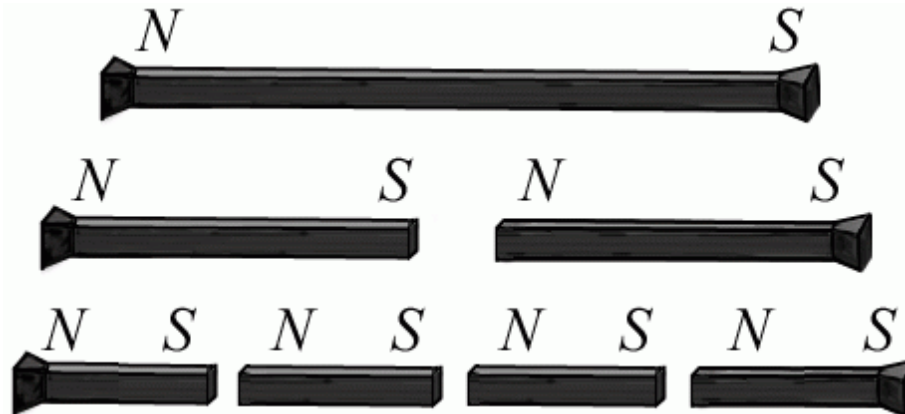


Электромагнетизм

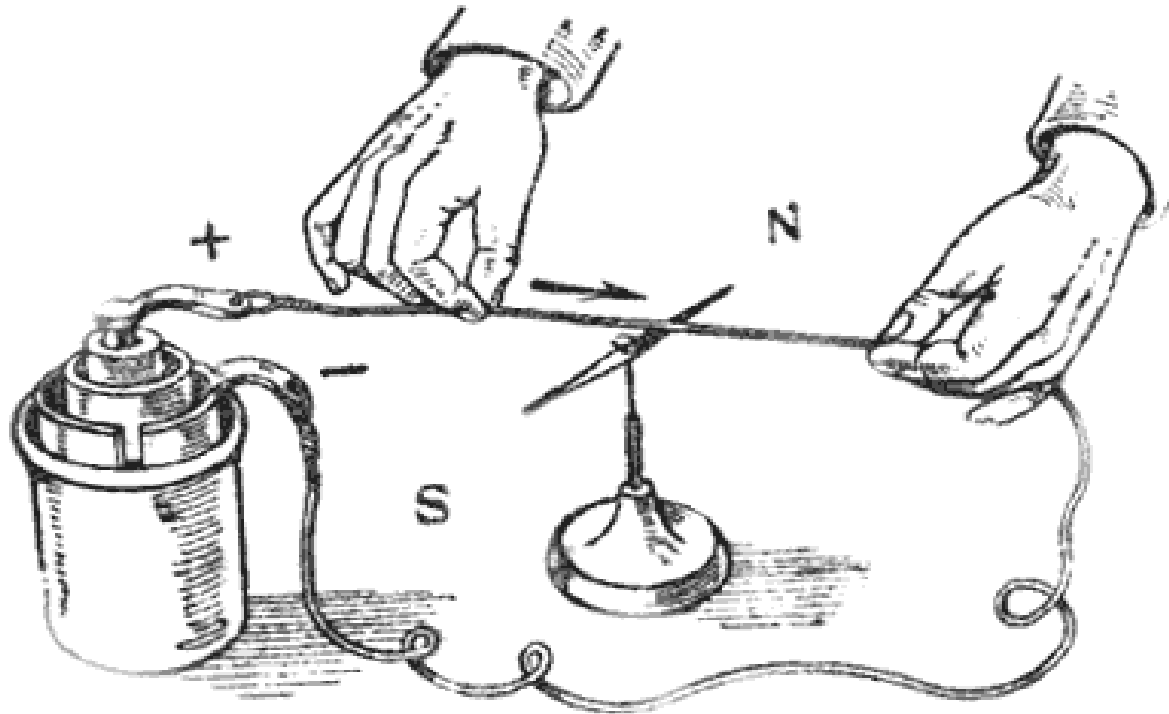
Понятие о магнитном поле

- 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**.

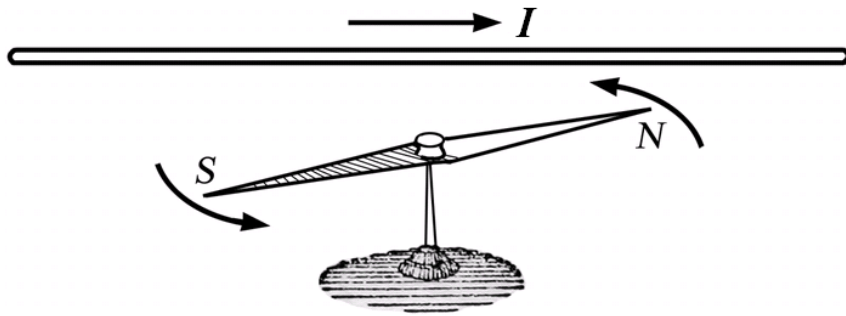


Понятие о магнитном поле

- Вокруг проводников с током и постоянных магнитов существует силовое поле (магнитное), которое оказывает силовое действие на другие проводники с током или постоянные магниты.



Опыт Эрстеда (1820)



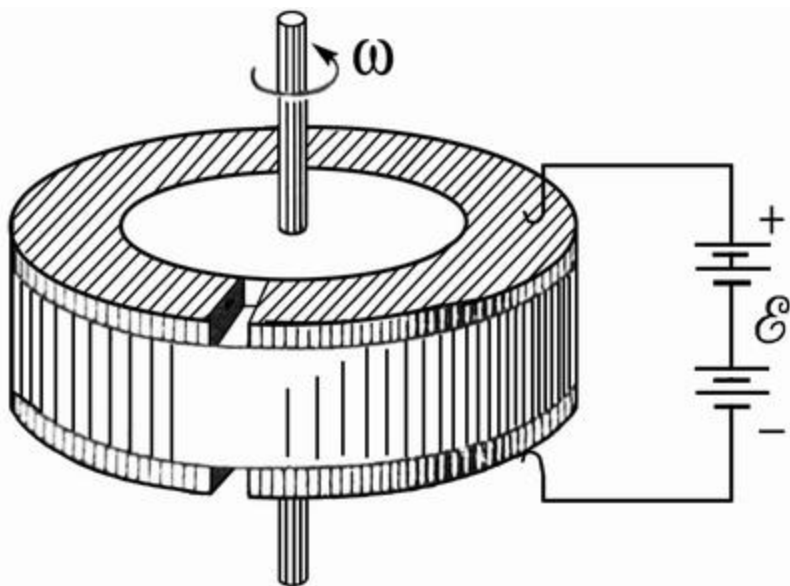
Взаимодействие
постоянного
электрического тока с
магнитной стрелкой.

Стрелка стремится расположиться
перпендикулярно проводнику с током.

Вывод:

вокруг прямолинейного проводника с током есть магнитное поле.

Опыт Эйхенвальда (1901)



Взаимодействие конвекционного тока на движущемся проводнике и тока связанных зарядов, возникающего при движении наэлектризованного диэлектрика с магнитной стрелкой.

$$q = C\Delta\varphi,$$

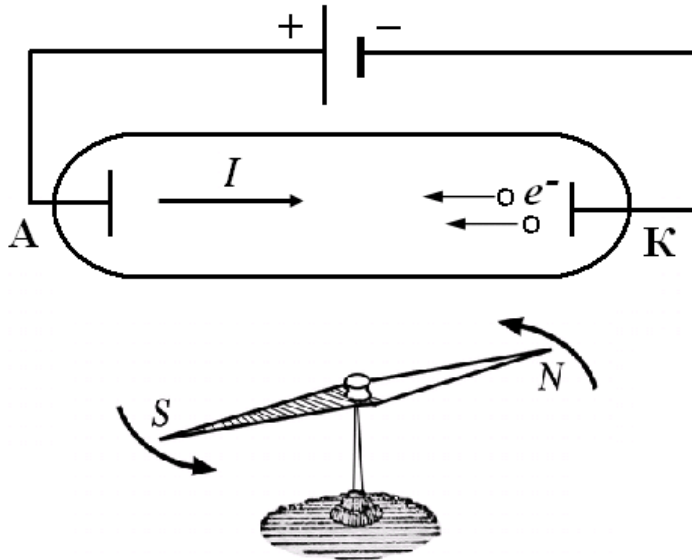
конвекционный ток: $I = qn = nC\Delta\varphi,$

n – число оборотов диска за единицу времени.

Вывод:

конвекционный ток свободных зарядов и ток связанных зарядов приводят к появлению магнитного поля как и ток проводимости.

Опыт Иоффе (1911)



Взаимодействие движущихся заряженных частиц (электронов) и магнитной стрелки.

Вывод:

Движение заряженных частиц приводит к появлению магнитного поля.

Общий вывод:

- *вокруг всякого проводника с током есть магнитное поле.*

Но ток – это направленное движение зарядов.

- *Вокруг всякого движущегося заряда помимо электрического поля образуется еще и магнитное поле.*

Понятие о магнитном поле

Магнитное поле материально. Подобно электрическому полю, оно обладает энергией и, следовательно, массой.

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

ОСНОВНОЕ СВОЙСТВО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Магнитное поле действует на движущиеся заряды, а на неподвижные не действует.

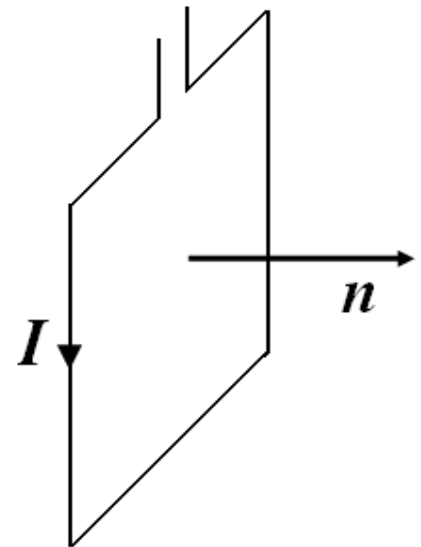
Вектор магнитной индукции – силовая характеристика магнитного поля

Силовое действие магнитное поле оказывает на:

- 1) Элемент тока: $F \sim Idl$.
- 2) Магнитную стрелку.
- 3) Рамку или контур с током.

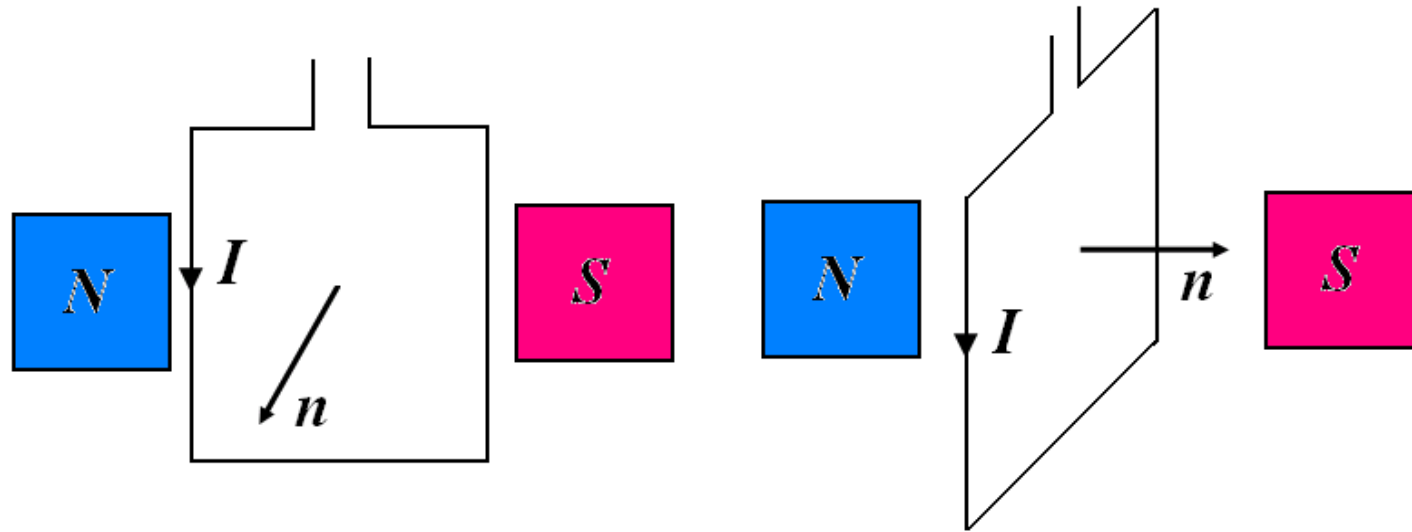
Ориентация рамки в пространстве определяется направлением положительной нормали, определяемой по правилу **правого винта (буравчика)**:

Если направление вращения винта совпадает с направлением тока, то поступательное движение винта совпадает с **положительным направлением нормали**.

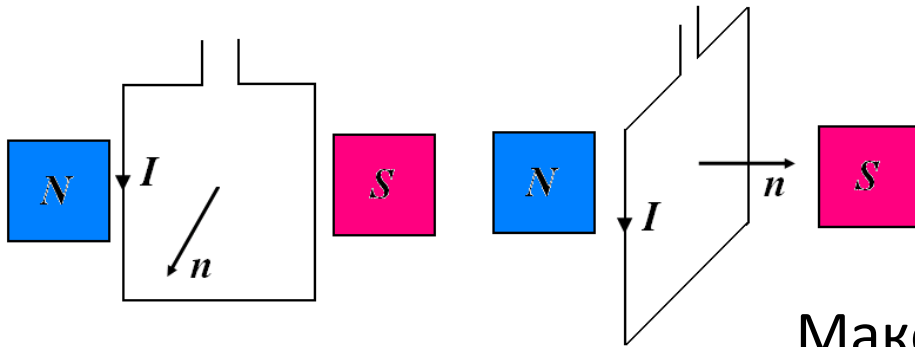


Вектор магнитной индукции

Если по рамке, помещенной во внешнее магнитное поле, пропускается ток, то она поворачивается и устанавливается в положении равновесия.



Вектор магнитной индукции



$$M_{\max} \sim I \cdot S \sin 90^\circ$$

Максимальный вращающий момент

$$IS = P_m \quad \text{магнитный момент рамки}$$

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

$$\frac{M_{\max}}{P_m} = \frac{M_{\max}}{IS} = B \quad \text{-магнитная индукция.}$$

В СИ B измеряется в Теслах:

$$\left[1T_{\text{л}} = \frac{1H \cdot 1m}{1A \cdot 1m^2} \right]$$

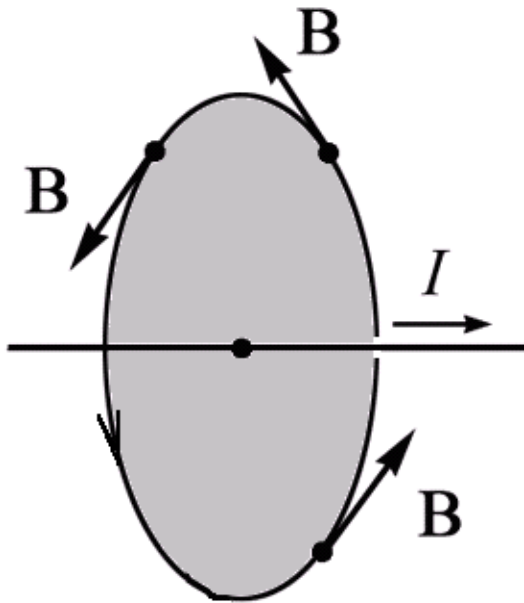
Вектор магнитной индукции

Магнитная индукция B в данной точке однородного магнитного поля определяется максимальным вращающим моментом, действующим на рамку с единичным магнитным моментом $P_m = 1 \text{ А} \cdot \text{м}^2$, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля.

Силовые линии магнитного поля

Линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции B , называются **силовыми линиями** магнитного поля.

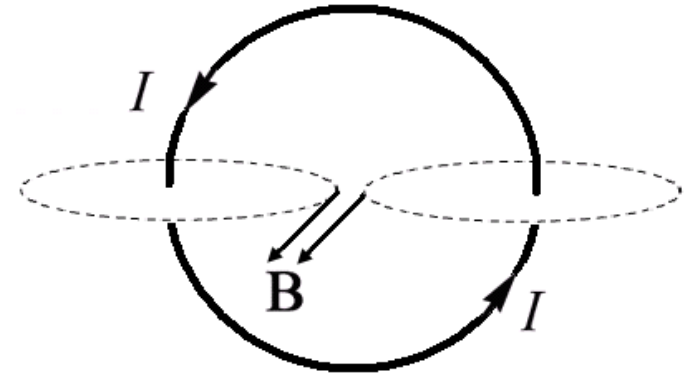
- Прямой ток



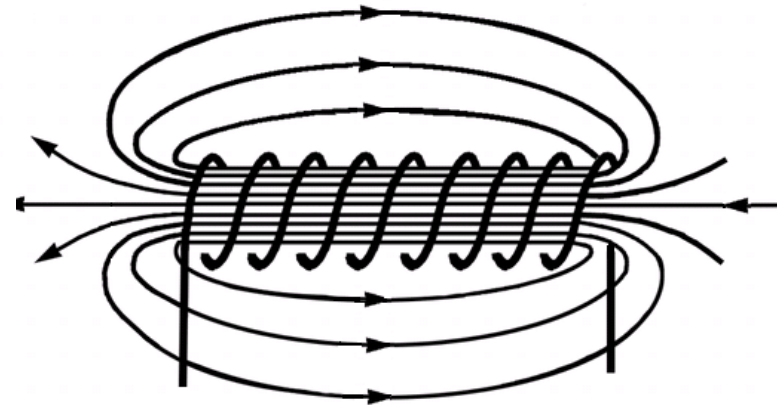
Направление силовых линий определяется **правилом правого винта (буравчика)**.

Силовые линии магнитного поля

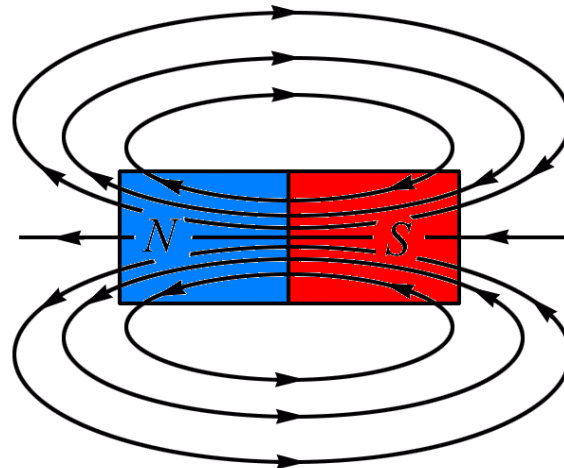
- Круговой ток



- Соленоид – система витков, имеющих ось симметрии



- Постоянный магнит

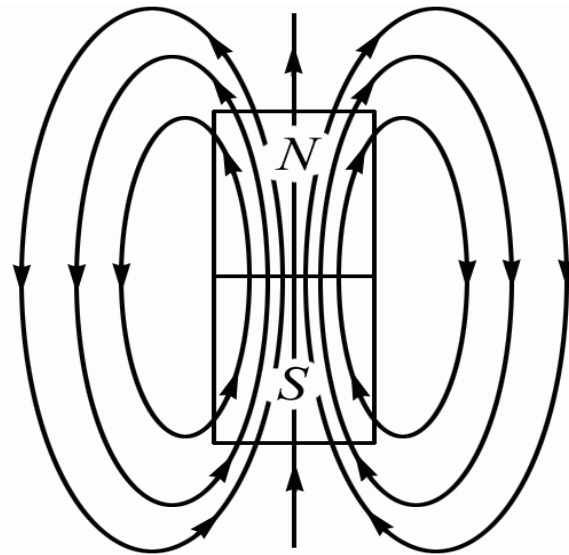
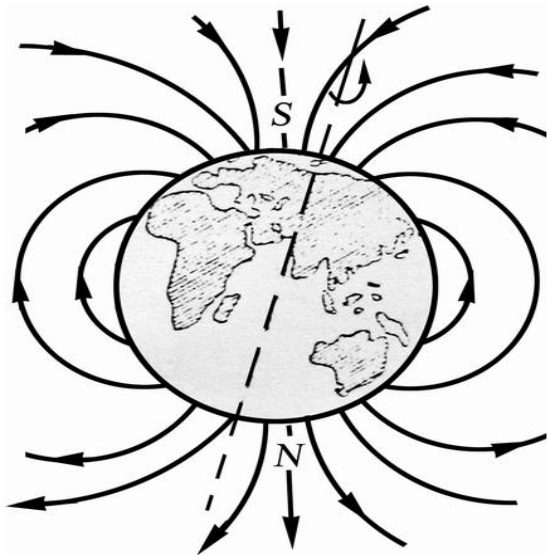


Силовые линии магнитного поля

Силовые линии магнитного поля замкнутые и не пересекаются.

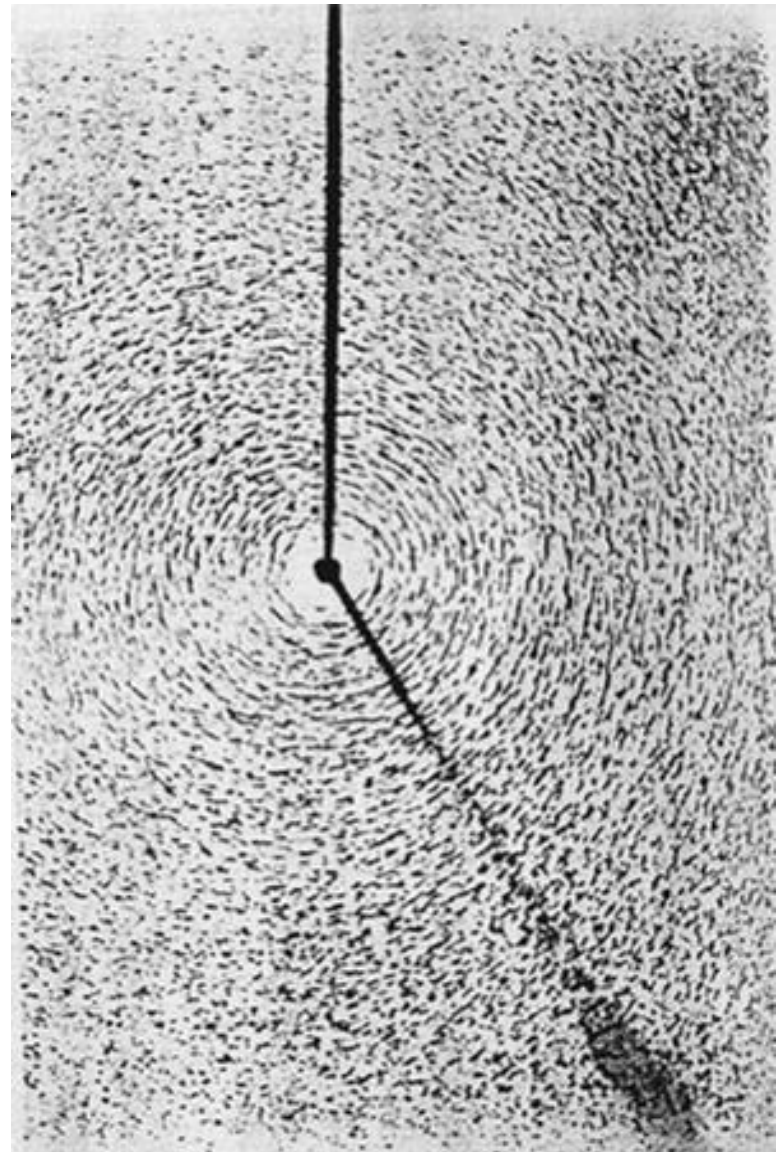
Следовательно, магнитное поле – **вихревое**.

Условились, за направление принимать направление северного конца магнитной стрелки.



Силовые линии магнитного поля

**Магнитных зарядов
не существует!!!**



Закон Гаусса для магнитного поля в дифференциальной и интегральной форме

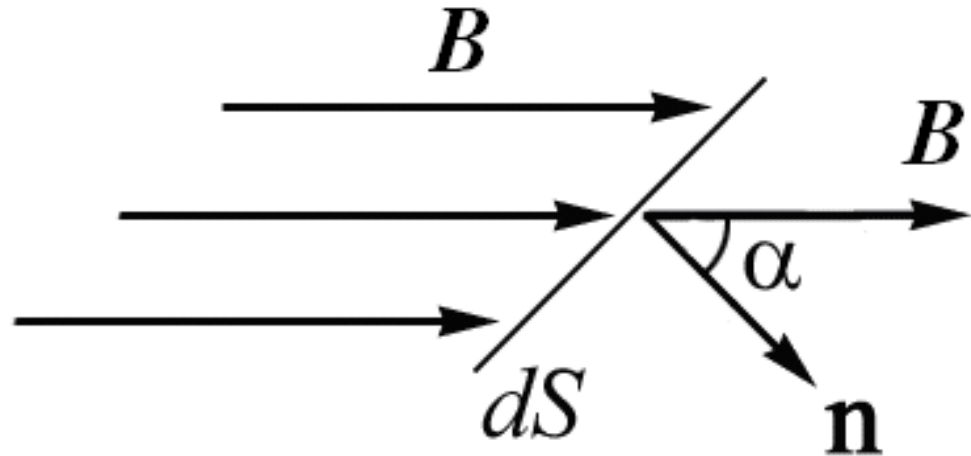
Силовые линии магнитного поля замкнуты,
следовательно, дивергенция вектора $\vec{B}$ равна
нулю

$\operatorname{div} \vec{B} = 0$ – закон Гаусса для вектора $\vec{B}$
в дифференциальной форме.

($\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0}$ - для электрического поля).

Закон Гаусса для магнитного поля в дифференциальной и интегральной форме

Поток вектора B :



$$\Phi_B = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

В СИ: $[\Phi_B] = \text{вебер (Вб)}$.

Закон Гаусса для магнитного поля в дифференциальной и интегральной форме

Теорема Остроградского-Гаусса:

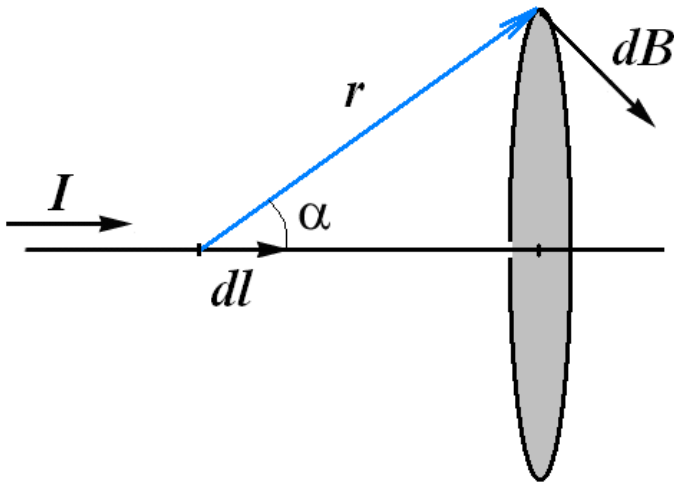
$$\left. \begin{aligned} \oint_S \vec{B} d\vec{S} &= \int_V \operatorname{div} \vec{B} dV, \\ \operatorname{div} \vec{B} &= 0 \end{aligned} \right\} \oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Поток вектора $\vec{B}$ через произвольную замкнутую поверхность равен нулю.

Закон Био – Савара – Лапласа

- Жан Батист Био и Феликс Савар экспериментально определили, что магнитная индукция зависит от:
 1. тока I , протекающего по проводнику,
 2. формы и размеров проводника,
 3. положения точки относительно проводника,
 4. состояния окружающей среды (магнитной проницаемости).

Закон Био – Савара – Лапласа



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

$d\vec{B}_i$ создается участком длиной dl проводника с током I ,

r – радиус-вектор от элементарного тока до точки, в которой ищется поле.

α – угол между элементарным током $I \cdot dl$ и r .

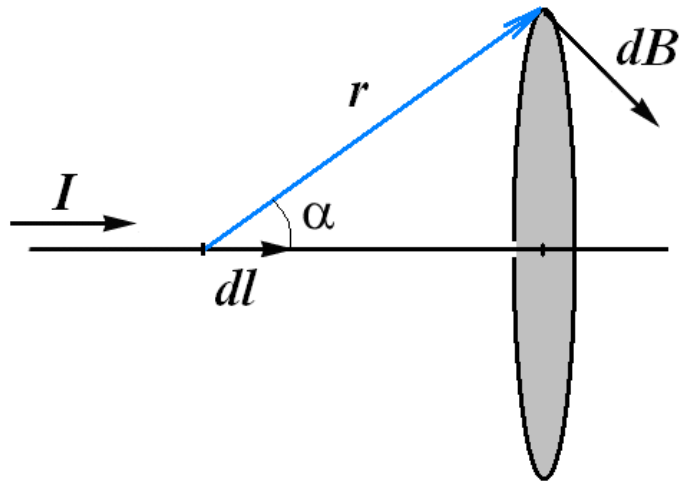
$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} [\text{Гн} / \text{м}; \text{Н} / \text{А}^2]$$

магнитная постоянная

Закон Био – Савара – Лапласа

В скалярном виде:



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

$\mu\mu_0$ – **абсолютная магнитная проницаемость среды.**

μ относительной магнитной проницаемостью среды:

$$\mu = \frac{B_{\text{среда}}}{B_0}$$

$\mu < 1$, то среда – диамагнетик

$\mu > 1$ – парамагнетик

$\mu \gg 1$ – ферромагнетик

Закон Био – Савара – Лапласа

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

Принцип суперпозиции для магнитного поля:

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

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

Закон Био – Савара – Лапласа

H – вектор напряженности магнитного поля,
измеряемая в СИ [А / м]

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

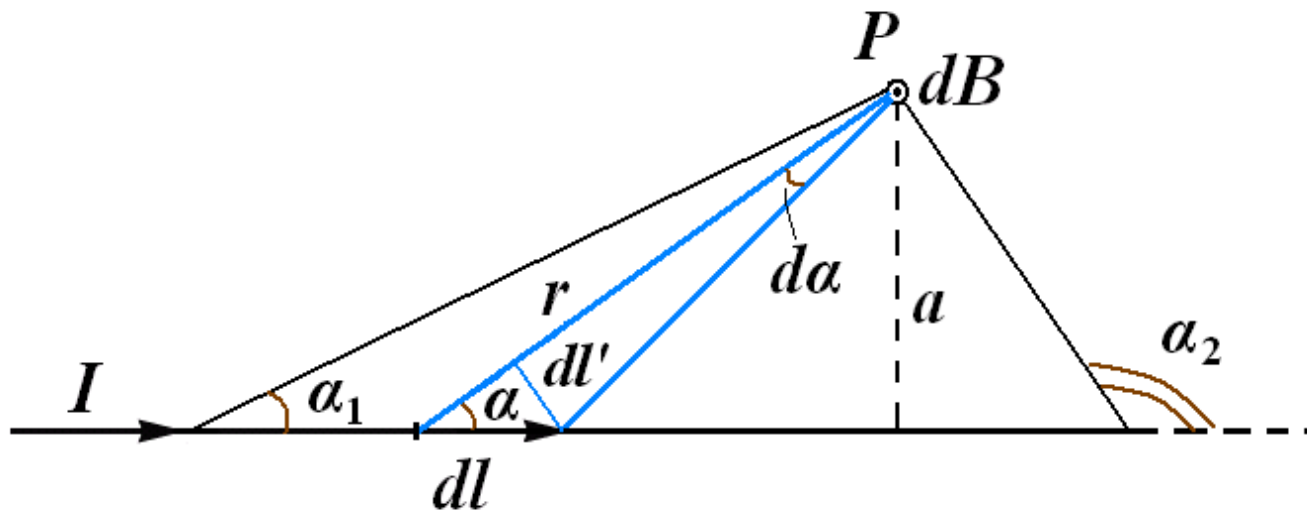
$$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E} \quad \text{для электрического поля}$$

Закон Био – Савара – Лапласа для H :

$$d\vec{H} = \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}$$

Применение закона Био – Савара – Лапласа для расчета магнитных полей

Магнитное поле прямолинейного проводника с током.



Поле в точке P , расположенной на расстоянии a от проводника конечной длины с током I .

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

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

Так как $d\alpha$ мал,
то $dl' = r d\alpha$;

$$dl = \frac{r d\alpha}{\sin \alpha}$$

$$a = r \sin \alpha$$

$$dl = \frac{a d\alpha}{\sin^2 \alpha}$$

Магнитное поле прямолинейного проводника с током.

$$dB = \frac{\mu_0 I \frac{a d\alpha}{\sin^2 \alpha}}{4\pi \frac{a^2}{\sin^2 \alpha}} \sin \alpha = \frac{\mu_0 I \sin \alpha d\alpha}{4\pi a}$$

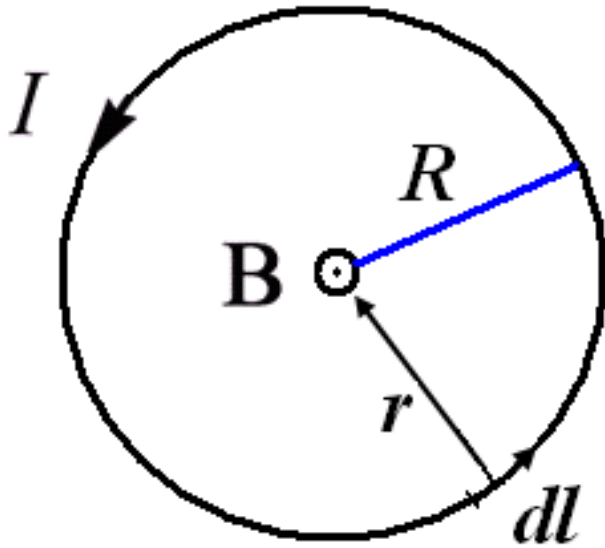
$$B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu_0 I \sin \alpha d\alpha}{4\pi a} = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

Если проводник бесконечной длины, тогда

$$\alpha_1 = 0, \quad \alpha_2 = 180^\circ$$

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

Магнитное поле в центре кругового тока



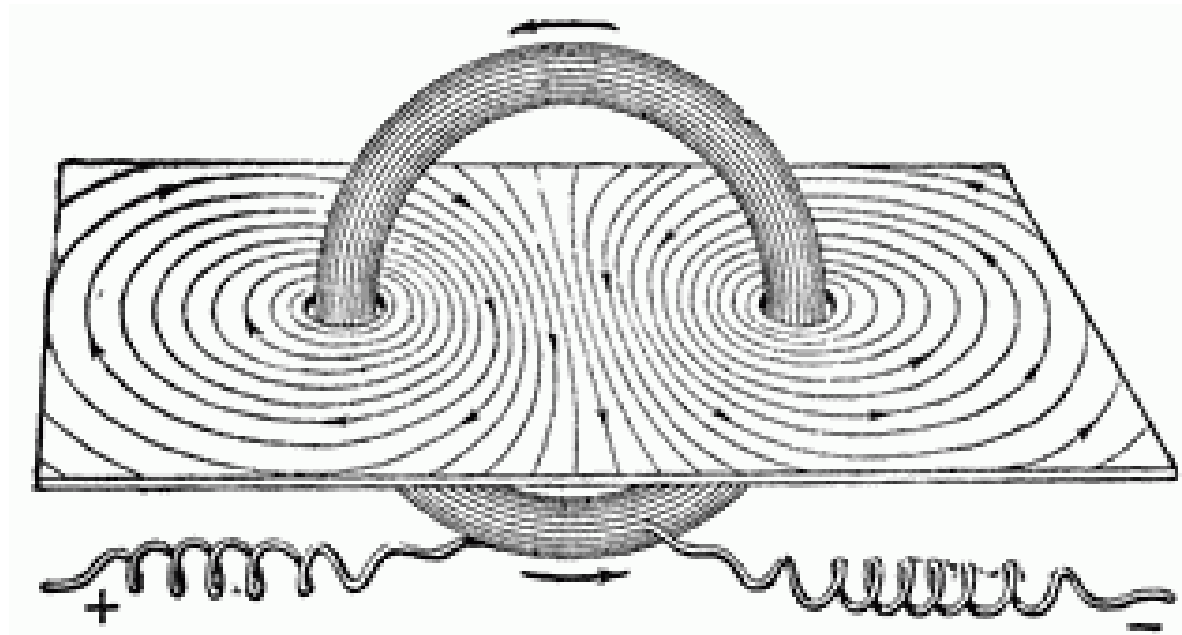
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3}$$

$$r = R, \quad \alpha = 90^\circ$$

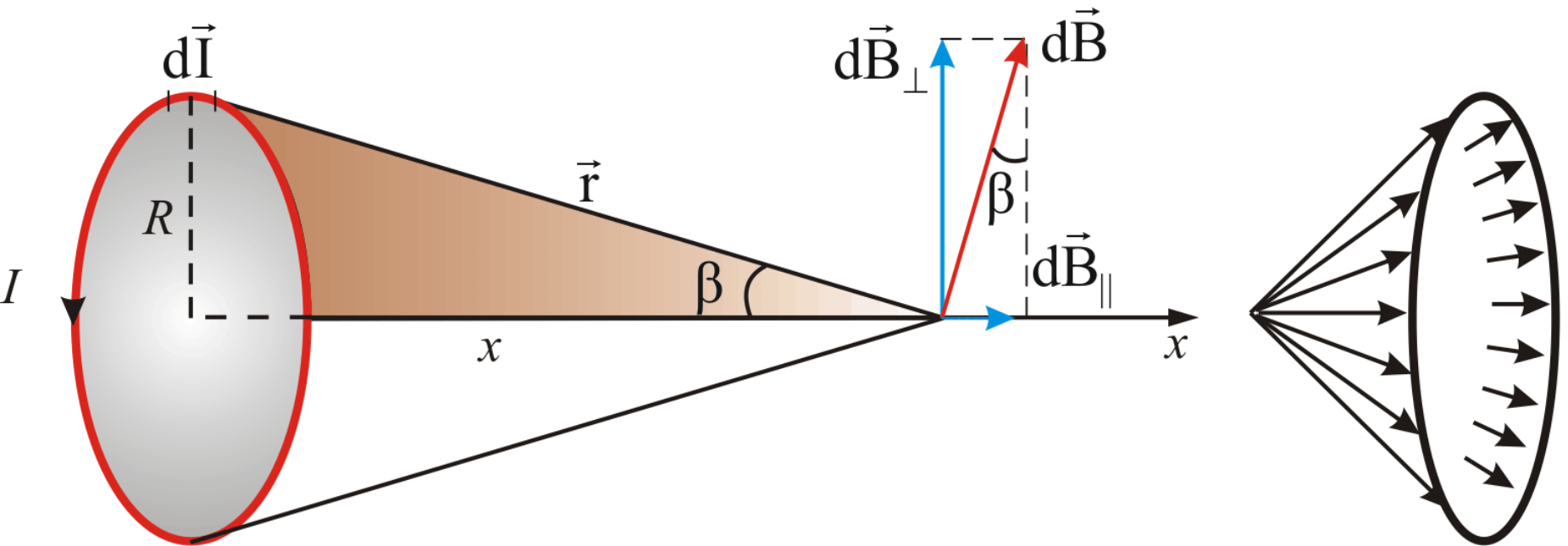
$$dB = \frac{\mu_0 I dl \sin \alpha}{4\pi r^2} = \frac{\mu_0 I dl}{4\pi R^2}$$

$$B = \oint_l \frac{\mu_0 I dl}{4\pi R^2} = \frac{\mu_0 I}{4\pi R^2} 2\pi R = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Магнитное поле в центре кругового тока



Магнитное поле на оси кругового проводника с током

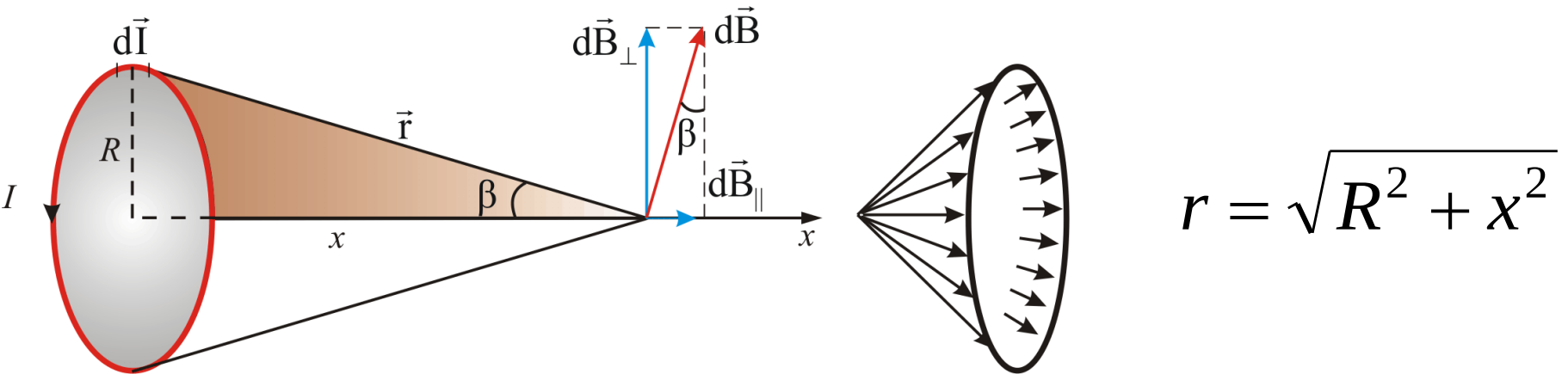


$$dB_\parallel = dB \sin \beta$$

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

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

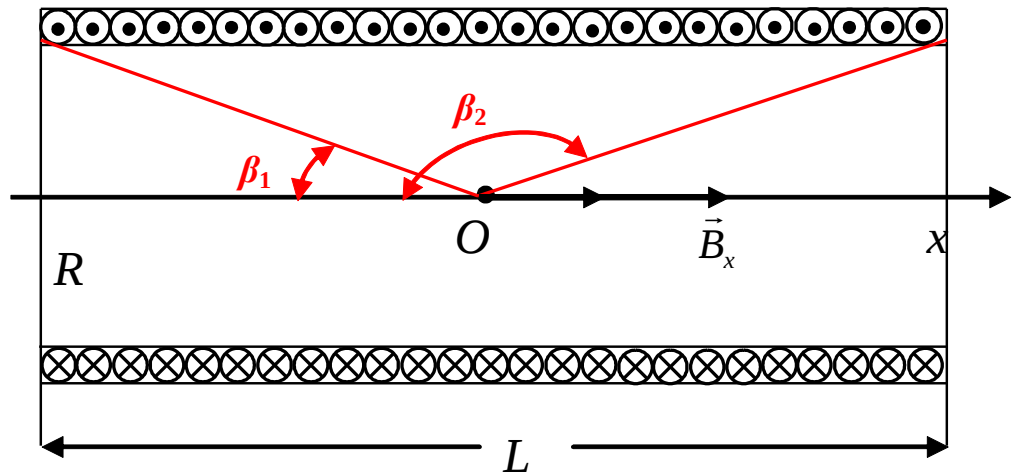
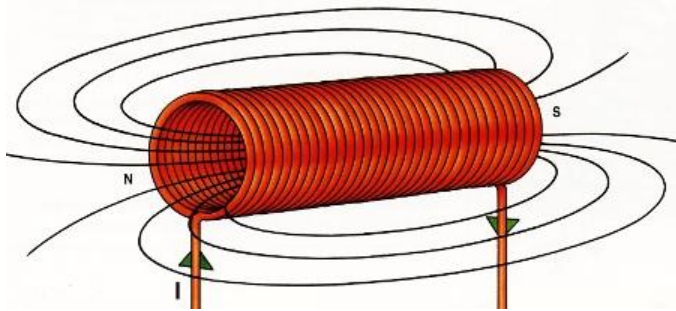
Магнитное поле на оси кругового проводника с током



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

$$x = 0 \quad \Rightarrow \quad B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$

Поле соленоида



$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} nI (\cos \beta_1 - \cos \beta_2)$$

где $n = N / L$ – число витков на единицу длины соленоида.

ВЫВОД САМОСТОЯТЕЛЬНО!