

8. МАГНИТНОЕ ПОЛЕ В ВАКУУМЕ

7.1. Взаимодействие токов. Магнитное поле

Электрические токи взаимодействуют между собой. Например, два тонких прямолинейных параллельных проводника, по которым текут токи в одном направлении, притягивают друг друга.

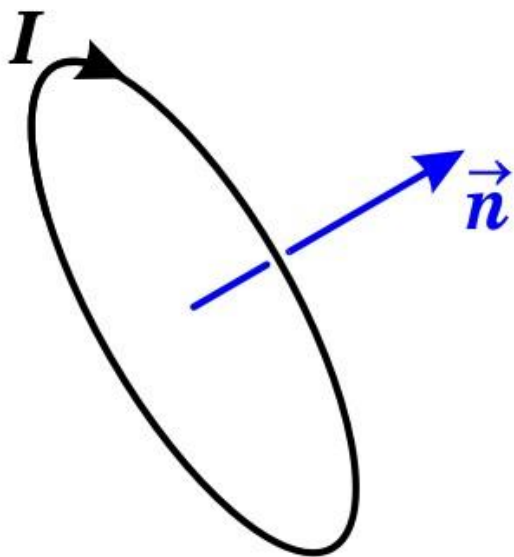
Сила взаимодействия, приходящаяся на единицу длины

$$F_1 = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 I_2}{b}$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная, I_1, I_2 – сила тока в проводниках, b – расстояние между ними. Закон был установлен Ампером в 1820 г.

Взаимодействие токов осуществляется через поле, которое называется **магнитным**. Это поле, как обнаружил Эрстед, оказывает ориентирующее действие на **магнитную стрелку**.

Движущиеся заряды (токи) изменяют свойства окружающего их пространства — создают в нем магнитное поле. Это поле проявляется в том, что на движущиеся в нем заряды (токи) действуют силы.



Магнитная индукция — вектор, направление которого определяется равновесным направлением положительной нормали к пробному контуру.

$$B = \frac{N_{max}}{P_m}$$

N_{max} – вращательный момент, P_m – магнитный момент контура

B характеризует силовое действие магнитного поля на ток и, следовательно, является аналогом напряженности электрического поля E .

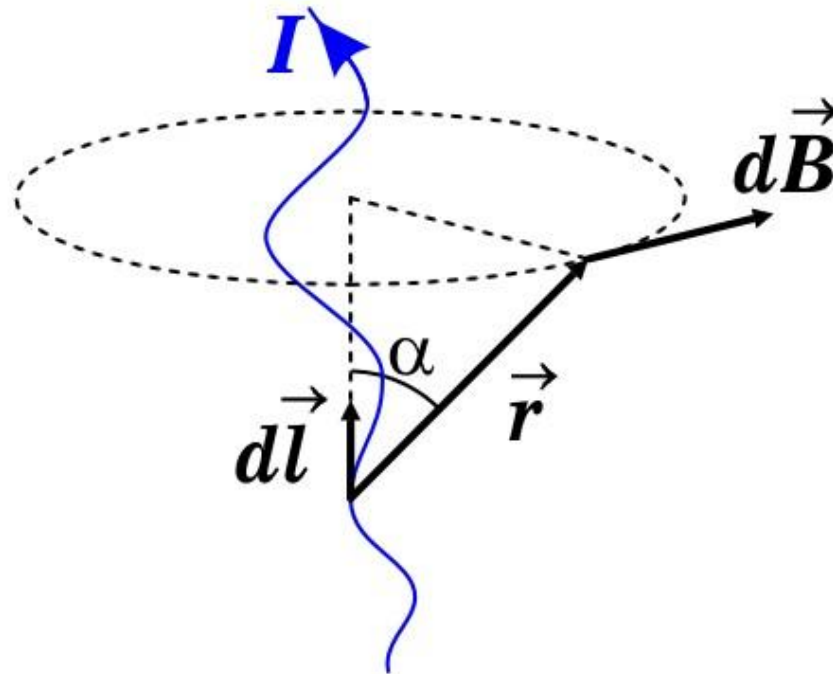
8.2. Закон Био-Савара-Лапласа. Поле движущегося заряда

Био и Савар провели в 1820 г. исследование магнитных полей токов различной формы. Они установили, что магнитная индукция пропорциональна силе тока, создающего магнитное поле, и зависит от расстояния до той точки, в которой определялась B .

Лаплас - магнитное поле любого тока может быть вычислено как векторная сумма (суперпозиция) полей, создаваемых отдельными элементарными участкам тока $d\vec{l}$.

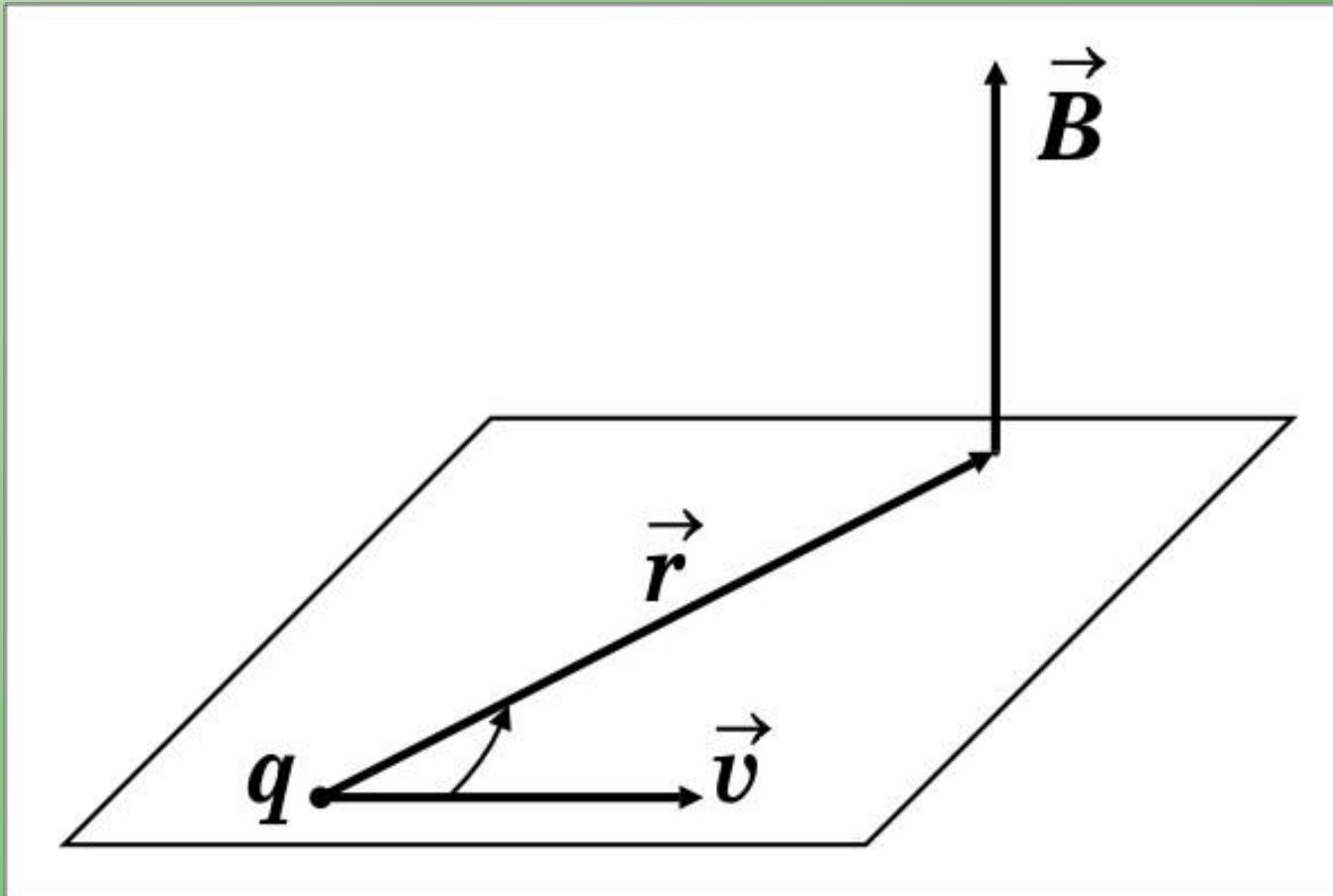
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{l} \times \vec{r}]}{r^3}$$

– закон Био-Савара-Лапласа.



Индукция магнитного поля, создаваемого зарядом q , движущимся со скоростью v

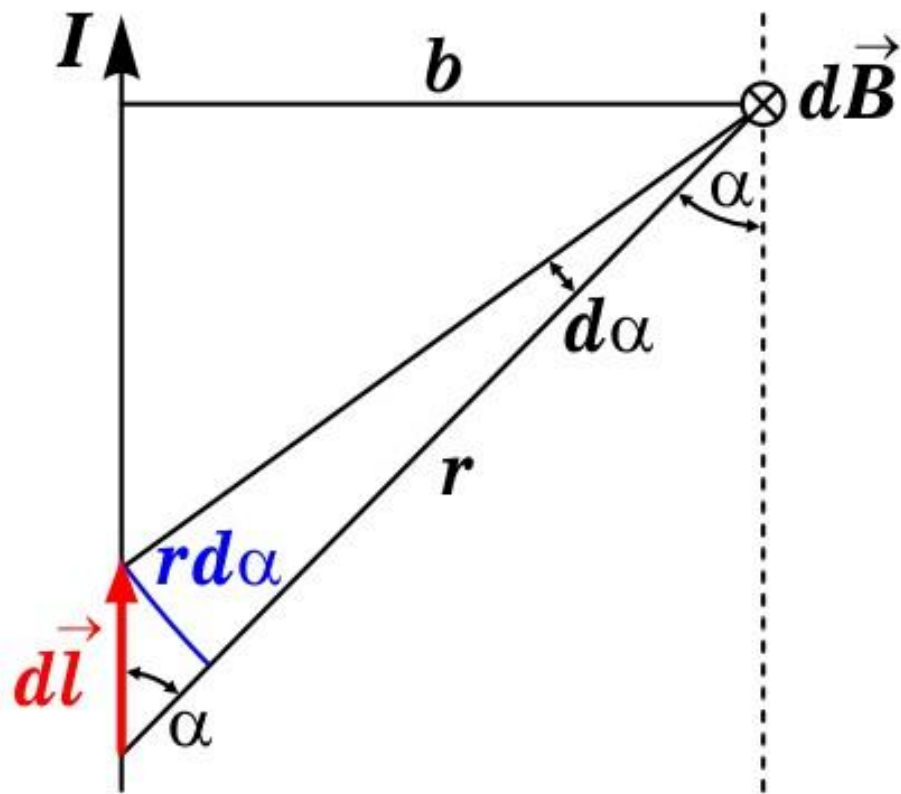
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q[\vec{v} \times \vec{r}]}{r^3}$$



Электромагнитные возмущения распространяются в пространстве со скоростью света c . Поэтому поле в данной точке пространства будет соответствовать тому состоянию (т. е. положению и скорости) заряда, которое существовало на $\tau = r/c$ секунд раньше. Формулы дают правильный результат, если перемещением заряда за время τ $v\tau \ll r$, т.е. $v \ll c$.

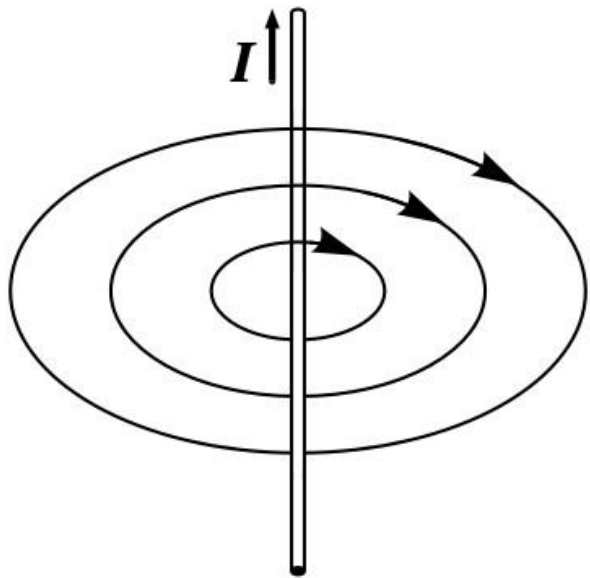
8.3. Поля прямого и кругового токов

Применим закон Био-Савара-Лапласа для вычисления полей простейших токов. Рассмотрим поле, создаваемое током, текущим по бесконечному прямому проводу. Все $d\mathbf{B}$ в данной точке имеют одинаковое направление (сложение векторов можно заменить сложением их модулей).

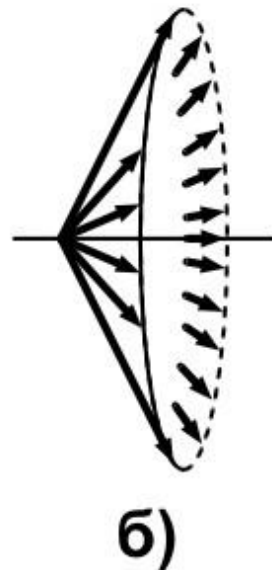
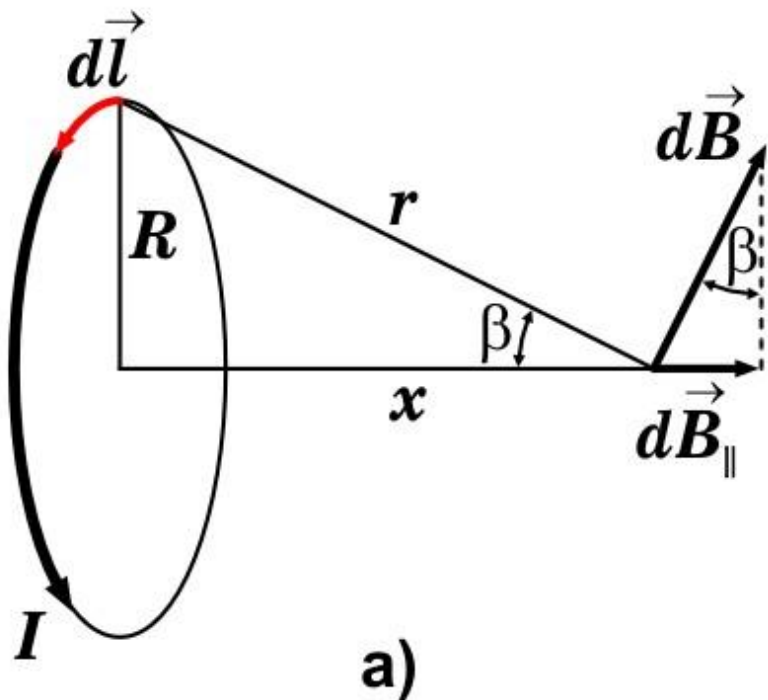


Магнитная индукция поля прямого тока

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



Линии магнитной индукции представляют собой систему концентрических окружностей, охватывающих провод.



Магнитная индукция на оси кругового тока, на расстоянии x от плоскости, в которой лежит контур

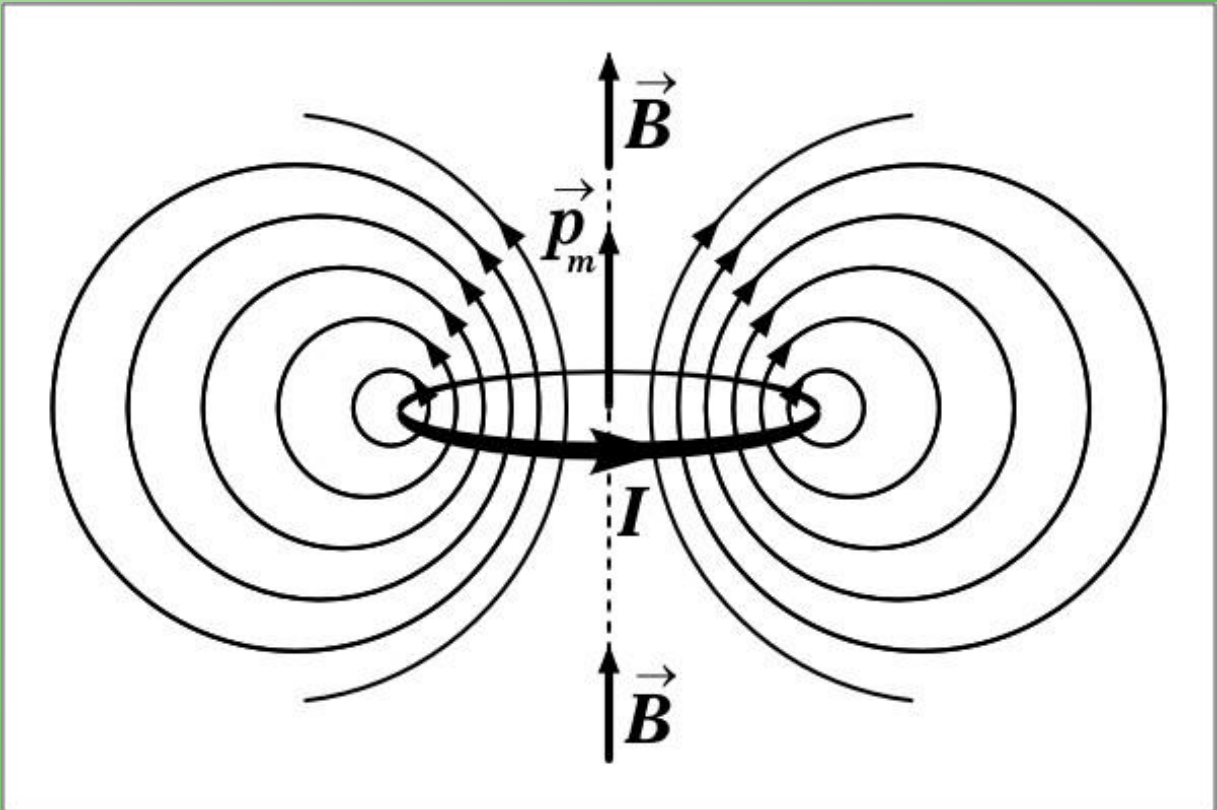
$$B = \frac{\mu_0 I R^2}{2(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

Для $x \gg R$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\vec{p}_m}{x^3}$$

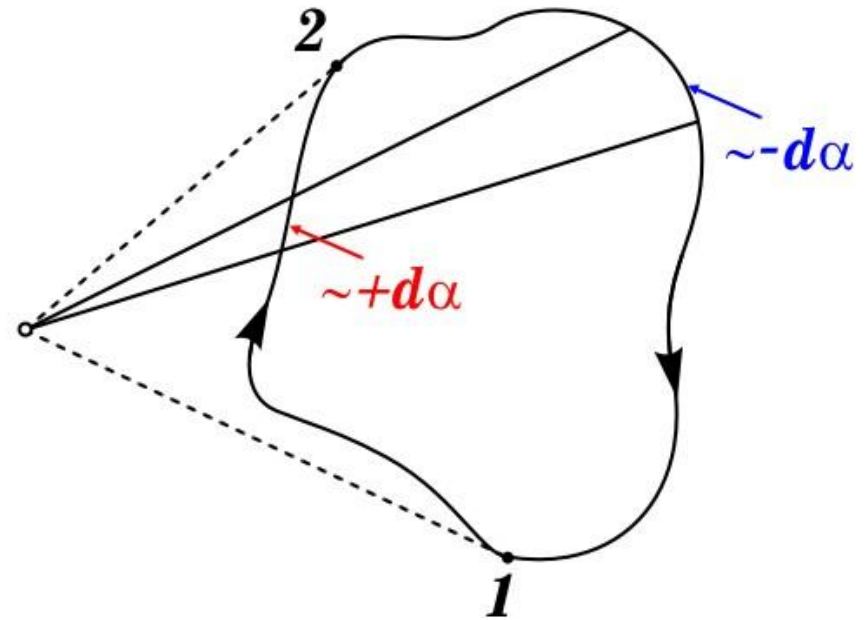
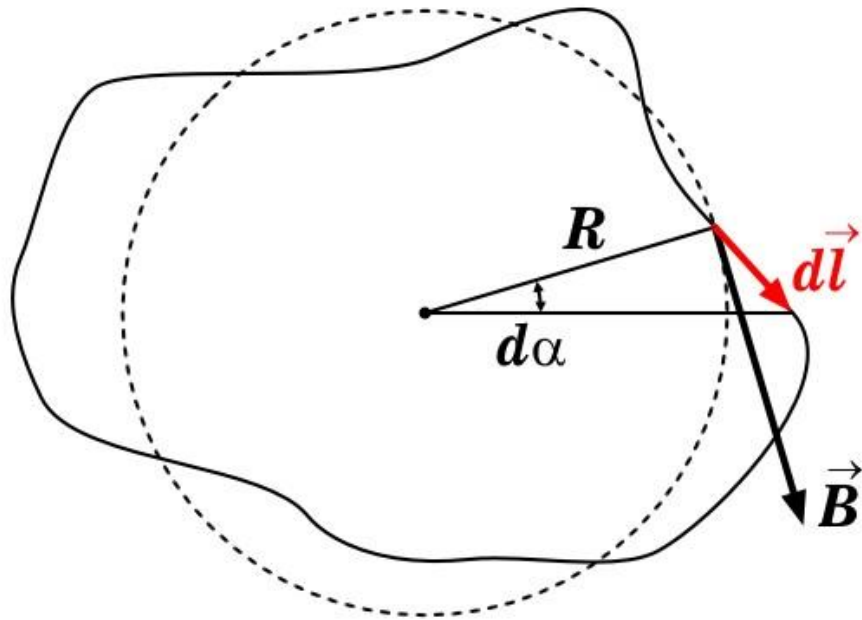
Поле в центре кругового тока

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



8.4. Циркуляция вектора B . Поле соленоида и тороида

Вычислим циркуляцию вектора B по контуру, охватывающему прямой ток. Контур лежит в плоскости перпендикулярной току.

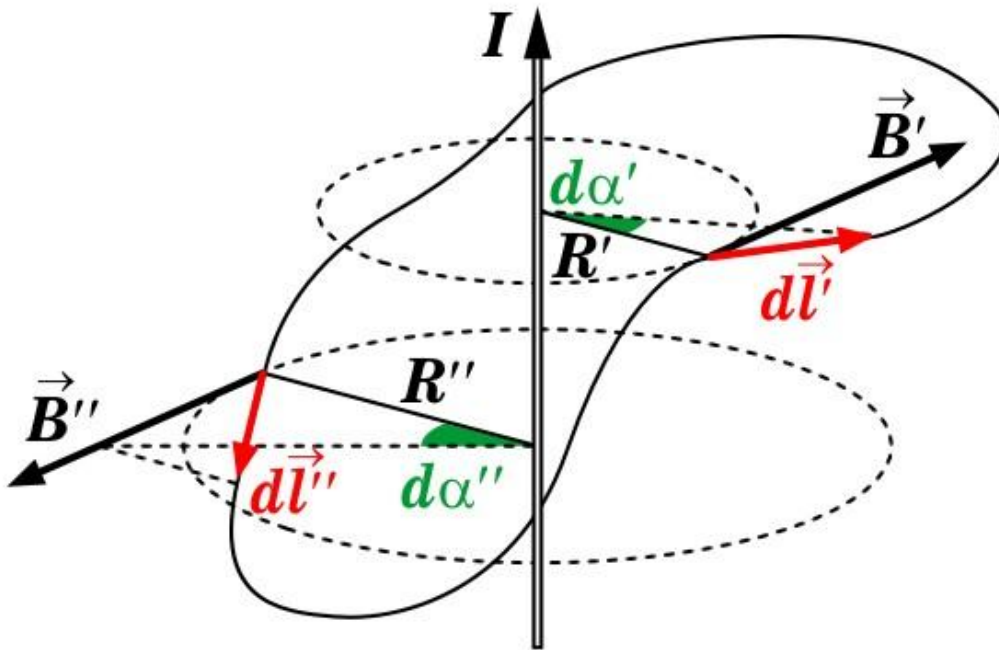


Циркуляция вектора B по замкнутому контуру (I – ток охватываемый контуром):

$$\oint B dl = \mu_0 I$$

Если контур тока не охватывает, циркуляция вектора B равна нулю. Если контур охватывает несколько токов, циркуляция B равна их алгебраической сумме:

$$\oint B dl = \mu_0 \sum_k I_k$$



Вычисляя сумму токов, положительным нужно считать такой ток, направление которого связано с направлением обхода по контуру правилом правого винта.

Величины \vec{E} и \vec{B} являются основными силовыми характеристиками соответствующих полей. Между этими полями имеется принципиальное различие.

$$\oint \vec{E} d\vec{l} = 0$$

Электростатическое поле потенциально и может быть охарактеризовано потенциалом φ .

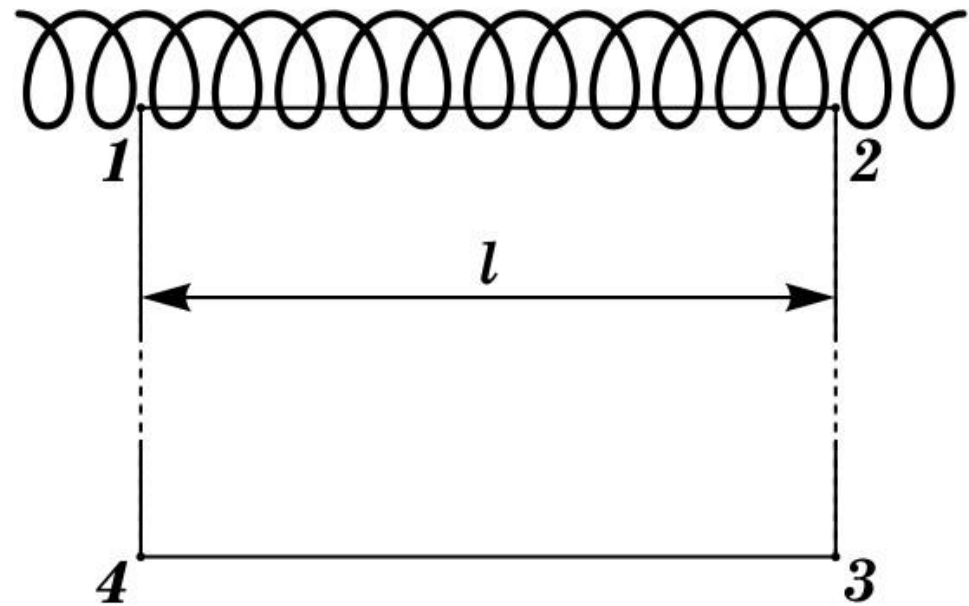
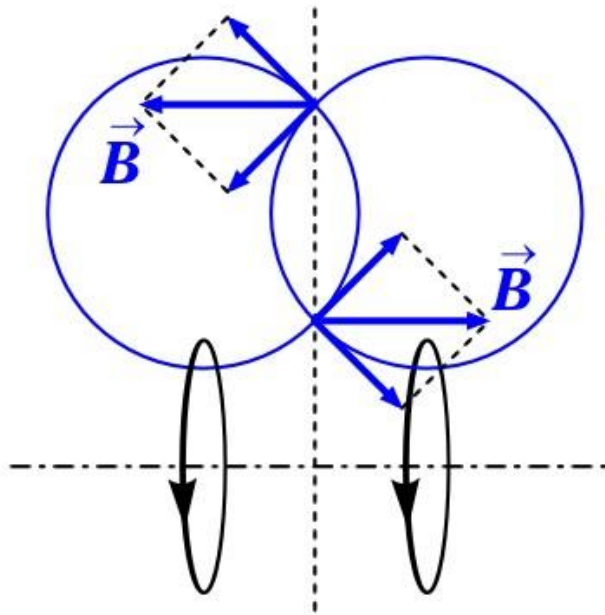
$$\oint \vec{B} d\vec{l} \neq 0$$

Циркуляция \vec{B} не равна нулю, если контур, по которому берется циркуляция, охватывает ток. Поля, обладающие таким свойством, называются **вихревыми**. Магнитному полю нельзя приписать потенциал.

Линии магнитной индукции всегда замкнуты. Это указывает на то, что **магнитных зарядов в природе не существует**.

Поле бесконечно-длинного соленоида

Соленоид - это тонкий провод, навитый плотно, виток к витку, на цилиндрический каркас. Соленоид создает такое же поле как и система одинаковых круговых токов с общей прямой осью. Любая плоскость перпендикулярная к оси соленоида будет его плоскостью симметрии.

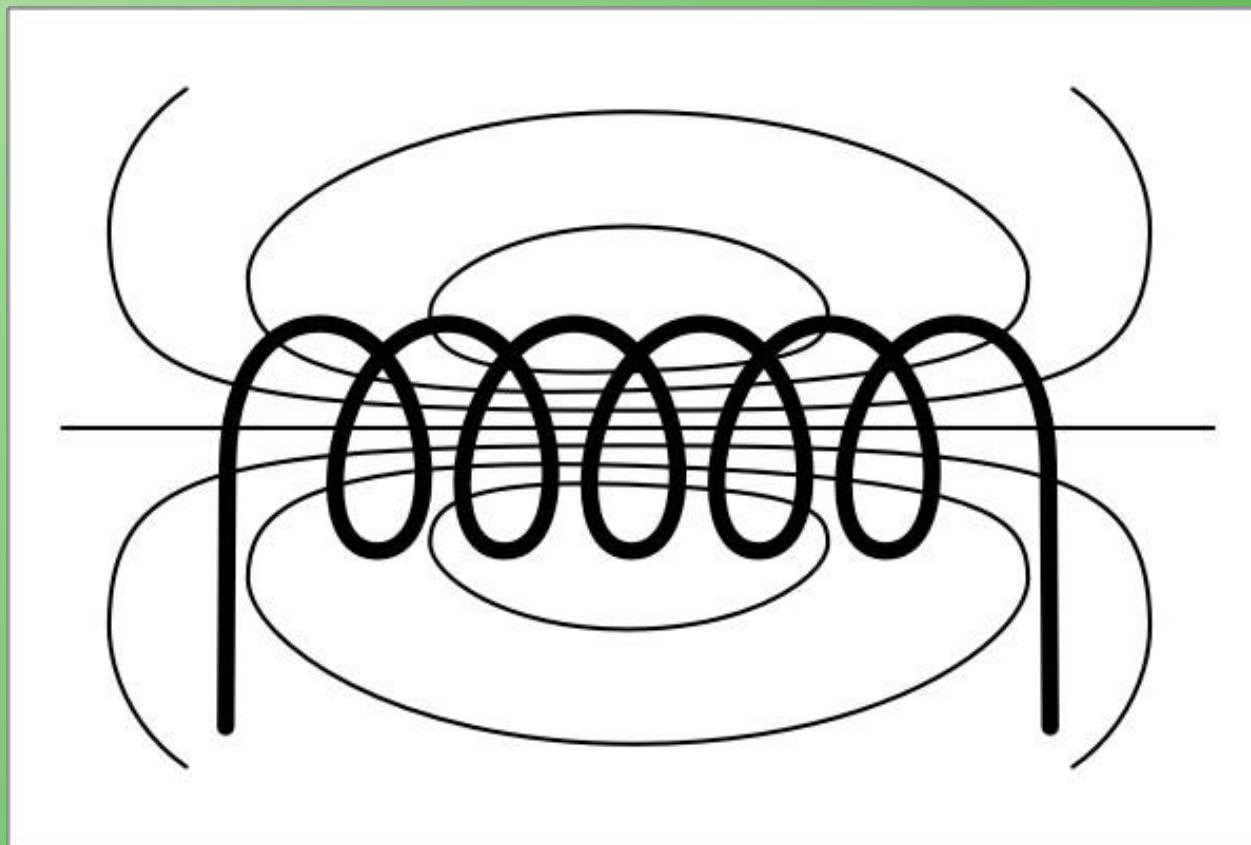


Магнитная индукция внутри бесконечно-длинного соленооида

$$B = \mu_0 In$$

Поле внутри соленооида однородно.

Вне соленооида магнитная индукция равна нулю.



Поле тороида

Тороид представляет собой тонкий провод, плотно навитый на каркас, имеющий форму тора. Он эквивалентен системе одинаковых круговых токов, центры которых расположены по окружности.

Магнитная индукция внутри тороида:

$$B = \mu_0 I n \frac{R}{r}$$

Вне тороида магнитная индукция равна нулю