

# Магнитное поле

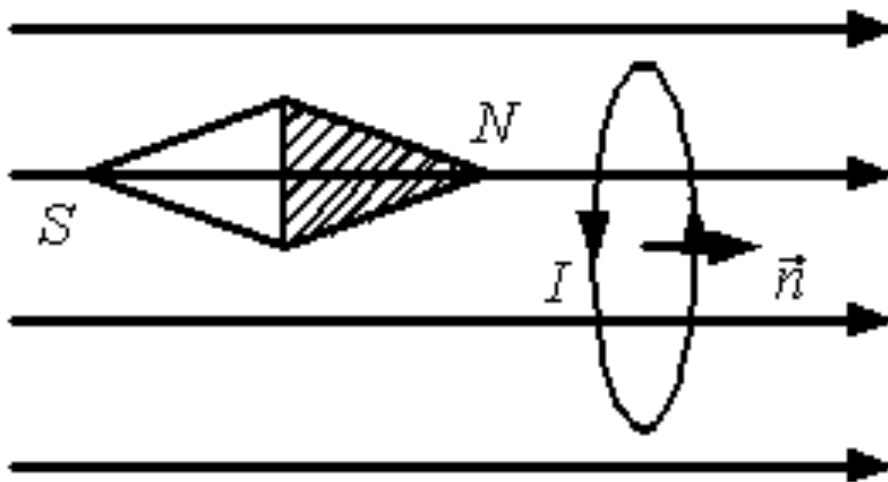
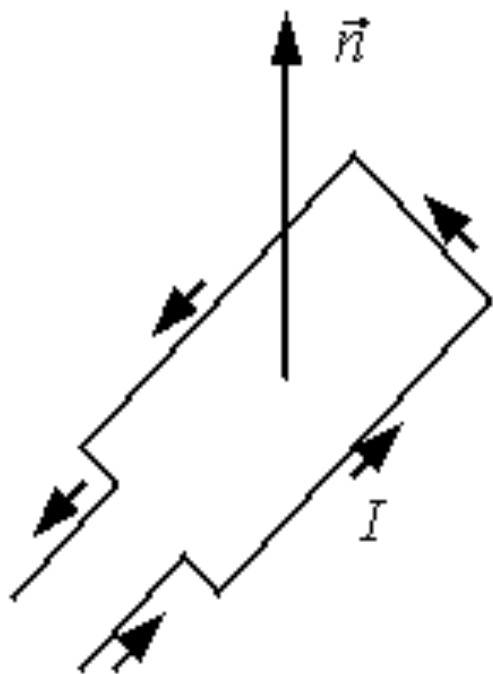


**В пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает силовое поле, называемое **магнитным**.**

**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:

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

$\vec{B}$  - 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.

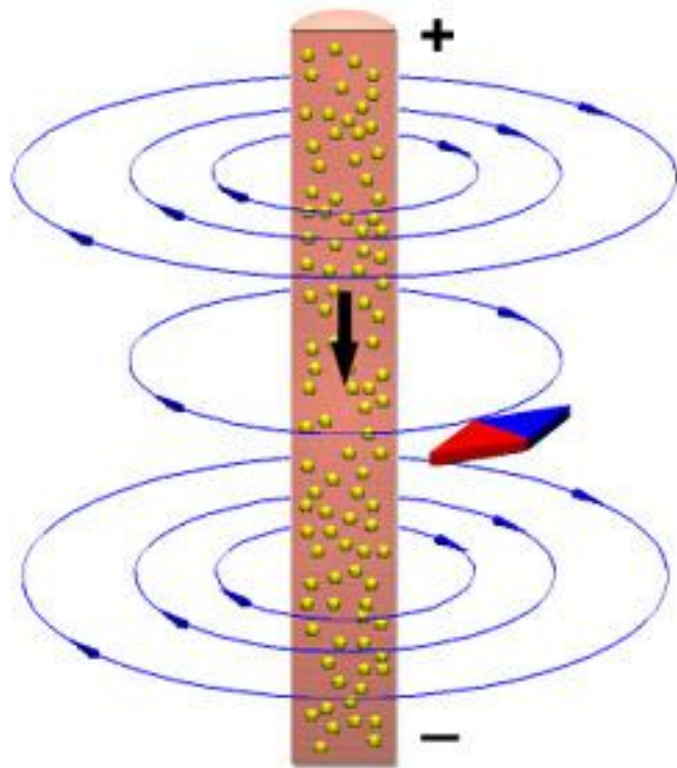
**Магнитная индукция в данной точке однородного магнитного поля определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с магнитным моментом, равным единице, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля:**

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

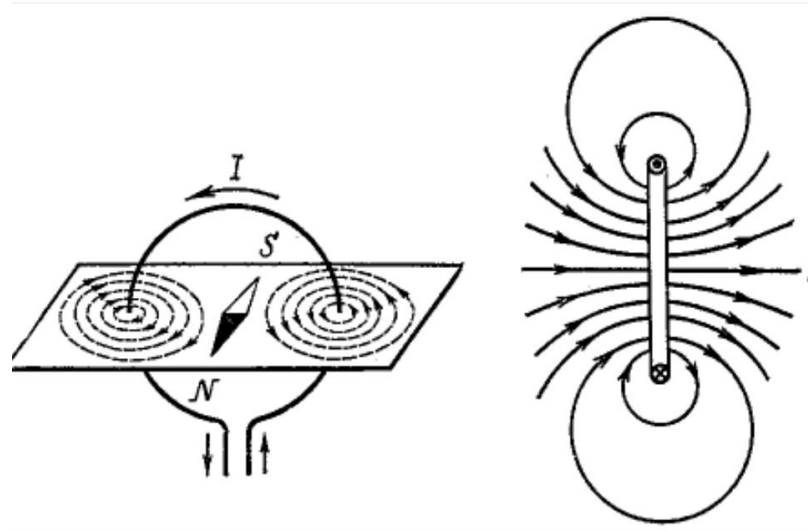
**Единица магнитной индукции : тесла  
1Тл = 1Н/(1А·1м).**

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

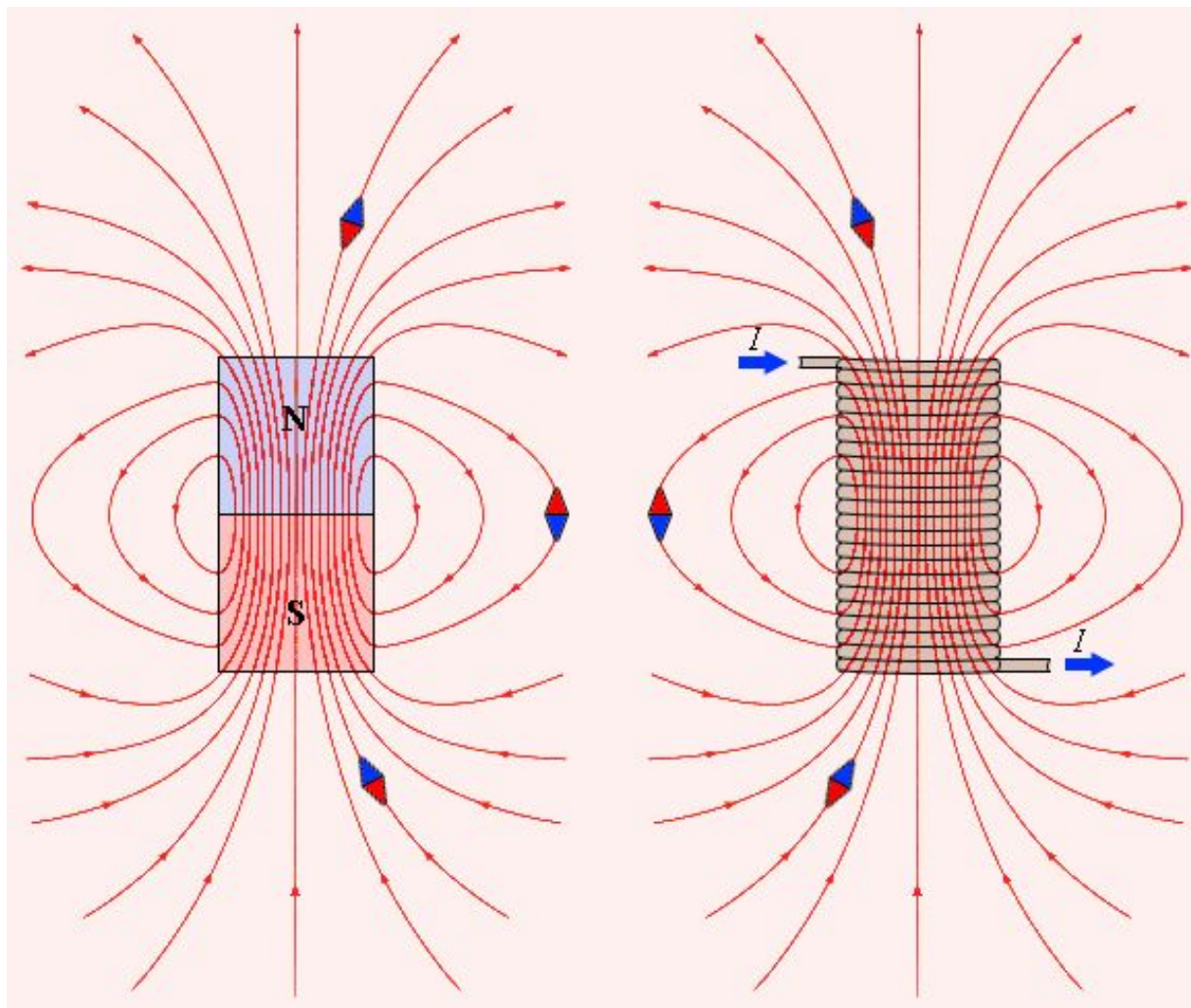
Их направление задается правилом правого винта.



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  $\mu_0$  — магнитная постоянная -**

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

**$\mu$  — магнитная проницаемость среды, показывающая, во сколько раз магнитное поле макротоков  $H$  усиливается за счет поля микротоков среды.**

## Принцип суперпозиции:

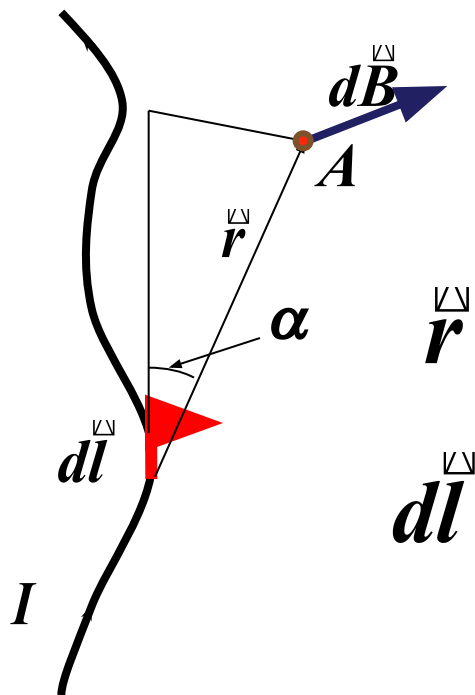
Если магнитное поле создается несколькими проводниками с током, то индукция результирующего поля есть векторная сумма индукций полей, создаваемых каждым проводником в отдельности.

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

# Закон Био — Савара — Лапласа

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

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}, \text{ где}$$



$\vec{r}$  - 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

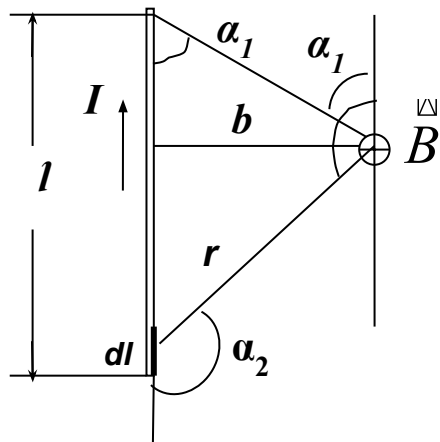
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl r \sin \alpha}{r^3} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \sin \alpha}{r^2} ,$$

где  $\alpha$  - 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.

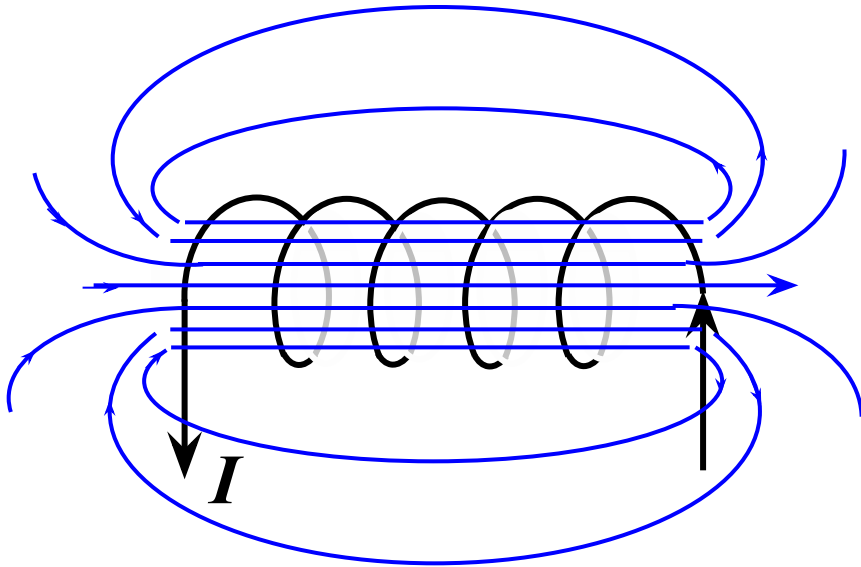
$$B = \mu_0 \mu \frac{I}{2R}$$

**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  $\vec{B}$ .

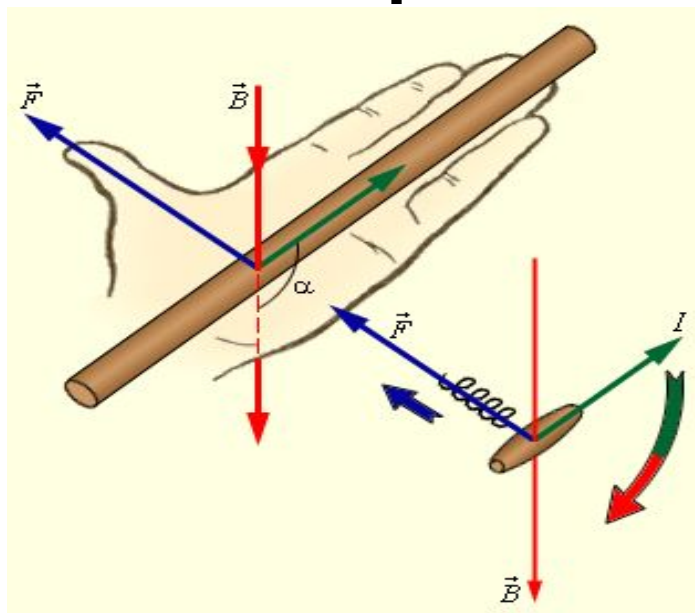
Определяется выражением:

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

где  $\vec{dl}$  – 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  $90^\circ$  большой палец покажет направление силы Ампера  $\vec{F}$ .



Модуль силы Ампера:

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

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

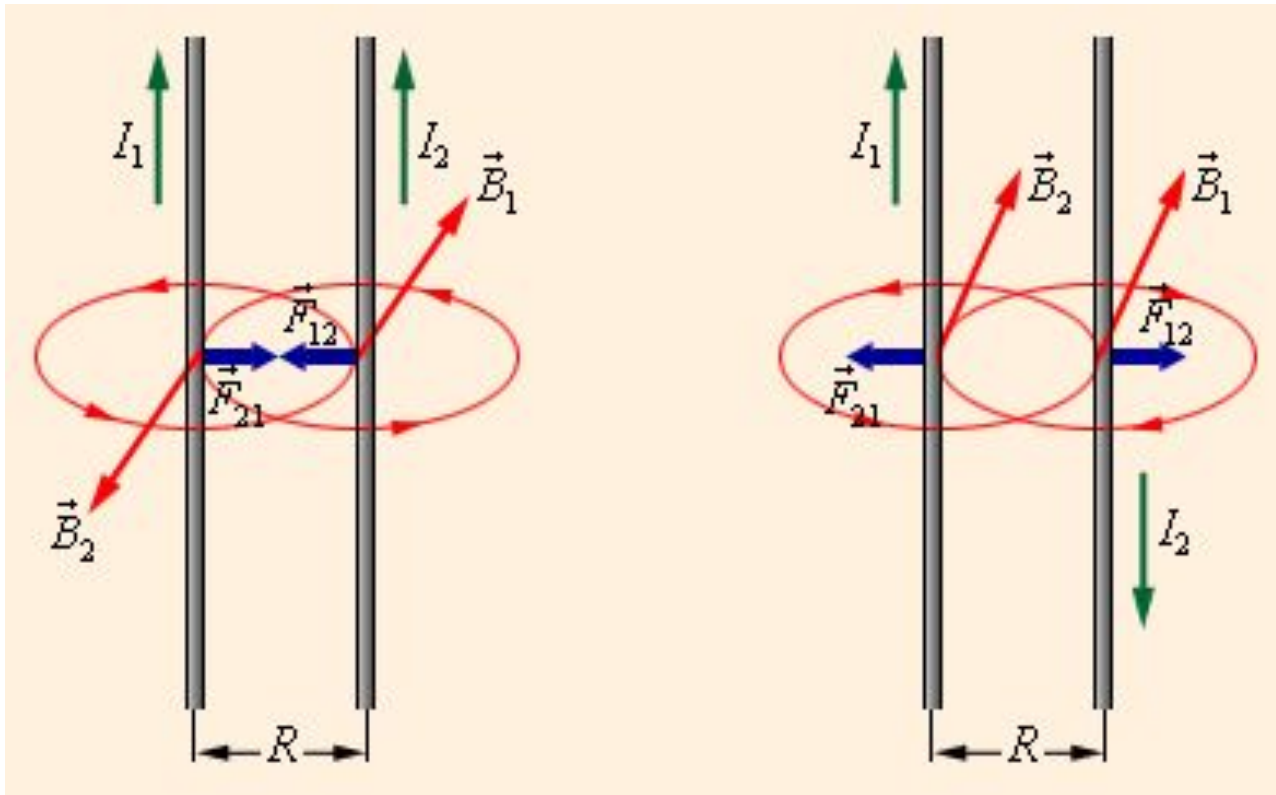
Модуль силы Ампера, действующей на прямолинейный проводник с током, находящийся в однородном магнитном поле:

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

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

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

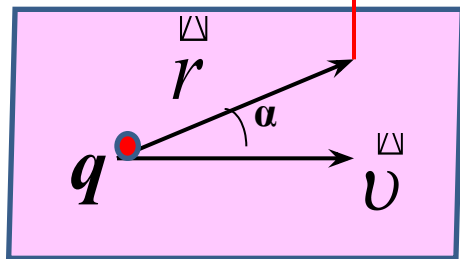
# Магнитное поле движущегося заряда

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;  $\alpha$  – 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.

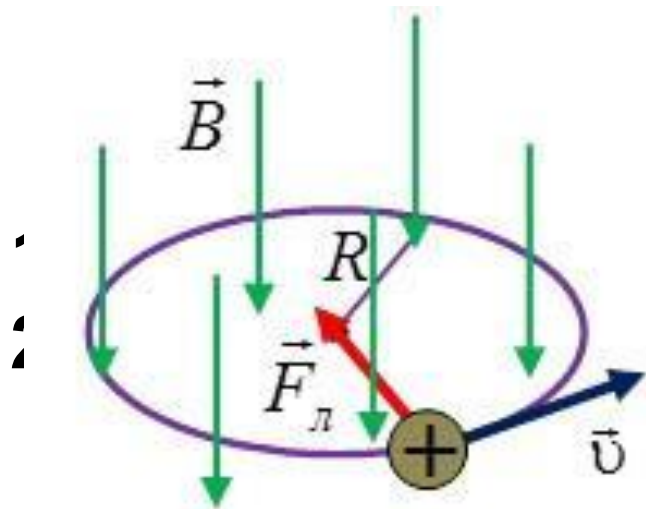
Магнитное поле не действует на заряженную частицу в двух случаях:

- 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:



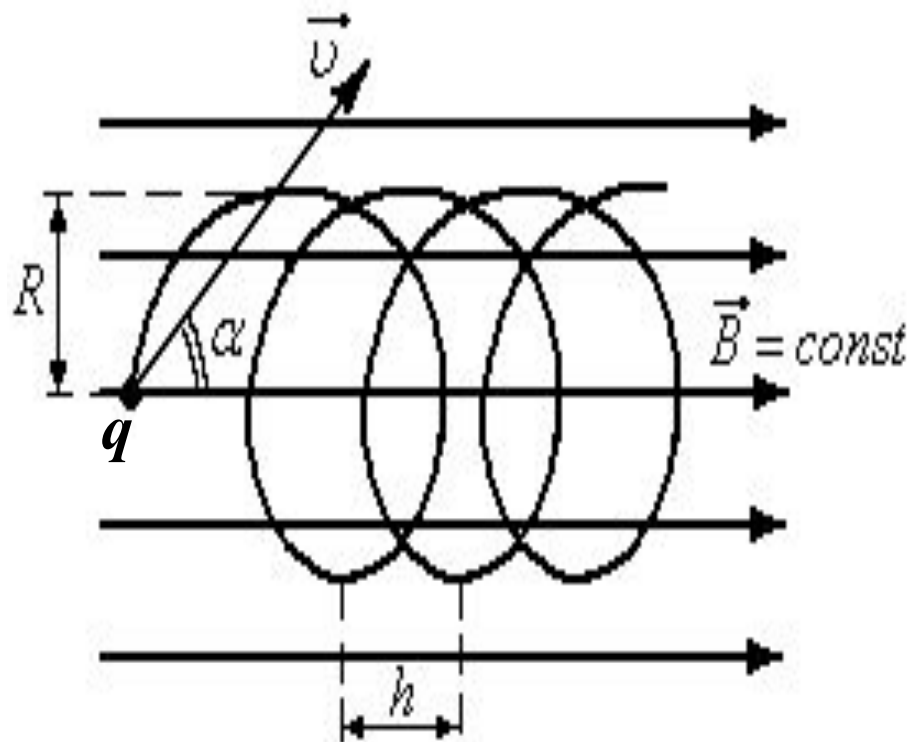
$$\frac{mv^2}{R} = qvB ;$$

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

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

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:



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

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

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  $\alpha$  - 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:

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

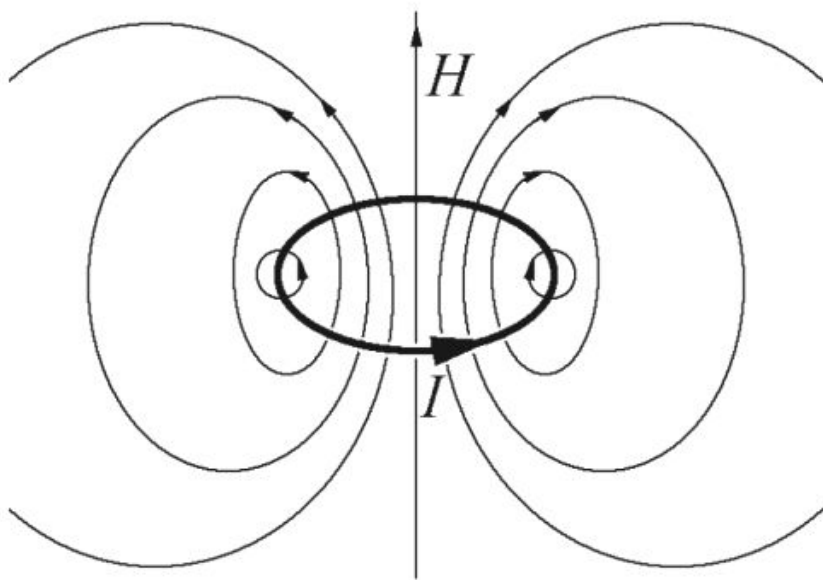
Единицей магнитного потока в системе СИ является **вебер** (Вб).



# Теорема Гаусса для магнитного поля в вакууме

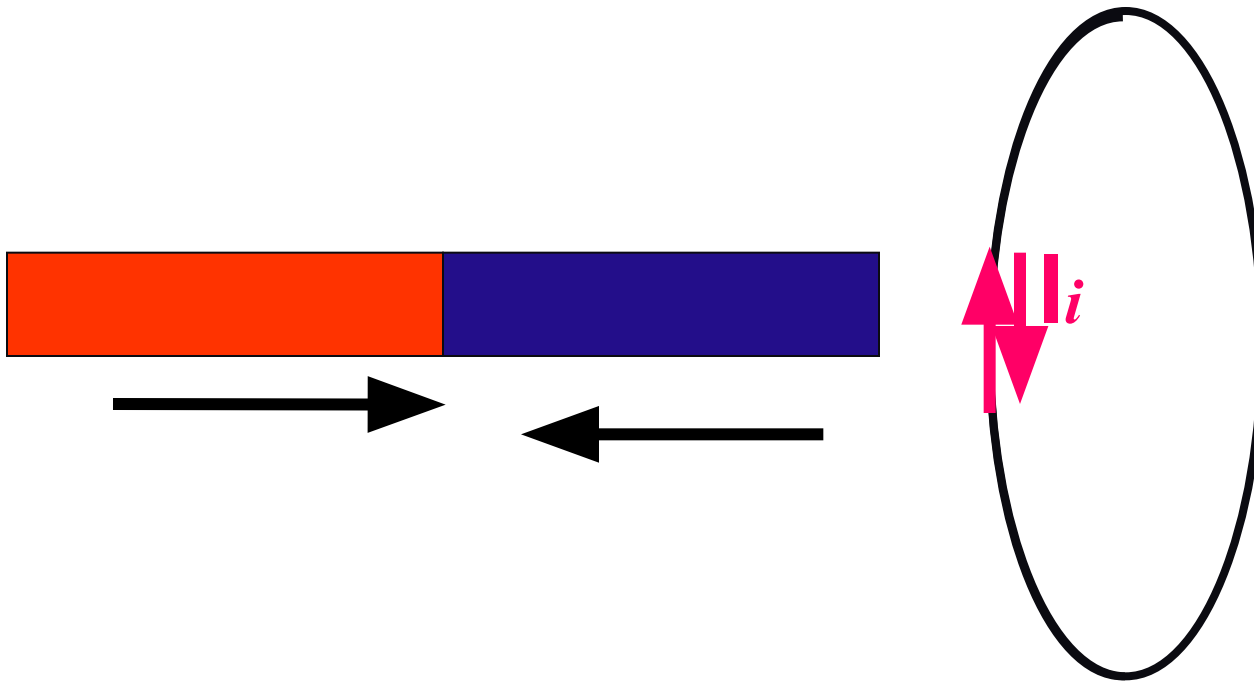
Поток вектора магнитной индукции сквозь любую замкнутую поверхность равен нулю:

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



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  $\mathcal{E}_i$  в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром:

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

Единица ЭДС  $\mathcal{E}_i$  : В (вольт).

Этот закон является **универсальным**: ЭДС  $\mathcal{E}_i$  не зависит от способа изменения магнитного потока.

# Правило Ленца

Направление индукционного тока, а, следовательно, и знак  $\mathcal{E}_i$  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**.

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

Единица индуктивности : Гн (**Генри**).

Индуктивность катушки:

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

где  $N$  – число витков катушки;  
 $l$  – ее длина;  $S$  – 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 :**

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

