

Магнитное поле

План

- Магнитная индукция
- Магнитное поле движущегося заряда
- Действие магнитного поля на движущийся заряд
- Циркуляция вектора магнитной индукции
- Теорема Гаусса для магнитного поля
- Работа по перемещению проводника в магнитном поле

Магнитное поле

- Опыт показывает, что, в пространстве, окружающем токи и постоянные магниты, возникает силовое поле, называемое **магнитным**
- Наличие магнитного поля обнаруживается по **силовому действию** на внесенные в него проводники с током или постоянные магниты
- Х.Эрстед (1777–1851)

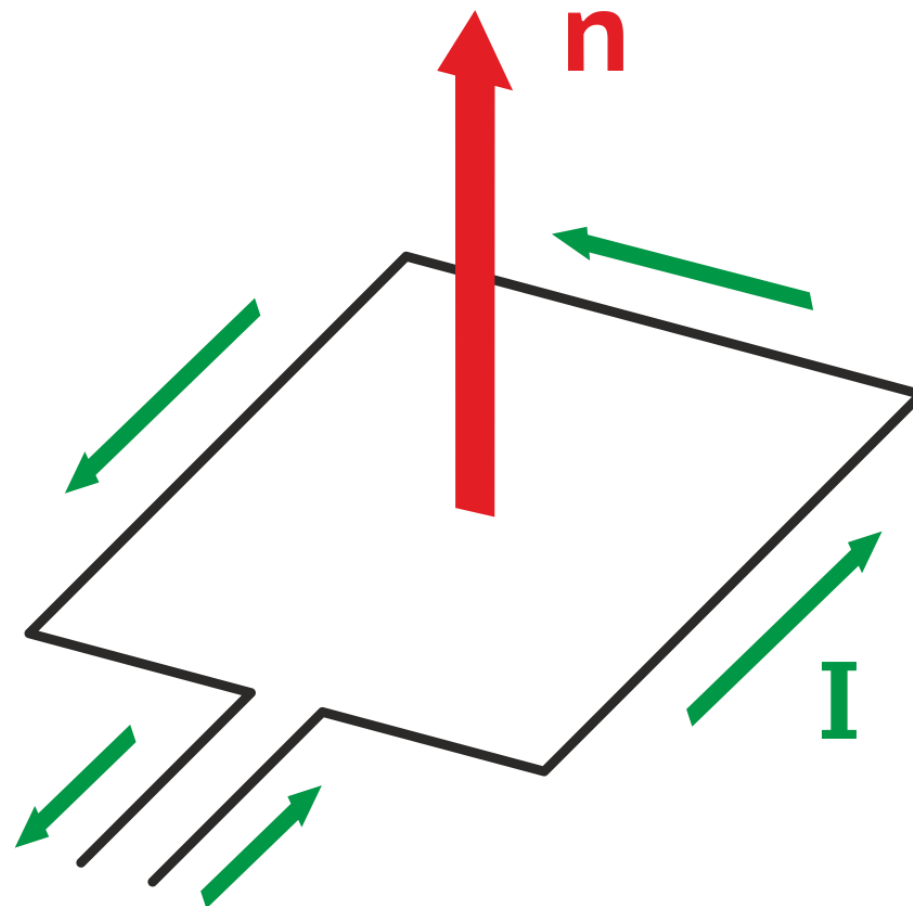
Магнитное поле

- Важнейшая особенность магнитного поля состоит в том, что оно действует **только на движущиеся электрические заряды**
- Характер воздействия магнитного поля на ток различен в зависимости от **формы** проводника, по которому течет ток, от **расположения** проводника и от **направления** тока

Ориентация контура в пространстве определяется направлением нормали к контуру

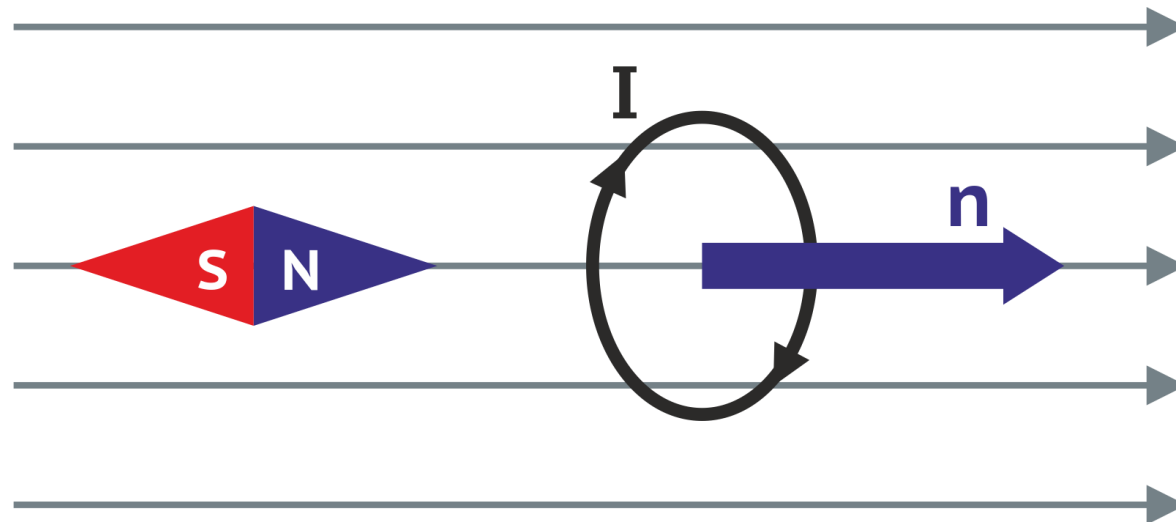
Правило правого винта

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



За направление магнитного поля в данной точке принимается направление, вдоль которого располагается **положительная нормаль** к рамке.

Также может быть принято направление, совпадающее с направлением силы, которая действует на **северный полюс** магнитной стрелки



Вращающий момент сил

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m, \mathbf{B}]$$

\mathbf{p}_m – вектор магнитного момента рамки с током

\mathbf{B} – вектор магнитной индукции, количественная характеристика магнитного поля

Для плоского контура с током

$$\mathbf{p}_m = IS\mathbf{n}$$

S – площадь поверхности контура (рамки)

\mathbf{n} – единичный вектор нормали к поверхности рамки

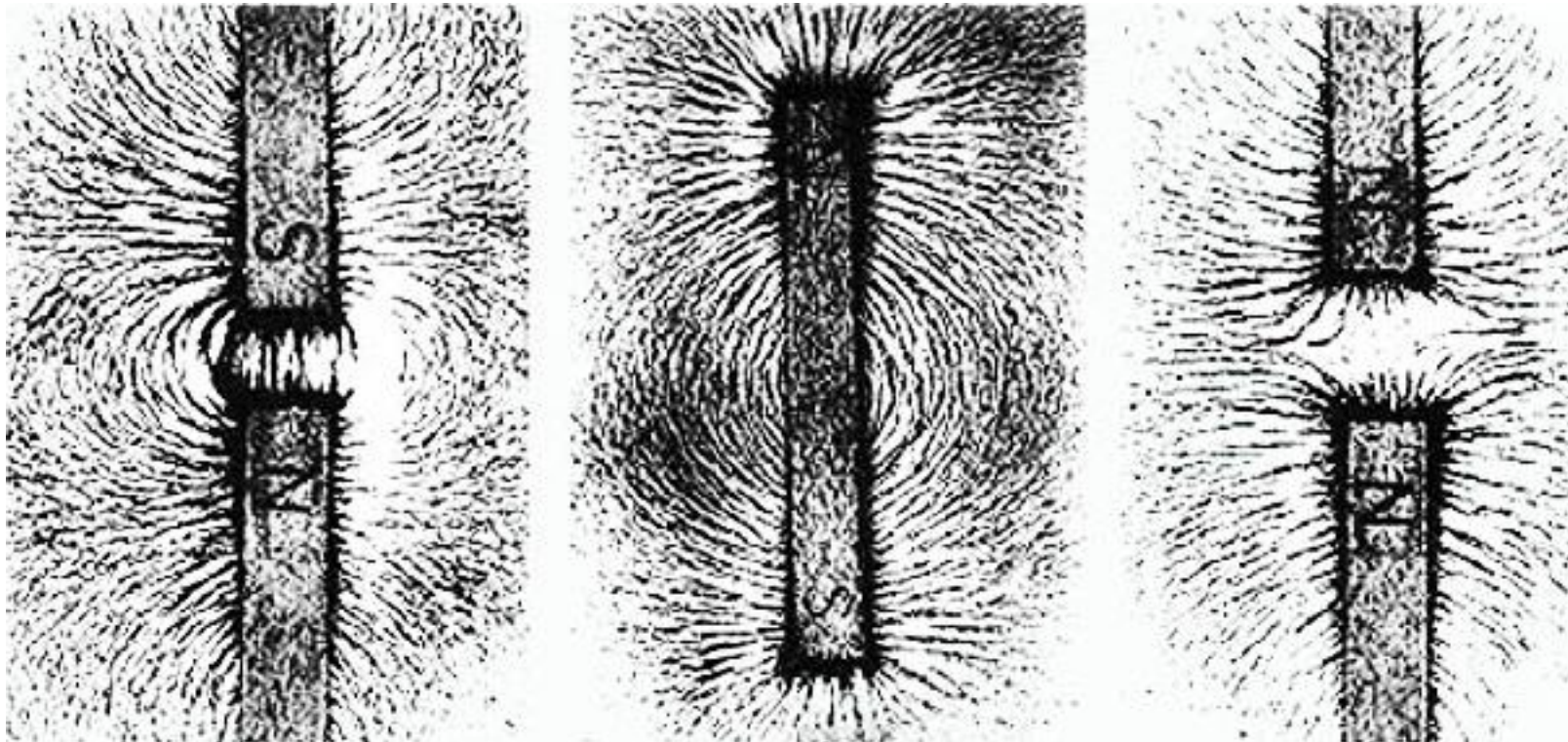
Магнитная индукция

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

$$B = \frac{M_{max}}{p_m}$$

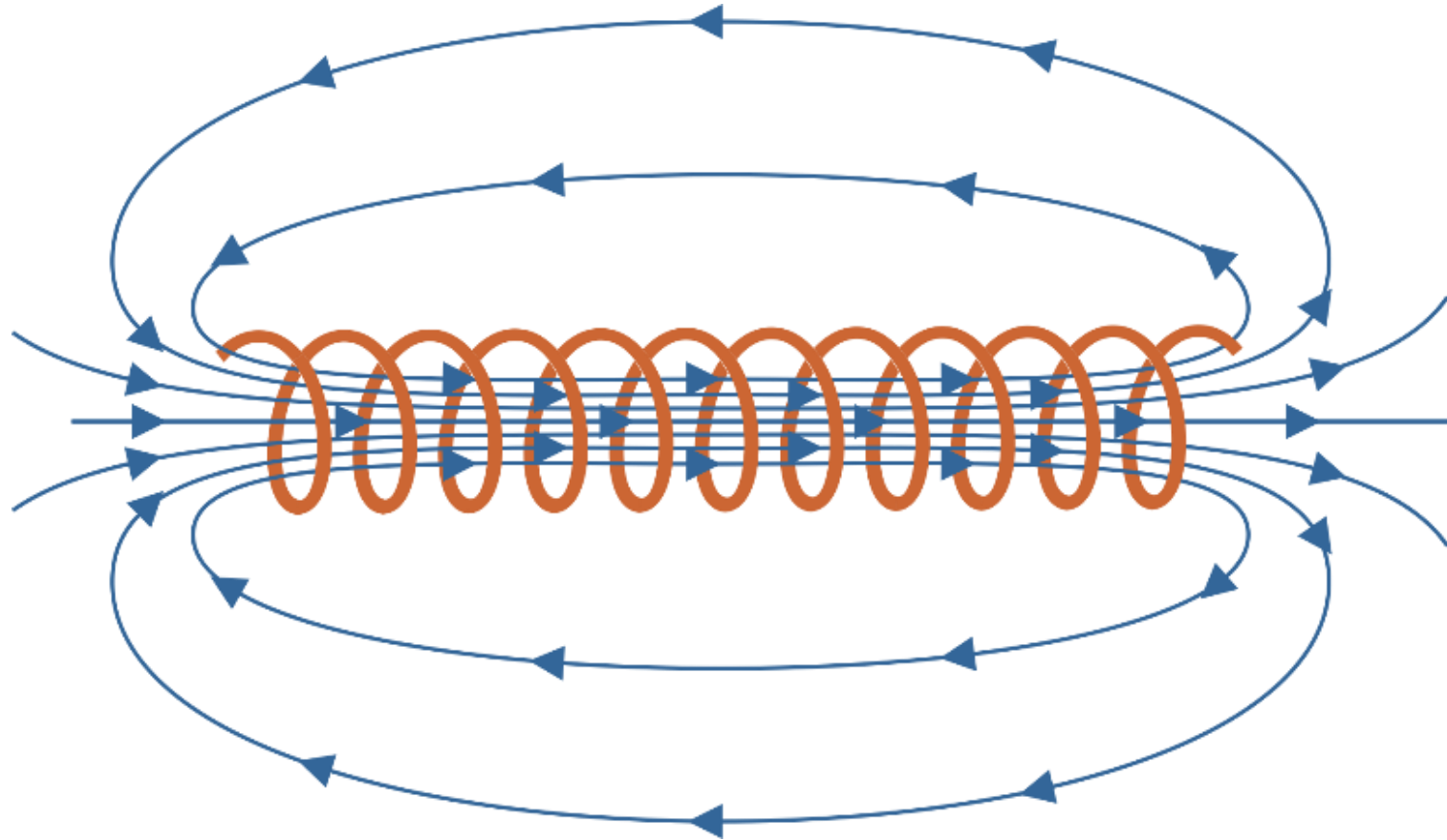
Однородное магнитное поле – магнитное поле, в каждой точке которого вектор B одинаков.

Линии магнитной индукции – линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора

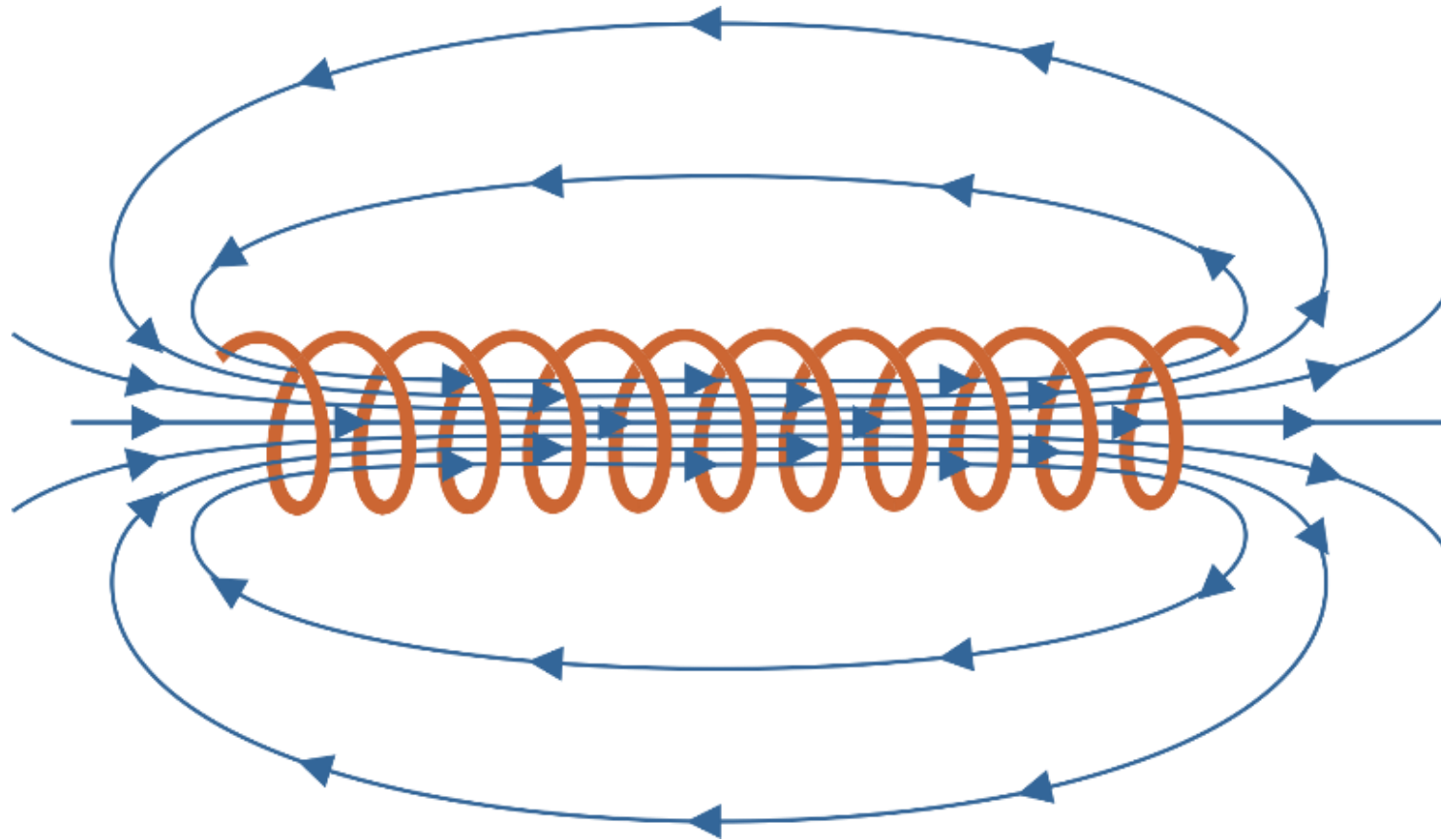


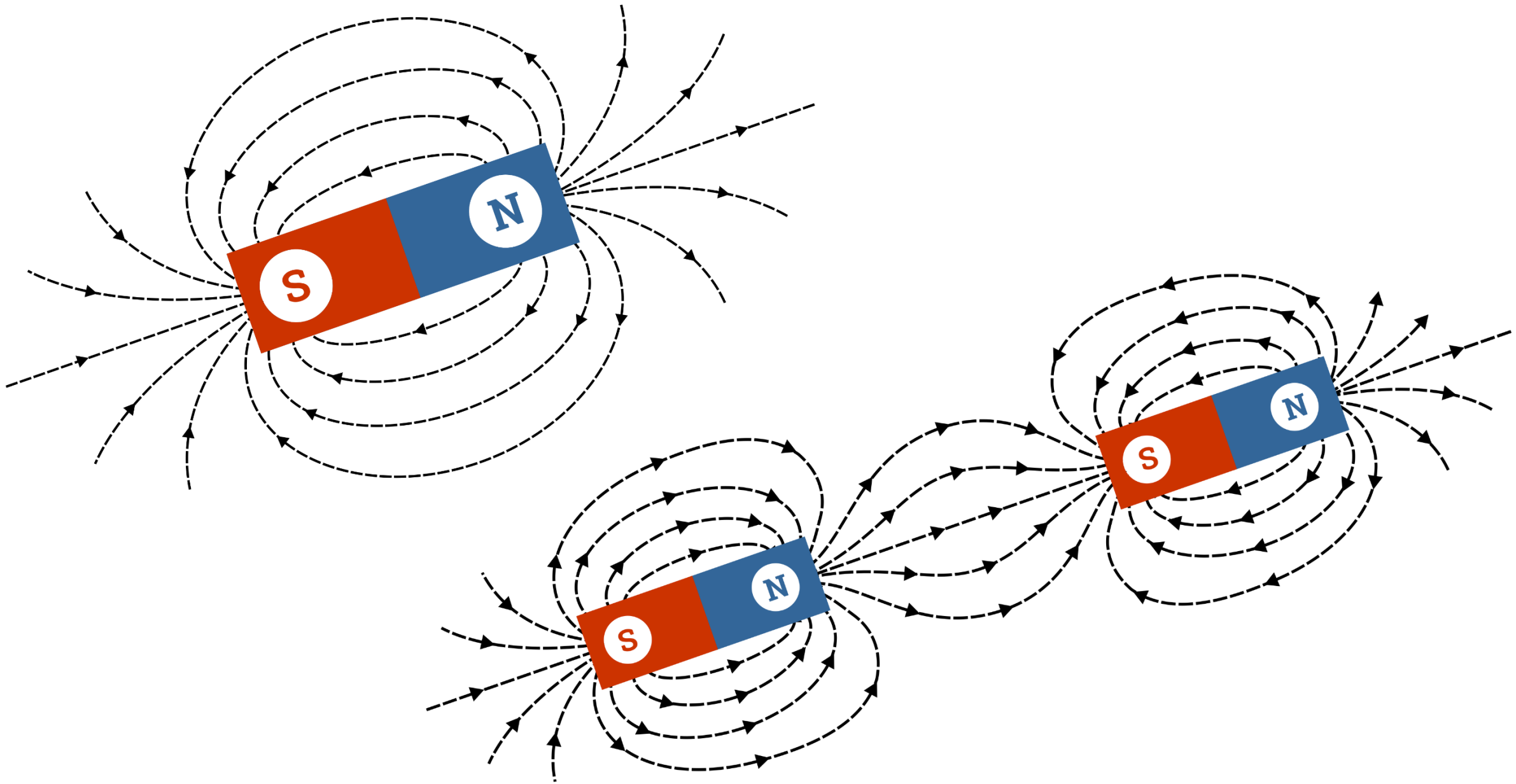
Правило правого винта

Рукоятка винта, ввинчиваемого по направлению тока, вращается в направлении линий магнитной индукции



Линии магнитной индукции всегда **замкнуты** и охватывают проводники с током





Микро- и макротоки

А. Ампер (1775 – 1836):

в любом теле существуют **микроскопические** токи, обусловленные движением электронов в атомах и молекулах.

Эти микроскопические молекулярные токи создают свое магнитное поле и могут поворачиваться в магнитных полях **макротоков**.

Если вблизи какого-то тела поместить проводник с током (макроток), то под действием его магнитного поля микротоки определенным образом ориентируются, создавая в теле дополнительное магнитное поле.

Магнитное поле больше в среде, нежели в вакууме, в отличии от электрического поля

Вектор магнитной индукции B характеризует результирующее магнитное поле, создаваемое всеми макро- и микротоками

Вектор напряженности магнитного поля

Описывает магнитное поле макротоков

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

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Н}}{\text{А}^2} = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$ – магнитная постоянная,

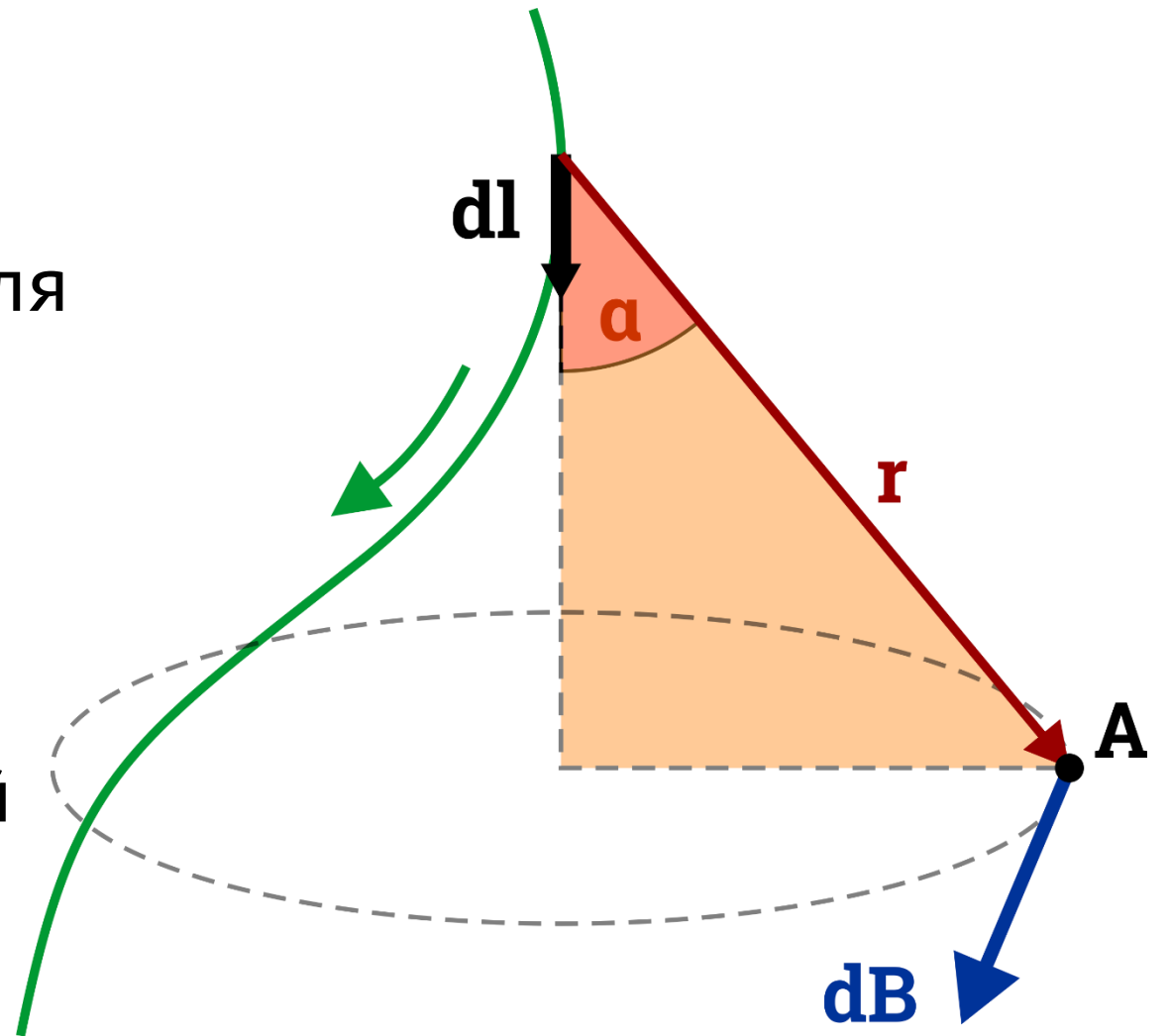
μ – безразмерная величина – **магнитная проницаемость** среды, показывающая, во сколько раз магнитное поле макротоков усиливается за счет поля микротоков среды

Закон Био-Савара-Лапласа

Для проводника с током I , элемент dl которого создает в некоторой точке A индукцию поля $d\mathbf{B}$, записывается в виде

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

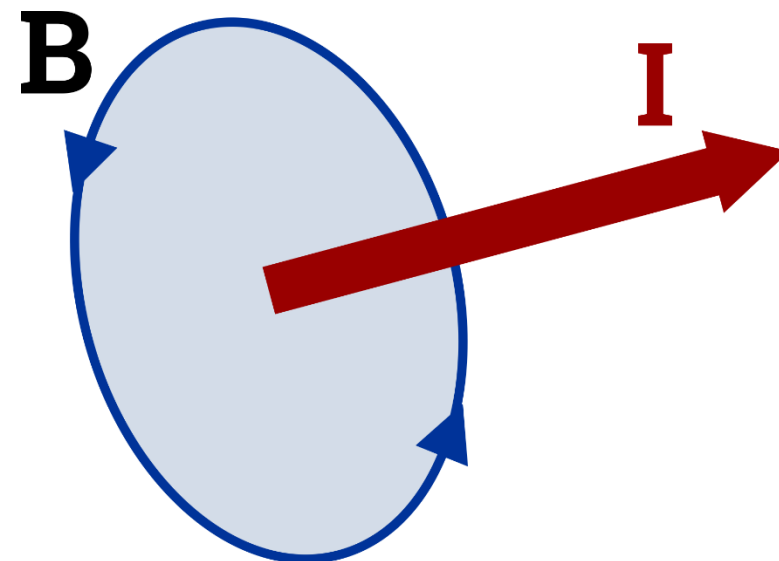
\mathbf{r} — радиус-вектор, проведённый из элемента dl проводника в точку A поля



Правило правого винта

Направление вращения рукоятки винта дает направление $d\mathbf{B}$, если **поступательное** движение винта соответствует направлению тока в элементе

Направление $d\mathbf{B}$ перпендикулярно $d\mathbf{l}$ и \mathbf{r} , и совпадает с касательной к линии магнитной индукции



Принцип суперпозиции

Магнитная индукция результирующего поля, создаваемого несколькими токами или движущимися зарядами, равна векторной сумме магнитных индукций складываемых полей, создаваемых каждым током или движущимся зарядом в отдельности

$$\mathbf{B} = \sum_i \mathbf{B}_i$$

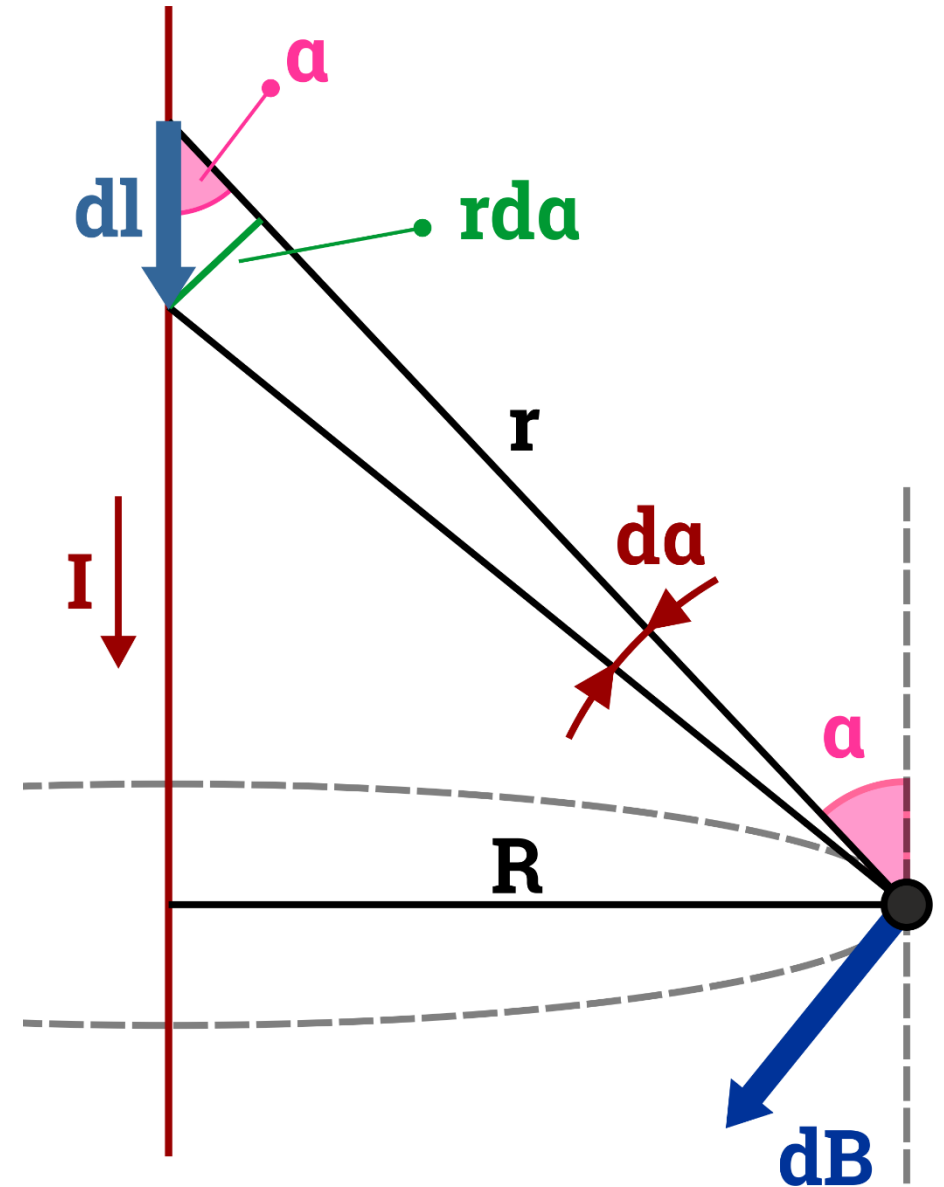
Магнитное поле прямого тока

$$r = \frac{R}{\sin \alpha} \quad dl = \frac{r \cdot d\alpha}{\sin \alpha}$$

$$dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{R} \sin \alpha d\alpha$$

$$B = \int dB = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{I}{R} \int_0^\pi \sin \alpha d\alpha =$$

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



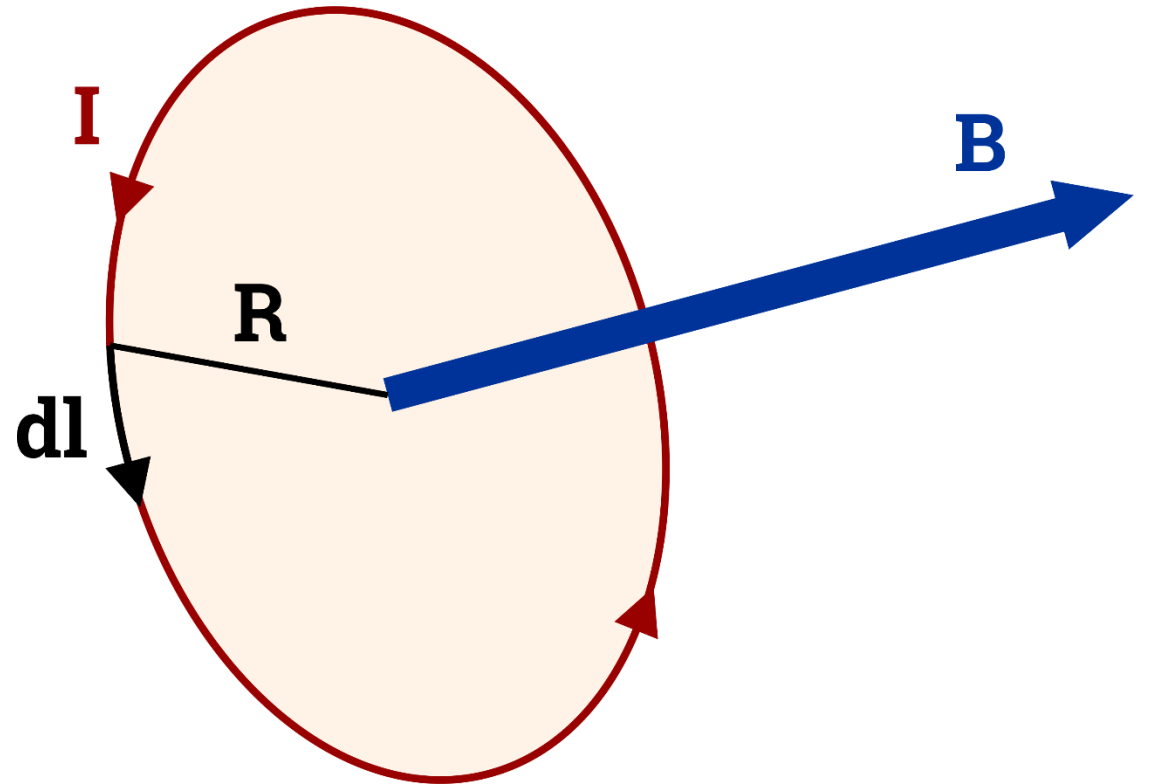
Магнитное поле кругового проводника

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

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

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

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



Закон Ампера

Сила dF , с которой магнитное поле действует на элемент проводника $d\mathbf{l}$ с током I , находящегося в магнитном поле \mathbf{B} , равна

$$d\mathbf{F} = I [d\mathbf{l}, \mathbf{B}]$$

$$dF = IBdl \sin \alpha$$

α – угол между векторами $d\mathbf{l}$ и \mathbf{B}

Правило левой руки

Если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входил вектор \mathbf{B} , а четыре вытянутых пальца расположить по направлению тока в проводнике, то отогнутый большой палец покажет **направление силы**, действующей на ток

Сила взаимодействия токов

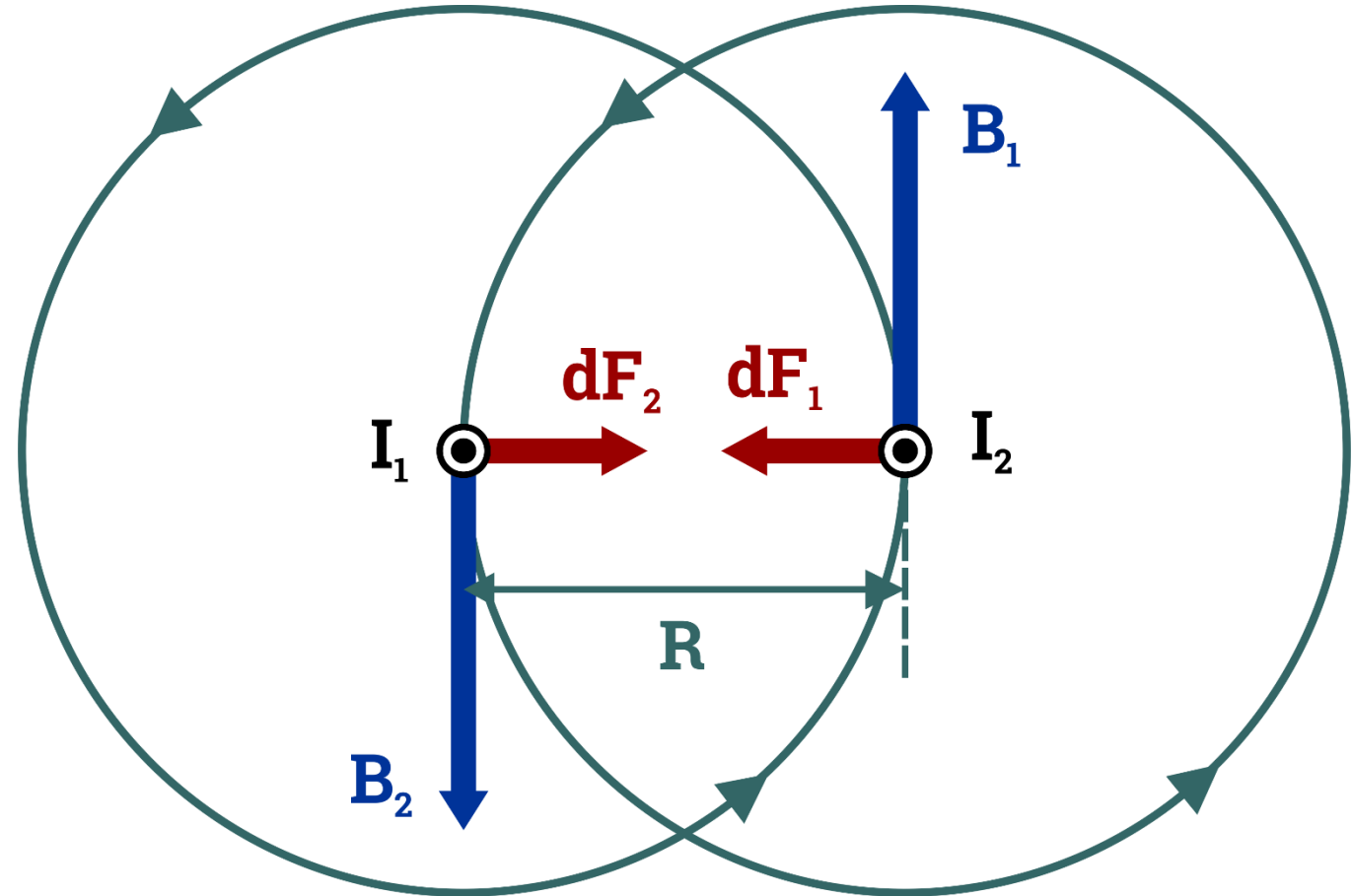
$$B_1 = \frac{\mu_0 \mu 2I_1}{4\pi R}$$

$$dF_1 = I_2 B_1 dl = \frac{\mu_0 \mu 2I_1 I_2}{4\pi R} dl$$

$$dF_2 = I_1 B_2 dl = \frac{\mu_0 \mu 2I_1 I_2}{4\pi R} dl$$

$$dF_1 = dF_2$$

$$dF_2 = I_1 B_2 dl = \frac{\mu_0 \mu 2I_1 I_2}{4\pi R} dl$$



$$dF = IBdl$$

$$B = \frac{1}{I} \frac{dF}{dl}$$

1 Тл – магнитная индукция такого однородного магнитного поля, которое действует с силой **1Н** на каждый **метр длины** прямолинейного проводника, расположенного перпендикулярно направлению поля, если по этому проводнику проходит ток **1А**

$$1\text{Тл} = 1 \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$$

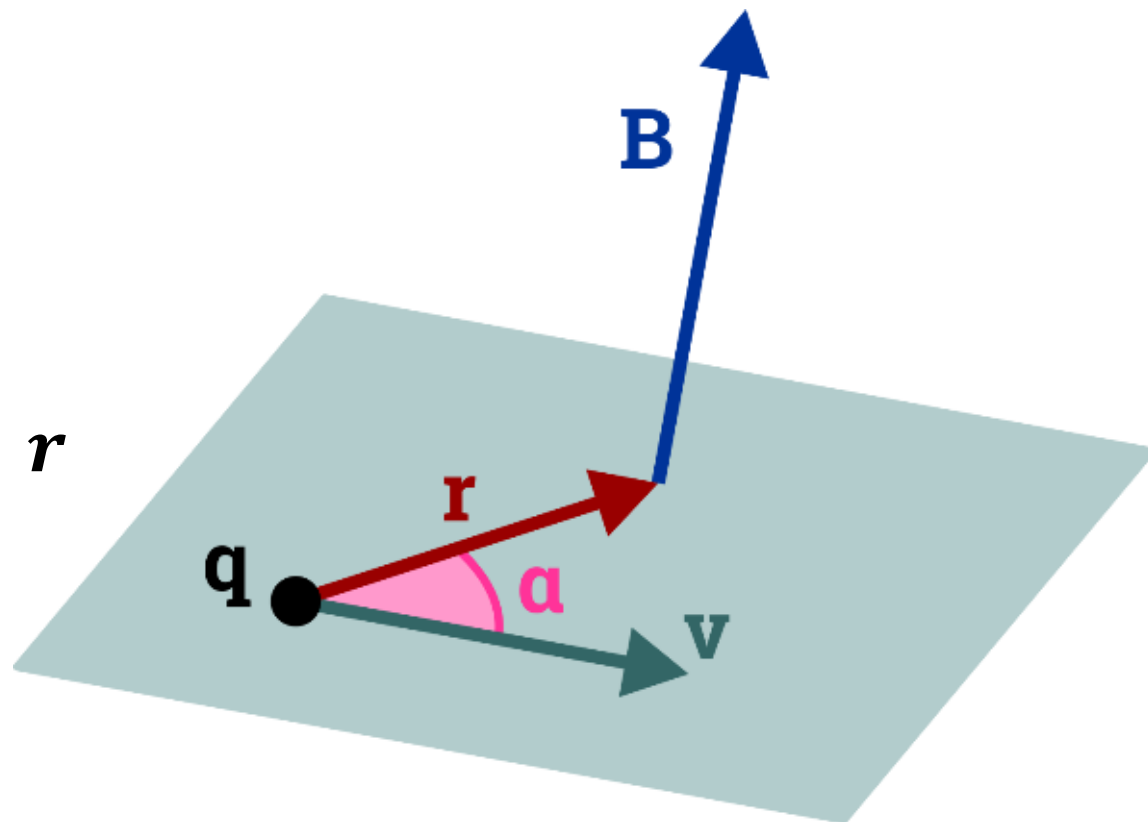
Магнитное поле движущегося заряда

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

$$B = \frac{\mu_0 \mu q v}{4\pi r^2} \sin \alpha$$

α – угол между векторами \mathbf{v} и \mathbf{r}

$$Idl = qv$$



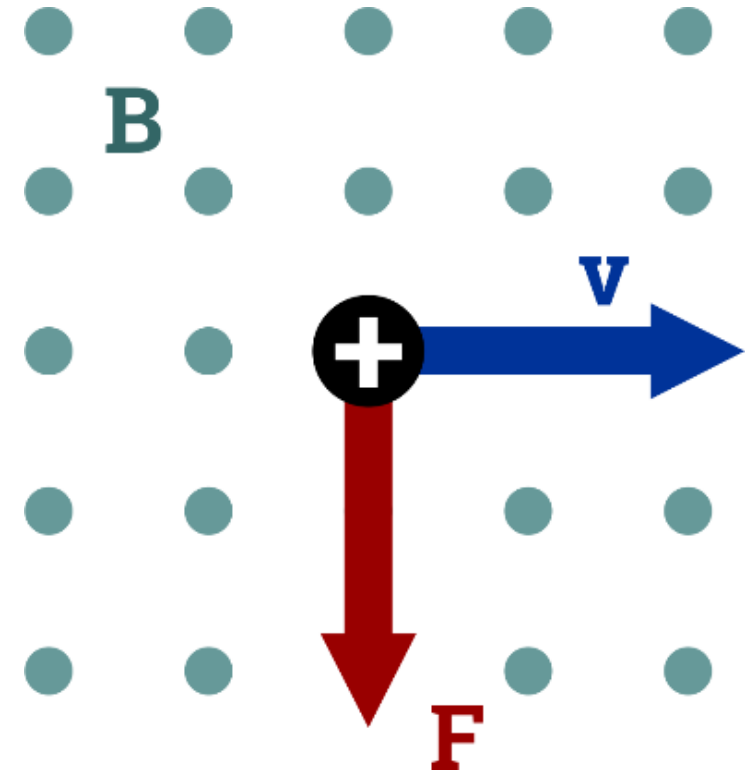
Действие магнитного поля на движущийся заряд

Сила Лоренца

$$F = q[v, B]$$

Правило левой руки

Если ладонь левой руки расположить так, чтобы в нее входил вектор B , а четыре вытянутых пальца направить вдоль вектора v , то отогнутый большой палец покажет направление силы F , действующей на положительный заряд



$$\mathbf{F} = q[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$$

- Магнитное поле не действует на покоящийся электрический заряд
- Сила Лоренца изменяет только направление этой скорости, не изменяя ее модуля
- Постоянное магнитное поле не совершает работы
- Кинетическая энергия заряженной частицы при движении в магнитном поле не изменяется

Формула Лоренца

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} + q[\mathbf{v}, \mathbf{B}]$$

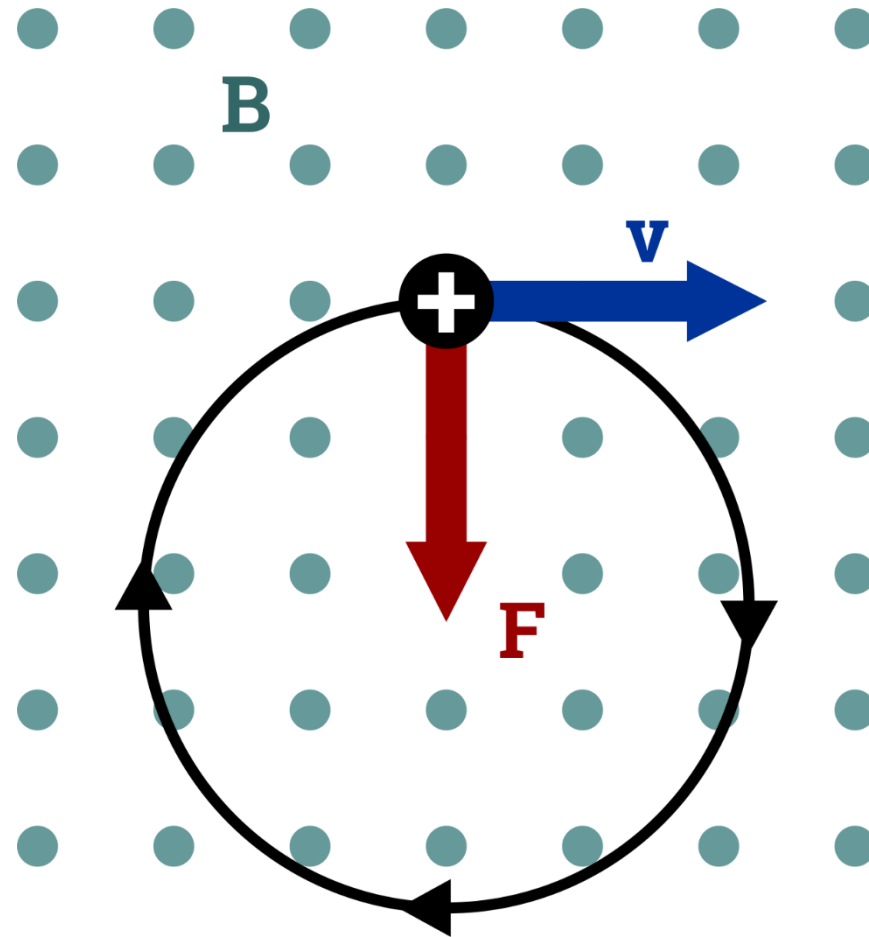
Движение заряженных частиц в магнитном поле

$$F = ma = m \frac{v^2}{r}$$

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

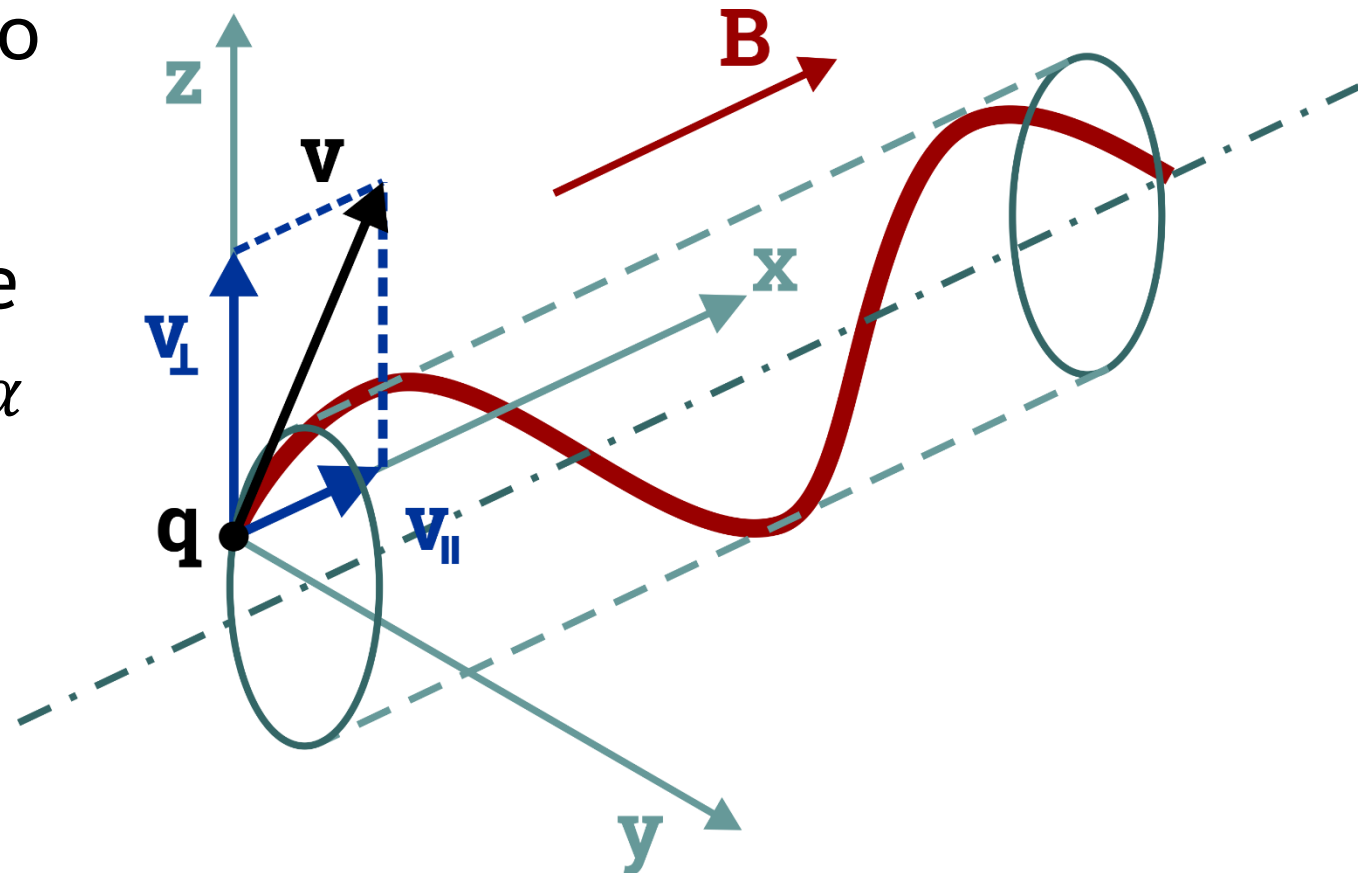
$$r = \frac{m v}{q B}$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{B q}$$



Движение заряженных частиц в магнитном поле

- 1) Равномерное прямолинейное движение **вдоль поля** со скоростью $v_{\parallel} = v \cos \alpha$
- 2) Равномерное движение со скоростью $v_{\perp} = v \sin \alpha$ по окружности в плоскости, **перпендикулярной полю**

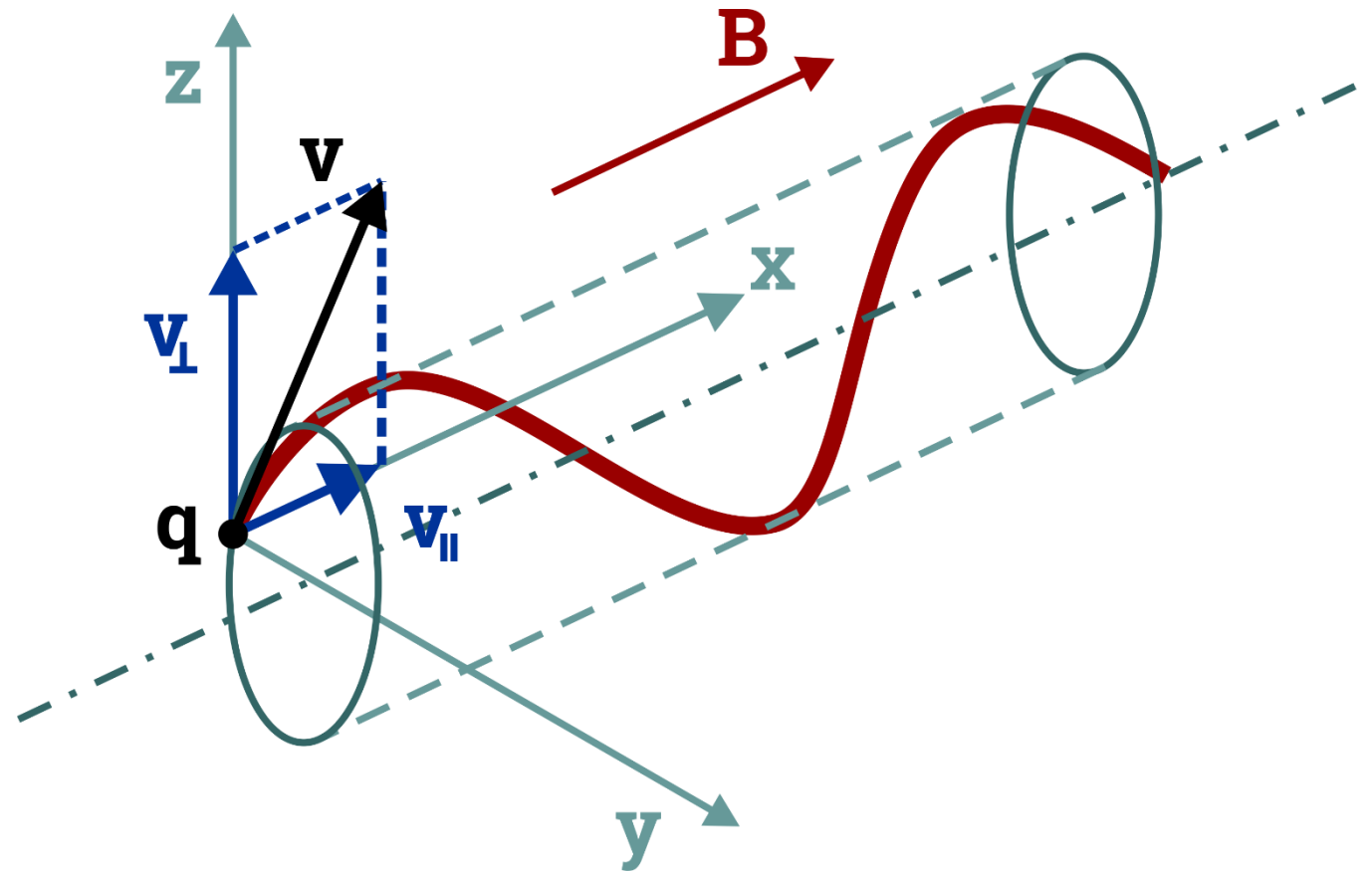


Движение заряженных частиц в магнитном поле

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

$$h = v_{\parallel} T = v T \cos \alpha$$

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

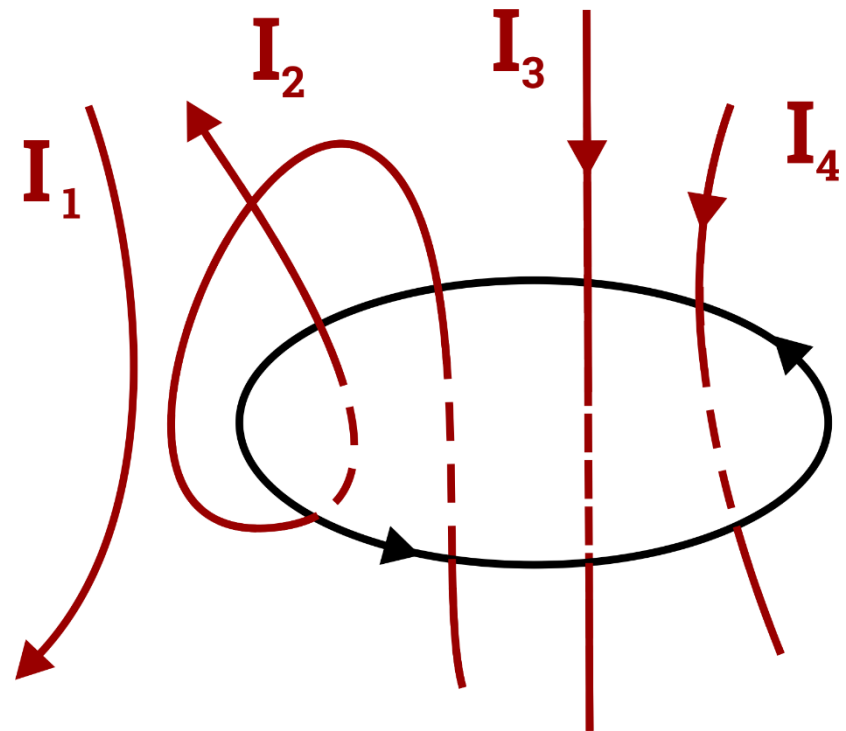


Закон полного тока для магнитного поля

Циркуляция вектора \mathbf{B} по произвольному замкнутому контуру равна произведению магнитной постоянной μ_0 на алгебраическую сумму токов, охватываемых этим контуром

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{l} = \oint_L B_l dl = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k$$

$$\sum_{k=1}^n I_k = I_1 + 2I_2 - 0 \cdot I_3 - I_4$$



Циркуляция вектора электростатического поля всегда равна нулю, т. е. электростатическое поле является **потенциальным**

$$\oint_L \mathbf{E} d\mathbf{l} = 0$$

Циркуляция вектора магнитного поля не равна нулю. Такое поле называется **вихревым**

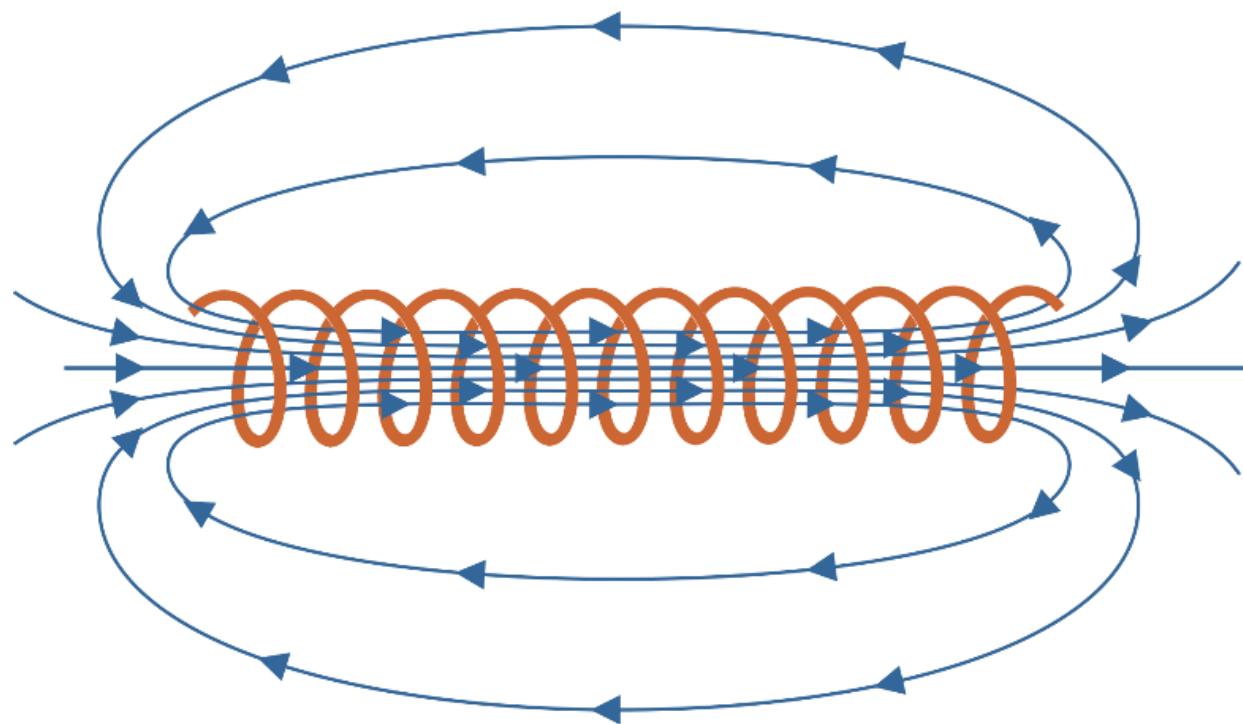
$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 \sum_{k=1}^n I_k$$

Магнитное поле соленоида

$$\oint_{ABCD} B_l dl = \mu_0 NI$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{l}$$

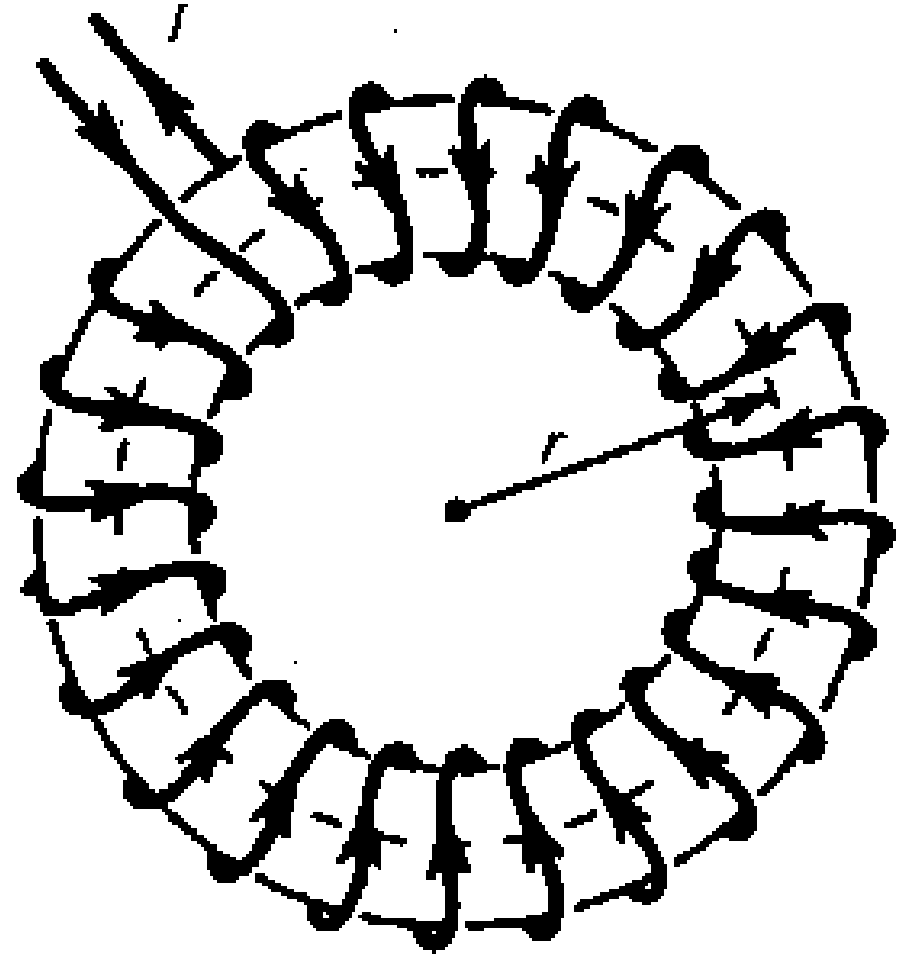
Поле внутри соленоида однородно



Магнитное поле тороида

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 NI$$

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$$



Поток вектора магнитной индукции

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

$$d\Phi_B = \mathbf{B}d\mathbf{S} = B_n dS$$

$$B_n = B \cos \alpha$$

Поток вектора магнитной индукции

Для однородного поля и плоской поверхности, расположенной перпендикулярно вектору B

$$\Phi = BS$$

$$\Phi = [\text{Вб}] = [\text{Вебер}] = \text{Тл} \cdot \text{м}^2$$

Потокосцепление

$$\Psi = \Phi N$$

Теорема Гаусса для магнитного поля

Поток вектора магнитной индукции сквозь любую замкнутую поверхность равен нулю

$$\int_S \mathbf{B} dS = \int_S B_n dS = 0$$

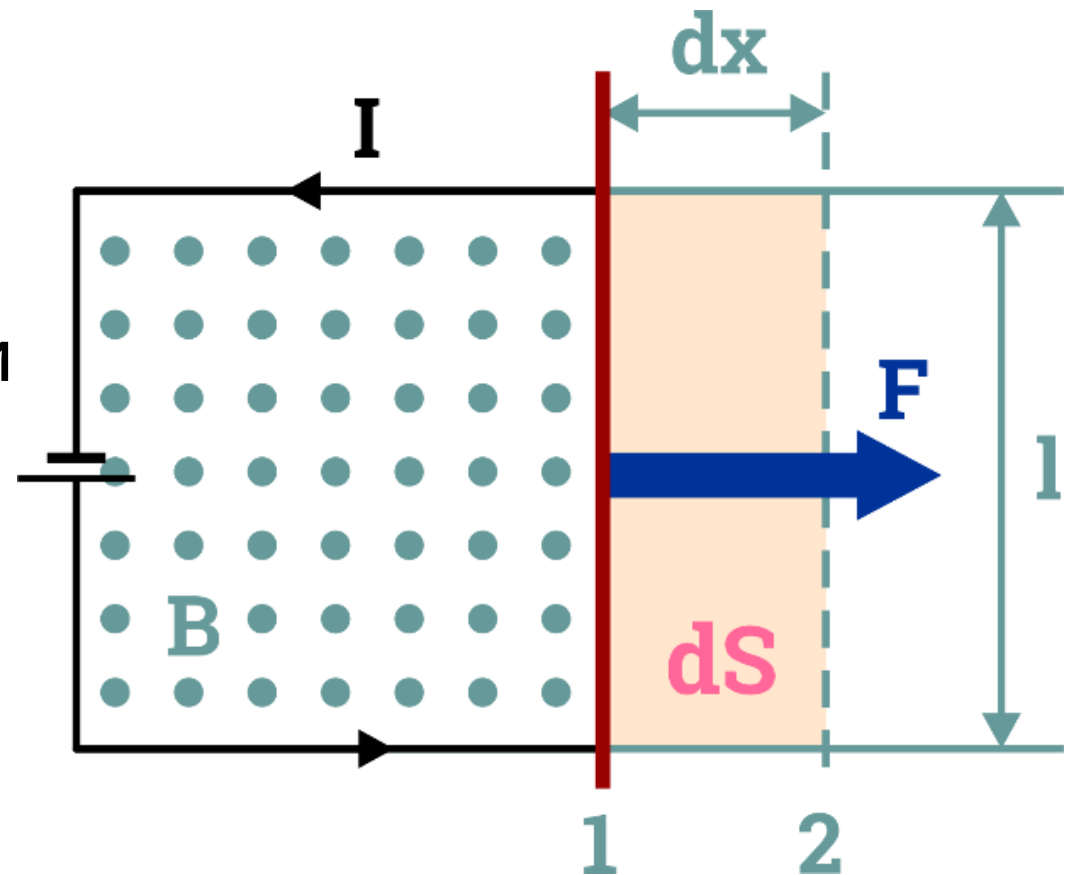
Теорема отражает факт отсутствия магнитных зарядов

Работа по перемещению проводника

$$F = IBl$$

$$dA = Fdx = IBl \cdot dx = IB \cdot dS = \\ = IB \cdot d\Phi$$

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока на магнитный поток, пересеченный движущимся проводником



Работа по перемещению проводника

$$A = IB\Delta\Phi$$

Работа по перемещению замкнутого контура с током в магнитном поле равна произведению силы тока в контуре на **изменение магнитного потока**, сцепленного с контуром