

Магнитное поле

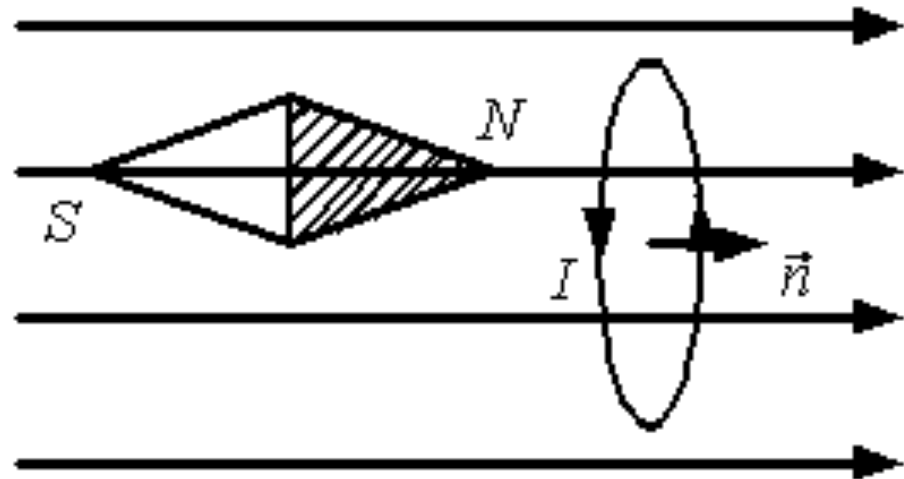
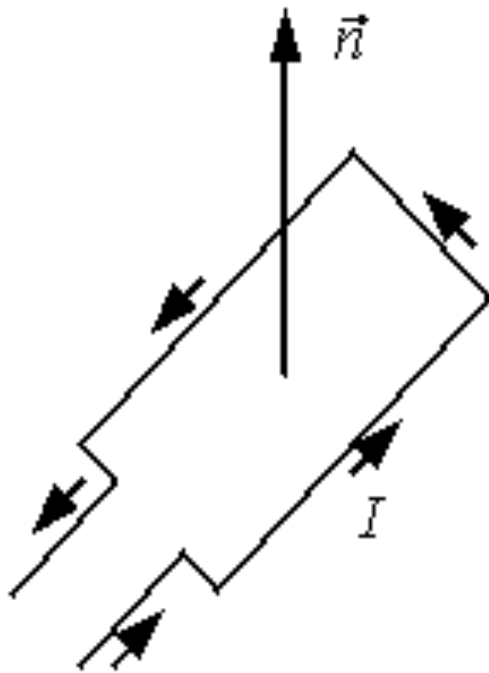


В пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает силовое поле, называемое **магнитным.**

Магнитное поле создается проводниками с током, движущимися электрически заряженными частицами и телами, постоянными магнитами и переменным электрическим полем.

Магнитное поле проявляет себя по действию на движущие заряженные частицы и тела, на контур с током и на тела, обладающие магнитным моментом (намагниченные), независимо от того, движутся они или нет.

При исследовании магнитного поля используют замкнутый плоский контур с током (рамка с током).



- За направление магнитного поля в данной точке принимается:
- направление, вдоль которого располагается положительная нормаль к рамке;
- направление, совпадающее с направлением силы, которая действует на северный полюс магнитной стрелки, помещенной в данную точку.

В качестве положительного направления нормали принимается направление, связанное с током правилом правого винта.

Рамка с током поворачивается в магнитном поле.

Вращающий момент сил зависит как от свойств поля в данной точке, так и от свойств рамки:

$$\vec{M} = [\vec{P}_m \vec{B}], \quad M = P_m B \sin \alpha ,$$

$\vec{B}$ - вектор **магнитной индукции** – силовая характеристика магнитного поля;

$\vec{P}_m$ - вектор **магнитного момента** рамки с током.

Для плоского контура с током I :

$$\vec{P}_m = IS\vec{n}, \quad P_m = IS$$

S - площадь поверхности контура (рамки),
 $\vec{n}$ - единичный вектор нормали к
поверхности рамки.

Направление $\vec{P}_m$ совпадает с направлением
положительной нормали.

Магнитная индукция в данной точке однородного магнитного поля определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с магнитным моментом, равным единице, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля:

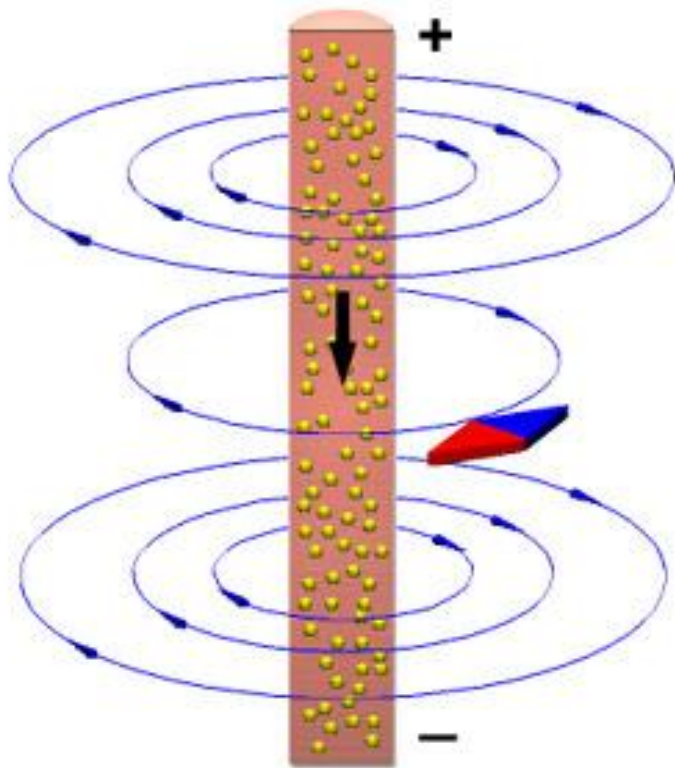
$$B = \frac{M_{\max}}{P_m} .$$

Единица магнитной индукции : тесла

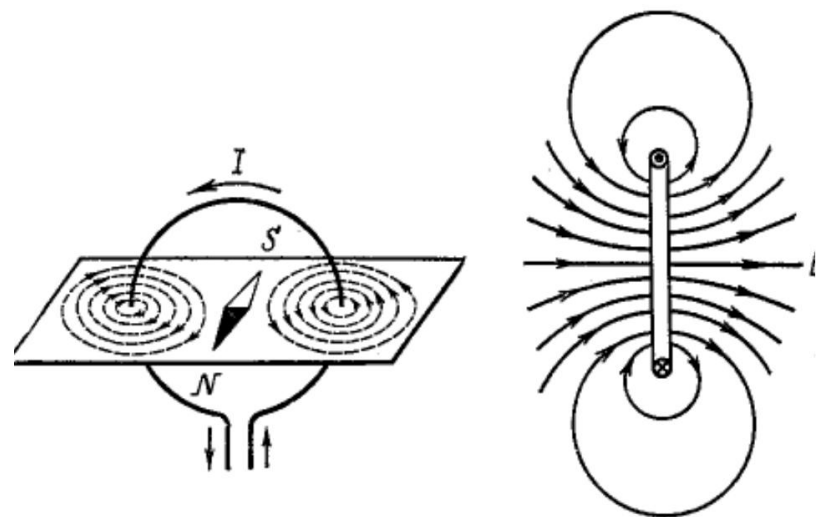
$$1\text{Тл} = 1\text{Н}/(1\text{А}\cdot 1\text{м}).$$

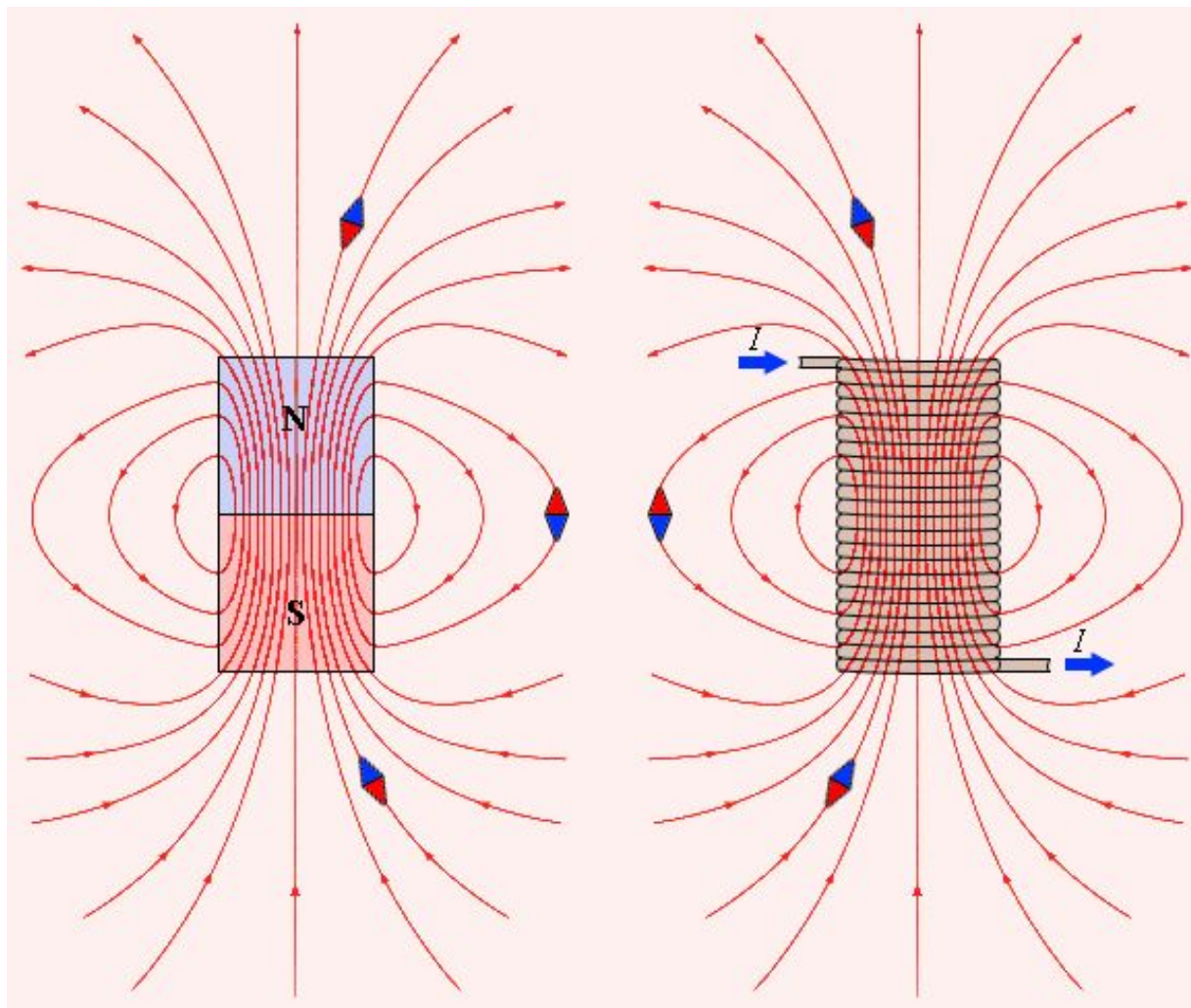
Магнитное поле изображают с помощью **линий магнитной индукции** — линий, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора $\mathbf{B}$.

Их направление задается правилом правого винта.



Линии магнитной индукции всегда замкнуты и охватывают проводники с током.





Магнитное поле не имеет источников – магнитных зарядов. Силовые поля, обладающие этим свойством, называются вихревыми.

Гипотеза высказанная Ампером: в любом теле существуют **микроскопические токи**, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах.

Молекулярные токи создают свое магнитное поле и могут поворачиваться в магнитных полях макротоков.

Вектор магнитной индукции $\vec{B}$ характеризует результирующее магнитное поле, создаваемое всеми макро- и микротоками.

Магнитное поле макротоков описывается вектором напряженности H .

Для однородной изотропной среды:

$$B = \mu_0 \mu H,$$

Где μ_0 — магнитная постоянная -

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

μ — магнитная проницаемость среды, показывающая, во сколько раз магнитное поле макротоков H усиливается за счет поля микротоков среды.

Принцип суперпозиции:

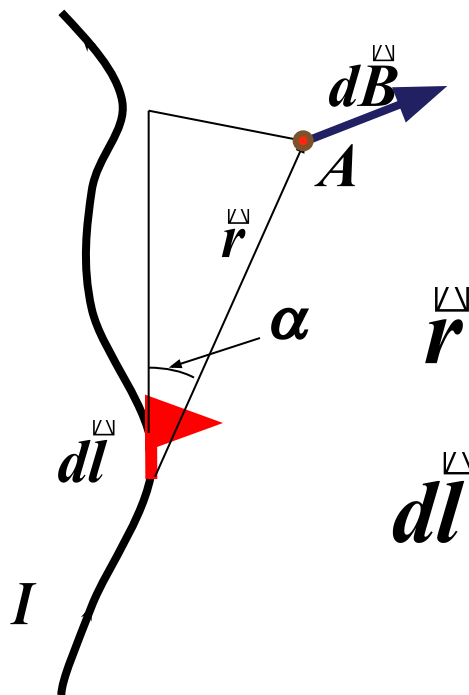
Если магнитное поле создается несколькими проводниками с током, то индукция результирующего поля есть векторная сумма индукций полей, создаваемых каждым проводником в отдельности.

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

Закон Био — Савара — Лапласа

Для магнитной индукции поля, создаваемого элементом тока I длиной dl , была получена формула:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [dl, r]}{r^3}, \text{ где}$$



$\vec{r}$ - вектор, проведенный от элемента тока в точку A ;
 $d\vec{l}$ - вектор, совпадающий с элементарным участком тока и направленный в ту сторону, в которую течет ток.

Направление $\vec{dB}$: перпендикулярно плоскости, в которой располагаются векторы $\vec{dl}$ и $\vec{r}$; его направление совпадает с направлением правого винта, вращающегося по кратчайшему пути от $\vec{dl}$ к $\vec{r}$.

Модуль dB определяется как

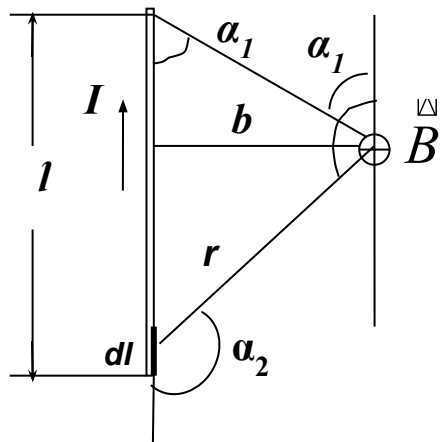
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl r \sin \alpha}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2} ,$$

где α - угол между векторами $\vec{dl}$ и $\vec{r}$.

Магнитное поле прямого тока — тока, текущего по тонкому прямому проводу бесконечной длины:

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

Магнитное поле конечного проводника с током:



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

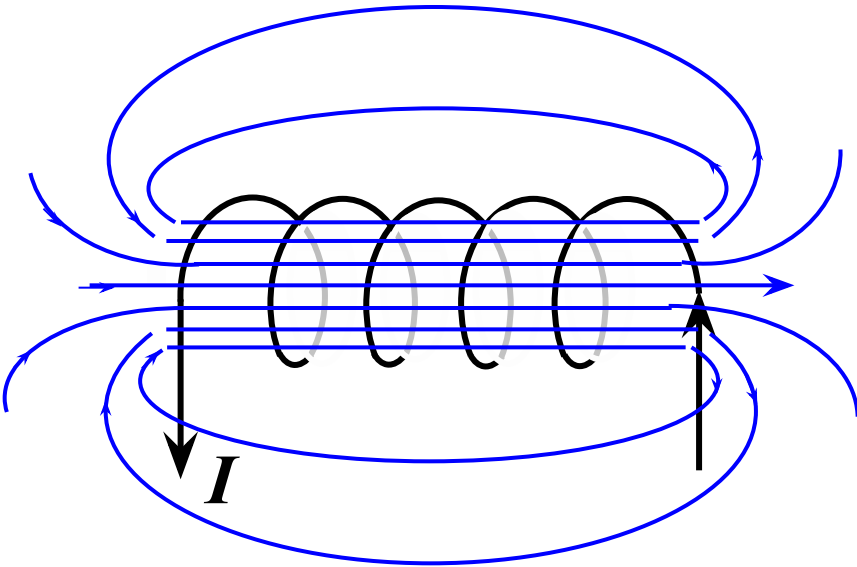
Магнитное поле в центре кругового проводника с током: все элементы кругового проводника с током создают в центре магнитное поле одинакового направления — вдоль нормали от витка.

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

Магнитное поле на оси кругового витка с током на расстоянии b от его центра:

$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + b^2)^{3/2}}$$

Соленоид – это проводник, намотанный по винтовой линии на поверхность цилиндрического каркаса.



Пусть длинный соленоид с током I имеет n витков на единицу длины.

Магнитное поле соленоида: $B = \mu_0 n I$,

где $N/l = n$, N – число витков соленоида;
 l – его длина.

Поле внутри соленоида **однородно** (краевыми эффектами пренебрегаем).

Закон Ампера

Элементарная сила $d\vec{F}$, с которой магнитное поле действует на элемент проводника с током прямо пропорциональна силе тока в проводнике I , длине элемента проводника dl и индукции магнитного поля $\vec{B}$.

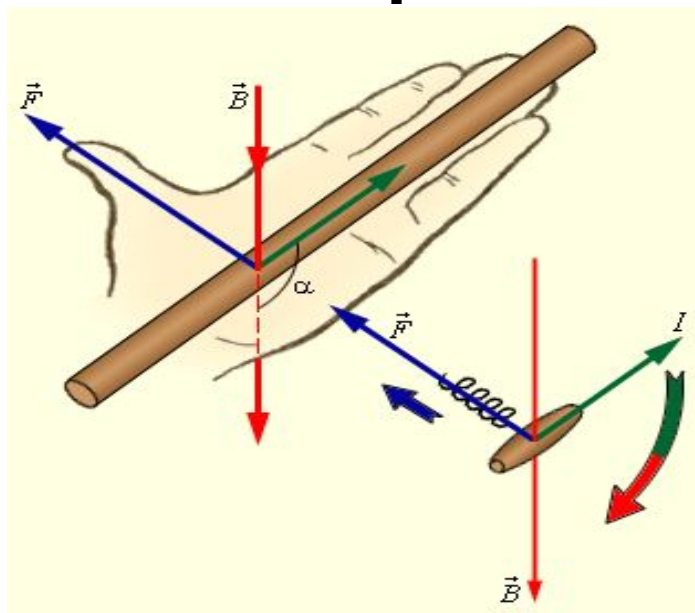
Определяется выражением:

$$d\vec{F} = I \cdot d\vec{l} \times \vec{B},$$

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

Наглядно направление силы Ампера принято определять по **правилу левой руки**:

Ладонь левой руки расположить так, чтобы в неё входил вектор магнитной индукции $\vec{B}$, а четыре вытянутых пальца расположить по направлению тока в проводнике, тогда отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы Ампера $\vec{F}$.



Модуль силы Ампера:

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

где dF - сила Ампера; I - сила тока в проводнике; dl - элемент проводника; B - модуль индукции магнитного поля; α - угол между векторами индукции $\vec{B}$ и $\vec{dl}$ (направлением тока в проводнике).

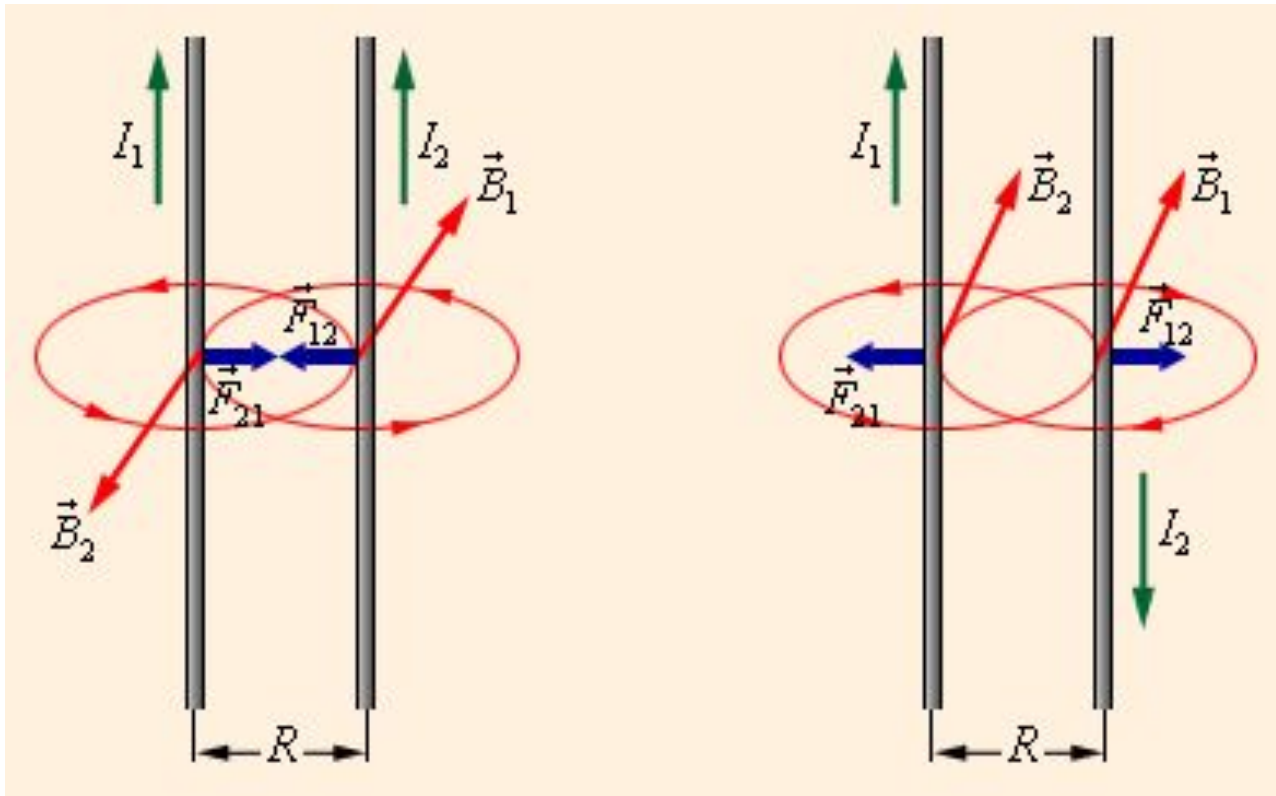
Модуль силы Ампера, действующей на прямолинейный проводник с током, находящийся в однородном магнитном поле:

$$F = I \cdot B \cdot L \sin \alpha ,$$

где L - длина проводника.

Взаимодействие токов вызывается их магнитными полями.

Магнитное поле одного тока действует силой Ампера на другой ток и наоборот.



Магнитное взаимодействие параллельных и антипараллельных токов.

Сила взаимодействия параллельных ТОКОВ

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

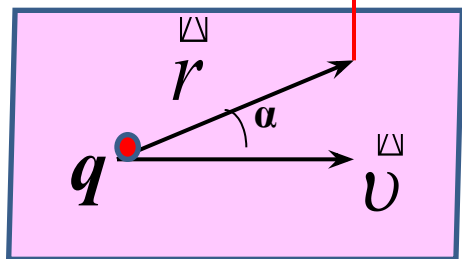
Магнитное поле движущегося заряда

Каждый проводник с током создает в окружающем пространстве магнитное поле. Электрический ток представляет собой упорядоченное движение электрических зарядов, поэтому можно сказать, что **любой движущийся в вакууме или среде заряд создает вокруг себя магнитное поле.**

Закон, определяющий магнитное поле точечного заряда q , свободно движущегося с нерелятивистской скоростью v , выражается формулой:

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

- в векторной форме;



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

- модуль магнитной индукции

Для отрицательного заряда направление магнитной индукции поменяется на противоположное.

Действие магнитного поля на движущийся заряд

Движущиеся электрические заряды создают вокруг себя магнитное поле, которое распространяется в вакууме со скоростью света.

При движении заряда во внешнем магнитном поле возникает силовое взаимодействие магнитных полей, определяемое по закону Ампера.

По проводнику dl за промежуток времени dt проходит n одинаковых зарядов величиной dq , т.е. через проводник протекает ток, сила которого

$$I = \frac{ndq}{dt} .$$

Согласно закону Ампера , на ndq зарядов будет действовать сила:

$$dF = BIdl \sin \alpha = B \frac{ndq}{dt} dl \sin \alpha \quad .$$

Сила, с которой магнитное поле действует на каждый заряд, равна:

$$F = \frac{dF}{n} = Bq \frac{dl}{dt} \sin \alpha \quad .$$

$\frac{dl}{dt} = v$ - скорость движения заряда; α –
угол между вектором скорости $\vec{v}$ и
вектором магнитной индукции $\vec{B}$.

Сила, действующая со стороны магнитного поля на **движущийся** заряд, равна:

$$F_{\text{л}} = qvB \sin \alpha \quad .$$

Выражение для силы, действующей в магнитном поле как на проводник с током, так и на движущийся заряд, было получено Лоренцем и названо в его честь.

$$\vec{F} = q[\vec{v} \times \vec{B}] \quad - \text{ сила Лоренца в векторном виде.}$$

Сила Лоренца перпендикулярна векторам $\vec{v}$ и $\vec{B}$.

Направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд, определяется по правилу **левой руки**.

С изменением знака заряда направление силы изменяется на противоположное.

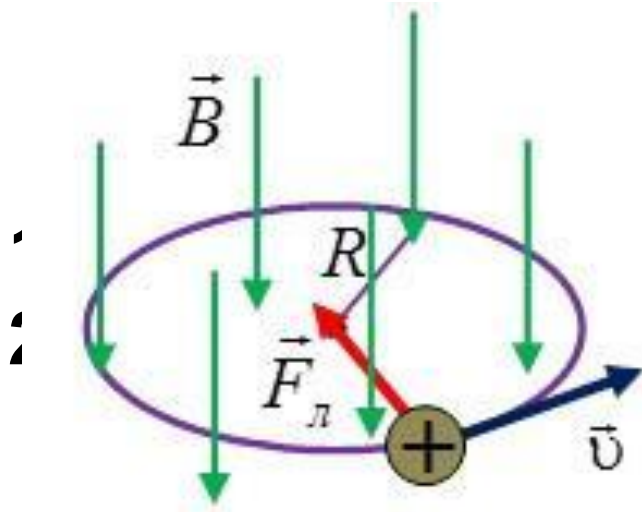
Магнитное поле не действует на заряженную частицу в двух случаях:

- 1) если $v = 0$ (частица неподвижна);
- 2) если $\sin\alpha = 0$, т.е. частица движется вдоль линий магнитного поля .

Так как сила Лоренца всегда направлена перпендикулярно вектору скорости летящей частицы, то она **не изменяет величину скорости, а изменяет лишь направление движения частиц**.

Действие силы Лоренца не приводит к изменению энергии заряженной частицы, т.е. эта сила **не совершает работы**.

1) Заряженная частица влетает перпендикулярно силовым линиям поля:



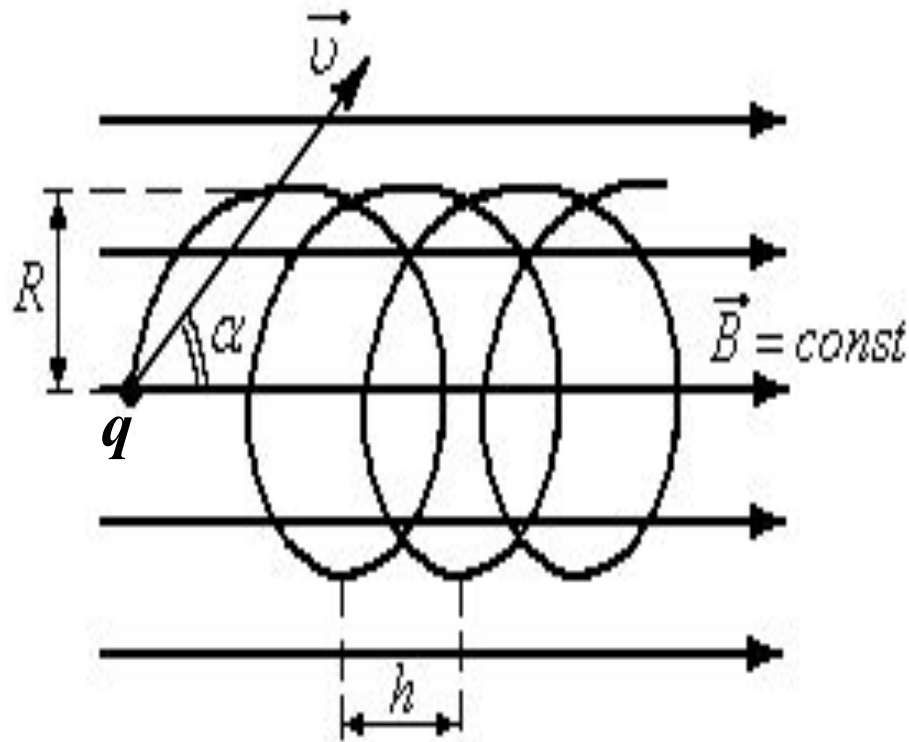
$$\frac{mv^2}{R} = qvB ;$$

$$R = \frac{mv}{qB} ;$$

$$T = \frac{2\pi m}{qB} .$$

При движении заряженной частицы в однородном магнитном поле, перпендикулярном к плоскости, в которой происходит движение, траектория частицы является **окружностью**.

2) Заряженная частица влетает под углом к линиям поля:



$$R = \frac{m}{q} \frac{v \sin \alpha}{B}$$

$$h = 2\pi \frac{m v \cos \alpha}{q B}$$

Траектория движения частицы представляет собой **винтовую линию, ось которой совпадает с направлением поля.**

Поток вектора магнитной индукции

Потоком вектора магнитной индукции (магнитным потоком) через площадку S называется скалярная физическая величина, равная

$$\Phi_B = BS \cos \alpha = B_n S,$$

где α - угол между нормалью к площадке и вектором магнитной индукции, B_n - проекция вектора B на нормаль к площадке.

Магнитный поток через площадку, в зависимости от ориентации вектора B по отношению к нормали, может быть как положительным, так и отрицательным, что определяется знаком проекции B_n .

Магнитный поток через элемент dS поверхности S соответственно, выражается формулой:

$$d\Phi_B = (\vec{B}, d\vec{S}) = B dS \cos \alpha ,$$

в этой формуле $d\vec{S} = dS \vec{n}$, $\vec{n}$ - орт вектора нормали.

Полный поток через поверхность S равен сумме потоков через все элементы поверхности, т.е. равен интегралу:

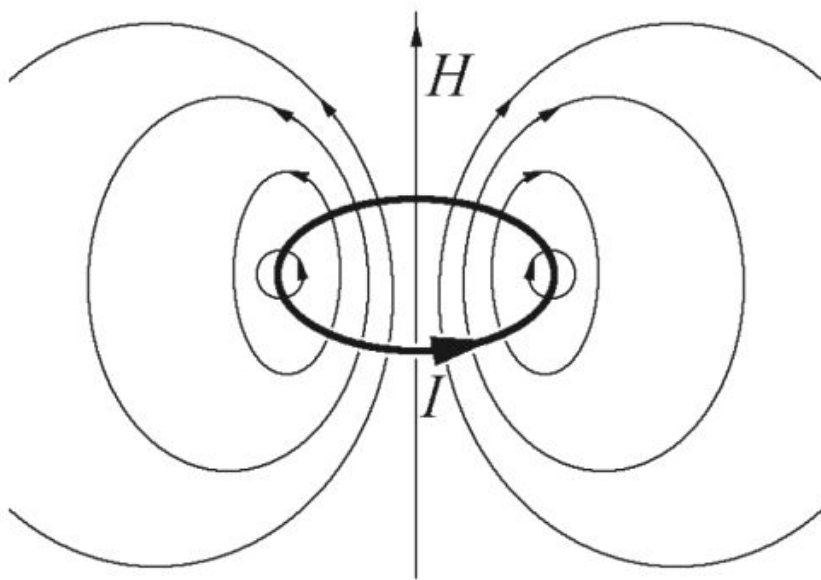
$$\Phi_B = \int_S (\vec{B}, d\vec{S}) = \int_S B_n dS .$$

Единицей магнитного потока в системе СИ является **вебер** (Вб).

Теорема Гаусса для магнитного поля в вакууме

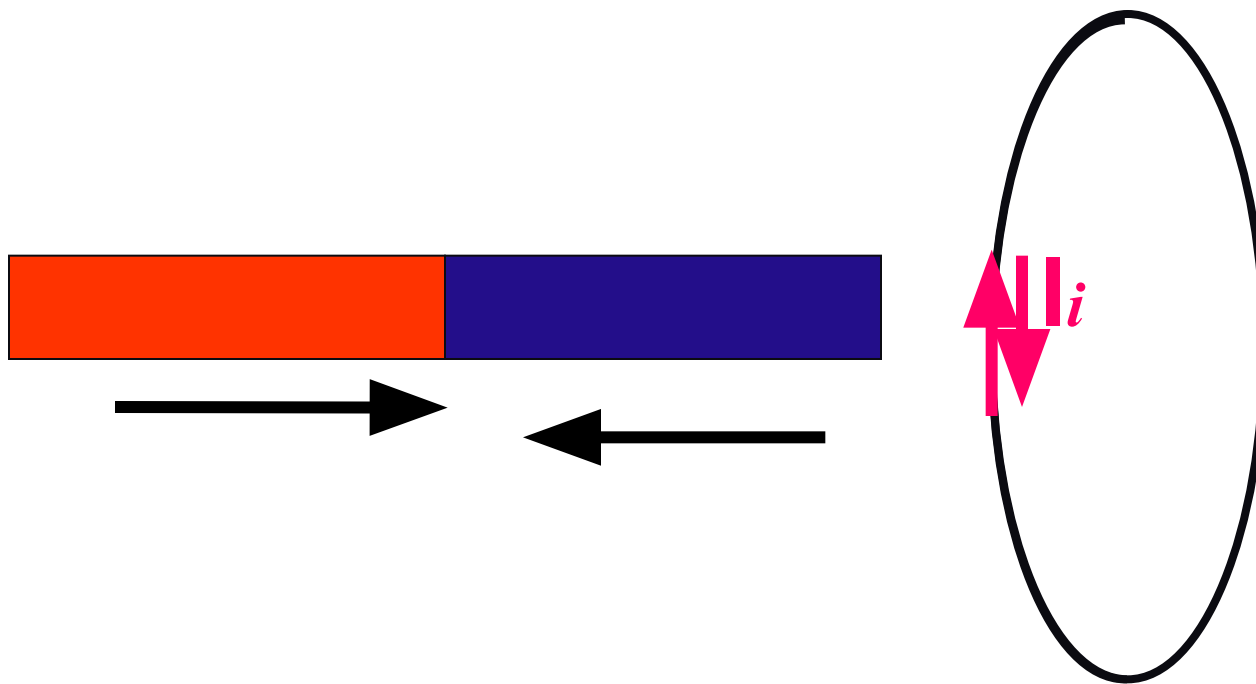
Поток вектора магнитной индукции сквозь любую замкнутую поверхность равен нулю:

$$\oint_S (\vec{B}, d\vec{S}) = 0 \quad .$$



Эта теорема отражает факт отсутствия магнитных зарядов, вследствие чего линии магнитной индукции не имеют ни начала, ни конца и являются замкнутыми.

Электромагнитная индукция



Электромагнитная индукция – явление, заключающееся в том, что в замкнутом проводящем контуре при изменении магнитного потока пронизывающего этот контур возникает электрический ток, получивший название **индукционного**.

Направление индукционного тока зависит от:

- направления магнитных линий;
- характера изменения магнитного потока.

Сила индукционного тока зависит **от скорости изменения магнитного потока**: чем быстрее меняется магнитный поток, тем больше сила индукционного тока.

Закон электромагнитной индукции

ЭДС электромагнитной индукции ε_i в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\varepsilon_i = - \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}.$$

Единица ЭДС ε_i : В (вольт).

Этот закон является **универсальным**: ЭДС ε_i не зависит от способа изменения магнитного потока.

Правило Ленца

Направление индукционного тока, а, следовательно, и знак ε_i определяется правилом Ленца:

индукционный ток всегда направлен так, чтобы противодействовать причине, его вызывающей.

Возникающий в замкнутом контуре индукционный ток своим магнитным полем противодействует тому изменению магнитного потока, которым он вызван.

Явление самоиндукции

Изменение тока в контуре ведет к возникновению ЭДС индукции в этом же контуре. Данное явление получило название **самоиндукции**.

$$\left. \begin{array}{l} B = \mu\mu_0 I \frac{N}{l} \\ \Phi = BS \cos \alpha \end{array} \right\} \begin{array}{l} \Phi \sim B \sim \\ I \end{array} \quad \Phi = L I, \text{ где } L - \text{индуктивность контура.}$$

Единица индуктивности : Гн (Генри).

Индуктивность катушки:

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2 S}{l}, \quad \text{где } N - \text{число витков катушки; } l - \text{ее длина; } S - \text{площадь ее поперечного сечения.}$$

Закон Фарадея применительно к явлению самоиндукции:

$$\varepsilon_{is} = -L \frac{\Delta I}{\Delta t} \quad \text{или} \quad \varepsilon_{is} = -L \frac{dI}{dt} .$$

Считается, что $L = \text{const}$ (контур не деформируется и магнитная проницаемость среды постоянна). Знак минус обусловлен правилом Ленца и показывает, что индуктивность контура приводит к замедлению изменения тока в нем.

Энергия магнитного поля, связанного с контуром :

$$W = \frac{LI^2}{2}.$$

