1. **Явление электризации. Две стороны электризованного состояния – заряженность вещества и напряженность пространства. Электрический заряд – количественная характеристика состояния вещества, источник электрического поля. Закон сохранения заряда. Электрическое поле – носитель электрического взаимодействия.**

**Все тела в природе способные электризоваться, т.е приобретать электрический заряд.**

[Электризация](http://dic.academic.ru/dic.nsf/ruwiki/1209180) — статическое электричество явление, при котором на поверхности и в объёме диэлектриков, проводников и полупроводников возникает и накапливается свободный электрический заряд. Наличие электрического заряда проявляется в том, что заряженное тело взаимодействует с другими заряженными телами.

Существуют два различных типа электрических зарядов – + и -. Заряды одного знака отталкиваются, разных – притягиваются.

Электрический заряд – неотъемлемое свойство некоторых элементарных частиц. Заряд все элементарных частиц одинаков по абсолютной величине, его мы будем называть – элементарный заряд. Положительны элементарный заряд = е. Примеры: электрон (заряд = -е), протон (заряд = е) и нейтрон (заряд=0). Из этих частиц построены все вещества, поэтому электрические заряды входят в состав всех тел. Обычно алгебраическая сумма всех зарядов теле равно 0 и тело в целом - нейтральное. Но если каким-то образом создать в теле избыток заряда одного знака, то тело окажется заряженным. Можно также вызвать просто перераспределение заряда в теле.

Основным свойством заряда является его дискретность. Наименьший заряд, известный в настоящее время, равен 1,6·10 –19 Кулона. Предполагается, что возможны дробные части этого заряда – кварки, но они до настоящего времени экспериментально не обнаружены.

Закон сохранения заряда: суммарный заряд электрически изолированной системы не может изменяться.

Взаимодействие между покоящимися зарядами осуществляется через электрическое поле. Всякий заряд изменяет свойства окружающего его пространства – создает в нем электрическое поле. Это поле проявляет себя в том, что помещенный в какую-либо его точку электрический заряд оказывается под действием силы.

Для количественного определения электрического поля вводится силовая характеристика — напряжённость электрического поля. [Напряжённостью электрического поля](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%8F%D0%B6%D1%91%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8F) называют векторную физическую величину, равную отношению силы, с которой поле действует на положительный пробный заряд, помещённый в данную точку пространства, к величине этого заряда. Направление вектора совпадает в каждой точке пространства с направлением силы, действующей на положительный пробный заряд.

1. **Электростатическое взаимодействие. Принцип суперпозиции. Закон Кулона. Вектор напряженности – силовая характеристика электростатического поля. Картина силовых линий поля.**

Итак, электрические заряды взаимодействуют друг с другом. Закон Кулона – закон, которому подчиняется взаимодействие точечных зарядов (заряженные тела, размеров которых можно пренебречь по сравнению с расстояниями от этого тела до других тел).

Закон Кулона: *сила взаимодействия двух неподвижных точеных зарядов пропорциональна величине каждого из них и обратно пропорциональная квадрату расстояния между ними. Направление силы совпадает с соединяющей заряды прямой*.



где r /r – единичный вектор, направленный вдоль прямой, соединяющей оба заряда, расстояние между которыми равно r.

Коэффициент k вводится в связи с использованием определенной системы единиц. В принятой у нас системе СИ этот коэффициент выражается через так называемую *диэлектрическую постоянную вакуума* ε0 = 8,86 · 10 –12 Фарад/Метр ( k = 1/ 4π ε0).

**Замечание:** понятие точечного заряда является математической абстракцией, в действительности приходится иметь дело с зарядами, заполняющими либо некоторый объем, либо некоторую площадь, а иногда – в случае тонких длинных проводов – некоторую длину. Как правило, заряды распределяются неравномерно, поэтому можно рассматривать объемную, поверхностную или линейную плотности зарядов, определяемые как:

; ; 

где dV,dS и dl – бесконечно малые элементы объема, площади и длины соответственно. Напряженность электрического поля.

Для характеристики самого поля вводится величина силы, действующей на пробный заряд, отнесенная к величине этого пробного заряда. Эта величина называется напряженностью электрического поля. Другими словами можно сказать, что **напряженность электрического поля есть сила, действующая на единичный положительный заряд, помещенный в данную точку поля.**

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

Используя закон Кулона, получаем: E = \frac{q}{4 \pi  \varepsilon_0 r^2}

Модуль напряжённости электрического поля в СИ измеряется в В/м ([Вольт](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%BB%D1%8C%D1%82) на [метр](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D1%80))

Сила, с которой система зарядов действует на некоторый не входящий в систему заряд, равна векторной сумме сил, с которыми действует на данный заряд каждый из зарядов системы в отдельности. Отсюда вытекает: *напряженность поля системы зарядов системы зарядов равна векторной сумме напряженности полей, которые создавал бы каждый из зарядов системы в отдельности*.

E (Σ Qi) = Σ (Ei).

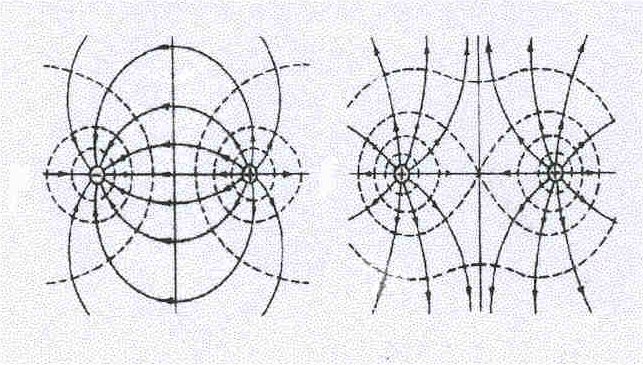
Это принцип суперпозиции (наложения) электрических полей.

Этот принцип позволяет находить напряженность поля от любых зарядов, распределенных в пространстве, причем, вместо суммы используются интегралы.

Электрическое поле можно описать, указав для каждой точки величину и направление вектора Е. Совокупность этих векторов образует поле вектора напряженности поля. Электрическое поле можно описать с помощью линий напряженности (=линии Е = силовые линии). Силовые линии проводят таким образом, чтобы касательная к ним в каждой точке совпадала с вектором направлением вектора Е. Густота линий выбирается так, чтобы количество линий, пронизывающих единицу поверхности, было равно числовому значений вектора Е.

Линии Е представляют собой совокупность радиальных прямых, направленных от положительного заряда или направленных к отрицательному заряду. Линии одним концом упираются в заряд, другими уходят в бесконечность.

Полное число линий, пересекающих сферическую пов-ть радиуса r, будет произведение густоты линий на поверхность сферы, а значит **(1/4πε )\* (q/ r2 )\* 4πr2 = q/ε.** Это значит, что число линий на любом расстоянии от заряда будет одним и тем же. Отсюда и вытекает, что линии нигде, кроме заряда, не начинаются и не заканчиваются, они начавшись на заряде уходят в бесконечность ( заряд +) или приходя из бесконечности, заканчиваются на заряде (заряд -).

****

1. **Поток вектора напряженности. Теорема Гаусса для напряженности электростатического поля.**

Для характеристики свойств векторных полей вводится скалярная величина – поток вектора через поверхность. В электростатике имеют дело с векторным полем напряженности, и вводят понятие поток напряженности.

В частном случае, когда поле однородно, а поверхность плоская:

**Ф = S\*Е\* cosα = En\*S**, где α – угол между Е и нормалью к площадке, Е\* cosα - проекция напряженности на нормаль.

В общем случае если поле неоднородно и поверхность не плоская, мысленно разбиваем поверхность на столь малые участки, чтобы их можно было приближенно считать плоскими, а поле – однородным.

Тогда для малого участка: **dФ = E\*dS\*cosα = En\*dS**

Тогда при S - ∞ имеем: **Ф = **

Знак потока зависит от выбора направления нормали к поверхности – при замене направления нормали на противоположное, Еn и поток вместе с ней меняют знак.

Теорема Гаусса: *поток напряженности через любую замкнутую поверхность пропорционален суммарному заряду, находящемуся внутри этой поверхности.*

Коэффициент пропорциональности в системе СИ равен 1/**ε0** , и теорема Гаусса имеет вид:

Ф0 =  или в развернутом виде .

Интеграл с кружком означает, что он берется по замкнутой поверхности S. Суммарный заряд можно выразить через плотность заряда, тогда: , где интеграл в правой части берется по объему V пространства, ограниченного поверхностью S.

1. **Свойства симметрии электростатического поля и применение теоремы Гаусса для расчета поля – равномерно заряженной плоскости, цилиндра, сферы, шара.**

**Симметрия - ???????????**

Теорема Гаусса: *поток напряженности через любую замкнутую поверхность пропорционален суммарному заряду, находящемуся внутри этой поверхности:*  .

Теорема Гаусса позволяет в ряде случаев найти напряженность поля гораздо более простым способом, чем с использованием формулы для Е поля точечного заряда и принципа суперпозиции.

Если заряд сосредоточен в тонком поверхностном слое несущего заряд тела, то распределение заряда в пространстве можно описать с помощью *поверхностной плотности заряда* , где dq – заряд, заключенный в слое площади dS.

Если заряд распределен по объему или поверхности цилиндрического тела тела (равномерно в каждом сечении), используется *линейная плотность заряда* .

**Поле бесконечно однородно заряженной плоскости**

Пусть поверхностная плотность заряда во всех точках плоскости одинакова и равна , заряд положительный. Из соображений симметрии вытекает, что напряженность поля в любой точке имеет направление, перпендикулярное к плоскости.

Представим себе цилиндрическую поверзость с образующими, перепендикулярными поверхности и основаниями величины S, расположенными относительно плоскости симметрично. Значит Е1=Е=Е2. Применим к поверхности теорему Гаусса. Суммарный поток через поверхность равен 2Е\*S. Внутри поверхности заключен заряд \*S. По теореме: , а значит .

Полученный результат не зависит от длинны цилиндра. Это означает, что на любых расстояниях от плоскости напряженность поля одинакова по величине. Если взять плоскость конечных размеров, то полученный результат будет справедливым только для точек, расстояние которых от края пластинки значительно превышает расстояние от самой пластинки. По мере удаления от плоскости или приближения к ее краям поле будет все больше отличаться от поля бесконечной заряженной плоскости.

**Поле заряженного цилиндра**

Пусть поле создается бесконечной цилиндрической поверхность радиуса R, заряженной с постоянной . Заряд – положительный. Из-за симметрии следует, что Е поля в каждой точке должна быть направлена вдоль радиальной прямой, перпендикулярной к оси цилиндра, а величина Е может зависеть только от расстоянии r от оси цилиндра. Представим себе замкнутую цилиндрическую пов-ть радиуса r и высоты h. Для оснований цилиндра Е=0, для боковой поверхности Е=Е(r) . Значит поток вектора напряженности через рассматриваемую поверхность равен: . **Если r > R**, внутрь поверхности попадает заряд q= (- линейная плотность). Тогда применив теорему Гаусса: 

Тогда: 

**Если r<R,** рассматриваемая замкнутая поверхность не содержит внутри зарядов, а значит Е=0.

Таким образом, внутри равномерно заряженной цилиндрической поверхности бесконечной длины поле отсутствует. Напряженность поля вне поверхности определяет линейной плотностью заряда и расстояние r от оси цилиндра.

Если цилиндр заряжен отрицательно: из полученной формулы следует, что уменьшая r, вблизи поверхности цилиндра можно получить поле с огромным Е. Подставим в формулу и r=R, получим Е поля в непосредственной близости к поверхности цилиндра: .

**Поле заряженной сферы**

Поле, создаваемое сферой радиуса R, заряженной с постоянной , будет очевидно центрально-симметричным. Значит, что направление вектора Е в любой точке проходит через центр сферы, а величина Е является функцией расстояния r от центра сферы.

Вообразим концентрическую с заряженной сферой поверхность радиуса r. **Если r>R**, то внутрь поверхности попадет весь заряд q, распределенный по сфере. Значит,

, откуда 

**Если r<R**, то такая поверхность не будет содержать зарядов, и значит Е=0.

Таким образом, поле во внутренних точках заряженного шара определяется зарядом, находящимся внутри сферы, проходящей через точку наблюдения, и не зависит от зарядов, расположенных вне ее.

**Поле заряженного шара**

Пусть шар радиуса R заряжен с постоянной объемной плотностью . Поле будет центрально-симметричным. Для поля вне шара формула будет та же, что и в предыдущем пункте, т.е. .

Однако сферическая поверхность радиуса r < R заключает в себе заряд  и поэтому теорема Гаусса для такой поверхности запишется так:  и заменив , получим  при условии r < R. Таким образом внутри шара напряженность поля растет линейно с расстоянием r от центра шара. Вне шара напряженность убывает по такому же закону, как и у поля точечного заряда.

1. **Работа сил электростатического поля над зарядом. Теорема о циркуляции напряженности электростатического поля.**

При перемещении пробного заряда в поле электростатические силы совершают работу. Напомним, что , где - угол между направлениями силы и перемещения, а  - проэкция силы на направление перемещения. Так как сила, действующая на пробный заряд , то для работы электростатических сил при бесконечно малом перемещении пробного заряда имеем: , а для работы на конечном участке пути от точки В до С имеем: .

Из курса механики: если силы взаимодействия между материальными точками мех. Системы удовлетворяют третьему закону Ньютона и не зависят от скорости, то эти силы потенциальны. Электростатические силы по закону Кулона потенциальны.

По определению потенциальных сил их работа в замкнутой системе зависит от начальной и конечной конфигурации системы и не зависит от того, по каким траекториям перемещались.

**Пример:** перемещение пробного заряда q0 из точки В в С. Выберем траекторию пробного заряда в виде радиального отрезка ВВ´ и дуги В´С окружности, в центре которой заряд q.

На участке ВВ´ , а dl=dr. Значит по формуле:

, где rВ и rС – расстояния от заряда до точек В и С.

На участке В´С El=0, а значит и АB´C=0.

Таким образом 

Теорема о циркуляции:

Из независимости работы от формы траектории вытекает равенство нулю работы по перенесению заряда по замкнутому контуру.

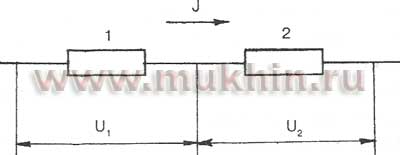
Из формулывытекает .

Для произвольного поля вектора А выражение называется циркуляцией вектора А по контуру. Следовательно – теорема о циркуляции напряженности электростатического поля: *циркуляция напряженности электростатического поля по любому контуру равна нулю.*

1. **Цепи постоянного тока. Правило Кирхгофа для разветвленной цепи. .**

Электрическая цепь - сов-ть устройств, в которых течет ток. Состоит из отдельных устройств или элементов, которые по их назначению можно разделить на 3 группы: источники питания (гальванические элементы, электрические аккумуляторы), электроприемники (нагревательные и осветительные приборы), элементы, предназначенные для передачи электроэнергии от источника питания к электроприемнику (провода, устройства, обеспечивающие уровень и качество напряжения, и др.).

Последовательное соединение элементов цепи:

  
1 — первый резистор; 2 — второй резистор

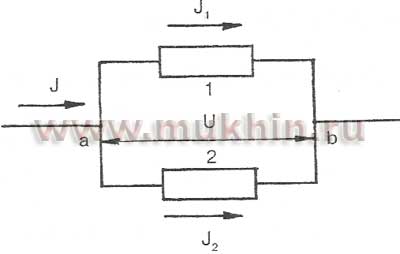
Резисторы 1 и 2 имеют сопротивления R1 и R2. Поскольку электрический заряд в этом случае не накапливается (постоянный ток), то при любом сечении проводника за определенный интервал времени проходит один и тот же заряд. Из этого вытекает, что сила тока в обоих резисторах равная: I = I1 = I2, U = U1 + U2.

Согласно закону Ома, для всего участка цепи и для каждого резистора в отдельности полное сопротивление цепи будет: R = R1 + R2

В случае последовательного соединения проводников напряжения и сопротивления можно выразить соотношением: U1/U2 = R1/R2

Параллельное соединение проводников: разветвленная, имеет точки разветвления проводников - узлами. В них электрический заряд не накапливается, т. е. электрический заряд, поступающий за определенный промежуток времени в узел, равен заряду, уходящему из узла за то же время. Из этого следует, что I = I1 + I2, где I — сила тока в неразветвленной цепи.

При параллельном соединении проводников напряжение на них будет одно и то же.



Обозначим сопротивления параллельно соединенных двух проводников R1 и R2. Используя закон Ома для участков электрической цепи с данными сопротивлениями, можно выявить, что величина, обратная полному сопротивлению участка ab, равна сумме величин, обратных сопротивлениям отдельных проводников, т. е.: 1/R = 1/R1 + 1/R2. Из этого вытекает: R = R1R2/(R1 + R2)

I1/I2 = R2/R1

Соединения конденсаторов.

**Последовательное соединение**. В этом случае обкладка одного конденсатора, заряженная отрицательно, соединена с обкладкой другого конденсатора, заряженного положительно. Тогда: 1/С = 1/С1 + 1/С2 + 1/С3 + ...

**Параллельное соединение**. При параллельном соединении конденсаторов положительно заряженные обкладки соединены с положительно заряженными, а отрицательно заряженные — с отрицательными: С = С1 + С2 + С3 + ...

Соединения источников тока

При параллельном способе соединения источников тока соединяют между собой все положительные и все отрицательные полюсы. Напряжение на разомкнутой батарее будет равно напряжению на каждом отдельном источнике, т. е. при параллельном способе соединения ЭДС батареи равна ЭДС одного источника. Сопротивление батареи при параллельном включении источников будет меньше сопротивления одного элемента, потому что в этом случае их проводимости суммируются.

При последовательном соединении источников тока (рис. 6) два соседних источника соединяются между собой противоположными полюсами.

Разность потенциалов между положительным полюсом последнего источника и отрицательным полюсом первого будет равна сумме разностей потенциалов между полюсами каждого источника. Из этого вытекает, что при последовательном соединении ЭДС батареи равна сумме ЭДС источников, включенных в батарею. Общее сопротивление батареи при последовательном включении источников равняется сумме внутренних сопротивлений отдельных элементов.

Правила Кирхгофа:

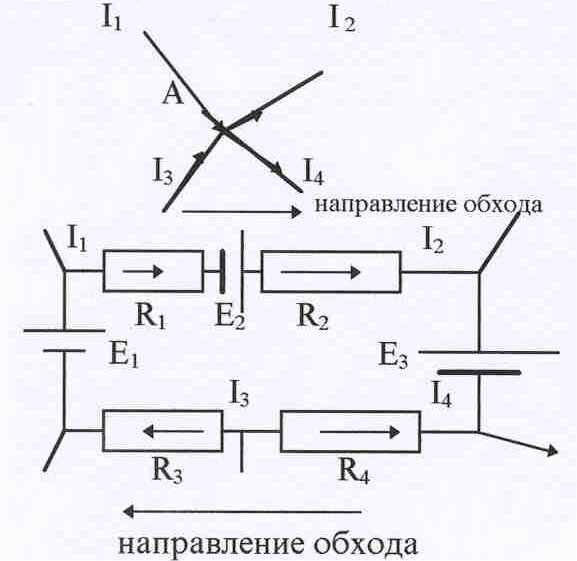
Для расчета сложных электрических цепей немецким ученым Кирхгофом были сформулированы эмпирические правила.

1. Для любого узла электрической цепи сумма токов, входящих и выходящих из него, равна нулю. При этом токам приписывается определенный знак: входящие и выходящие токи имеют различные знаки.
2. Касается замкнутого контура, выделенного в сложной цепи: сумма произведений токов на сопротивления, по которым они проходят, равняется сумме ЭДС, включенных в данный контур.

При этом токам и ЭДС приписывается определенный знак: при заданном направлении обхода контура положительными берутся только те токи (и ЭДС), которые совпадают с выбранным направлением обхода контура. Так из рис.16 следует:

I1 – I2 + I3 –I4 = 0,

I1 R1 + I2 R2 - I4 R4 + I3 R3 = E3 – E2 – E1 .



1. **Опыт Эрстеда. Вектор магнитной индукции. Силовые линии магнитной индукции и вихревое состояние пространства.**

Взаимодействие токов – через магнитное поле.

Опыт Эрстеда – он обнаружил, что поле, возбуждаемое током, оказывает ориентирующее действие на магнитную стрелку. В своем опыте проволока, по которой тек ток, была натянута на магнитной стрелкой, вращающейся на игле. При включении тока стрелка устанавливалась перпендикулярно проволоке.

Из опыта следует, что магнитное поле имеет направленный характер и должно характеризоваться векторной величиной.

Эта величина В – магнитная индукция.

Магнитная индукция (Тл) – тесла -индукция такого магнитного поля, в котором на каждый метр длины проводника при силе тока 1 А действует максимальная сила Ампера 1 Н.

|  |
| --- |
| http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/javagifs/63230164571861-9.gif |

Магнитное поле, в отличие от электрического, не оказывает действия на покоящийся заряд. Сила возникает лишь тогда, когда заряд движется.

Итак, движущиеся заряды, токи, создают в нем магнитное поле. Это поле проявляется в том, что на движущиеся в нем заряды (токи) действуют силы.

Для магнитного поля – принцип суперпозиции: поле В, порождаемое несколькими движущимися зарядами (токами), равно векторной сумме полей В, порождаемых каждым зарядом в отдельности.

,а в векторном виде  - закон ампера.

Вектор В, не зависит ни от модуля, ни от направления пробного элемента тока, и он – характеристика поля.

Линии магнитной индукции - линии, касательные к которым направлены также как и [вектор](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80) магнитной индукции в данной точке поля. Как всякое поле, магнитное поле можно изобразить, проводя линии магнитной индукции. Через каждую точку магнитного поля можно провести линию индукции. Линии магнитного поля, так же как и электрического поля, линии индукции магнитного поля прочерчивают с такой густотой, чтобы число линий, пересекающих единицу поверхности, перпендикулярной к ним, было равно (или пропорционально) индукции магнитного поля в данном месте.

Линии не имеют начали и конца, они замкнуты и охватывают электрические токи. Векторное поле, линии которого замкнуты, называется вихревым. Значит, постоянное магнитное поле, в отличие от электростатического, вихревое.

1. **Взаимодействие токов – опыты Ампера. Сила Ампера. Сила Лоренца. Движение заряженных частиц в магнитном поле.**

**Зако́н Ампе́ра** — закон взаимодействия постоянных [токов](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D1%82%D0%BE%D0%BA). Установлен [Андре Мари Ампером](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BC%D0%BF%D0%B5%D1%80,_%D0%90%D0%BD%D0%B4%D1%80%D0%B5_%D0%9C%D0%B0%D1%80%D0%B8) в [1820](http://ru.wikipedia.org/wiki/1820). Из закона Ампера следует, что параллельные [проводники](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%BA) с постоянными токами, текущими в одном направлении, притягиваются, а в противоположных — отталкиваются. Законом Ампера называется также закон, определяющий силу, с которой [магнитное поле](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5) действует на малый отрезок проводника с током.

Сила d\vec F, с которой магнитное поле действует на элемент объёма *dV* проводника с током плотности \vec j, находящегося в магнитном поле с индукцией \vec B:

d\vec F = \vec j \times \vec B dV.

Если ток течёт по тонкому проводнику, то \vec j dV = I d\vec l, где d\vec l — «элемент длины» проводника — вектор, по модулю равный *dl* и совпадающий по направлению с током. Тогда предыдущее равенство можно переписать следующим образом: Сила d\vec F, с которой магнитное поле действует на элемент d\vec lпроводника с током, находящегося в магнитном поле, прямо пропорциональна силе тока *I* в проводнике и [векторному произведению](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) элемента длины d\vec lпроводника на магнитную индукцию \vec B:

d\vec F = I d\vec l \times  \vec B.  
 Направление силы d\vec Fопределяется по правилу вычисления [векторного произведения](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D0%BA%D1%82%D0%BE%D1%80%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D1%80%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%B2%D0%B5%D0%B4%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5), которое удобно запомнить при помощи [правила левой руки](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%B8%D0%BB%D0%BE_%D0%BB%D0%B5%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%80%D1%83%D0%BA%D0%B8) (Если движется заряд, а магнит покоится, то для определения силы действует правило левой руки: «Если левую руку расположить так, чтобы линии индукции магнитного поля входили в ладонь перпендикулярно ей, а четыре пальца были направлены по току (по движению положительно заряженной частицы или против движения отрицательно заряженной), то отставленный на 90° большой палец покажет направление действующей силы Лоренца или Ампера) .

Модуль силы Ампера можно найти по формуле:

dF = I B dl \sin\alpha\,,

где α — угол между векторами магнитной индукции и тока.

Сила *dF* максимальна когда элемент проводника с током расположен перпендикулярно линиям магнитной индукции (\alpha = 90^\circ, \sin\alpha = 1):

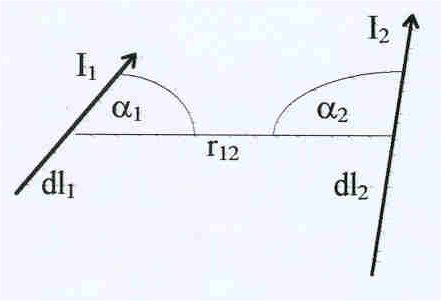
dF_{max} = IBdl\,.

Из лекций:

Бесконечно малый отрезок проводника, по которому проходит ток, принято называть элементом тока.

Опыты показывают, что два элемента тока взаимодействуют друг с другом. Принятые представления заставляют нас предположить, что это взаимодействие осуществляется посредством магнитного поля.

Ампер: величина сил взаимодействия двух элементов определяется выражением:

,

,

Величина k как и прежде введена из соображений размерности. В системе СИ она равна μ0 /4π; значение постоянной μ0 , которую принято называть магнитной постоянной вакуума, записывается так:

μ0 = 4π × 10 –7 .

Для определения силы как вектора закон Ампера должен быть изменен так, чтобы справа стояло векторное произведение:

, .

**Сила Лоренца** — [сила](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B8%D0%BB%D0%B0), с которой [электромагнитное поле](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5) действует на [точечную](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D1%82%D0%B5%D1%80%D0%B8%D0%B0%D0%BB%D1%8C%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D1%82%D0%BE%D1%87%D0%BA%D0%B0) [заряженную](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B7%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4) частицу. Силой Лоренца называют иногда силу, действующую на движущийся со скоростью \mathbf{v}заряд q\ лишь со стороны [магнитного поля](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5), нередко же полную силу — со стороны электромагнитного поля вообщеиначе говоря, со стороны [электрического](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5) \mathbf{E}и [магнитного](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5) \mathbf{B}полей в системе [СИ](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%98):

\mathbf{F}=q\left(\mathbf{E}+[\mathbf{v}\times\mathbf{B}]\right)

|  |  |
| --- | --- |
| \*со стороны магнитного поля \mathbf{F}_m=q\,[\mathbf{v}\times\mathbf{B}] |  |

где: q\ — [заряд](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B9_%D0%B7%D0%B0%D1%80%D1%8F%D0%B4) частицы;

\mathbf{v}— [скорость](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C) частицы;

\mathbf{B}— [магнитная индукция](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%B0%D1%8F_%D0%B8%D0%BD%D0%B4%D1%83%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F) поля.

Тогда, полная сила: при движении заряженной частицы в [электромагнитном поле](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5) на неё будут действовать и [электрическое](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5), и [магнитное поле](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D0%B5), а полная сила есть сумма сил со стороны первого и второго:

\mathbf{F} = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m \,

|  |
| --- |
|  |
| \mathbf{F}=q\left(\mathbf{E}+[\mathbf{v}\times\mathbf{B}]\right), |
|  |

где: \mathbf{E}— [напряжённость электрического поля](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D0%BF%D1%80%D1%8F%D0%B6%D1%91%D0%BD%D0%BD%D0%BE%D1%81%D1%82%D1%8C_%D1%8D%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B3%D0%BE_%D0%BF%D0%BE%D0%BB%D1%8F);

\mathbf{F}_e— сила, действующая со стороны электрического поля;

Из учебника:

На всякий заряд, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца.



Из этой формулы следует что сила Лоренца перпендикулярна как В, так и скорости v движущегося заряда и имеет модуль , где α – угол между векторами скорости и магнитной индукции.

Из этого следует, что ускорение заряда, движущегося в магнитном поле, нормально траектории, т.е. сила Лоренца не изменяет величины скорости, а изменяет только ее направление. Поэтому при движении зпаряда в магнитном поле его кинетическая энергия постоянна.

Движение заряда в магнитном поле

Пусть материальная точка с массой m и зарядом q в однородном магнитном поле, начальная скорость v образует с В угол α. Движение можно разложить на движение вдоль оси В, и движение по перпендикулярной к ней плоскости. Пеперь сила Лоренца имеет модуль  и лежит в плоскости, перпендикулярной В, а модуль составляющей скорости в этой плоскости . Траектория заряда в перпендикулярной вектору В плоскости- окружность, радиус которой определяется из условия: . Значит 

Движение вдоль вектора В равномерно со скоростью , т.к.проекция силы Лоренца на это направление равна нулю. Таким образом траектория результирующего движения – винтовая линия, т.е. частица как бы навивается на линии магнитной индукции.

**26. Самоиндукция. Индуктивность. Магнитная энергия контура.**

Важным частным случаем электромагнитной индукции является самоиндукция, т.е. возникновение ЭДС индукции в самом проводнике, порождающим изменяющееся магнитное поле. В строгой теории электромагнетизма показано, что величина магнитного потока, окружающего проводник с током, пропорциональна силе этого тока Ф = L I, где коэффициент пропорциональности L носит название **коэффициента самоиндукции** или **индуктивности**.

Качественные соображения о пропорциональности между Ф и I вытекают из закона Био-Савара-Лапласа, где установлено, что В~ I. Значения L определяются геометрическими свойствами проводника. Единицей измерения L в системе СИ служит Генри.

1Генри =1Вебер/Ампер.

Учитывая взаимосвязь Ф и L, можно записать

Eсам = - .

Если проводник не изменяет своей формы с течением времени, то dL/dt = 0, и

Eсам = -.

Для одного витка длинного соленоида Ф =ВS= μ0 nIS, и, если полное число витков соленоида равно N= nlc, , то общий поток через весь соленоид Ф0 = Ф N = μ0 n2lc IS, откуда

L = μ0 n2lcS.

Магнитная энергия контура

Пусть имеется электрическая цепь, состоящая из источника постоянного тока, сопротивления и катушки индуктивности L. Предположим, что в некоторый момент времени источник мгновенно удаляется из цепи, которая остается замкнутой. Как следствие явления самоиндукции ток в цепи не исчезнет мгновенно, т.к. его будет поддерживать возникшая ЭДС самоиндукции. В процессе убывания тока сторонние силы, ответственные за явление самоиндукции, совершат некоторую работу. За малый промежуток времени dt, когда ток и ЭДС остаются практически неизменными, сторонние силы совершат работу dA = Eсамdq, где dq =Idt, или, используя выражение для ЭДС самоиндукции, dA= -Idt×L dI/dt, т.е.

dA=-LidI.

Полную работу сил можно найти, суммируя малые работы dA за весь период исчезновения тока:

.

По закону сохранения энергии эта работа может быть совершена лишь за счет энергии W, которой обладает катушка с током, поэтому

.

Эту энергию можно приписать магнитному полю катушки (соленоида). Считая соленоид достаточно длинным, можно использовать формулу, связывающую индукцию поля в соленоиде с током: B =μ0 nI, откуда I = B/μ0 n. Подставляя это соотношение, а также значение L для соленоида в выражение для энергии катушки, получаем:

.

Тогда плотность магнитной энергии, т.е. энергии, приходящейся на единицу объема V=lcS,

равна

w =.

**33.Оптический диапазон шкалы ЭМ волн. Свет. Приближение геометрической оптики. Прямолинейное распространение света. Законы отражения и преломления. Принцип Гюйгенса.**

**Свет** — [электромагнитное излучение](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5), испускаемое нагретым или находящимся в возбуждённом состоянии [веществом](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B5%D1%89%D0%B5%D1%81%D1%82%D0%B2%D0%BE), воспринимаемое человеческим [глазом](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%BB%D0%B0%D0%B7). Нередко, под светом понимают не только [видимый свет](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D1%8B%D0%B9_%D1%81%D0%B2%D0%B5%D1%82), но и примыкающие к нему широкие области [спектра](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%BF%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80).

[*Видимый свет*](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) — [электромагнитное излучение](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%BC%D0%B0%D0%B3%D0%BD%D0%B8%D1%82%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) с [длинами волн](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%B0_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B) ≈ 380—760 [нм](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9D%D0%B0%D0%BD%D0%BE%D0%BC%D0%B5%D1%82%D1%80) (от [фиолетового](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A4%D0%B8%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B2%D1%8B%D0%B9) до [красного](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BD%D1%8B%D0%B9_%D1%86%D0%B2%D0%B5%D1%82)).

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Название диапазона | | Длины волн, *λ* |
| [Радиоволны](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B0%D0%B4%D0%B8%D0%BE%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) | [Сверхдлинные](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B5%D1%80%D1%85%D0%B4%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B) | более 10 [км](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BC) |
| [Длинные](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%BB%D0%B8%D0%BD%D0%BD%D1%8B%D0%B5_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B) | 10 км — 1 км |
| [Средние](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%BD%D0%B8%D0%B5_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B) | 1 км — 100 [м](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D1%80) |
| [Короткие](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9A%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B) | 100 м — 10 м |
| [Ультракороткие](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D0%BA%D0%BE%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%BA%D0%B8%D0%B5_%D0%B2%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D1%8B) | 10 м — 1 мм |
| [Инфракрасное излучение](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%84%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%80%D0%B0%D1%81%D0%BD%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) | | 1 мм — 780 [нм](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9C%D0%B5%D1%82%D1%80#.D0.9A.D1.80.D0.B0.D1.82.D0.BD.D1.8B.D0.B5_.D0.B8_.D0.B4.D0.BE.D0.BB.D1.8C.D0.BD.D1.8B.D0.B5_.D0.B5.D0.B4.D0.B8.D0.BD.D0.B8.D1.86.D1.8B) |
| [Видимое (оптическое) излучение](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%B8%D0%B4%D0%B8%D0%BC%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) | | 780—380 нм |
| [Ультрафиолетовое](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A3%D0%BB%D1%8C%D1%82%D1%80%D0%B0%D1%84%D0%B8%D0%BE%D0%BB%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) | | 380 — 10 нм |
| [Рентгеновские](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A0%D0%B5%D0%BD%D1%82%D0%B3%D0%B5%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%B5_%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) | | 10 нм — 5 пм |
| [Гамма](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%93%D0%B0%D0%BC%D0%BC%D0%B0-%D0%B8%D0%B7%D0%BB%D1%83%D1%87%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) | | менее 5 пм |

**Геометри́ческая о́птика** — раздел [оптики](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9E%D0%BF%D1%82%D0%B8%D0%BA%D0%B0), изучающий законы распространения [света](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B5%D1%82) в прозрачных [средах](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D1%80%D0%B5%D0%B4%D0%B0) и принципы построения изображений при прохождении света в оптических системах без учёта его волновых свойств.

Краеугольным приближением геометрической оптики является понятие [светового луча](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D0%BB%D1%83%D1%87). В этом определении подразумевается, что направление потока лучистой энергии (ход светового луча) не зависит от поперечных размеров пучка света.

В силу того, что свет представляет собой волновое явление, имеет место [интерференция](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%98%D0%BD%D1%82%D0%B5%D1%80%D1%84%D0%B5%D1%80%D0%B5%D0%BD%D1%86%D0%B8%D1%8F), в результате которой *ограниченный* пучок света распространяется не в каком-то одном направлении, а имеет конечное угловое распределение т.е имеет место [дифракция](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B8%D1%84%D1%80%D0%B0%D0%BA%D1%86%D0%B8%D1%8F). Однако в тех случаях, когда характерные поперечные размеры пучков света достаточно велики по сравнению с длиной волны, можно пренебречь расходимостью пучка света и считать, что он распространяется в одном единственном направлении: вдоль светового луча.

**Закон прямолинейного распространения света :** в прозрачной однородной среде свет распространяется по прямым линиям. В связи с законом прямолинейного распространения света появилось понятие *световой луч*, которое имеет геометрический смысл как линия, вдоль которой распространяется свет. *Реальный физический смысл имеют световые пучки конечной ширины. Световой луч можно рассматривать как ось светового пучка.* Поскольку свет, как и всякое излучение, переносит энергию, то можно говорить, что *световой луч указывает направление переноса энергии световым пучком.* Также закон прямолинейного распространения света позволяет объяснить, как возникают солнечные и лунные затмения.

**Закон отражения света** — устанавливает изменение направления хода [светового луча](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%A1%D0%B2%D0%B5%D1%82%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D0%BB%D1%83%D1%87) в результате встречи с отражающей (зеркальной) поверхностью: падающий и отражённый лучи лежат в одной плоскости с нормалью к отражающей поверхности в точке падения, и эта нормаль делит угол между лучами на две равные части. Широко распространённая, но менее точная формулировка «угол падения равен углу отражения» не указывает точное направление отражения луча.

**Закон Снелла преломления света** описывает [преломление](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D0%B5) света на границе двух сред. Также применим и для описания преломления волн другой природы, например звуковых.

Угол падения света на поверхность связан с углом преломления соотношением

n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2\, 

Здесь:

*n*1 — [показатель преломления](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C_%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F) среды, из которой свет падает на границу раздела;

α1 — угол падения света — угол между падающим на поверхность лучом и нормалью к поверхности;

*n*2 — [показатель преломления](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%9F%D0%BE%D0%BA%D0%B0%D0%B7%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BB%D1%8C_%D0%BF%D1%80%D0%B5%D0%BB%D0%BE%D0%BC%D0%BB%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F) среды, в которую свет попадает, пройдя границу раздела;

α2 — угол преломления света — угол между прошедшим через поверхность лучом и нормалью к поверхности.

**Принцип Гюйгенса — Френеля** — основной постулат волновой теории, описывающий и объясняющий механизм распространения волн, в частности, световых.

Каждый элемент [волнового фронта](http://ru.wikipedia.org/wiki/%D0%92%D0%BE%D0%BB%D0%BD%D0%BE%D0%B2%D0%BE%D0%B9_%D1%84%D1%80%D0%BE%D0%BD%D1%82) можно рассматривать как центр вторичного возмущения, порождающего вторичные сферические волны, а результирующее световое поле в каждой точке пространства будет определяться интерференцией этих волн.

**34. Интерференция. Оптическая длина пути. Когерентность. Интерференционная картина от двух монохроматических источников.**

Интерференция – одно из ярких проявлений волновой природы света. Это интересное и красивое явление наблюдается при наложении двух или нескольких световых пучков. Интенсивность света в области перекрывания пучков имеет характер чередующихся светлых и темных полос, причем в максимумах интенсивность больше, а в минимумах меньше суммы интенсивностей пучков. При использовании белого света интерференционные полосы оказываются окрашенными в различные цвета спектра. С интерференционными явлениями мы сталкиваемся довольно часто: цвета масляных пятен на асфальте, окраска замерзающих оконных стекол, причудливые цветные рисунки на крыльях некоторых бабочек и жуков – все это проявление интерференции света.

Первый эксперимент по наблюдению интерференции света в лабораторных условиях принадлежит [И. Ньютону](http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/scientist/newton.html). Он наблюдал интерференционную картину, возникающую при отражении света в тонкой воздушной прослойке между плоской стеклянной пластиной и плосковыпуклой линзой большого радиуса кривизны (рис. 3.7.1). Интерференционная картина имела вид концентрических колец, получивших название колец Ньютона (рис. 3.7.2).

Ньютон не смог с точки зрения корпускулярной теории объяснить, почему возникают кольца, однако он понимал, что это связано с какой-то периодичностью световых процессов ([см. § 3.6](http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/chapter3/section/paragraph6/theory.html)).

Первым интерференционным опытом, получившим объяснение на основе волновой теории света, явился опыт Юнга (1802 г.). В опыте [Юнга](http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/scientist/young.html) свет от источника, в качестве которого служила узкая щель S, падал на экран с двумя близко расположенными щелями S1 и S2 (рис. 3.7.3). Проходя через каждую из щелей, световой пучок уширялся вследствие [дифракции](http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/chapter3/section/paragraph8/theory.html#1), поэтому на белом экране Э световые пучки, прошедшие через щели S1 и S2, перекрывались. В области перекрытия световых пучков наблюдалась интерференционная картина в виде чередующихся светлых и темных полос.

Юнг был первым, кто понял, что нельзя наблюдать интерференцию при сложении волн от двух независимых источников. Поэтому в его опыте щели S1 и S2, которые в соответствии с принципом Гюйгенса можно рассматривать как источники вторичных волн, освещались светом одного источника S. При симметричном расположении щелей вторичные волны, испускаемые источниками S1 и S2, находятся в фазе, но эти волны проходят до точки наблюдения P разные расстояния r1 и r2. Следовательно, фазы колебаний, создаваемых волнами от источников S1 и S2 в точке P, вообще говоря, различны. Таким образом, задача об интерференции волн сводится к задаче о сложении колебаний одной и той же частоты, но с разными фазами. Утверждение о том, что волны от источников S1 и S2 распространяются независимо друг от друга, а в точке наблюдения они просто складываются, является опытным фактом и носит название принципа суперпозиции.

Монохроматическая (или синусоидальная) волна, распространяющаяся в направлении радиус-вектора http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/javagifs/63230164598509-1.gif, записывается в виде

|  |
| --- |
| E = a cos (ωt – kr), |

где a – амплитуда волны, k = 2π / λ – волновое число, λ – длина волны, ω = 2πν – круговая частота. В оптических задачах под E следует понимать модуль вектора напряженности электрического поля волны. При сложении двух волн в точке P результирующее колебание также происходит на частоте ω и имеет некоторую амплитуду A и фазу φ:

|  |
| --- |
| E = a1 · cos (ωt – kr1) + a2 · cos (ωt – kr2) = A · cos (ωt – φ). |

Приборов, которые способны были бы следить за быстрыми изменениями поля световой волны в оптическом диапазоне, не существует; наблюдаемой величиной является поток энергии, который прямо пропорционален [квадрату амплитуды электрического поля волны](http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/chapter2/section/paragraph6/theory.html). Физическую величину, равную квадрату амплитуды электрического поля волны, принято называть интенсивностью: I = A2.

Несложные тригонометрические преобразования приводят к следующему выражению для интенсивности результирующего колебания в точке P:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | | --- | | http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/javagifs/63230164598589-2.gif | | (\*) |

где Δ = r2 – r1 – так называемая разность хода.

Из этого выражения следует, что интерференционный максимум (светлая полоса) достигается в тех точках пространства, в которых Δ = mλ (m = 0, ±1, ±2, ...). При этом Imax = (a1 + a2)2 > I1 + I2. Интерференционный минимум (темная полоса) достигается при Δ = mλ + λ / 2. Минимальное значение интенсивности Imin = (a1 – a2)2 < I1 + I2. На рис. 3.7.4 показано распределение интенсивности света в интерференционной картине в зависимости от разности хода Δ.

В частности, если I1 = I2 = I0, т. е. интенсивности обеих интерферирующих волн одинаковы, выражение (\*) приобретает вид:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
|  | |  | | --- | | I = 2I0(1 + cos kΔ). | | (\*\*) |

В этом случае Imax = 4I0, Imin = 0.

Формулы (\*) и (\*\*) являются универсальными. Они применимы к любой интерференционной схеме, в которой происходит сложение двух монохроматических волн одной и той же частоты.

Если в схеме Юнга через y обозначить смещение точки наблюдения от плоскости симметрии, то для случая, когда d << L и y << L (в оптических экспериментах эти условия обычно выполняются), можно приближенно получить:

|  |
| --- |
| http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/javagifs/63230164598649-3.gif |

При смещении вдоль координатной оси y на расстояние, равное ширине интерференционной полосы Δl, т. е. при смещении из одного интерференционного максимума в соседний, разность хода Δ изменяется на одну длину волны λ. Следовательно,

|  |
| --- |
| http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/javagifs/63230164598699-4.gif |

где ψ – угол схождения «лучей» в точке наблюдения P. Выполним количественную оценку. Допустим, что расстояние d между щелями S1 и S2 равно 1 мм, а расстояние от щелей до экрана Э составляет L = 1 м, тогда ψ = d / L = 0,001 рад. Для зеленого света (λ = 500 нм) получим Δl = λ / ψ = 5 · 105 нм = 0,5 мм. Для красного света (λ = 600 нм) Δl = 0,6 мм. Таким путем Юнг впервые измерил длины световых волн, хотя точность этих измерений была невелика.

Следует подчеркнуть, что в волновой оптике, в отличие от геометрической оптики, понятие луча света утрачивает физический смысл. Термин «луч» употребляется здесь для краткости для обозначения направления распространения волны. В дальнейшем этот термин будет употребляться без кавычек.

В эксперименте Ньютона (рис. 3.7.1) при нормальном падении волны на плоскую поверхность линзы разность хода приблизительно равна удвоенной толщине 2h воздушного промежутка между линзой и плоскостью. Для случая, когда радиус кривизны R линзы велик по сравнению с h, можно приближенно получить:

|  |
| --- |
| http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/javagifs/63230164598779-5.gif |

где r – смещение от оси симметрии. При написании выражения для разности хода следует также учесть, что волны 1 и 2 отражаются при разных условиях. Первая волна отражается от границы стекло–воздух, а вторая – от границы воздух–стекло. Во втором случае происходит изменение фазы колебаний отраженной волны на π, что эквивалентно увеличению разности хода на λ / 2. Поэтому

|  |
| --- |
| http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/javagifs/63230164598799-6.gif |

При r = 0, то есть в центре (точка соприкосновения) Δ = λ / 2; поэтому в центре колец Ньютона всегда наблюдается интерференционный минимум – темное пятно. Радиусы rm последующих темных колец определяются выражением

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | http://old.college.ru/physics/courses/op25part2/content/javagifs/63230164598829-7.gif | |

Эта формула позволяет экспериментально определить длину волны света λ, если известен радиус кривизны R линзы.

Проблема когерентности волн. Теория Юнга позволила объяснить интерференционные явления, возникающие при сложении двух монохроматических волн одной и той же частоты. Однако повседневный опыт учит, что интерференцию света в действительности наблюдать не просто. Если в комнате горят две одинаковые лампочки, то в любой точке складываются интенсивности света и никакой интерференции не наблюдается. Возникает вопрос, в каких случаях нужно складывать напряженности (с учетом фазовых соотношений), в каких – интенсивности волн, т. е. квадраты напряженностей полей? Теория интерференции монохроматических волн не может дать ответа на этот вопрос.

Реальные световые волны не являются строго монохроматическими. В силу фундаментальных физических причин излучение всегда имеет статистический (или случайный) характер. Атомы светового источника излучают независимо друг от друга в случайные моменты времени, и излучение каждого атома длится очень короткое время (τ ≤ 10–8 с). Результирующее излучение источника в каждый момент времени состоит из вкладов огромного числа атомов. Через время порядка τ вся совокупность излучающих атомов обновляется. Поэтому суммарное излучение будет иметь другую амплитуду и, что особенно важно, другую фазу. Фаза волны, излучаемой реальным источником света, остается приблизительно постоянной только на интервалах времени порядка τ. Отдельные «обрывки» излучения длительности τ называются цугами. Цуги имеют пространственную длину, равную cτ, где c – скорость света. Колебания в разных цугах не согласованы между собой. Таким образом, реальная световая волна представляет собой последовательность волновых цугов с беспорядочно меняющейся фазой. Принято говорить, что колебания в разных цугах некогерентны. Интервал времени τ, в течение которого фаза колебаний остается приблизительно постоянной, называют временем когерентности.

Интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний, т. е. колебаний, относящихся к одному и тому же цугу. Хотя фазы каждого из этих колебаний также подвержены случайным изменениям во времени, но эти изменения одинаковы, поэтому разность фаз когерентных колебаний остается постоянной. В этом случае наблюдается устойчивая интерференционная картина и, следовательно, выполняется принцип суперпозиции полей. При сложении некогерентных колебаний разность фаз оказывается случайной функцией времени. Интерференционные полосы испытывают беспорядочные перемещения из стороны в сторону, и за время Δt их регистрации, которая в оптических экспериментах значительно больше времени когерентности (Δt >> τ), происходит полное усреднение. Регистрирующее устройство (глаз, фотопластинка, фотоэлемент) зафиксирует в точке наблюдения усредненное значение интенсивности, равное сумме интенсивностей I1 + I2 обоих колебаний. В этом случае выполняется закон сложения интенсивностей.

Таким образом, интерференция может возникнуть только при сложении когерентных колебаний. Волны, создающие в точке наблюдения когерентные колебания, также называются когерентными. Волны от двух независимых источников некогерентны и не могут дать интерференции. Т. Юнг интуитивно угадал, что для получения интерференции света нужно волну от источника разделить на две когерентные волны и затем наблюдать на экране результат их сложения. Так делается во всех интерференционных схемах. Однако, даже в этом случае интерференционная картина исчезает, если разность хода Δ превысит длину когерентности cτ.