

Магнитное поле

Магнитный момент контура с током.

Вращающий момент, действующий на контур с током в однородном магнитном поле.

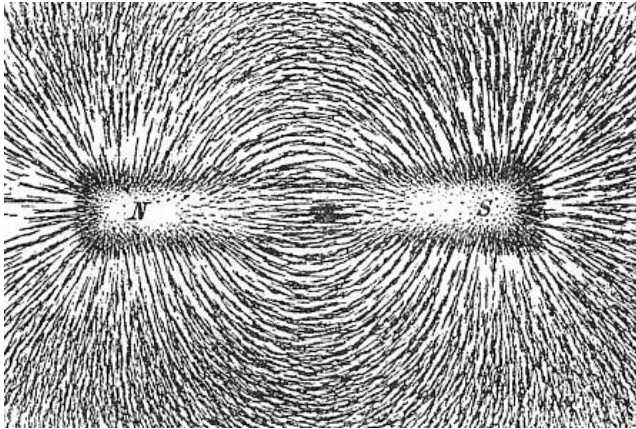
Вектор магнитной индукции.

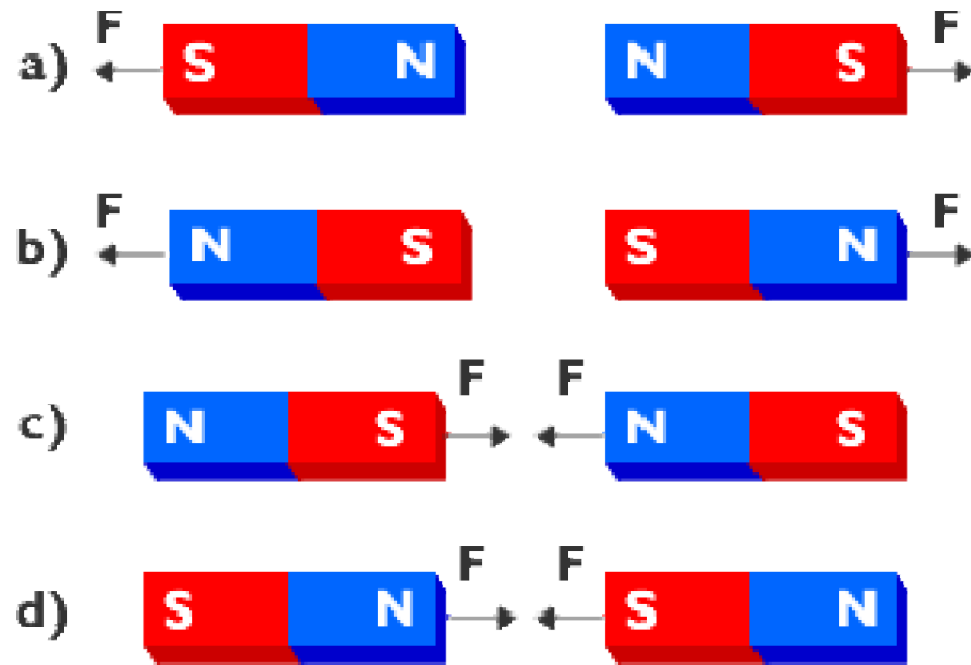
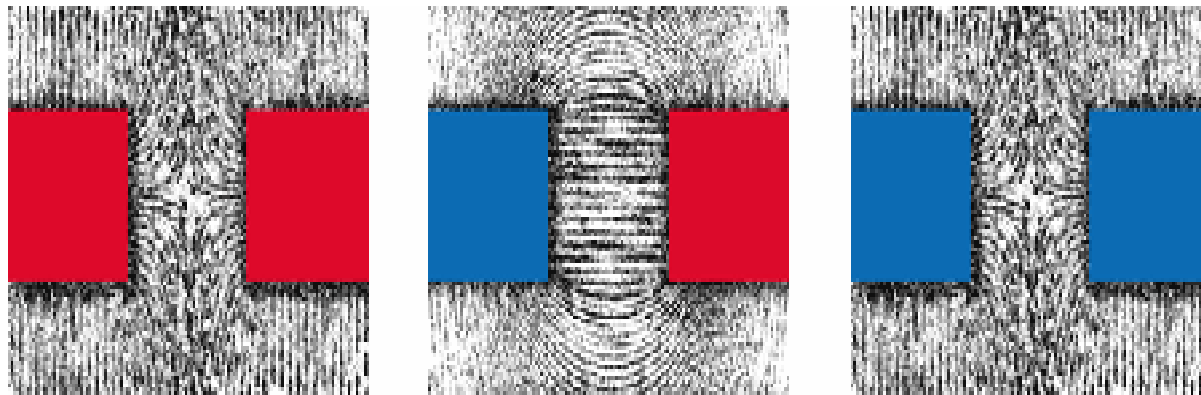
Закон Био – Савара – Лапласа.

Расчет полей, создаваемых проводниками с током.

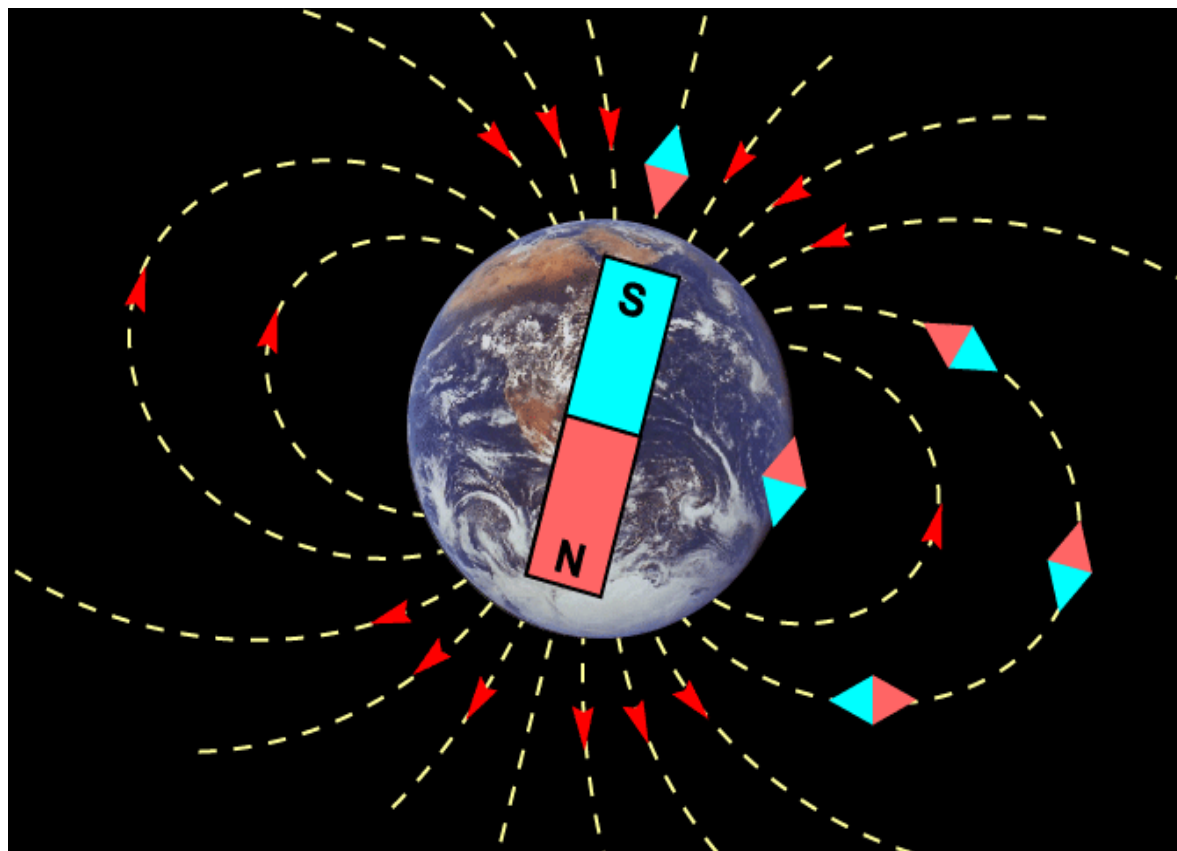
Магнитное поле движущегося заряда.

Постоянные магниты

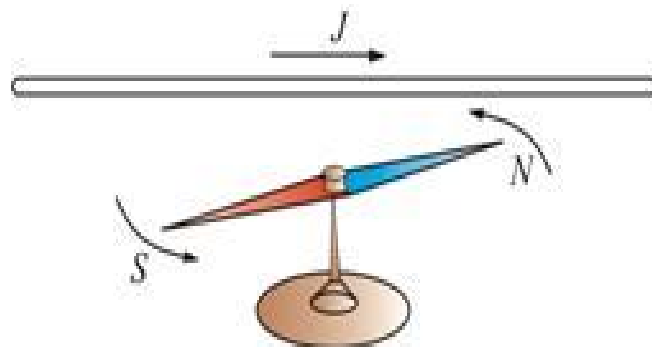




Компас. Магнитное поле Земли.



В 1820 году Эрстед обнаружил, что электрический ток ориентирует магнитную стрелку.



Постоянные магниты и токи (движущиеся заряды) порождают силовое поле. Это поле называется магнитным. Магнитное поле в свою очередь действует на постоянные магниты и движущиеся заряды.

Гипотеза Ампера о природе магнетизма веществ

Постоянные магниты могут быть изготовлены лишь из немногих веществ, но все вещества, помещённые в магнитное поле, намагничиваются в той или иной мере. Именно по этой причине вектор магнитной индукции в веществе отличается от вектора магнитной индукции в вакууме.

Ампер предположил, что магнитные свойства **любого тела** определяются замкнутыми электрическими токами (микротоками) внутри него.

В ненамагниченном теле микротоки расположены хаотически, и поэтому мы не наблюдаем во внешнем пространстве никакого магнитного поля.

Магнитное поле макротока ориентирует микротоки в веществе, результирующее поле характеризуется вектором индукции.

Вектор индукции магнитного поля есть суммарный результат действия макротока и микротоков.

Вектор напряженности магнитного поля - характеристика поля, порожденного макротоком.

В однородной изотропной среде

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

Индукция магнитного поля, размерность - [Тл].

Напряженность магнитного поля, размерность - [А/м].

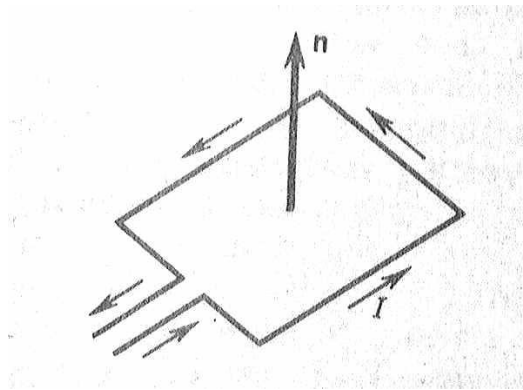
Магнитная проницаемость среды – μ , для вакуума $\mu=1$.

Магнитная постоянная

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

Рамка с током

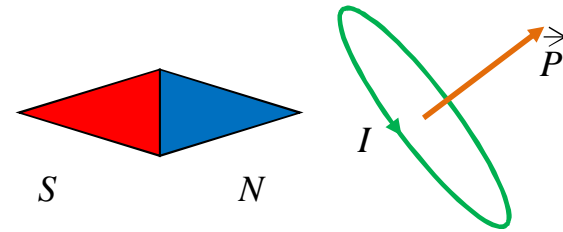
Рамка с током – замкнутый плоский контур с током малого, по сравнению с характерным масштабом задачи, размера.



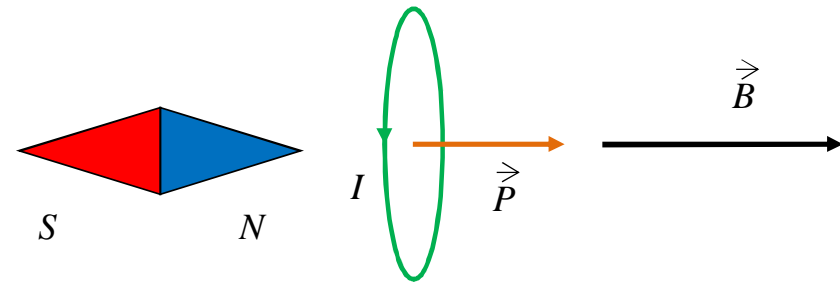
Положительная нормаль выбирается по правилу правого винта. Нормаль совпадает с направлением движения винта, головка которого вращается в направлении тока, текущего по рамке.

$$\vec{P} = IS\vec{n} \quad - \text{ магнитный момент рамки с током.}$$

Неустойчивое положение



Устойчивое положение

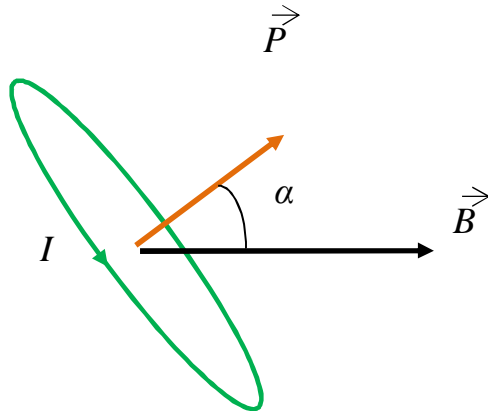


Рамка с током ориентируется в магнитном поле.

Магнитное поле – векторное поле. За направление магнитного поля принимается направление, вдоль которого располагается магнитная стрелка и магнитный момент рамки с током.

Инструмент для исследования магнитного поля – рамка с током.

\vec{B} - вектор магнитной индукции, единица измерения [Тл].



Момент сил, действующий со стороны магнитного поля на рамку с током

$$\vec{M} = [\vec{P} \times \vec{B}]$$

$$M = PB \sin \alpha$$

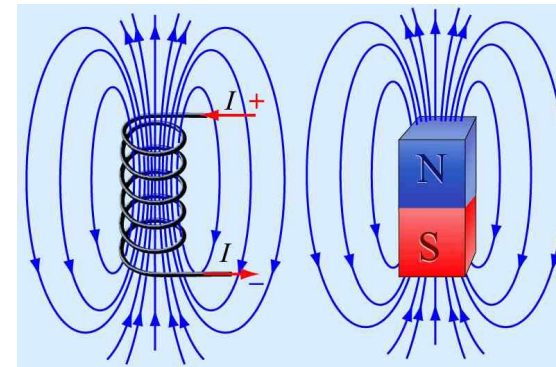
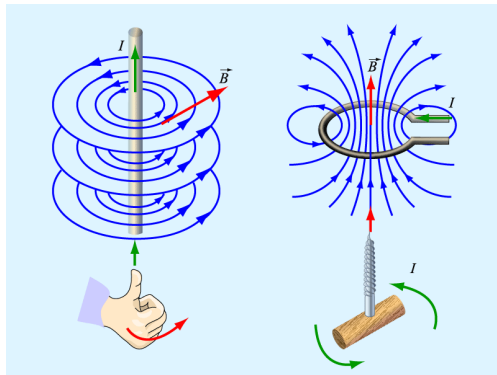
$$B = M_{\max} / P$$

Индукция одинакова при использовании различных рамок.

Магнитная индукция в данной точке однородного магнитного поля в данной точке пространства есть максимальный вращающий момент, действующий на рамку с единичным магнитным моментом, когда нормаль к рамке перпендикулярна направлению поля.

Линия магнитной индукции – линия, касательная к которой в каждой точке совпадает с направлением вектора магнитной индукции.

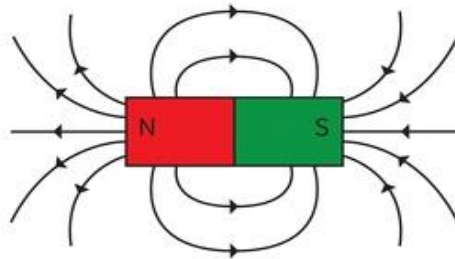
Направление линий магнитной индукции и направление тока связаны правилом правого винта (буравчика).



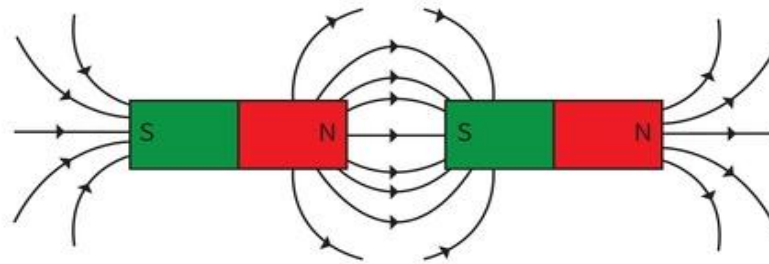
Поля, в которых векторные линии замкнуты, называются вихревыми. Магнитное поле — вихревое поле.

Замкнутость линий магнитной индукции является фундаментальным свойством магнитного поля, заключающимся в том, что оно не имеет источников. Магнитных зарядов, аналогичных электрическим зарядам, не существует.

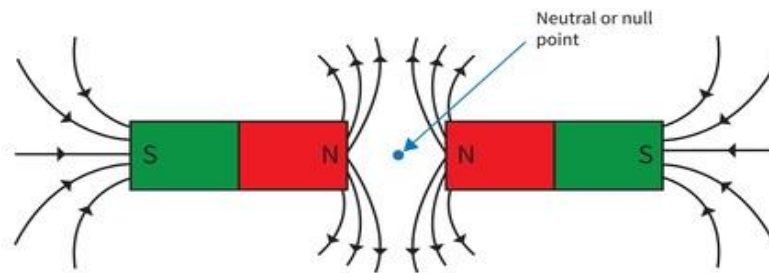
Magnetic Field of a Bar Magnet



www.electronics-micros.com



Attraction between opposite poles



Repulsion between like poles

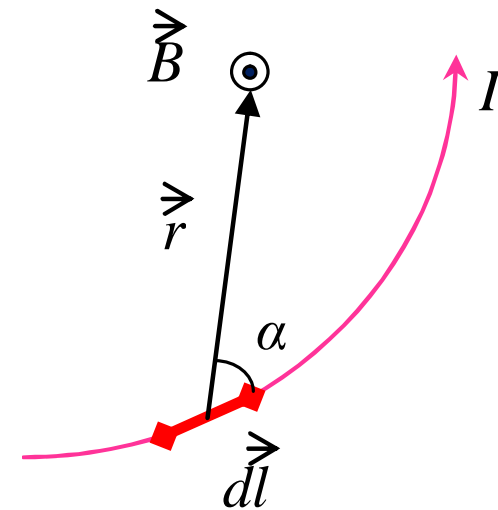
Закон Био – Савара – Лапласа

Био и Савар экспериментально установили, что индукция тока зависит от:

- силы тока в проводнике (пропорциональна ему);
- формы и размеров проводника;
- расположения проводника относительно точки наблюдения;
- среды.

Лаплас, применив принцип суперпозиции, облек эти наблюдения в строгую математическую форму.

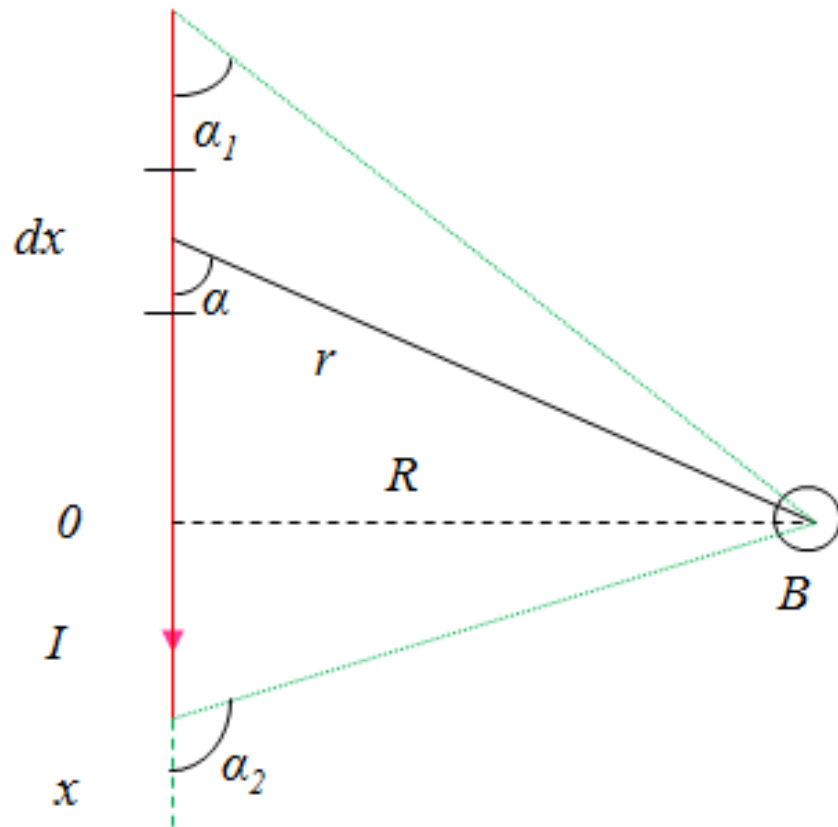
Магнитная индукция поля, созданного проводником с током, в любой точке пространства равна векторной сумме индукций элементарных магнитных полей отдельных малых участков этого проводника.



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

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^2} dl \sin(\angle d\vec{l}, \vec{r})$$

Магнитное поле прямого тока



$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^2(x)} \sin \alpha(x) dx$$

$$R = r \sin \alpha$$

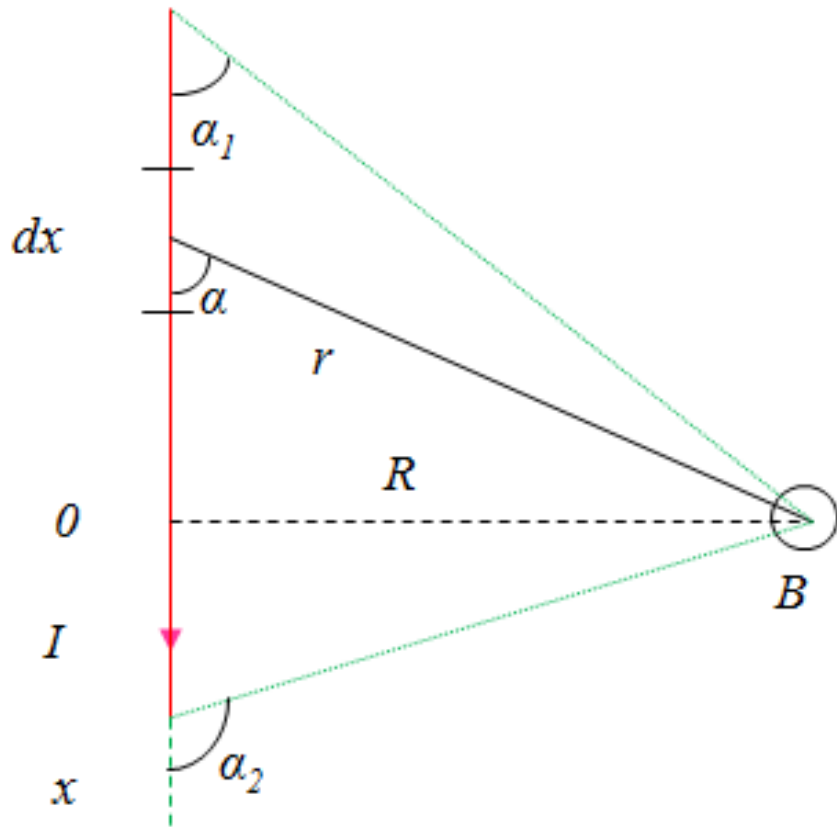
$$x = -r \cos \alpha = -R \operatorname{ctg} \alpha$$

$$dx = \frac{R d\alpha}{\sin^2 \alpha}$$

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} \sin \alpha d\alpha \quad B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \sin \alpha d\alpha$$

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

Прямолинейный бесконечный проводник



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

$$\alpha_1 = 0$$

$$\alpha_2 = \pi$$

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

Индукция в центре квадратной рамки с током

$$B = B_1 + B_2 + B_3 + B_4 = 4B_1$$

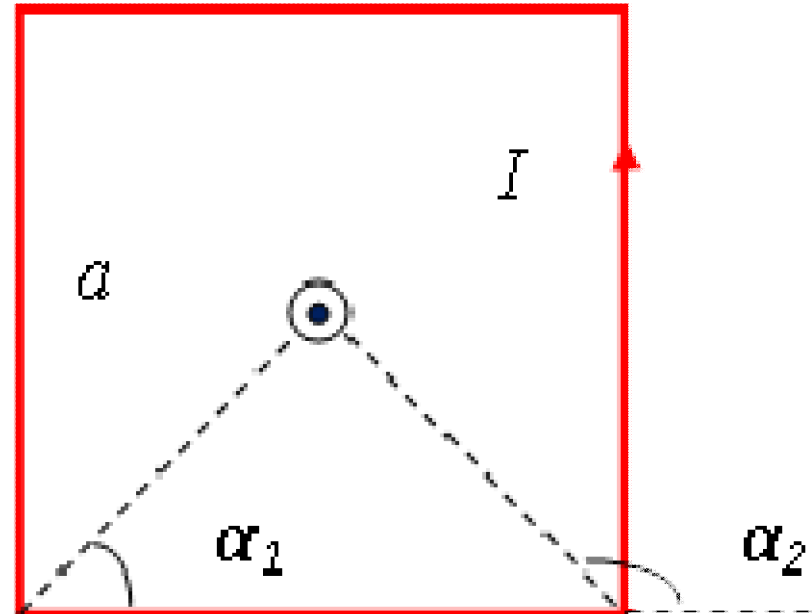
$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{R} (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

$$\alpha_1 = \pi/4 \quad \alpha_2 = 3\pi/4$$

$$\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2 = \sqrt{2}$$

$$R = a/2$$

$$B_1 = \frac{\mu\mu_0}{2\pi} \frac{I}{a} \sqrt{2}$$



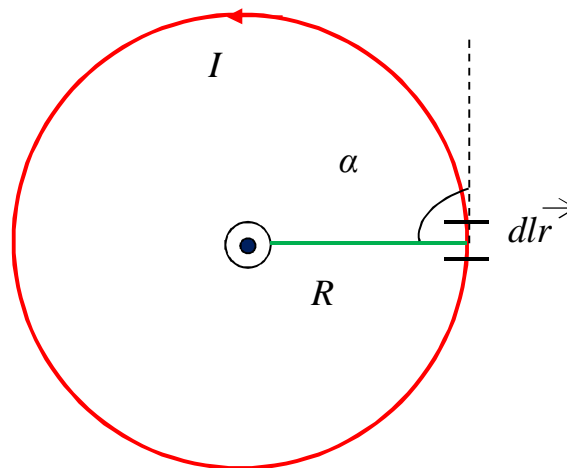
$$B = \frac{\mu\mu_0}{\pi} \frac{2\sqrt{2}I}{a}$$

Индукция в центре кругового витка с током

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

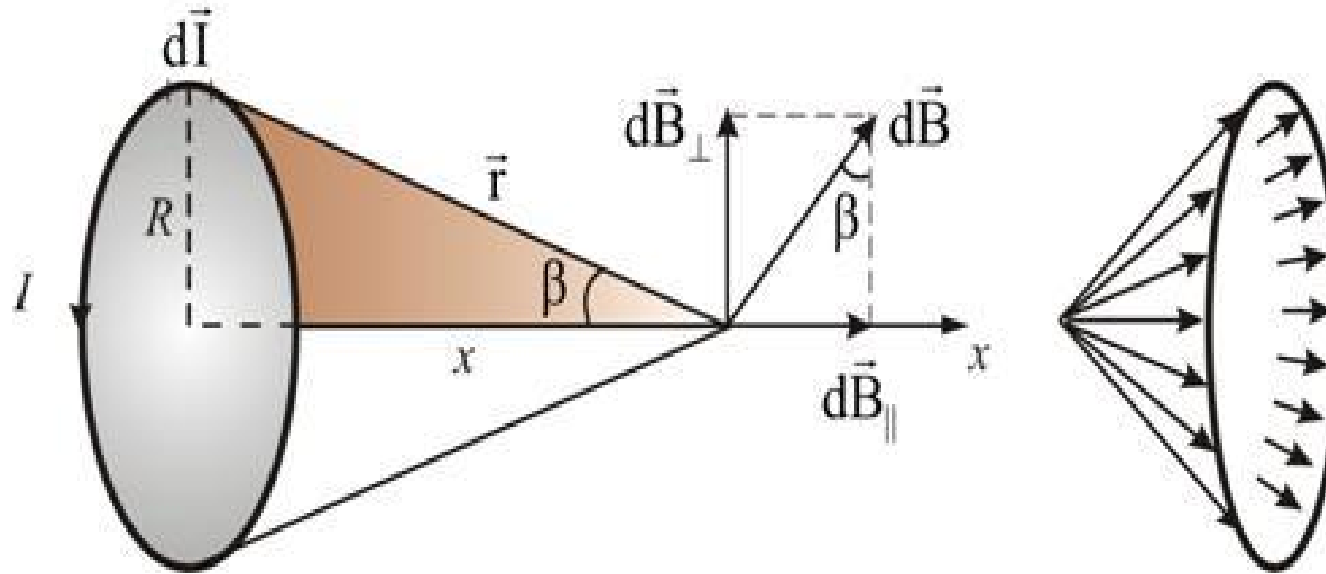
$$\alpha = \pi/2$$

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



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

Индукция на оси кругового витка с током



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

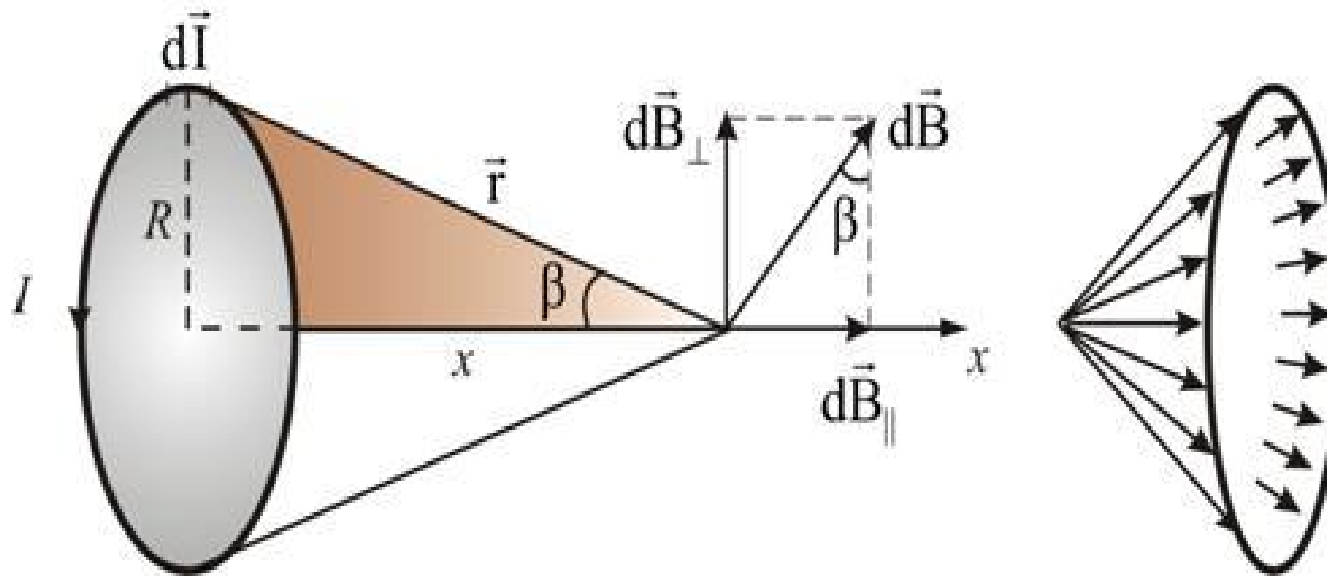
$$\alpha = \pi/2$$

$$d\vec{B} = d\vec{B}_\perp + d\vec{B}_\parallel$$

$$\oint dB_\perp = 0$$

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

Индукция на оси кругового витка с током

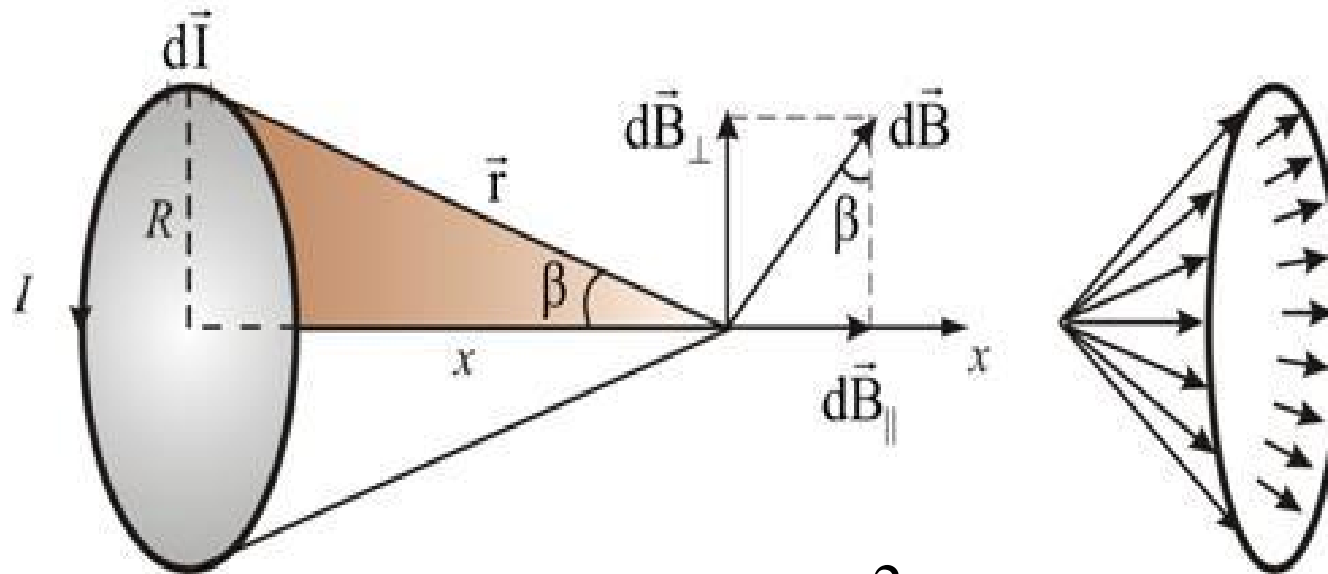


$$\sin \beta = R/r \quad r^2 = R^2 + x^2$$

$$dB_{\parallel} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^2} \sin \beta dl = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{IR}{r^3} dl$$

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{IR}{r^3} \oint dl \quad \oint dl = 2\pi R$$

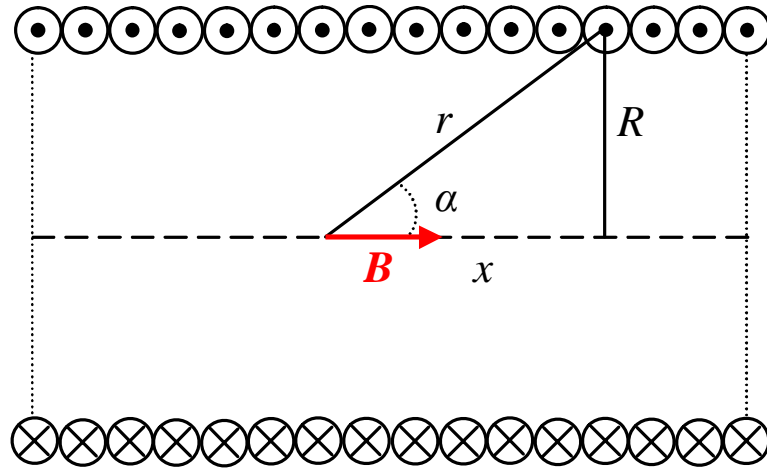
Индукция на оси кругового витка с током



$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

$$B(0) = \frac{\mu\mu_0}{2R} I$$

Магнитное поле соленоида



$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} \frac{IR^2}{r^3}$$

$$dN = ndx \quad dB = B(r) dN$$

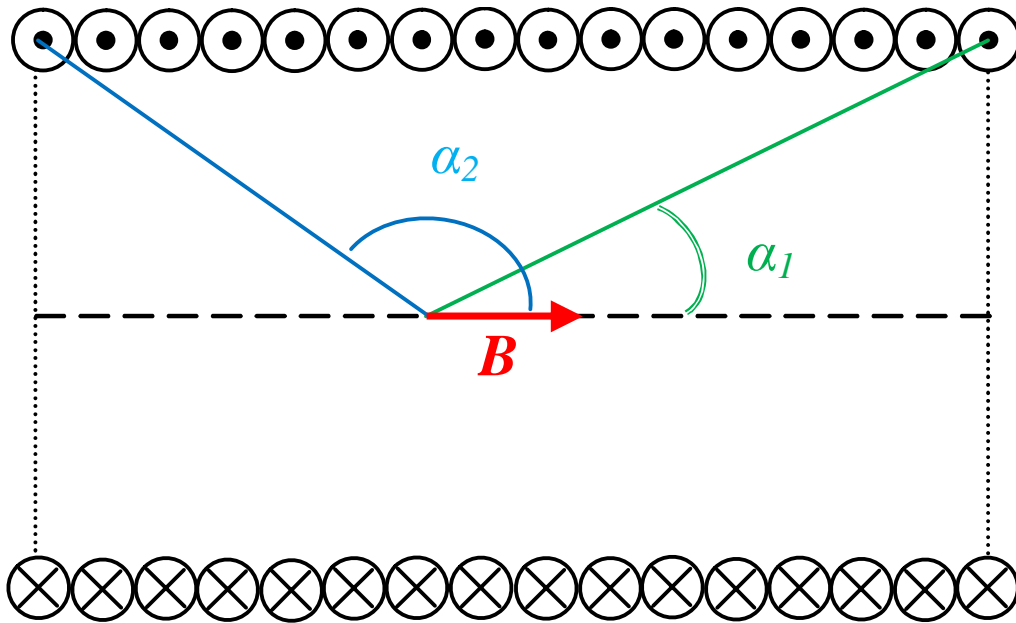
$$x = r \cos \alpha \quad r^2 = R^2 + x^2 \quad R = r \sin \alpha$$

$$x = R \operatorname{ctg} \alpha$$

$$dx = -\frac{R d\alpha}{\sin^2 \alpha}$$

$$dB = -\frac{\mu\mu_0}{2} \frac{IR^2}{r^3} \frac{nR d\alpha}{\sin^2 \alpha} = -\frac{\mu\mu_0}{2} nI \sin \alpha d\alpha$$

Магнитное поле соленоида



$$B = -\frac{\mu\mu_0}{2} nI \int_{\alpha_2}^{\alpha_1} \sin \alpha d\alpha$$

$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} nI (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2)$$

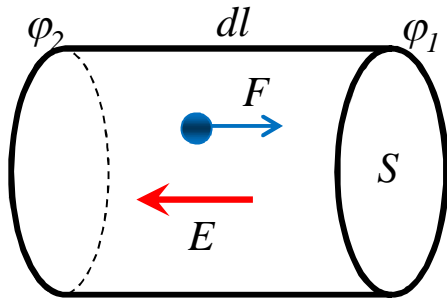
$$\alpha_1 = 0 \quad \alpha_2 = \pi$$

$$B = \mu\mu_0 nI$$

$$\alpha_1 = \pi/2 \quad \alpha_2 = \pi$$

$$B = \mu\mu_0 nI / 2$$

Магнитное поле движущегося заряда



$$dl = Vdt \quad dN = nSdl \quad dq = qdN$$

$$j = \frac{1}{S} \frac{dq}{dt} = qnV \quad I = jS = qnVS$$

$$Idl = qVdN$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{I}{r^3} [d\vec{l} \times \vec{r}] \quad \vec{B}_q = \frac{d\vec{B}}{dN} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{q}{r^3} [\vec{V} \times \vec{r}]$$

$$B_q = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{qV}{r^2} \sin \alpha$$

Магнитное поле движущегося заряда

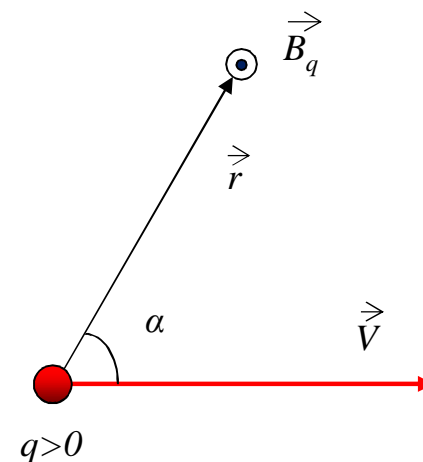
$$B_q = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \frac{qV}{r^2} \sin \alpha$$

$$r = r(t) \quad \Rightarrow \quad B_q = B_q(t)$$

$$\alpha = 0 \quad \Rightarrow \quad B_q = 0$$

$$V = 0 \quad \Rightarrow \quad B_q = 0$$

Справедливо при $V \ll c$



Правило правой руки применимо лишь для положительных зарядов.

