

ЛЕКЦИЯ 5

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ
ПОЛЕ

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ–

физическое поле посредством которого осуществляется взаимодействие электрически заряженных частиц и частиц обладающих магнитным моментом.

Условно делится на **ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ** и **МАГНИТНОЕ ПОЛЕ**

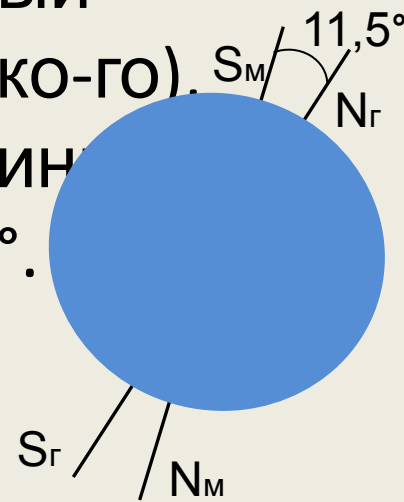
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ЕГО ХАРАКТЕРИСТИКИ

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ

- **МАГНИТНОЕ ПОЛЕ** – одна из форм проявления элек-тромагнитного поля, отличающаяся только тем, что действует только на движущиеся электрически заря-женные частицы и тела, на проводники с током и тела обладающие магнитным моментом.
- **МАГНИТНОЕ ПОЛЕ** создается проводниками с током, движущимися электрически заряженными частицами и телами с магнитным моментом отличным от нуля.
- **МАГНИТНОЕ ПОЛЕ** имеет количественные харак-терис-тики : **МАГНИТНУЮ ИНДУКЦИЮ** и **НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

- Все постоянные магниты имеют два разноименных полюса: северный и южный.
- Одноименные полюса взаимно **отталкиваются**, а разноименные взаимно **притягиваются**.
- Существует магнитное поле Земли, обусловленное, в основном, процессами происходящими в жидком ядре Земли. Магнитные полюса Земли не совпадают с географическими (северный магнитный находится около южного географического). угол между осью вращения Земли и линией соединяющей магнитные полюса $11,5^\circ$.



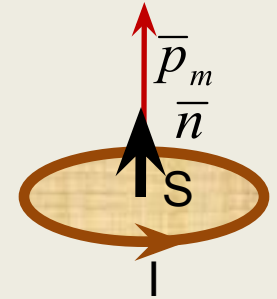
Магнитное поле не действует на неподвижные электрические заряженные тела, но и эти частицы (тела) не действуют на помещенную около них магнитную стрелку, то есть не создают магнитного поля.

При пропускании по проводнику постоянного тока, находящаяся под ним магнитная стрелка вращалась вокруг своей оси, стараясь расположиться перпендикулярно проводнику. Ось стрелки тем точнее перпендикулярна, чем больше сила тока и слабее влияние Земли. Было обнаружено, что направление поворота северного полюса стрелки под действием электрического тока изменяется на противоположное, при изменении тока в проводнике (опыт Эрстеда).

Вывод: при прохождении по проводнику

МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ

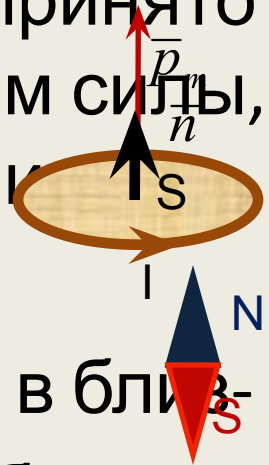
МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ – векторная величина, характеризующая магнитные свойства тел и частиц тела, для плоского замкнутого элект-рического контура численно равен произведению силы тока I на площадь S ограниченную кон-туром и направленную перпендикулярно к плоскости, в соответствии с правилом правого винта. – единичный вектор нормали к площади контура.



$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$

Магнитное поле оказывает на рамку с током ориентирующее воздействие, поворачивая её. Это связано с направлением магнитного поля, за которое берётся (в данной точке) направление

За положительное направление может быть принято направление, совпадающее с направлением силы, которая действует на северный полюс магнитной стрелки, помещенной в данную точку.



Так как, оба полюса магнитной стрелки лежат в близких точках поля, то силы действующие на оба полюса примерно равны друг другу. Значит, на магнитную стрелку действует пара сил, поворачивающих её так, что бы ось стрелки совпадала с направлением поля.

Рамка с током испытывает ориентирующее действие поля, и на неё в магнитном поле действует пара сил. Вращающий момент этих сил зависит как от свойств поля в данной точке, так и от свойств контура.

$$M = [p_m B]$$

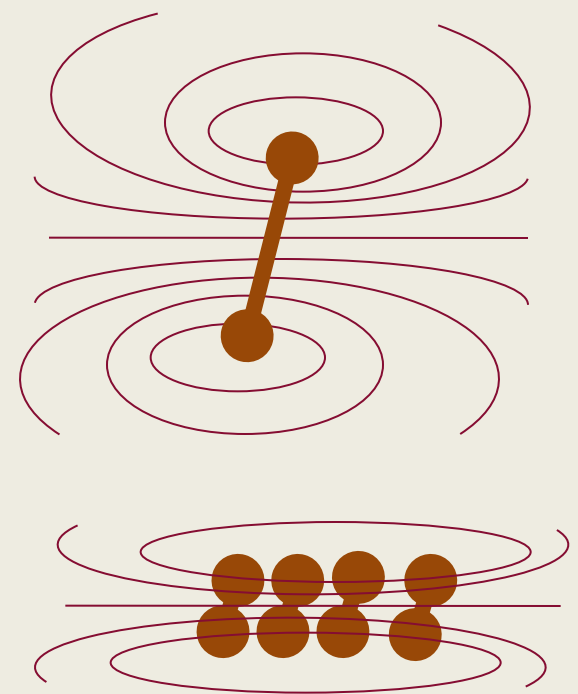
МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

\vec{B} – **ВЕКТОР МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ** – силовая характеристика магнитного поля равная отношению силы, действующей со стороны магнитного поля на малый элемент проводника с электрическим током, и произведения силы тока на длину элемента .

$$B = \frac{1}{I} \left(\frac{dM}{dl} \right)_{\max}$$

Если в данную точку поля помещать контуры с разными магнитными моментами, то на них действуют различные вращающие моменты, однако, отношение максимальных вращающих моментов к магнитным моментам будет для всех контуров одинаковым

МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ – в точке однородного магнитного поля определяется максимальным вращающим моментом, равным единице, когда нормаль к контуру перпендикулярна направлению поля.

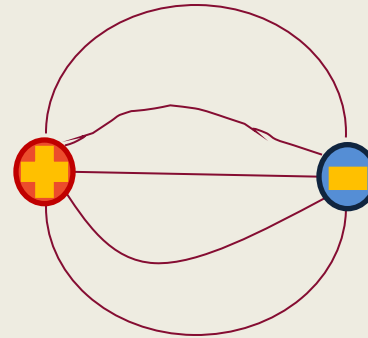
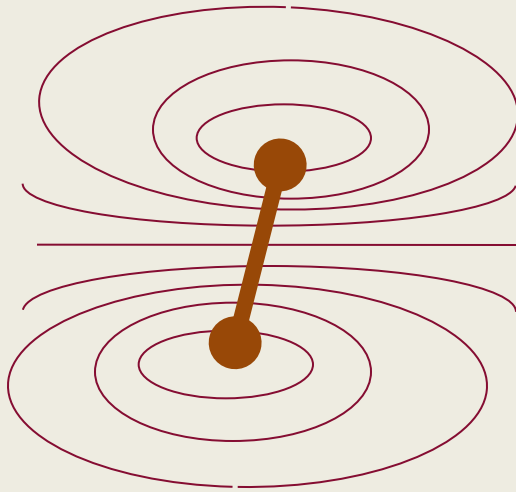


Так как магнитное поле является вихревым, то его, как и электрическое поле, можно описать с помощью **линий магнитной индукции** – линий касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора \vec{B} . Их направление задается с помощью правила правого винта.

На рисунке показаны линии магнитной индукции полей кругового тока и соленоида (равномерно намотанной на цилиндр спирали по которой течет

Линии магнитной индукции всегда замкнуты !!!

Этим они отличаются от линий напряженности электрического поля, которые разомкнуты (начинаются на положительных зарядах, заканчиваются на отрицательных).



НАПРЯЖЕННОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Ампер (1775-1836) предположил что в любом теле суще-ствуют микроскопические токи обусловленные движе-нием электронов в атомах и молекулах. Эти **микротоки** создают своё магнитное поле, и могут поворачиваться в магнитном поле макротоков.

Если вблизи тела поместить проводник с током (**макро-ток**), то под действием его магнитного поля, микротоки во всех атомах определенным образом ориентируются, Воздавая в теле дополнительное магнитное поле. Маг-нитная индукция характеризует результирующее маг-нитное поле, создаваемое всеми макро и микротоками. То есть: при \vec{J} одном и том же токе и равных условиях, в

Магнитное поле макротоков описывается **ВЕКТОРОМ НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ** \vec{H} . Для

одно-родной изотропной среды вектор магнитной индукции связан с вектором напряженности

соотношением: $\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$$

μ – магнитная постоянная.

– магнитная проницаемость среды, \vec{H}

показывающая во сколько раз магнитное поле

макротоков усиливается за счет магнитного поля

микротоков среды.

(\vec{H}, \vec{B})

Сравнивая векторные характеристики \vec{D}

электростатическо-кого и магнитного \vec{H}

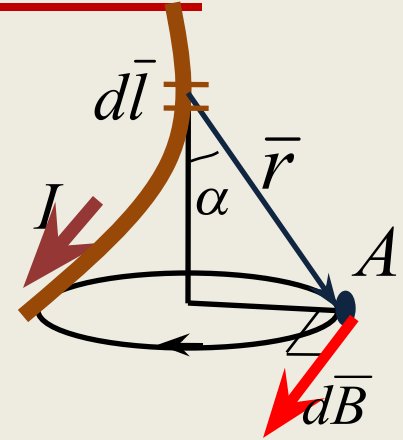
полей, можно заметить что аналогом вектора \vec{E}

электрического смещения явля-е~~т~~ся вектор

ЗАКОН БИО-САВАРА- ЛАПЛАСА

ЗАКОН БИО – САВАРА – ЛАПЛАСА

Магнитное поле постоянного тока изучалось французами Био (1774-1862), Саваром (1791-1842) и результаты исследований были обобщены



Для проводника с током I , элемент которого $d\vec{l}$ создает в некоторой точке A магнитное поле с индукцией $d\vec{B}$ справедливо соотношение:

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \vec{r}}{r^3}$$

Закон Био – Савара - Лапласа

$d\vec{l}$ – вектор равный по модулю длине проводника dl и совпадающий по направлению с током I .

\vec{r} – радиус-вектор проведенный из элемента проводника в точку A поля (r – его модуль).

Направление \vec{B} перпендикулярно \vec{r} и то есть перпендикулярно плоскости в которой они лежат, и совпадает с касательной к линиям магнитной индукции. Это направление может быть найдено с помощью правила правого винта, где направление вращения головки поступательное движение I винта – направление тока

$$\vec{dB} = \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2}$$

Закон Био – Савара – Лапласа в скалярной форме
 α – угол между векторами $d\vec{l}$ и \vec{r} .

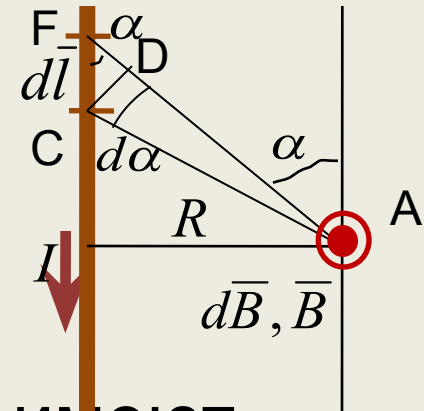
$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i$$

Для магнитного как и для электрического полей справедлив **ПРИНЦИП СУПЕРПОЗИЦИИ**:
Магнитная индукция создаваемая в одной точке несколькими движущимися зарядами или токами равна векторной сумме магнитных индукций

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ПРЯМОГО ТОКА

Магнитное поле тока текущего по прямому, тонкому, бесконечно длинному проводу.

В произвольной точке А, удаленной от провода на расстояние R с током I имеют векторы $d\vec{B}$ и \vec{B} направлены «к нам». Сложение этих векторов можно заменить суммой их модулей.



Так как $dl \rightarrow 0$, то радиус дуги CD равен R и угол $\angle C D C \approx 90^\circ$

$$r = \frac{R}{\sin \alpha} \quad dl = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha} \quad dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2} = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R} \sin \alpha d\alpha$$

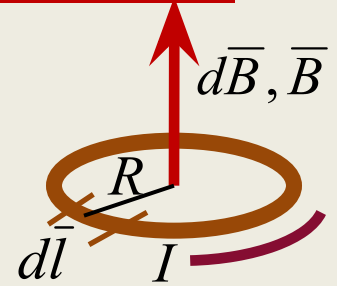
Так как α для всех элементов прямого тока изменяется в пределах $0 \rightarrow \pi$, то полная

магнитная индукция

$$B = \int dB = \frac{\mu\mu_0 I}{4\pi R} \int_0^\pi \sin \alpha d\alpha = \frac{\mu\mu_0 2I}{4\pi R} = \frac{\mu\mu_0 I}{2\pi R}$$

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ЦЕНТРЕ КРУГОВОГО ПРОВОДНИКА С ТОКОМ

Все элементы проводника в центре окружности создают магнитное поле одинаково направленного (вдоль нормали витка). Поэтому сложение векторов можно за-менить сложением их модулей. Так как все элементы перпендикулярны радиусу (синие векторы) и расстояние всех элементов проводника до центра одинаково



$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} dl \quad dl \in [0; 2\pi R]$$

$$B = \int dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R^2} 2\pi R = \frac{\mu\mu_0 I}{2R}$$

ЗАКОН АМПЕРА.
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ
ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ ТОКОВ

ЗАКОН АМПЕРА

Магнитное поле ориентирует контур тока (рамку) в пространстве, значит, вращающий момент, испытываемый рамкой, есть результат действия сил на её отдельные элементы. Ампер установил, что сила действующая на малый элемент равна геометрической сумме сил, которые действуют со стороны магнитного поля и вывел закон:

Сила с которой магнитное поле действует на элемент проводника с током, находящийся в магнитном поле, равна произведению силы тока на векторное произведение элемента длины проводника на магнитную индукцию поля.

$$dF = IBdl \sin \alpha$$

Закон Ампера в скалярной

форме

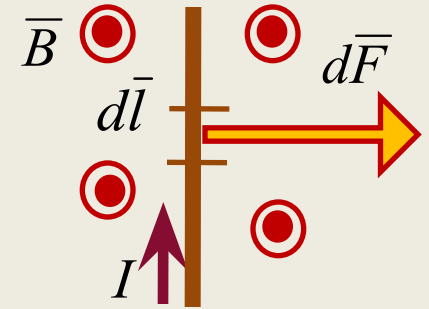
$d\vec{F}$

Направление вектора $d\vec{F}$ может быть определено по правилу левой руки:

В ладонь входит вектор магнитной

индукции \vec{B} , четыре пальца в направлении тока I в проводнике $d\vec{l}$ показывают направление силы $d\vec{F}$.

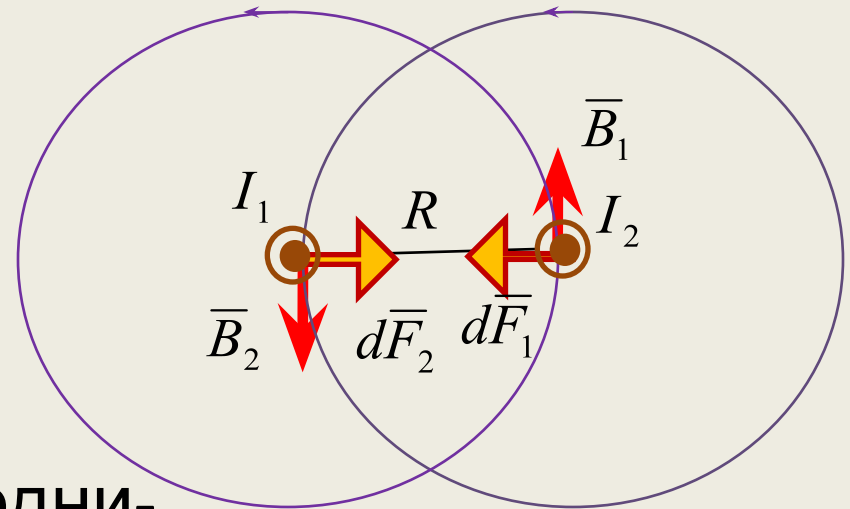
элемент проводника с током.



, большой палец действующей на

СИЛА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ДВУХ ТОКОВ

Закон Ампера может применяться для определения силы взаимодействия двух токов.



Пусть расстояние между проводниками равно R . Каждый из проводников создает магнитное поле, которое действует по закону Ампера на другой проводник. Рассмотрим с какой силой действует магнитное поле тока I_2 на элемент dl_1 проводника с током I_1 . Ток I_2 создает вокруг себя магнитное поле, линии магнитной индукции которого представляют собой концентрические окружности.

Направление \vec{B}_1 задается правилом «правого винта», его абсолютное значение:

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0 I_1}{2\pi R}$$

Направление силы $d\vec{F}_1$ с которой поле \vec{B}_1 действует на участок второго проводника с током определяется по правилу левой руки. Модуль

силы :

$$dF_1 = I_2 B_1 dl = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} dl$$

Аналогично для проводника с током I_2 :

$$dF_2 = I_1 B_2 dl = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} dl$$

Два параллельных тока одинакового направления будут притягиваться друг к другу с силой

$$dF = dF_1 = dF_2 = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} dl$$

МАГНИТНАЯ ПОСТОЯННАЯ. ЕДИНИЦЫ ИЗМЕРЕНИЯ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ И НАПРЯЖЕННОСТИ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Если два параллельных проводника с токами находятся ~~(в в)~~ в вакууме, то сила их действия на единицу проводника:

$$\frac{dF}{dl} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1I_2}{R}$$

Для определения численного значения магнитной постоянной μ_0 , воспользуемся определением ампера (единицы измерения силы тока), согласно которому: АМПЕР- сила неизменяющегося тока, который при прохождении по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого поперечного сечения, расположенного в

вакууме на расстоянии 1 м один от другого,
создаёт между проводниками силу равную $2 \cdot 10^{-7}$
Н на каж-дый метр длины.

Следовательно, если $I_1 = I_2 = 1(A)$ $l = 1(m)$ то

$$\frac{dF}{dl} = 2 \cdot 10^{-7} (H/m)$$

$$\mu_0 = \frac{dFR4\pi}{dl2I_1I_2} = 2 \cdot 10^{-7} \cdot \frac{1 \cdot 4\pi}{2 \cdot 1 \cdot 1} = 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{H}{A^2}\right) = 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{\Gamma H}{M}\right)$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \left(\frac{\Gamma H}{M}\right)$$

Где Гн (генри) единица индуктивности (**НЕ**
ИНДУКЦИИ!!!)

Единица измерения магнитной индукции – Тл (Тесла).

1 Тл – магнитная индукция такого однородного магнитного поля, которое действует с силой 1 Н на каждый метр прямого проводника, перпендикулярного полю с током 1 А.

$$1 \text{ Тл} = \frac{1 \text{ Н}}{1 \text{ А} \cdot 1 \text{ м}}$$

Единица измерения напряженности магнитного поля – А/м (ампер/метр).

1 А/м – напряженность такого поля, магнитная индукция которого в вакууме $4\pi \cdot 10^{-7}$ Тл.

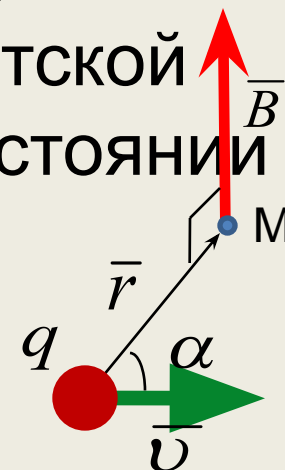
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ДВИЖУЩЕГОСЯ ЗАРЯДА

Каждый проводник с током создает в пространстве магнитное поле. Ток – упорядоченное движение электрических зарядов. Значит любой движущийся заряд создает вокруг себя магнитное поле.

q

Свободно движущийся заряд (заряд \bar{q} движущийся с постоянной нерелятивистской скоростью \bar{v}), создает в точке М, на расстоянии

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q \vec{v} \times \vec{r}}{r^3}$$



\vec{B}

Вектор \vec{B} направлен перпендикулярно плоскости в которой расположены \vec{v} и \vec{r} . Его направление – поступательное движение правого винта, при его вращении от \vec{v} к \vec{r} .

Формула магнитной индукции свободно двигающегося заряда в скалярной форме:

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

Движущийся заряд по своим свойствам эквивалентен элементу тока

$$Id\vec{l} = q\vec{v}$$

Эти закономерности справедливы только при малых скоростях двигающегося заряда, когда электрическое поле свободно двигающегося заряда можно считать электростатическим, то есть неподвижным зарядом в той точке в которой находится двигающийся заряд.

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

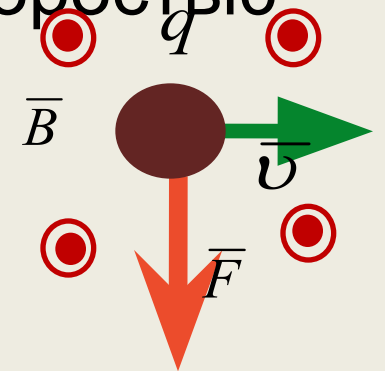
ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЙСЯ ЗАРЯД

Магнитное поле действует не только на проводники с током, но и отдельные движущиеся заряды.

Сила действующая на электрический заряд, движущийся в магнитном поле со скоростью

называется: Сила Лоренца

$$\vec{F} = q\vec{v}\vec{B}$$



Направление силы Лоренца определяется по правилу левой руки.

Для положительного заряда ($q > 0$), большой палец указывает направление силы действующей на положительный заряд. Для отрицательного заряда наоборот.

Абсолютное значение Силы Лоренца:

$$F = qvB \sin \alpha$$

α – угол между \vec{v} и \vec{B} .

Магнитное поле действует **только на движущиеся заряды**

Сила Лоренца **всегда перпендикулярна скорости** движения заряженной частицы, она **изменяет** только **НАП-РАВЛЕНИЕ** скорости, но не изменяет её **МОДУЛЯ. СИЛА ЛОРЕНЦА НЕ СОВЕРШАЕТ РАБОТЫ.**

Постоянное магнитное поле не совершает работы над движущейся в ней заряженной частицей, и кинетическая энергия этой частицы при движении в магнитном поле не изменяется.

Если на движущийся электрический заряд помимо магнитного поля действует и электрическое поле с напряженностью , то результирующая сила приложенная к заряду равна векторной сумме сил действующих со стороны обоих полей.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v}\vec{B}$$

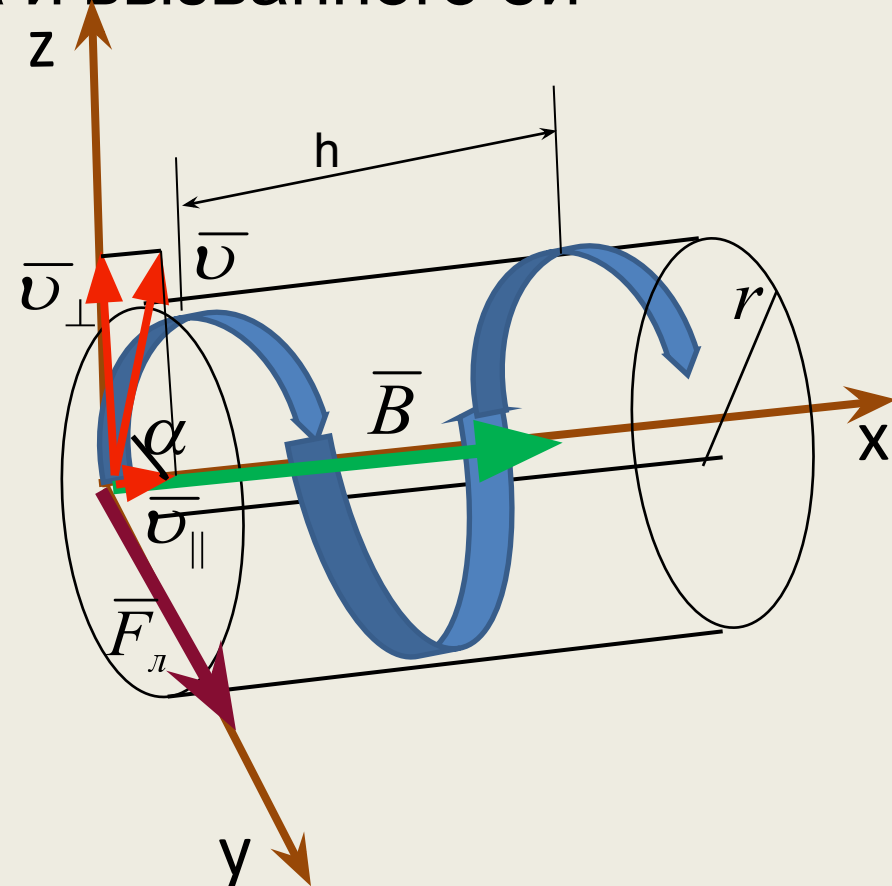
Формула Лоренца

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

Формула силы Лоренца позволяет найти закономерности движения заряженных частиц в магнитном поле.

Направление силы Лоренца и вызванного ей отклонения зависят от направления движения и заряда частицы.

Пусть имеется однородное магнитное поле \vec{B} . В него входит под углом α между векторами \vec{v} скорости и магнитной индукции \vec{B} , положительный заряд $+q$ массой m . Если $\alpha \neq 0$ и $\alpha \neq \pi/2$ и скорость \vec{v}



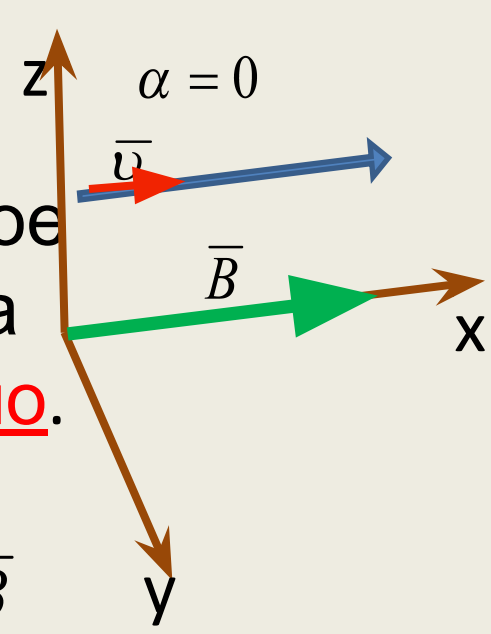
частицы направлена под углом α к \vec{B} , то её движение можно представить в виде суперпозиции:

- 1) Равномерное прямолинейное движение вдоль поля со скоростью $v_{\parallel} = v \cos \alpha$
- 2) Равномерное движение по окружности в плоскости перпендикулярной полю со скоростью $v_{\perp} = v \sin \alpha$.
 Радиус окружности: $r = \frac{m v_{\perp}}{qB} = \frac{m v \sin \alpha}{qB}$

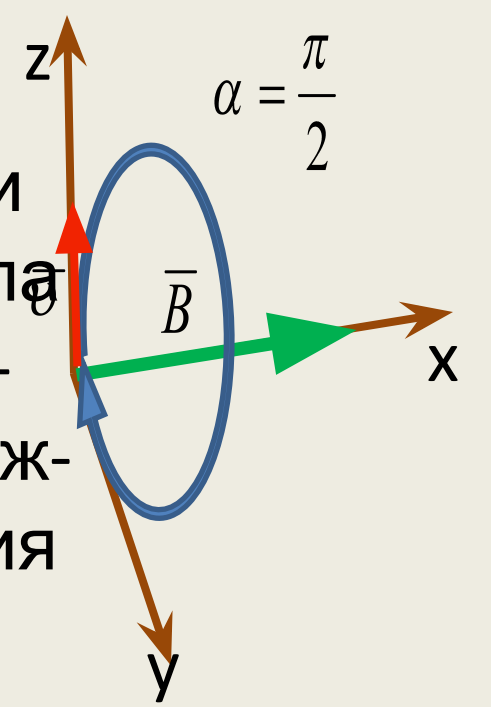
В результате сложения обоих движений, возникает движение по спирали, ось которой параллельна магнитному полю. Время затрачиваемое на один полный оборот (**Период заряда**): $T = \frac{2\pi m}{qB}$

Шаг винтовой линии $h = v_{\parallel} T = \frac{2\pi m}{qB} v \cos \alpha$

Если заряд движется **ВДОЛЬ** линий магнитной индукции $\alpha = 0$ или $\alpha = \pi$, то $F_l = qvB \sin \alpha = 0$ и магнитное поле на частицу **НЕ ДЕЙСТВУЕТ** и она движется прямолинейно и равномерно.



Если заряд движется **ПЕРПЕНДИКУЛЯРНО** линиям магнитной индукции $\bar{v} \perp \bar{B}$, то $F_l = qvB \sin \alpha = qvB$ и $a = \frac{F_l}{m} = \frac{qvB}{m}$, то $v = \text{const}$, постоянна по модулю и нормальна () к траектории частицы. По 2 закону Ньютона эта сила создает центростремительное ускорение и частица будет двигаться по окружности которая определяется из условия $F_l = qvB = \frac{mv^2}{r} \Rightarrow r = \frac{mv}{qB}$; $T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB}$

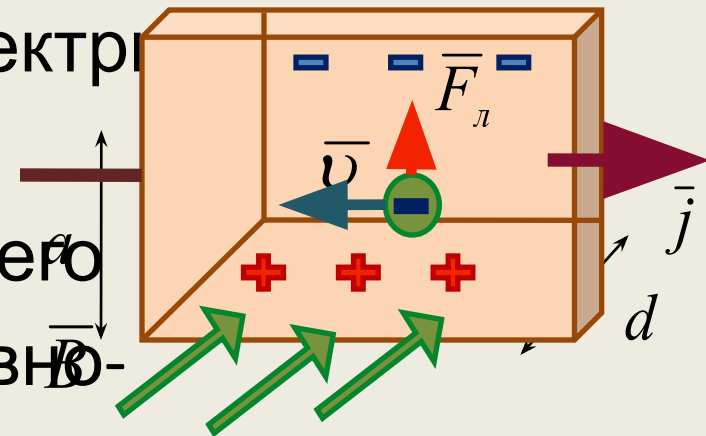


ЭФФЕКТ ХОЛЛА

Эффект Холла – возникновение в металле (или полупроводнике) с током плотностью \vec{j} , помещенном в магнитное поле \vec{B} электрического поля в направлении \vec{E} перпендикулярном \vec{j} и \vec{B} .

Электроны подвергаются воздействию силы Лоренца и концентрируются у одной из граней металла (эта грань заряжается отрицательно, противоположная положительно). В результате между гранями возникает дополнительное электрическое поле \vec{E}_H .

Когда напряженность этого поля \vec{E}_H достигнет такой величины, что его действие на заряды, будет уравновешивать силу Лоренца, то установится стационарное



распределение зарядов в поперечном направлении.

$$eE_B = \frac{e\Delta\varphi}{a} = evB \Rightarrow \Delta\varphi = vBa$$

$\Delta\varphi$ - поперечная (холловская) разность потенциалов

$$I = jS = jad = nevad$$

n

- концентрация электронов $\Delta\varphi = \frac{IB}{nead} = \frac{IB}{en d} R_x$

$$R_x = 1/en$$

- постоянная Холла (зависит от вещества)

Холловская поперечная разность потенциалов прямо пропорциональна магнитной индукции, силе тока, и обратно пропорциональна толщине пластины. По измеренному значению разности потенциалов можно определить концентрацию электронов в веществе. Знак постоянной Холла совпадает со знаком носителя заряда в веществе

ЦИРКУЛЯЦИЯ ВЕКТОРА
МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ
ДЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В
ВАКУУМЕ

Аналогично циркуляции вектора напряженности электростатического \vec{E} поля в вакууме,

Циркуляцией вектора по заданному замкнутому контуру называется интеграл

$$\oint_L B dl = \oint_L B_l dl$$

$d\vec{l}$ вектор элементарной длины контура, направленной вдоль обхода контура

$B_l = B \cos \alpha$ составляющая вектора \vec{B} в направлении касательной к контуру (с учетом выбранного направления обхода).

- α угол между векторами \vec{B} и $d\vec{l}$

ЗАКОН ПОЛНОГО ТОКА ДЛЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ВАКУУМЕ (ТЕОРЕМА О ЦИРКУЛЯЦИИ ВЕКТОРА МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ)

Циркуляция вектора магнитной индукции по произволь-ному замкнутому контуру равна произведению магнит-ной постоянной на алгебраическую сумму токов охва-тываемых ЭТИМ контуром

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i$$

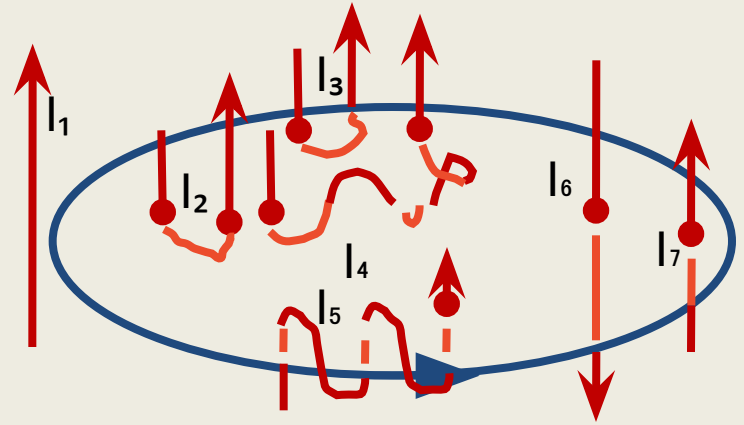
n

- число проводников с токами охватываемыми кон-туром произвольной формы.

Циркуляция вектора \vec{E} всегда равна нулю, то есть элек-тростатическое поле является **потенциальным**, Цирку-ляция вектора \vec{B} не равна нулю. Магнитное поле **вихревое**.

ПРИМЕР ЦИРКУЛЯЦИИ

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \cdot (0 \cdot I_1 + (1-1)I_2 + (-1)I_3 + (-1+1-1+1-1+1)I_4 + (1+1+1)I_5 + (-1)I_6 + 1 \cdot I_7) = \mu_0 \cdot (-I_3 + 3I_5 - I_6 + I_7)$$



- Каждый ток учитывается столько раз, сколько он охватывается контуром.
- Положительным считается тот ток, направление которого связано с направлением обхода правилом правого винта.
- Данное выражение справедливо только для тока в вакууме, так как для полей в веществе необходимо учитывать и молекулярные токи.