

# Лекция №7

## Магнетизм

Факультет природообустройства и строительства

Преподаватель: доцент кафедры теплоэнергетики и физики

Шуткова С.А.

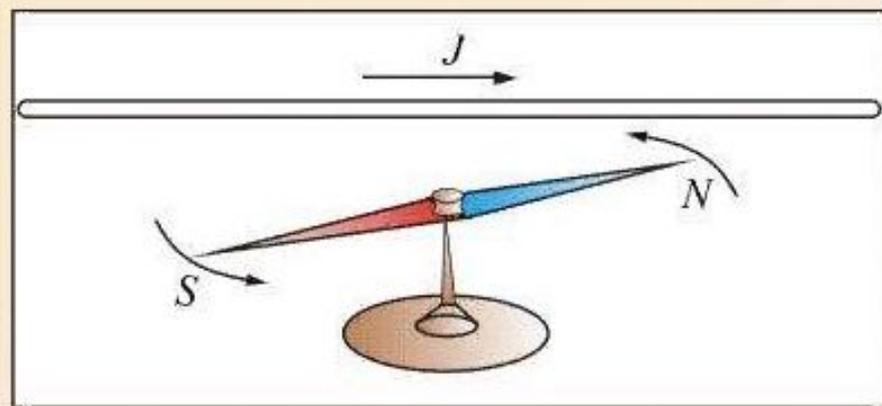
## 1.1. Магнитные взаимодействия

В пространстве, окружающем намагниченные тела, возникает **магнитное поле**.

Помещенная в это поле маленькая **магнитная стрелка** устанавливается в каждой его точке вполне определенным образом, указывая тем самым направление поля.

Тот конец стрелки, который в магнитном поле Земли указывает **на север**, называется **северным**, а противоположный – **южным**.

При отклонении магнитной стрелки от направления магнитного поля, на стрелку действует **механический крутящий момент  $M_{кр}$** , пропорциональный синусу угла отклонения  $\alpha$  и стремящийся повернуть ее вдоль указанного направления.

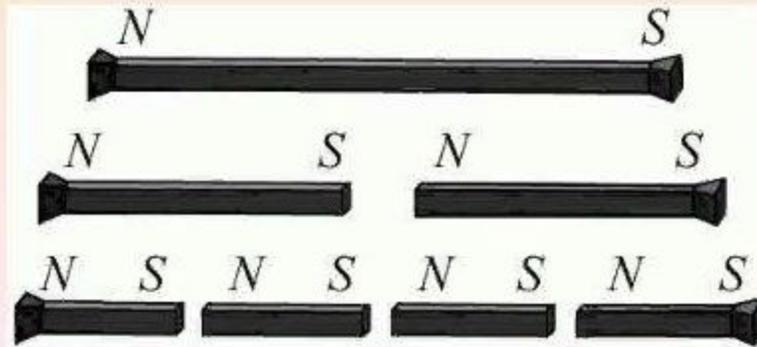


При взаимодействии постоянных магнитов они испытывают **результатирующий момент сил, но не силу**.

Подобно электрическому диполю, постоянный магнит в однородном поле стремится повернуться по полю, но не перемещаться в нем.

Отличие постоянных магнитов от электрических диполей заключается в следующем:

- **Электрический диполь** всегда состоит из зарядов, равных по величине и противоположных по знаку.
- **Постоянный же магнит**, будучи разрезан пополам, превращается в два меньших магнита, каждый из которых имеет и северный и южный полюса.

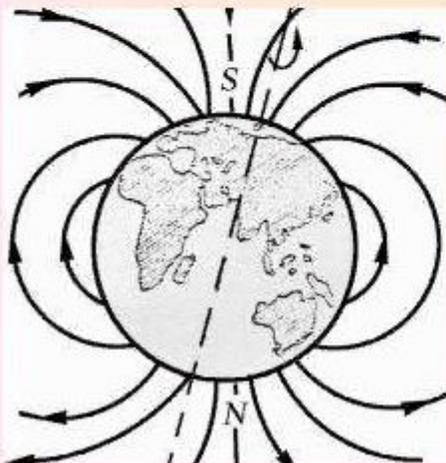


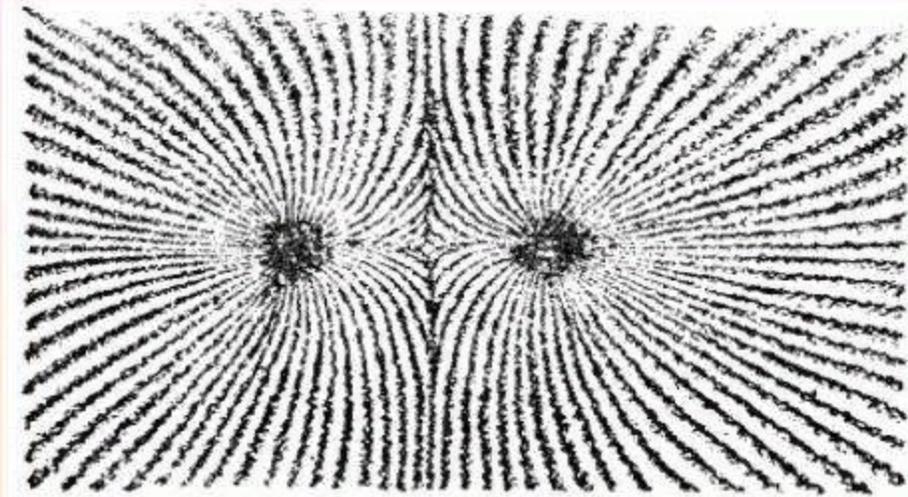


Подводя итоги сведениям о магнетизме, накопленным к **1600 г.**, **английский ученый-физик Уильям Гильберт**

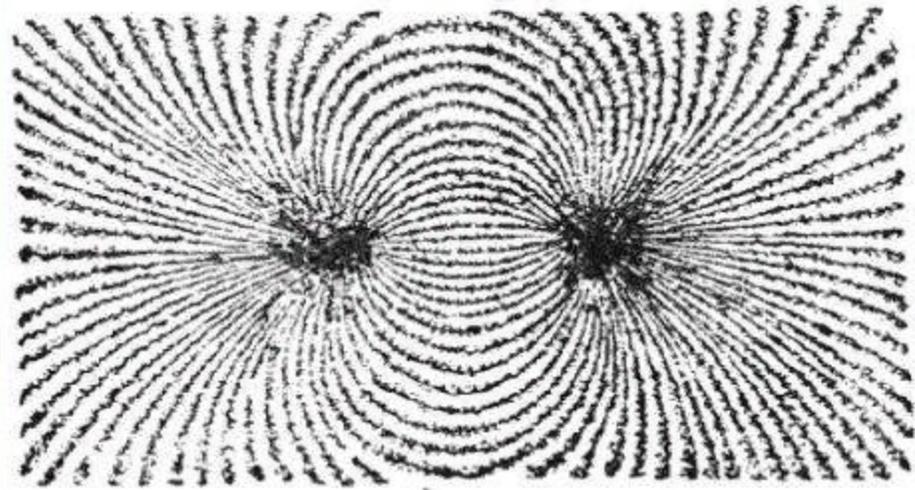
написал труд

**«О магните, магнитных телах и большом магните – Земле»**





Магнитное поле одноименных полюсов.

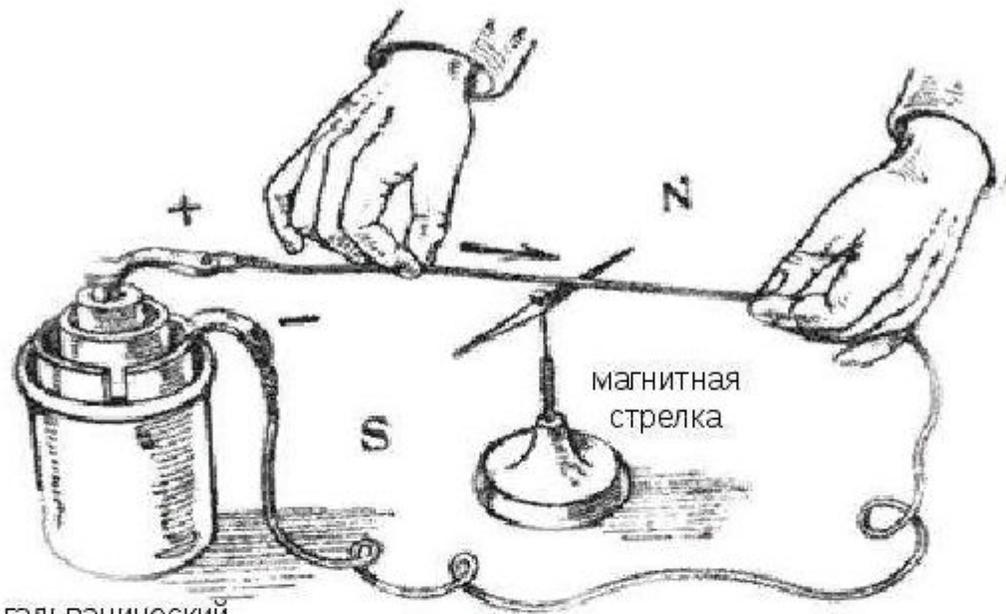


Магнитное поле разноименных полюсов.

В своих трудах У. Гильберт высказал мнение, что, несмотря на некоторое внешнее сходство, *природа электрических и магнитных явлений различна*. Все же, к середине XVIII века, окрепло убеждение о *наличии тесной связи между электрическими и магнитными явлениями*.

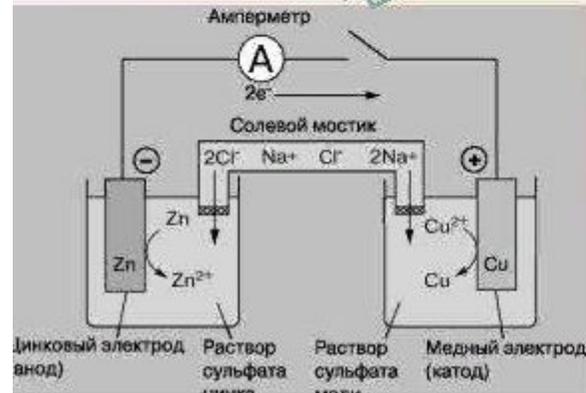


- В 1820 г. Х. Эрстед открыл магнитное поле электрического тока.
- А. Ампер установил законы магнитного взаимодействия токов.
- Ампер объяснил магнетизм веществ существованием молекулярных токов.



гальванический элемент

Опыт Эрстеда.



Самый распространенный вид гальванических элементов - это батарейки

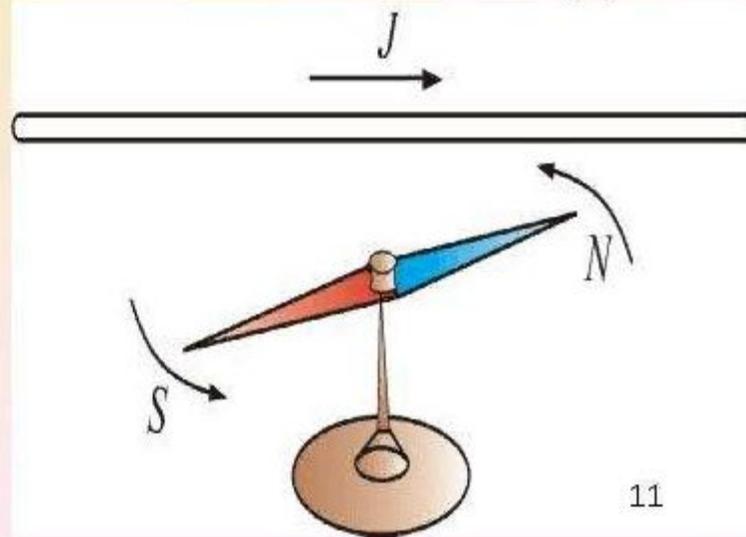


## Открытие Эрстеда.

При помещении магнитной стрелки в непосредственной близости от проводника с током он обнаружил, что при протекании по проводнику тока, стрелка отклоняется; после выключения тока стрелка возвращается в исходное положение (см. рис.).

Из описанного опыта

Эрстед делает **вывод**:  
вокруг прямолинейного  
проводника с током  
есть магнитное поле.



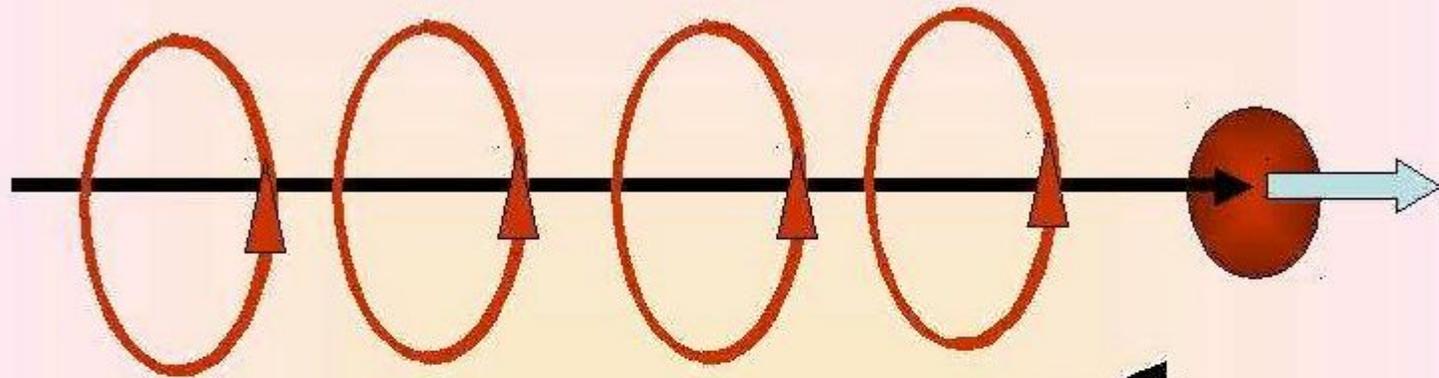
**Общий вывод:** вокруг всякого проводника с током есть магнитное поле.

Но ведь **ток – это направленное движение зарядов.**

Опыты подтверждают: магнитное поле появляется вокруг электронных пучков и вокруг перемещающихся в пространстве заряженных тел.

**Вокруг всякого движущегося заряда помимо электрического поля существует еще и магнитное.**

$$qV = \text{const}$$



Появляется  
магнитное поле

# Правило буравчика



# Правило буравчика



# Правило буравчика



Подобно электрическому полю, оно обладает энергией и, следовательно, массой. Магнитное поле материально. Теперь можно дать следующее определение магнитного поля:

*Магнитное поле – это материя, связанная с движущимися зарядами и обнаруживающая себя по действию на магнитные стрелки и движущиеся заряды, помещенные в это поле.*

Аналогия точечному заряду – **замкнутый плоский контур с током (рамка с током)**, линейные размеры которого малы по сравнению с расстоянием до токов, образующих магнитное поле.

**Основное свойство магнитного поля** – способность действовать на движущиеся электрические заряды с определенной силой.

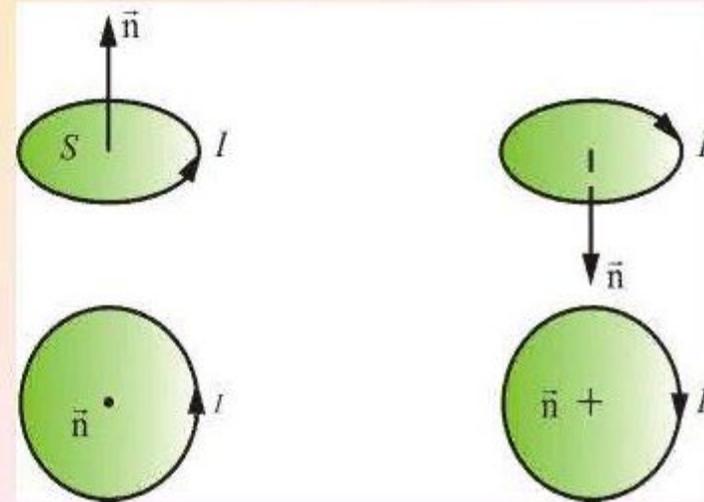
В магнитном поле контур с током будет ориентироваться определенным образом.

Ориентацию контура в пространстве будем характеризовать направлением нормали, которое определяется

*правилом правого винта*

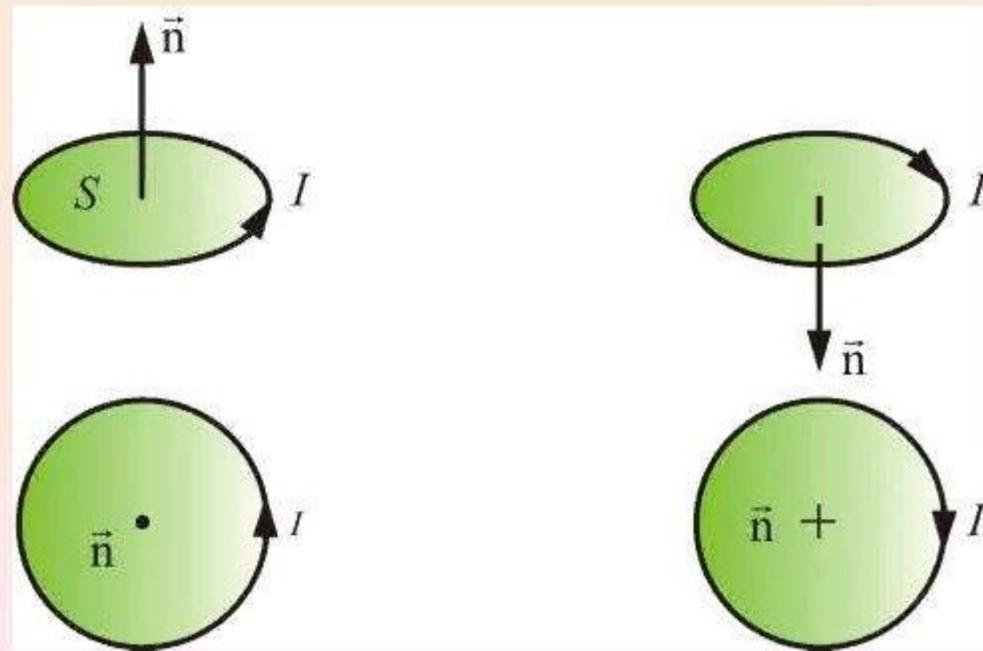
*или «правилом буравчика»:*

За положительное направление нормали принимается направление поступательного движения винта, головка которого вращается в направлении тока, текущего в рамке



Контур ориентируется в данной точке поля только одним способом.

За направление магнитного поля в данной точке принимается положительное направление нормали.



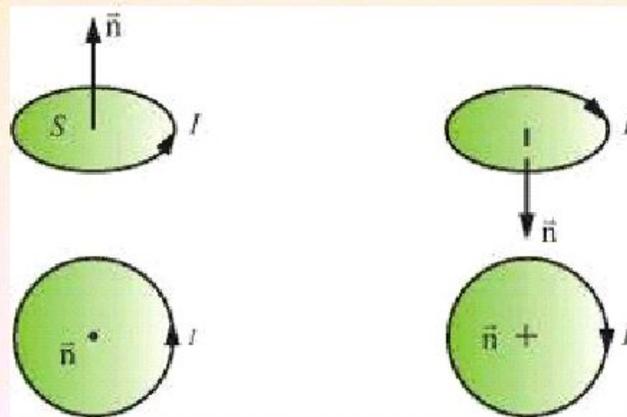
Вращающий момент прямо пропорционален величине тока  $I$ , площади контура  $S$  и синусу угла между направлением магнитного поля и нормали  $\vec{n}$

$$M \sim IS \sin(\vec{n}, \vec{B}),$$

здесь  $M$  – *вращающий момент*, или *момент силы*,

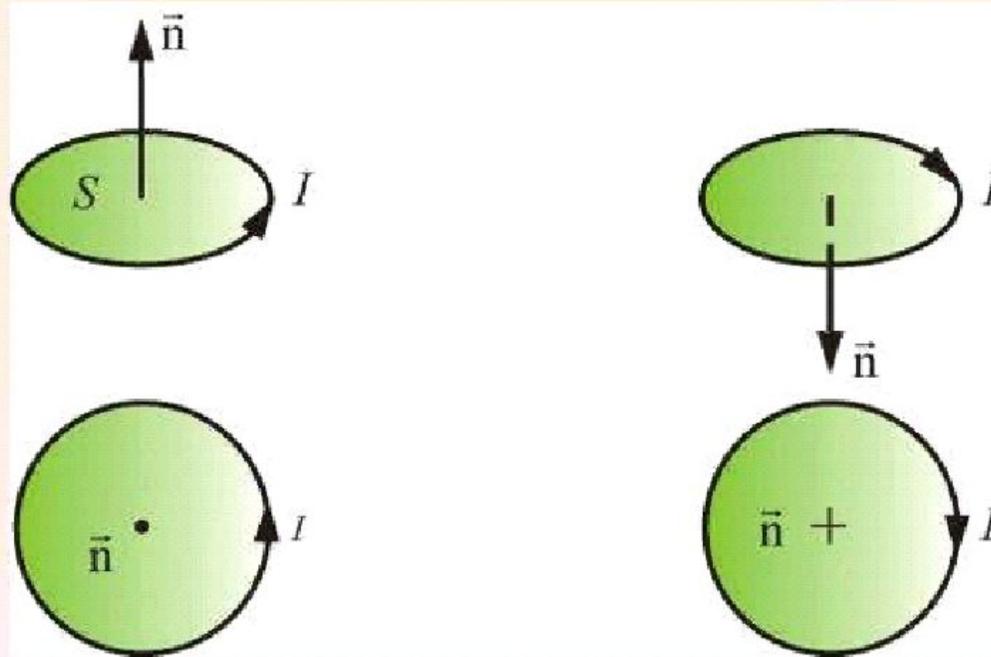
$IS = P_m$  – *магнитный момент* контура (аналогично

$ql = P$  – *электрический момент* диполя).



*Направление вектора магнитного момента совпадает с положительным направлением нормали:*

$$\vec{P}_m = P_m \vec{n}.$$



## Отношение момента силы к магнитному моменту $\frac{M}{P_m}$

для данной точки магнитного поля будет одним и тем же и может служить характеристикой магнитного поля, названной **магнитной индукцией**:

$$B = \frac{M}{P_m \sin(\vec{n}, \vec{B})}$$

$$\vec{B} = \frac{\vec{M}_{\max}}{\vec{P}_m},$$

$\vec{B}$  – **вектор магнитной индукции, совпадающий с нормалью  $\vec{n}$**

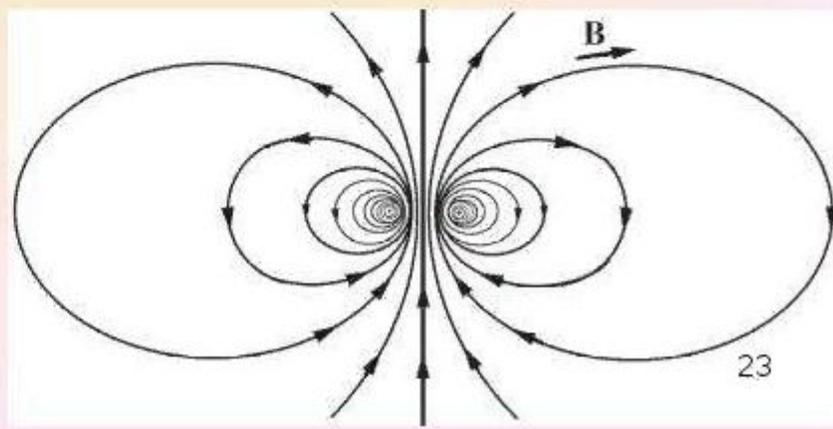
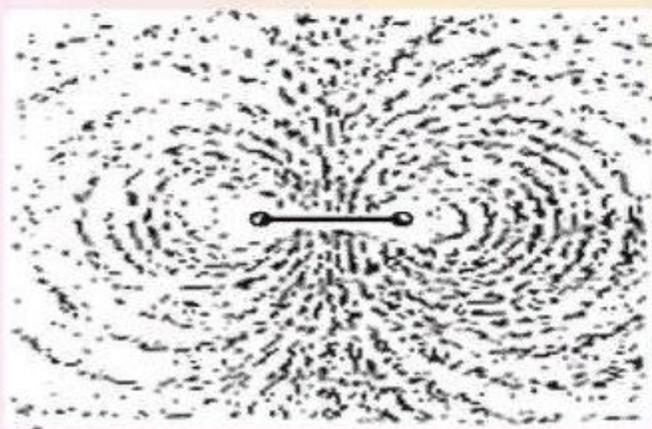
По аналогии с электрическим полем

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

**Магнитная индукция  $B$  характеризует силовое действие магнитного поля на ток** (аналогично,  $E$  характеризует силовое действие электрического поля на заряд).

$B$  – силовая характеристика магнитного поля, ее можно изобразить с помощью **магнитных силовых линий**.

Поскольку  $M$  – момент силы и  $P_m$  – магнитный момент являются характеристиками вращательного движения, то можно предположить, что **магнитное поле – вихревое**.

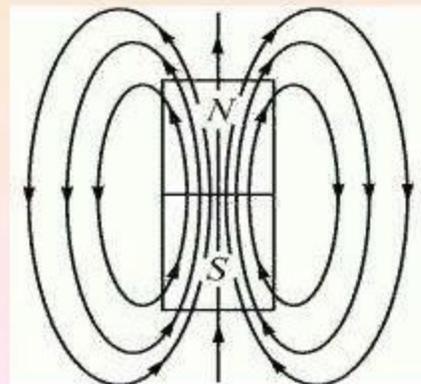
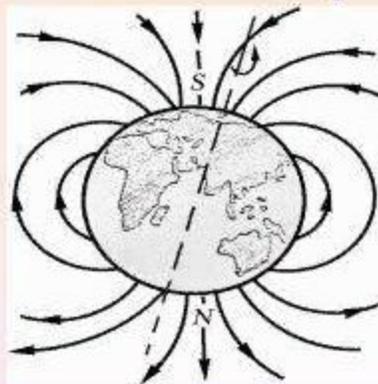


Условились, за направление  $\mathbf{B}$  принимать направление северного конца магнитной стрелки.

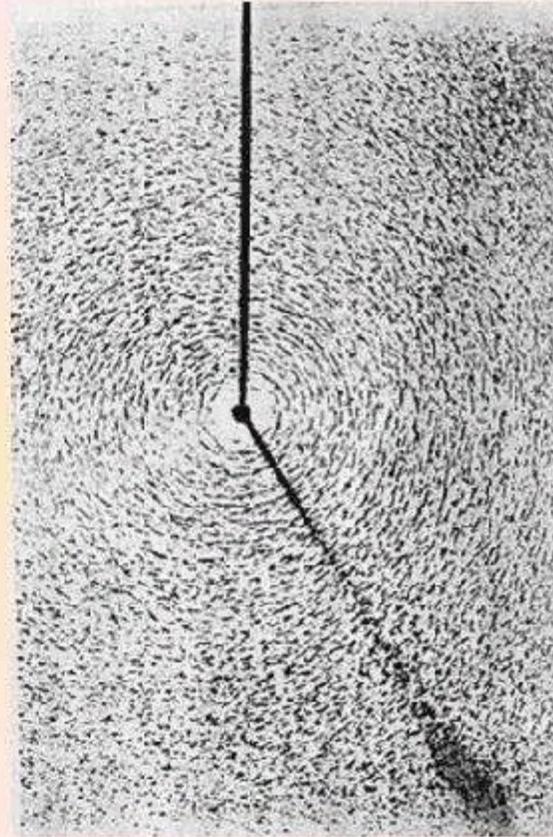
*Силовые линии выходят из северного полюса, а входят, соответственно, в южный полюс магнита.*

Для графического изображения полей удобно пользоваться силовыми линиями (линиями магнитной индукции).

*Линиями магнитной индукции* называются кривые, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора  $\mathbf{B}$  в этой точке.



Конфигурацию силовых линий  
легко установить с помощью  
мелких железных опилок  
которые намагничиваются в  
исследуемом магнитном поле и  
ведут себя подобно маленьким  
магнитным стрелкам  
(поворачиваются вдоль силовых  
линий).



## 1.2. Закон Био–Савара–Лапласа

В 1820 г. французские физики Жан Батист **Био** и Феликс **Савар**, провели исследования магнитных полей токов различной формы. А французский математик Пьер **Лаплас** обобщил эти исследования.

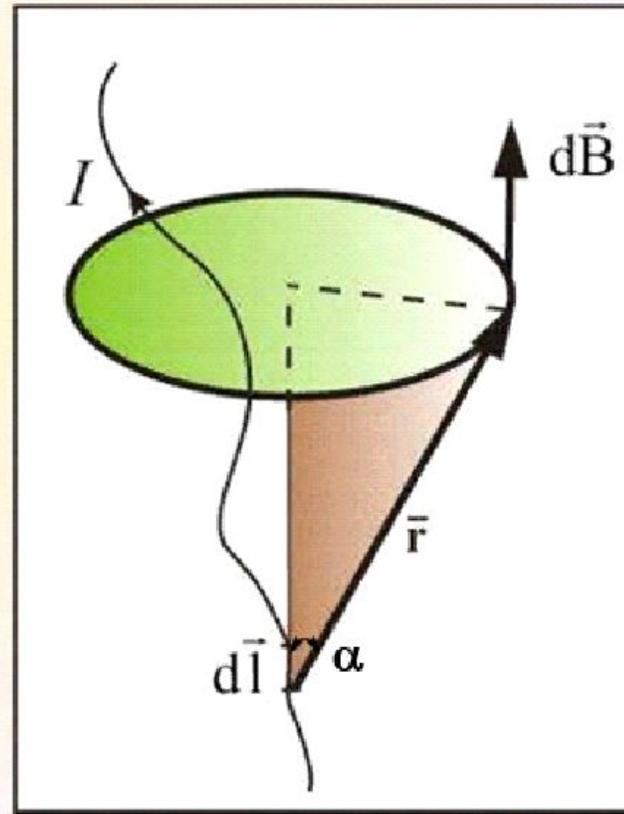
## Закон Био–Савара–Лапласа

Элемент тока длины  $d\vec{l}$  создает поле с магнитной индукцией:

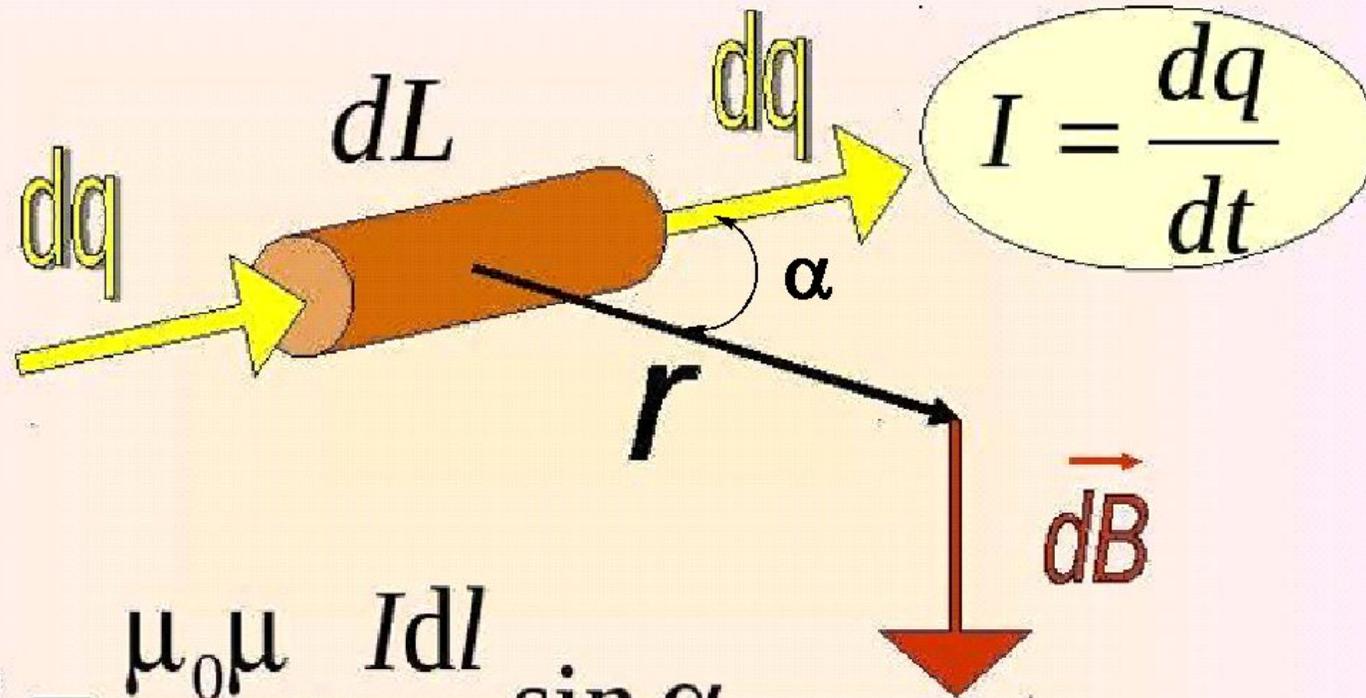
$$dB = k \frac{Idl}{r^2}$$

или в векторной форме:

$$\vec{dB} = k \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}.$$



## Поле элемента проводника с током



$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \cdot \frac{Idl}{r^2} \sin \alpha$$

Закон Био–Савара–Лапласа устанавливает величину и направление вектора  $d\mathbf{B}$  в произвольной точке магнитного поля, созданного проводником  $d\mathbf{l}$  с током  $I$ .

Модуль вектора определяется соотношением:

$$dB = k \frac{Idl \sin \alpha}{r^2},$$

где  $\alpha$  - угол между  $d\mathbf{l}$  и  $\mathbf{r}$ ;  $k$  – коэффициент пропорциональности.

Закон Био–Савара–Лапласа для **вакуума** можно записать так:

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

где  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$  – магнитная постоянная.

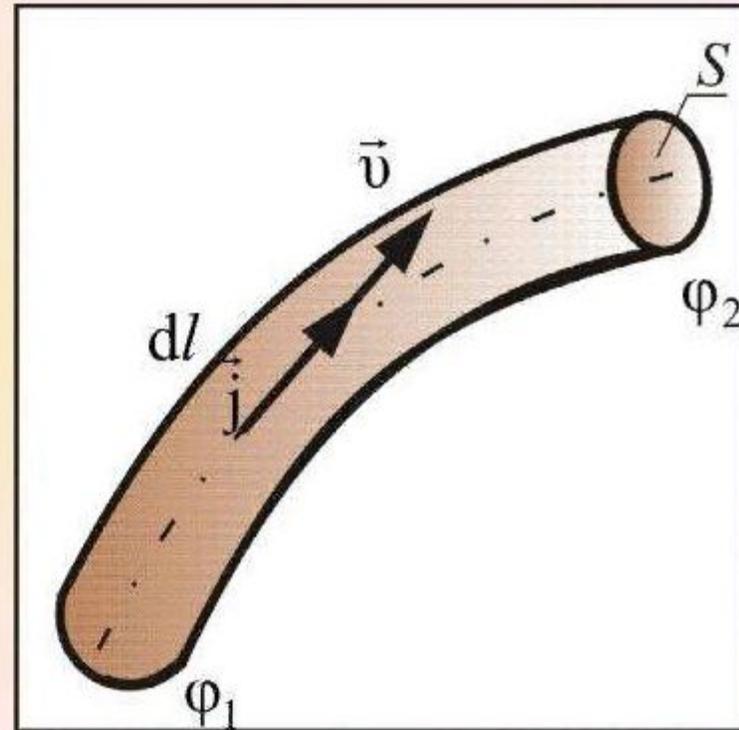
Магнитное поле любого тока может быть вычислено как векторная сумма (**суперпозиция**) полей, создаваемых отдельными элементарными участками тока:

$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i.$$

### 1.3. Магнитное поле движущегося заряда

*Электрический ток –  
упорядоченное  
движение зарядов, а  
магнитное поле  
порождается  
движущимися  
зарядами.*

Под свободным  
движением заряда  
понимается его движение  
с постоянной скоростью



*Индукция магнитного поля, создаваемого одним зарядом, движущимся со скоростью  $v$ :*

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

В скалярной форме **индукция магнитного поля одного заряда** в вакууме определяется по формуле:

$$B = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{q v \sin(\nu, r)}{r^2}.$$

Эта формула справедлива при скоростях заряженных частиц

$$v \ll c$$

## 1.4. Напряженность магнитного поля

*Магнитное поле – это одна из форм проявления электромагнитного поля, особенностью которого является то, что **это поле действует только на движущиеся частицы и тела, обладающие электрическим зарядом, а также на намагниченные тела.***

Магнитное поле создается проводниками с током, движущимися электрическими заряженными частицами и телами, а также переменными электрическими полями.

**Силовой характеристикой магнитного поля служит вектор магнитной индукции** поля, созданного одним зарядом в вакууме:

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

# Физический смысл магнитной индукции

$$|\vec{B}| = \frac{|F|}{qV \sin \alpha}$$

$$Tл = Н.с / (Кл.м)$$

**Напряженностью магнитного поля**  
называют векторную величину  $\vec{H}$ ,  
характеризующую магнитное поле и  
определяемую следующим образом:

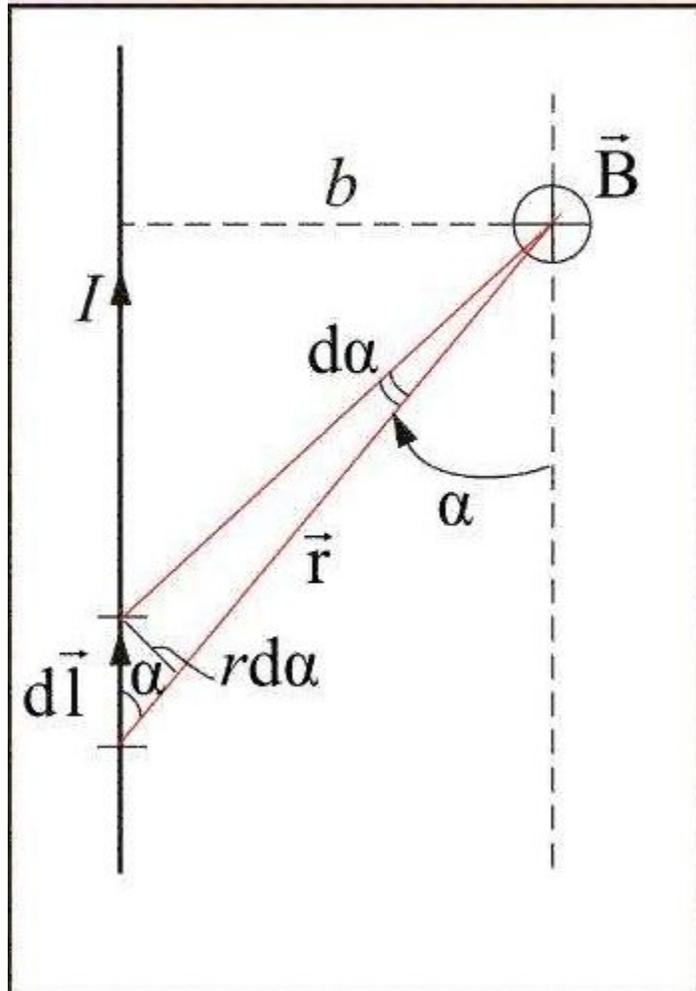
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

Напряженность магнитного поля заряда  $q$ ,  
движущегося в вакууме равна:

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi} \frac{q[\vec{v}, \vec{r}]}{r^3}$$

**Закон Био-Савара-  
Лапласа для  $\vec{H}$**

## 1.5. Магнитное поле прямого тока



Рассмотрим  
магнитное поле  
прямого тока

Пусть точка, в которой определяется магнитное поле, находится на расстоянии  $b$  от провода. Из рис. 1.6 видно, что:

$$r = \frac{b}{\sin\alpha}; \quad dl = \frac{rd\alpha}{\sin\alpha} = \frac{bd\alpha}{\sin^2\alpha}.$$

Подставив найденные значения  $r$  и  $dl$  в закон Био–Савара–Лапласа, получим:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Ib d\alpha \sin\alpha \sin^2\alpha}{\sin^2\alpha \cdot b^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I}{b} \sin\alpha d\alpha.$$

Для **конечного проводника** угол  $\alpha$  изменяется от  $\alpha_1$  до  $\alpha_2$ . Тогда:

$$B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi b} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin\alpha d\alpha = \frac{\mu_0 I}{4\pi b} (\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2).$$

(1.5.1)

Для **бесконечно длинного проводника**  $\alpha_1 = 0$ ,  
а  $\alpha_2 = \pi$ , тогда:

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

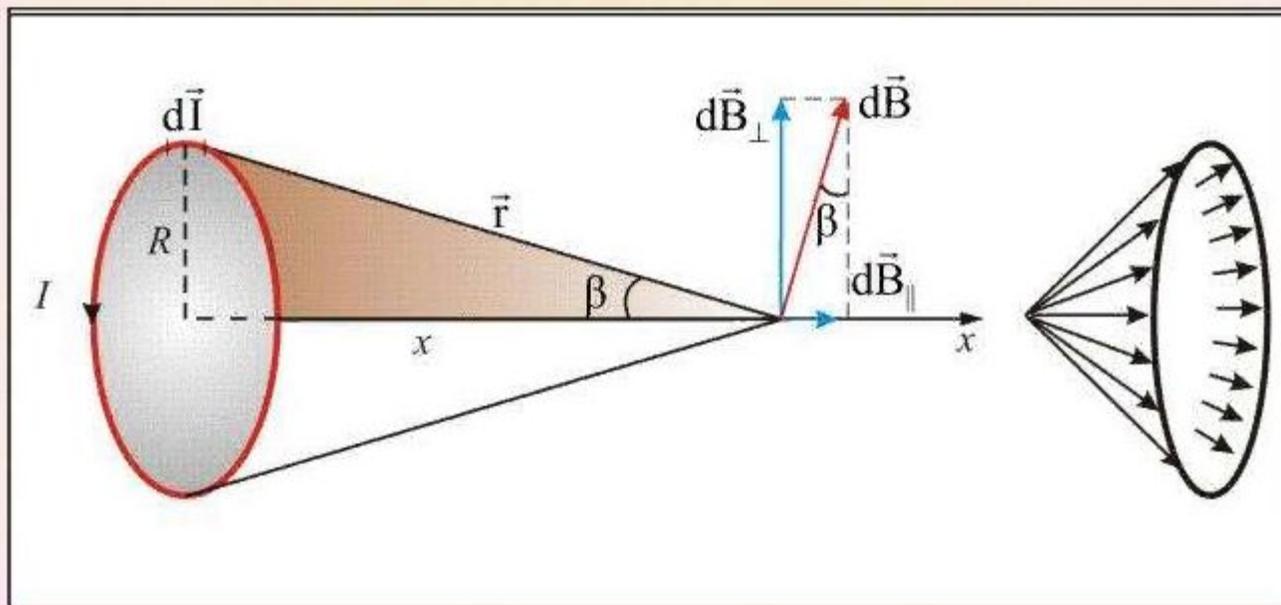
или

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

(1.5.2)

## 1.6. Магнитное поле кругового тока

Рассмотрим поле, создаваемое током  $I$ , текущим по тонкому проводу, имеющему форму окружности радиуса  $R$ .



$$\sin\beta = \frac{R}{r}$$

$$dB_{\parallel} = dB \sin\beta$$

т.к. угол между  $dl$  и  $r$   $\alpha$  – прямой, то  $\sin\alpha = 1$ ,

тогда получим:

$$dB_{\parallel} = dB \frac{R}{r} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl}{r^2} \frac{R}{r}.$$

(1.6.1)

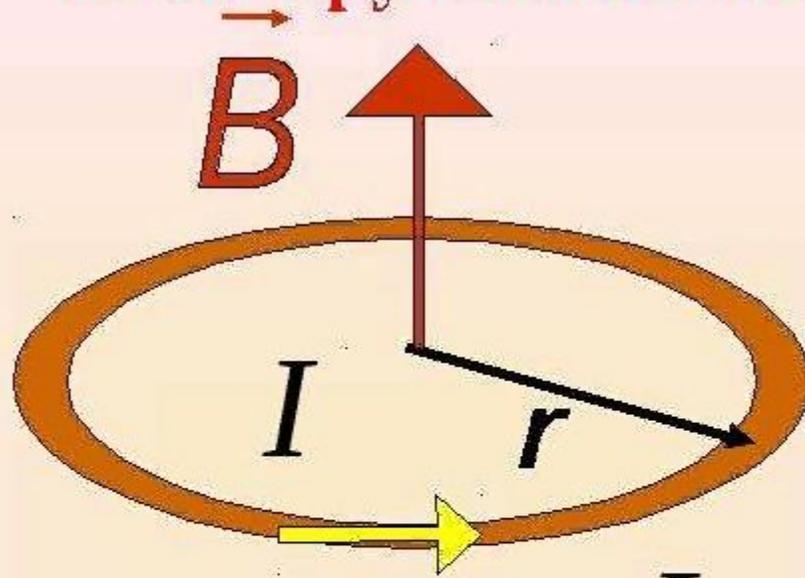
Подставив в (1.6.1)  $r = \sqrt{R^2 + x^2}$  и, проинтегрировав по всему контуру  $l = 2\pi R$  получим выражение для нахождения **магнитной индукции кругового тока:**

$$B = \int_0^{2\pi R} dB_{\parallel} = \frac{\mu_0 IR}{4\pi r^3} \int_0^{2\pi R} dl = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + x^2)^{3/2}}. \quad (1.6.2)$$

При  $x = 0$ , получим **магнитную индукцию в центре кругового тока:**

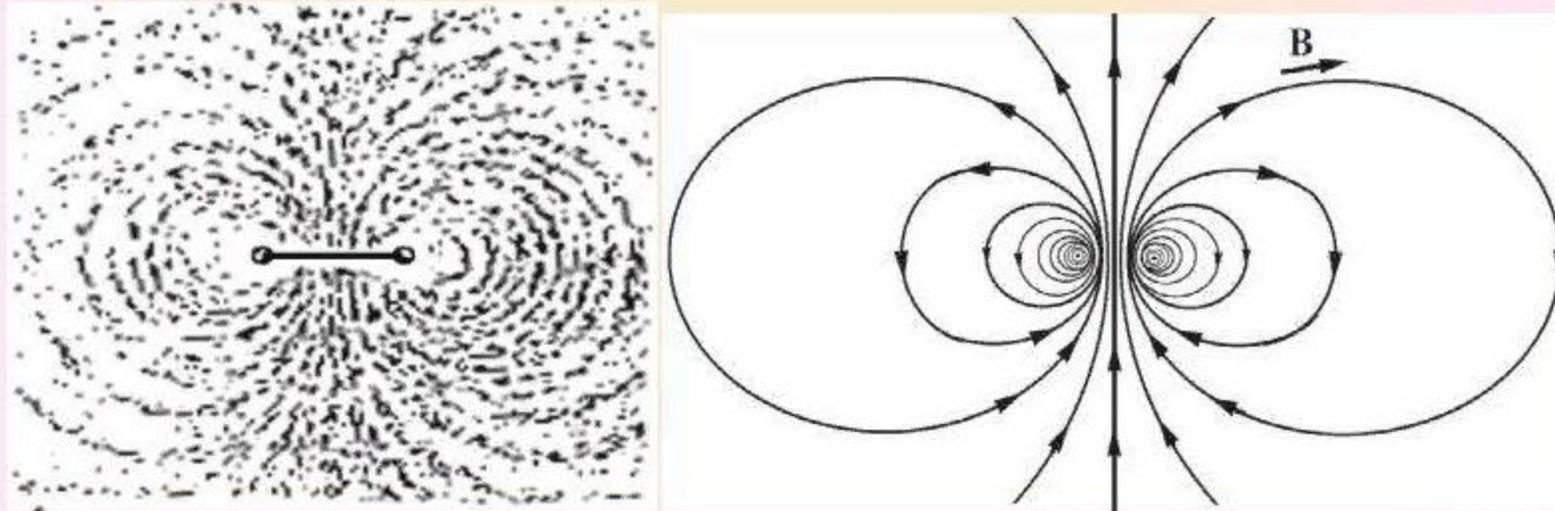
$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (1.6.3)$$

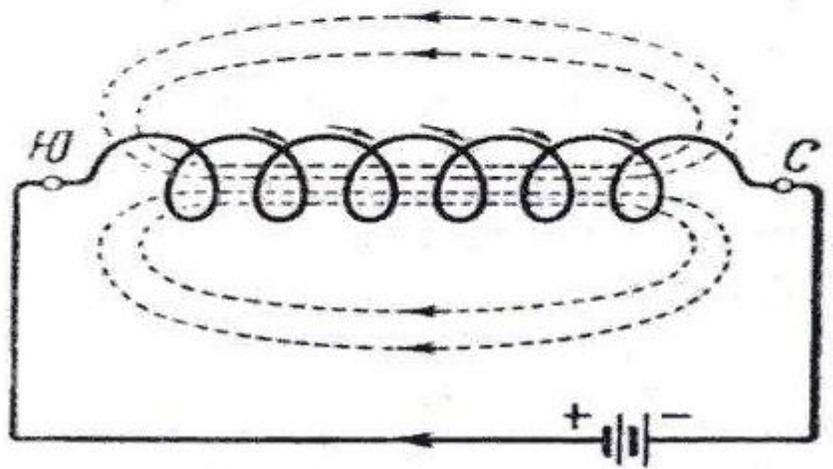
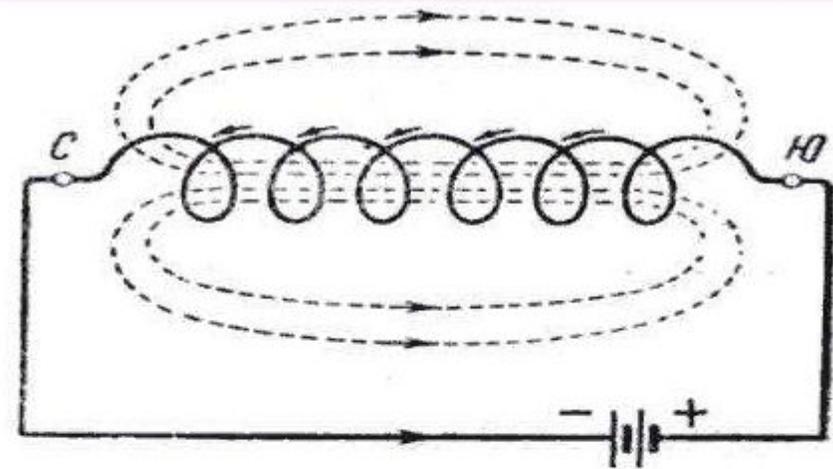
## Поле кругового тока



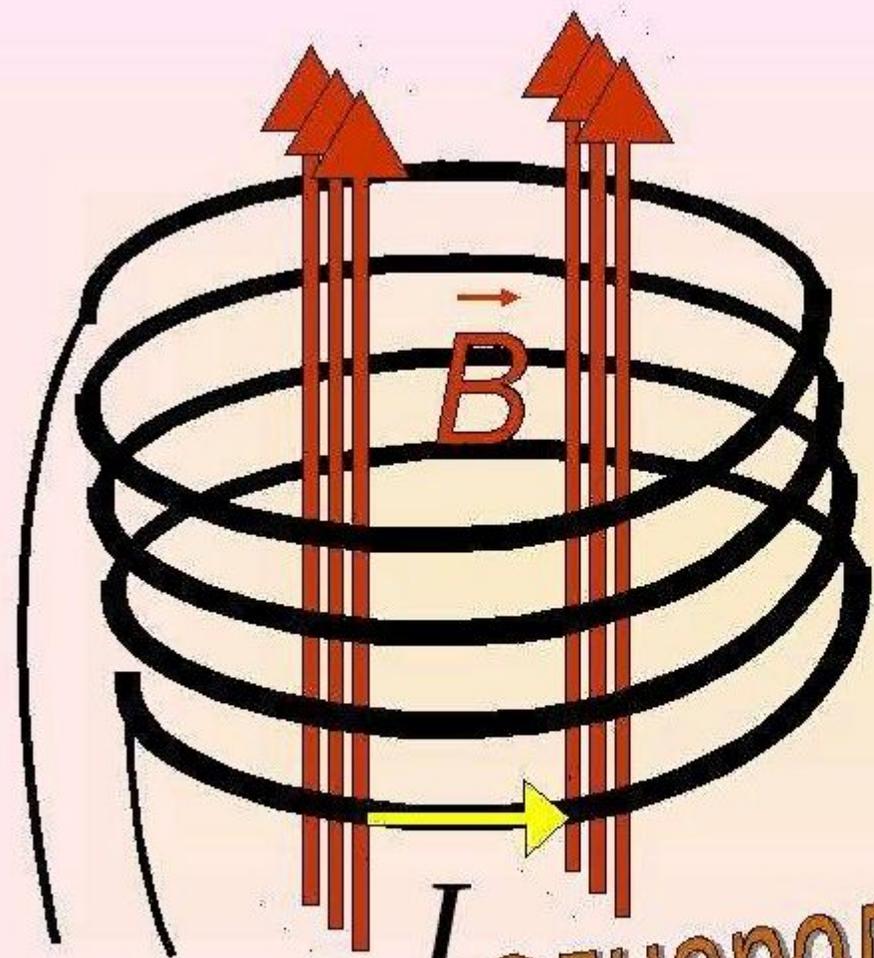
$$B_0 = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I}{r}$$

Силловые линии магнитного поля кругового  
тока хорошо видны в опыте с железными  
опилками ( см. рис.).





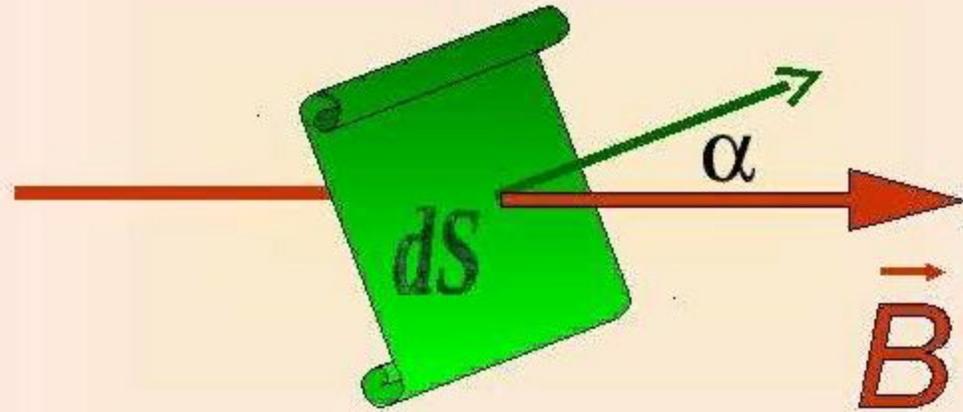
Магнитное поле  
спирали



Поле  
соленоида

однородное поле

# Определение потока вектора магнитной индукции



$$d\Phi = B dS \cos \alpha$$

## 1.7. Теорема Гаусса для вектора магнитной индукции

*Поток вектора через замкнутую поверхность должен быть равен нулю.*

Таким образом:

$$\Phi_B = \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (1.7.1)$$

*Это теорема Гаусса для  $\Phi_B$  (в интегральной форме): **поток вектора магнитной индукции через любую замкнутую поверхность равен нулю.***

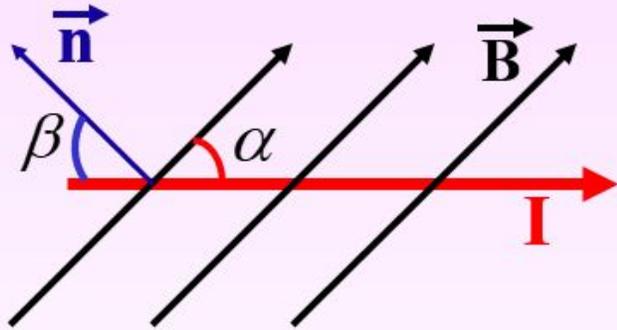
**В природе нет магнитных зарядов – источников магнитного поля, на которых начинались и заканчивались бы линии магнитной индукции.**

Заменив поверхностный интеграл в (1.7.1) объемным, получим:

$$\int_V \nabla B dV = 0 \quad (1.7.2)$$

где  $\nabla = \left( \frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z} \right)$  – оператор Лапласа.

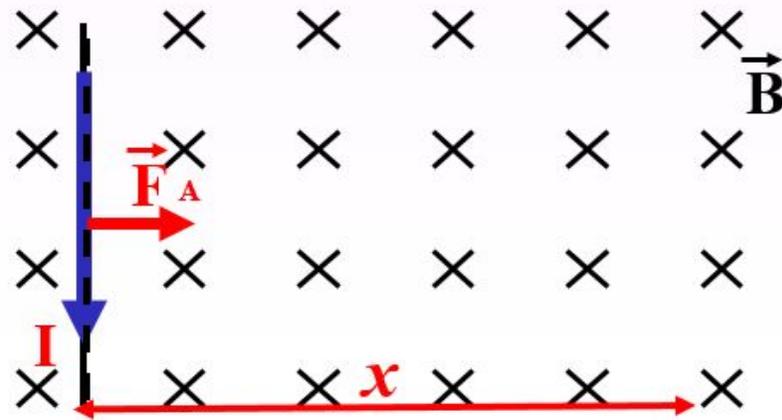
# Сила Ампера



**Сила Ампера** – сила, с которой магнитное поле действует на помещенный в него проводник с током.

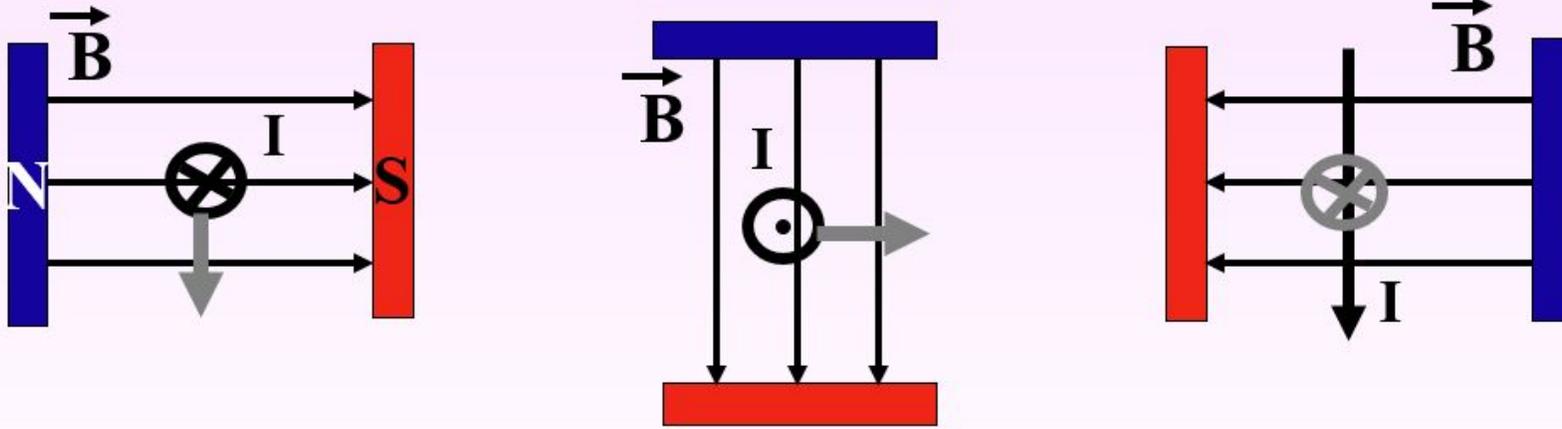
$$F_A = F_{A_{\max}} = IBl \quad \text{если } \alpha = 90^\circ (\beta = 0^\circ)$$

$$F_A = 0 \quad \text{если } \alpha = 0^\circ (\beta = 90^\circ)$$



$$A = IBlx$$

# Сила Ампера

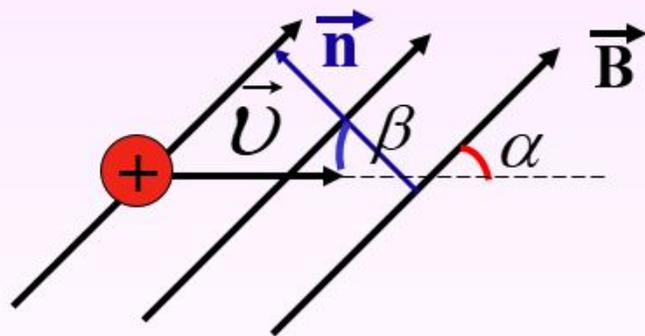
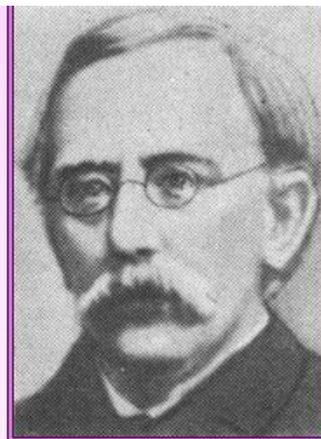


## **Правило левой руки:**

если расположить левую руку так, чтобы линии индукции входили в ладонь перпендикулярно к ней, а четыре вытянутых пальца были направлены по току, то отставленный большой палец покажет направление силы, действующей на проводник.

# Сила Лоренца

**Сила Лоренца** – сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся заряженную частицу.



$$F_{Л} = qvB \sin \alpha$$

$$F_{Л} = qvB \cos \beta$$

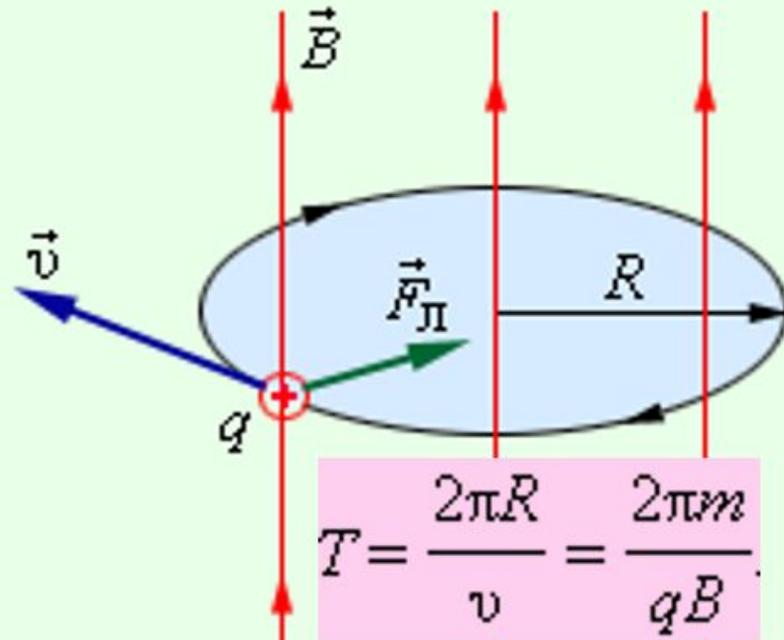
$$F_{Л} = 0 \quad \text{если} \quad \alpha = 0^{\circ} \quad (\beta = 90^{\circ})$$

$$F_{Л} = F_{Л \max} = qvB \quad \text{если} \quad \alpha = 90^{\circ} \quad (\beta = 0^{\circ})$$

# Сила Лоренца

## Направление силы Лоренца,

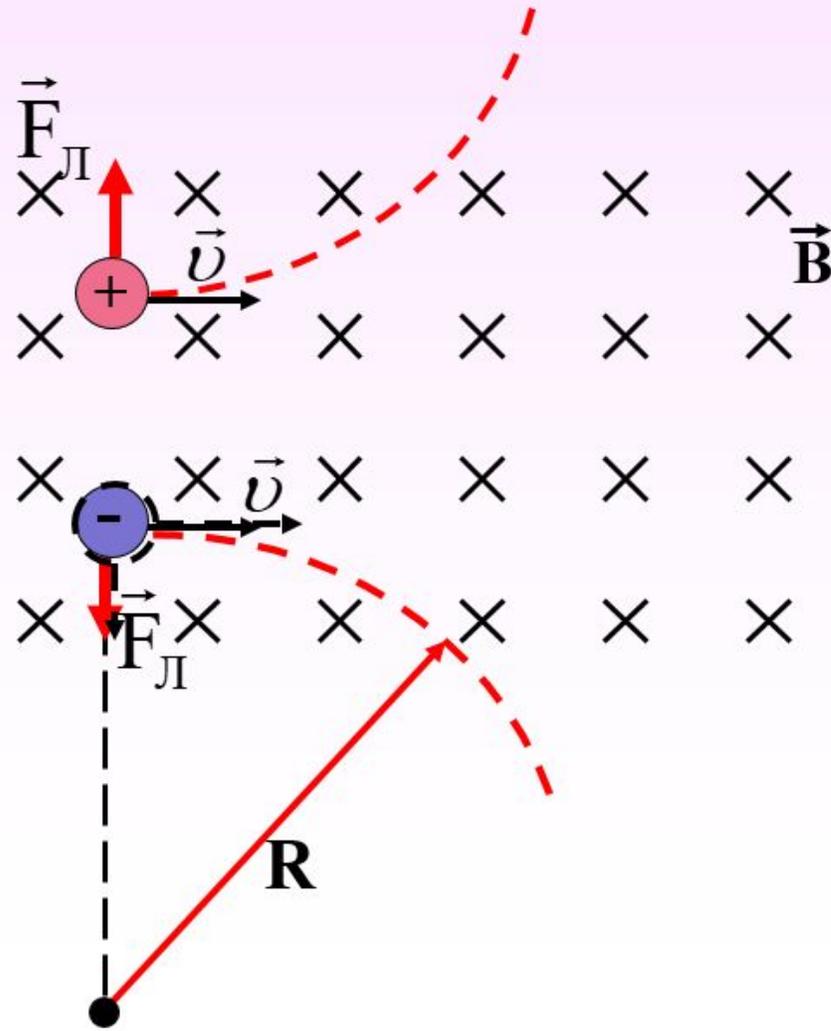
действующей на заряженную частицу, можно определить **по правилу левой руки**: если расположить левую руку так, чтобы линии индукции входили в ладонь перпендикулярно к ней, а четыре вытянутых пальца были направлены по движению положительно заряженной частицы (против движения отрицательно заряженной), то отставленный большой палец покажет направление действующей на частицу силы.



Круговое движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

- При движении заряженной частицы в магнитном поле **сила Лоренца работы не совершает.**
- **Период обращения** частицы в однородном магнитном поле

# Сила Лоренца



$$F_L = qvB$$

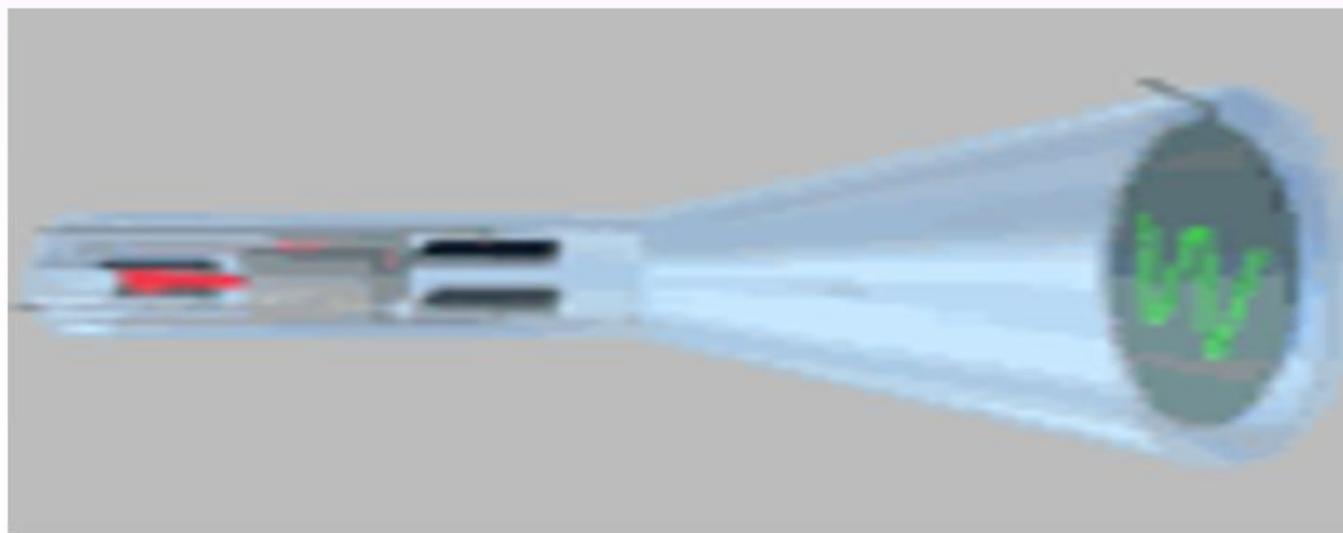
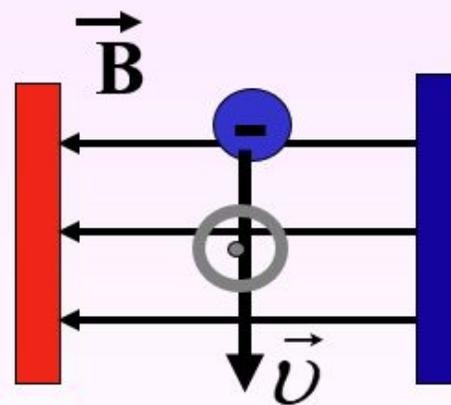
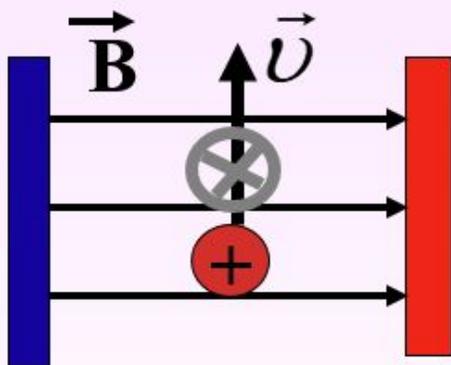
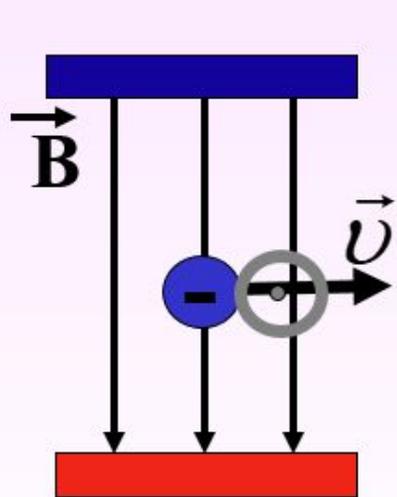
$$F_L = ma_y$$

$$a_y = \frac{v^2}{R}$$

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

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

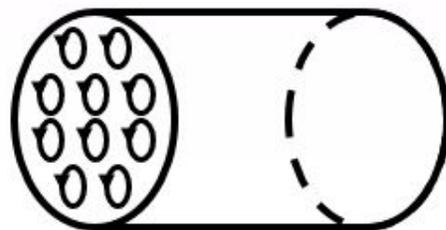
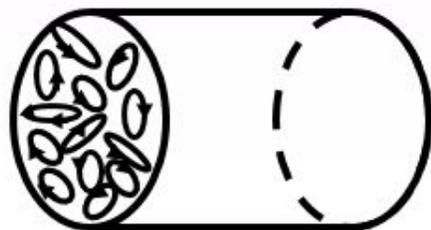
# Сила Лоренца



# Магнитные свойства вещества

Ампер объяснил магнетизм веществ существованием молекулярных токов.

**Гипотеза Ампера** - магнитные свойства тела можно объяснить циркулирующими внутри него токами.

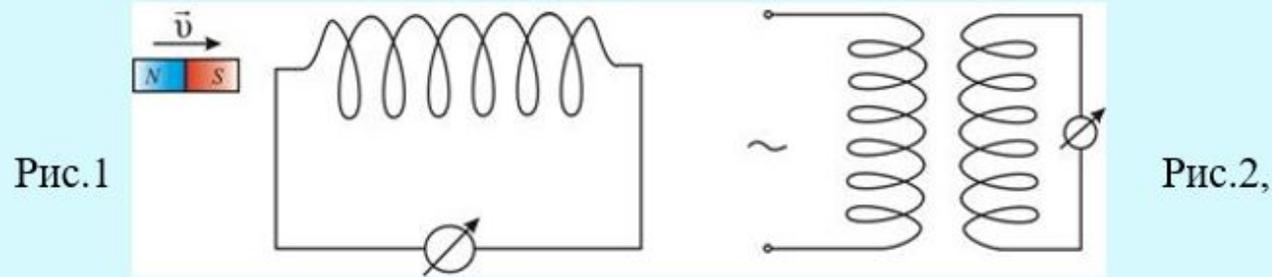


# Магнитные свойства вещества

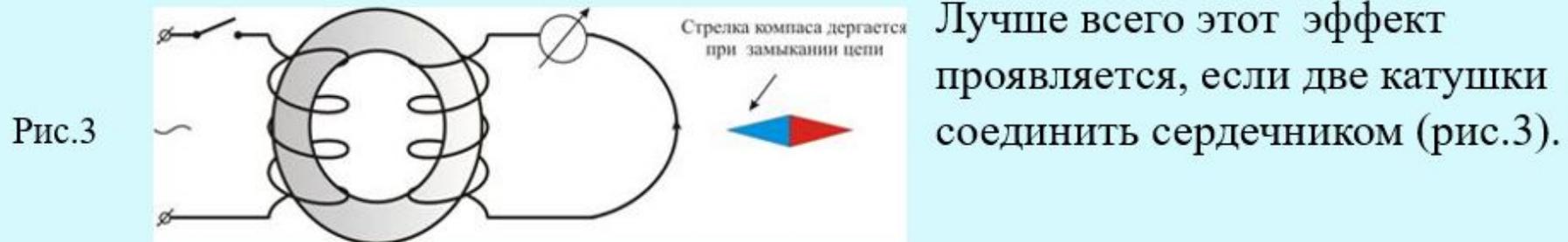
<i>вид вещества</i>	<i>ферромагнетики</i>	<i>парамагнетики</i>	<i>диамагнетики</i>
<i>свойства</i>	<i>Большое усиление магнитного поля</i>	<i>Малое усиление магнитного поля</i>	<i>Малое ослабление магнитного поля</i>
<i>маг. прониц.</i>	$\mu \gg 1$	$\mu > 1$	$\mu < 1$
<i>температурная зависимость</i>	<i><math>\mu</math> уменьшается с повышением температуры. (При достижении температуры Кюри магнитные свойства не проявляются).</i>	<i><math>\mu</math> уменьшается с повышением температуры</i>	<i><math>\mu</math> не зависит от температуры</i>
<i>примеры</i>	<i>железо, кобальт, никель</i>	<i>алюминий, платина, кислород</i>	<i>вода, висмут, поваренная соль</i>

## Опыты Фарадея. Индукционный ток

Рассмотрим классические опыты Фарадея, с помощью которых было обнаружено явление электромагнитной индукции



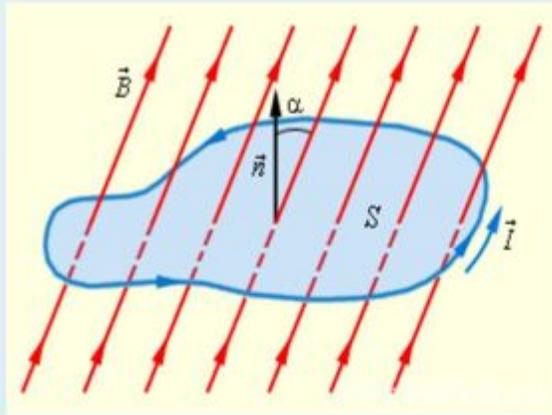
Если подносить постоянный магнит к катушке или относить от нее (рис.1), то в катушке возникнет электрический ток. Отклонение стрелки гальванометра тем больше, чем больше скорость движения магнита относительно катушки. Подобное происходит с двумя близко расположенными катушками (рис.2): если к одной из них подключить источник переменного тока, то в другой также возникнет переменный ток (этот ток получил название *индукционного тока*).



Лучше всего этот эффект проявляется, если две катушки соединить сердечником (рис.3).

## Электромагнитная индукция. Правило Ленца

**Электромагнитная индукция** - физическое явление, заключающееся в возникновении электрического (индукционного) тока в замкнутом проводящем контуре при изменении **потока** магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром.



$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Единица магнитного потока - вебер (1 Вб)

Итак, движущиеся заряды (токи) создают магнитное поле, а движущееся магнитное поле создает (вихревое) электрическое поле и собственно индукционный ток.

Для каждого конкретного случая Фарадей указывал направление индукционного тока.

В 1831 г. русский физик Э.Ленц установил общее правило нахождения направления индукционного тока, которое называется **правилом Ленца**.

## Индукционный ток

Опытным путем было установлено, что значение индукционного тока совершенно не зависит от способа изменения потока магнитной индукции сквозь контур, а определяется лишь *скоростью* его изменения.

Согласно определению магнитного потока

$$\Phi = BS \cos \alpha$$

Существует три возможных способов изменения потока:

1. Путем *изменения величины  $B$  магнитной индукции.*
2. Путем *изменения площади контура  $\Delta S$ , через который проходит магнитный поток.*
3. Путем *изменения угла  $\alpha$  (вращением контура)*

## Закон Фарадея. Правило Ленца

ЭДС  $\varepsilon_i$  электромагнитной индукции в контуре численно равна и противоположна по знаку скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, ограниченную этим контуром.

$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

знак  $\ll - \gg$  соответствует правилу Ленца

Правило Ленца



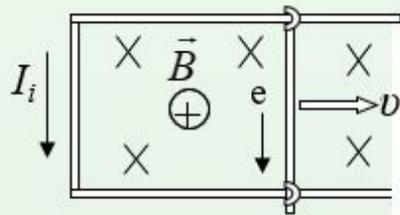
Индукционный ток в контуре имеет всегда такое направление, что создаваемое им магнитное поле препятствует изменению магнитного потока, вызывающему этот индукционный ток.

## Природа ЭДС индукции

Ответим на вопрос: *что является причиной движения зарядов, причиной возникновения индукционного тока?* Рассмотрим два случая:

- 1 - проводник *перемещается* в однородном магнитном поле  $\vec{B}$ ;
- 2 - проводник *неподвижен*, а меняется магнитный поток.

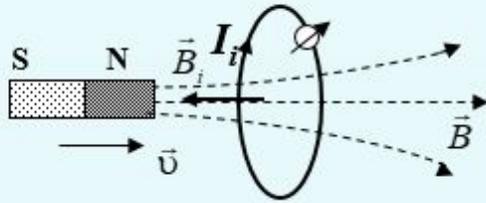
- ① В однородном магнитном поле находится проводящий контур, одна сторона которого (перемычка) может перемещаться (рис.) Предполагается, что сторонняя ЭДС отсутствует. Начнем двигать перемычку вправо со скоростью  $v$ . С такой же скоростью начнут двигаться носители тока в перемычке (электроны). Из-за наличия магнитного поля на каждый электрон начнет действовать сила Лоренца. Электроны будут перемещаться вниз, а ток направлен вверх; возникает разность потенциалов. Это и будет  $\varepsilon_i$  - *сторонняя сила*, под действием которой течет ток.



*Причиной возникновения индукционного тока в подвижных проводниках является сила Лоренца.*

## Природа ЭДС индукции

- ② Замкнутый проводник неподвижен. Будем изменять величину магнитного потока, пронизывающего этот виток (например, приближая к нему постоянный магнит, рис.).



При приближении (или удалении) магнита будет наблюдаться возникновение индукционного тока

Но объяснить его появление силой Лоренца нельзя, т.к. на неподвижные заряды магнитное поле не действует.

Ответ был дан Дж.Максвеллом в 1860 г.:

***всякое переменное магнитное поле возбуждает в окружающем пространстве переменное электрическое поле  $\vec{E}$  (вихревое поле)***

*Сущность явления электромагнитной индукции* совсем не в появлении индукционного тока (ток появляется тогда, когда есть заряды и замкнута цепь), а *в возникновении вихревого электрического поля (не только в проводнике, но и в окружающем пространстве, в вакууме)*.

## Свойства вихревого электрического поля

- Вихревое поле имеет совершенно иную структуру, нежели поле, создаваемое зарядами. Так как оно не создается зарядами, то силовые линии не могут начинаться и заканчиваться на зарядах, как это было в электростатике.
- Силовые линии вихревого поля замкнуты.
- Так как это поле перемещает заряды, вихревое поле - силовое поле  $\vec{F}' = q\vec{E}'$
- Работа вихревого поля на замкнутом пути не равна нулю

## Вращение рамки в магнитном поле

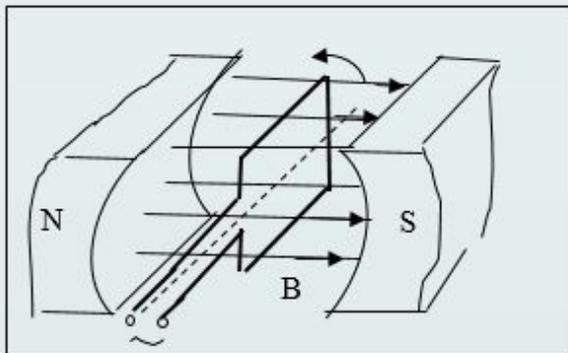
Явление электромагнитной индукции применяется для преобразования механической энергии в энергию электрического тока. Для этой цели используются **генераторы**, принцип действия которых можно рассмотреть на примере плоской рамки, вращающейся в однородном магнитном поле (рисунок)

Пусть рамка вращается равномерно с угловой скоростью  $\omega - \text{const}$ .

Магнитный поток, сцепленный с рамкой площадью  $S$ , в любой момент времени  $t$  равен  $\Phi = BS \cos \alpha = BS \cos \omega t$ ,  $\alpha = \omega t$  - угол поворота рамки в момент времени  $t$ . В момент вращения рамки в ней будет возникать переменная ЭДС индукции

$$\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt} = BS\omega \sin \omega t$$

изменяющаяся по гармоническому закону. ЭДС максимальна при  $\sin \omega t = 1$



$$\varepsilon_{\max} = BS\omega$$

Если вращается  $N$  витков, соединенных последовательно, то максимальное значение ЭДС будет равно

$$\varepsilon_{\max} = NBS2\pi\nu$$

## Явление самоиндукции. Индуктивность

Электрический ток, текущий в любом контуре, создает пронизывающий этот контур магнитный поток  $\psi$ . При изменении тока меняется также поток. Контур оказывается в переменном магнитном потоке, и в контуре индуцируется ЭДС. Это явление называется *самоиндукцией*.

В соответствии с законом Био – Савара – Лапласа магнитная индукция  $\vec{B}$  пропорциональна силе тока, вызвавшего поле. Отсюда вытекает, что ток  $I$  в контуре и создаваемый им полный магнитный поток через контур  $\Psi$  пропорциональны друг другу:  $\Psi = LI$

Коэффициент пропорциональности  $L$  называется *индуктивностью* контура. Индуктивность зависит от геометрии контура, а также от магнитных свойств окружающей среды.

Единицей индуктивности в СИ является генри (Гн). Индуктивность соленоида, имеющего  $N$  витков и площадь сечения  $S$ , может быть рассчитана по формуле:

$$L = \mu_0 \mu n^2 l \cdot S$$

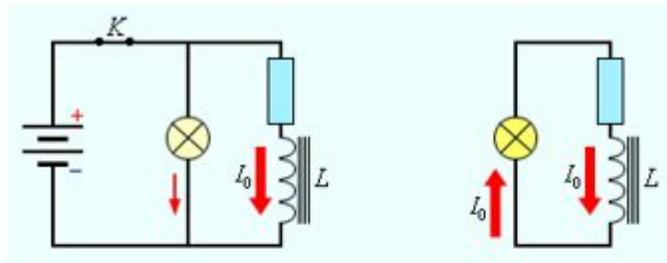
$$n = \frac{N}{l} \text{ - число витков на единицу длины}$$

## ЭДС самоиндукции

Самоиндукция – частный случай явления электромагнитной индукции. Применяв закон Фарадея, получим формулу для ЭДС самоиндукции

$$\varepsilon_s = -\frac{d\psi}{dt} = -\frac{d}{dt}(LI) = -L \frac{dI}{dt} \longrightarrow \boxed{\varepsilon_s = -L \frac{dI}{dt}}$$

Знак ( - ) обусловлен правилом Ленца, согласно которому наличие индуктивности в контуре приводит к *замедлению изменения* тока в нем.



Магнитное поле обладает энергией. Подобно тому, как в заряженном конденсаторе имеется запас электрической энергии, в катушке, по виткам которой протекает ток, имеется запас магнитной энергии.

Если включить электрическую лампу параллельно катушке с большой индуктивностью в электрическую цепь постоянного тока, то *при размыкании ключа* наблюдается кратковременная вспышка лампы (рис.). Ток в цепи возникает под действием ЭДС самоиндукции. Источником энергии, выделяющейся при этом в электрической цепи, является магнитное поле катушки.

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