План

1. Магнитное поле и его характеристики: магнитная индукция и напряжённость поля
2. Закон Био-Савара-Лапласа. Принцип суперпозиции
3. Применение закона Био-Савара-Лапласа для расчёта индукции магнитного поля
   3.1. Индукция поля прямого бесконечного проводника с током
   3.2. Индукция в центре кругового тока
   3.3. Индукция на оси кругового тока
   3.4. Поле соленоида
   3. 5. Поле движущегося заряда
4. Закон полного тока для магнитного поля в вакууме. Непотенциальность магнитного поля. Применение закона полного тока для расчёта поля прямого тока и длинного соленоида
5. Действие магнитного поля для движущиеся заряды и токи
   5.1. Сила Лоренца.
      5.1.1. Движение заряженной частицы в магнитном поле под действием силы Лоренца
      5.1.2. Магнетизм – релятивистский эффект
   5.2. Сила Ампера.
6. Рамка с током в магнитном поле:
   6.1. В однородном
   6.2. В неоднородном
7. Эффект Холла
8. Поток вектора магнитной индукции
9. Теорема Остроградского-Гаусса для магнитного поля
10. Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

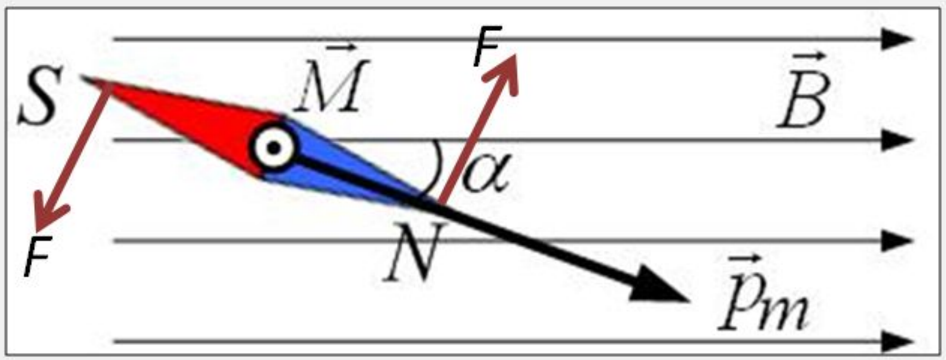
Магнитное поле. Индукция поля *B*

Магнитное поле создаётся любыми токами или движущимися зарядами

Взаимодействие токов (движущихся зарядов) осуществляется посредством магнитного поля (теория близкодействия)

Магнитное поле проявляется в том, что <u>на токи, помещённые в магнитное поле, действует сила</u>

<u>Магнитное поле поворачивает магнитную стрелку</u> (компаса):



Момент сил, действующих на стрелку:

$$\vec{M} = \left[\vec{p}_m \times \vec{B}\right]$$

$$M = p_m B \sin\alpha$$

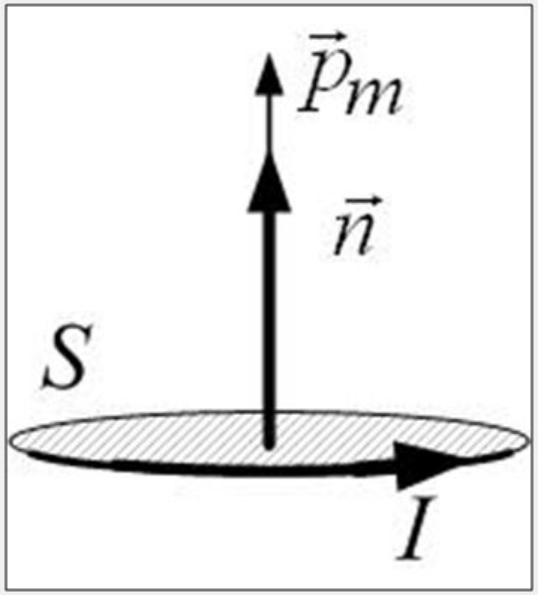
$\vec{B}$ <u>– силовая характеристика поля – магнитная индукция</u>

p_m – магнитный момент стрелки (или контура с током)

Магнитный момент $\vec{p}_m$

Определение магнитного момента контура с током:

$$\boxed{\vec{p}_m = I \cdot S \cdot \vec{n}} \qquad \boxed{p_m = I \cdot S}$$

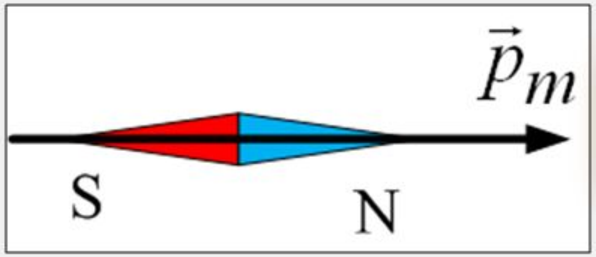


или

(если в контуре N витков):

$$\boxed{\vec{p}_m = N \cdot I \cdot S \cdot \vec{n}} \qquad \boxed{p_m = N \cdot I \cdot S}$$

Размерность: $[p_m] = [I] \cdot [S] = A \cdot м^2$



Магнитный момент стрелки компаса направлен от южного конца к северному

Индукция магнитного поля *B*

Определение магнитной индукции $\vec{B}$*:*

Величина магнитной индукции в данной точке поля численно равна максимальному вращающему моменту силы, действующему на виток (или магнитную стрелку) с единичным магнитным моментом:

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

$$M = p_m B \sin\alpha$$

$$\vec{M} = \left[\vec{p}_m \times \vec{B}\right]$$

B **– силовая векторнаяхарактеристика поля**

Размерность:

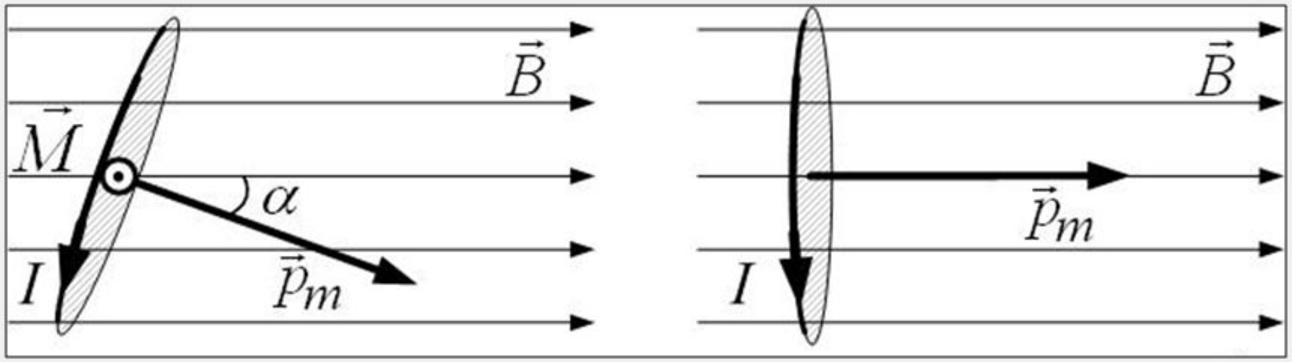
$$[B] = \frac{[M]}{[p_m]} = \frac{[F \cdot l]}{[p_m]} = \frac{Н \cdot м}{А \cdot м^2} = \frac{Н}{А \cdot м} = Тл \qquad \text{(тесла)}$$

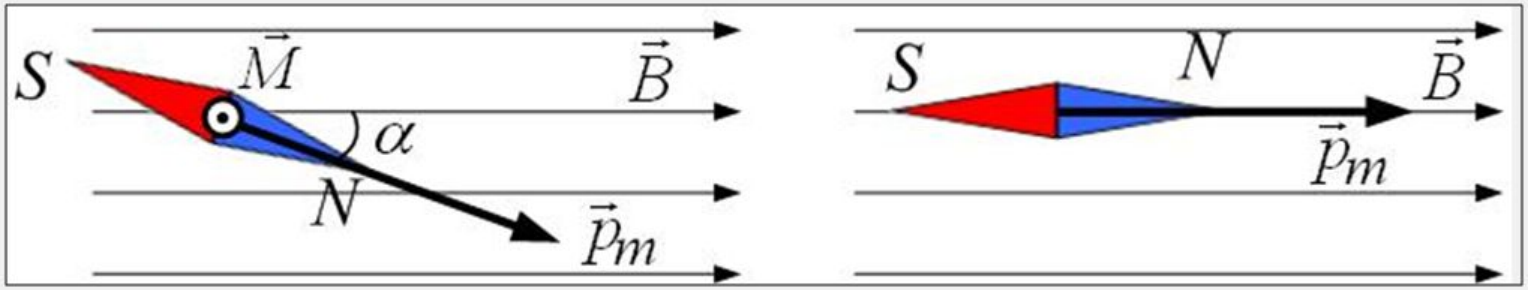
Магнитное поле. Индукция поля *B*

Магнитный момент в магнитном поле ориентируется по полю

$$M = p_m B \sin\alpha$$

$$\vec{M} = \left[\vec{p}_m \times \vec{B}\right]$$





Магнитное поле. Характеристики поля:
Магнитная индукция *B*
Напряжённость поля *H*

B **– силовая векторнаяхарактеристика поля**

Ещё одна характеристика поля – <u>напряжённость поля *H*</u>

В веществе индукция магнитного поля отличается от индукции в вакууме

При помещении вещества (магнетика) во внешнее поле в веществе под действием поля возникают микротоки (термин Ампера – «молекулярные токи» не совсем правилен)

Микротоки вещества сами создают дополнительную индукцию, так что <u>индукция *B* поля в веществе описывает суммарное поле: внешнее поле токов проводимости и микротоков вещества</u>

<u>Напряжённость поля *H* описывает только поле макротоков (токов проводимости)</u>

Напряжённость поля одинакова в вакууме и в веществе

Магнитное поле. Характеристики поля:
Магнитная индукция *B*
Напряжённость поля *H*

Аналогия с характеристик электростатического поля и магнитного полей:

$\vec{B}$ **аналогично** $\vec{E}$

Индукция магнитного поля описывает суммарное поле токов проводимости и микротоков вещества

Напряжённость электрического поля описывает суммарное поле свободных и связанных зарядов

$\vec{H}$ **аналогично** $\vec{D}$

Напряжённость магнитного поля описывает только поле макротоков (токов проводимости) и одинакова в вакууме и в веществе

Вектор электрического смещенеия описывает только поле свободных зарядов и одинаков в вакууме и в веществе

Магнитное поле. Характеристики поля: Магнитная индукция *B* Напряжённость поля *H*

Связь между характеристиками полей:

$$\vec{B} = \mu \cdot \mu_0 \cdot \vec{H}$$ **аналогично** $$\vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \frac{Гн}{м}$ – **магнитная постоянная**

μ – **магнитная проницаемость вещества**

Физический смысл магнитной проницаемости μ:

Магнитная проницаемость μ **показывает, во сколько раз индукция магнитного поля в веществе *B* больше, чем в вакууме** $B_0=\mu_0 H$:

$$\boxed{\mu = \frac{B}{\mu_0 H} = \frac{B}{B_0}}$$

$$\boxed{[\mu] = 1}$$

Закон Био-Савара-Лапласа. Принцип суперпозиции

<u>Задача электродинамики</u> –
вычисление полей, созданных зарядами и токами

<u>Закон Био-Савара-Лапласа</u> совместно с принципом суперпозиции позволяет определять в произвольной точке пространства индукцию магнитного поля, созданного каким-либо электрическим током

Принцип суперпозиции:

Индукция поля, созданного в данной точке несколькими токами, равна векторной сумме индукций полей, созданных в данной точке каждым током в отдельности:

$$\boxed{\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i}$$

Закон Био-Савара-Лапласа. Принцип суперпозиции

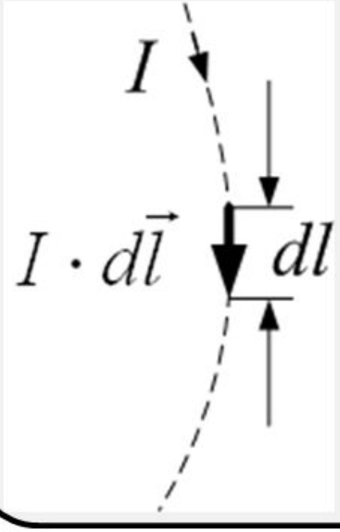
Принцип суперпозиции:

Индукция, созданная проводником с током, равна интегралу от элементарных индукций полей, созданных каждым элементом тока в отдельности:

$$\vec{B} = \int_L d\vec{B}$$

проводник непрерывный;
интеграл по всему проводнику

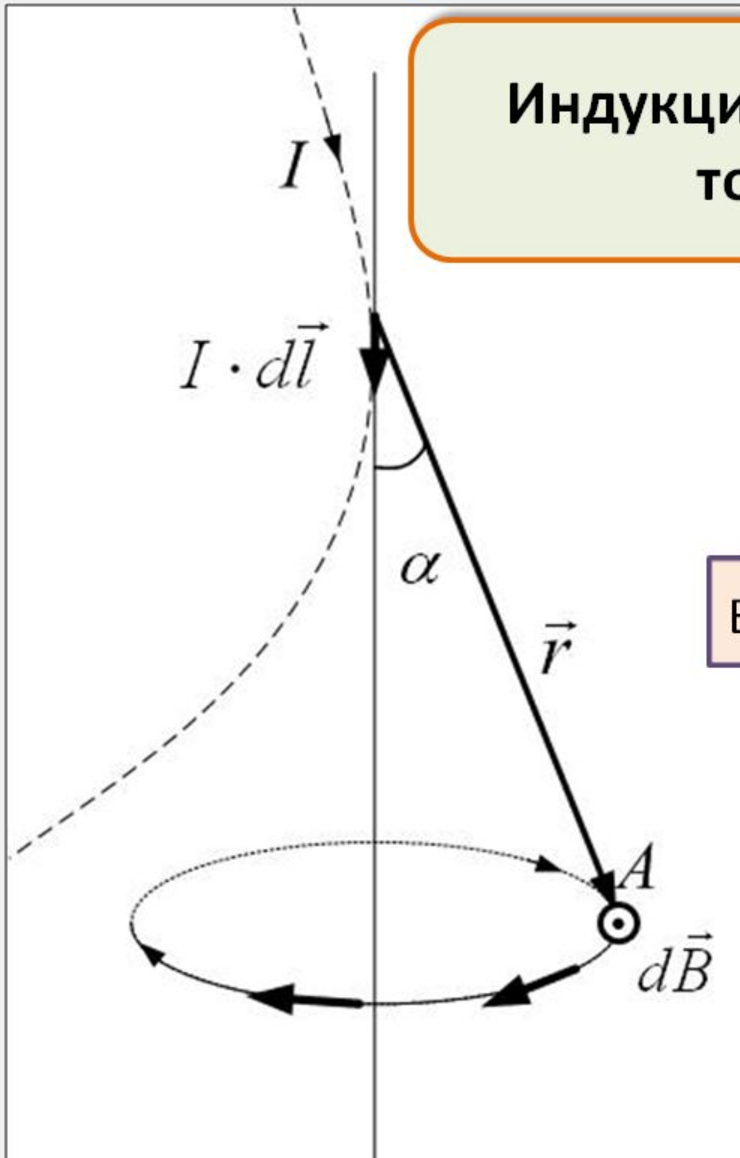
dB **создано элементом тока** $I \cdot dl$



Определение:

Элемент тока – это произведение силы тока на элемент длины провода: $I \cdot d\vec{l}$

Закон Био-Савара-Лапласа



Индукция dB поля, созданного элементом тока $I \cdot dl$ в произвольной точке *A*:

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

Вектор ***dB*** направлен по правилу буравчика

$$d\vec{B} \perp \vec{r} \qquad d\vec{B} \perp I \cdot d\vec{l}$$

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

Применение закона Био-Савара-Лапласа:

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

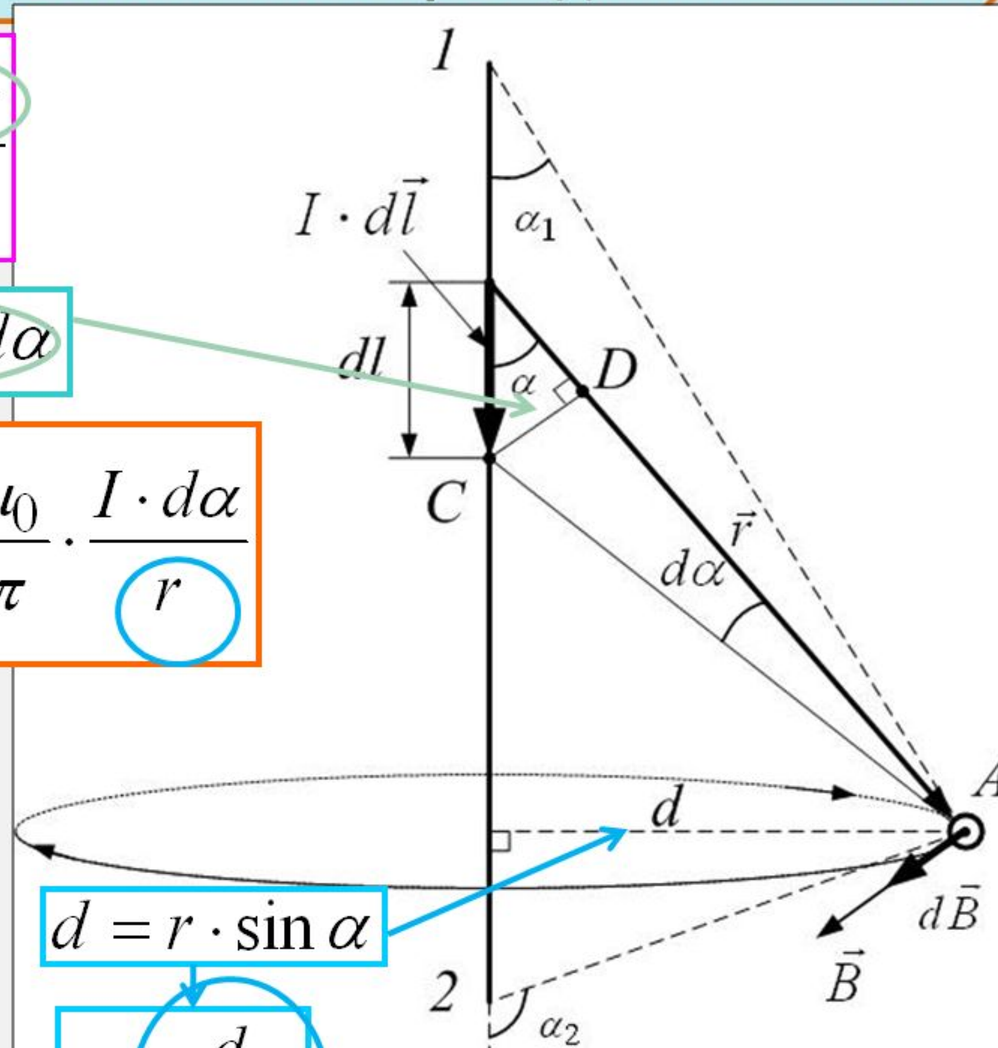
1. Индукция поля прямого бесконечного проводника с током

$$B = \int_1^2 dB = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin\alpha}{r^2}$$

$$|CD| = dl \cdot \sin\alpha = r \cdot d\alpha$$

$$B = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot r \cdot d\alpha}{r^2} = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot d\alpha}{r}$$

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



$$d = r \cdot \sin\alpha$$

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

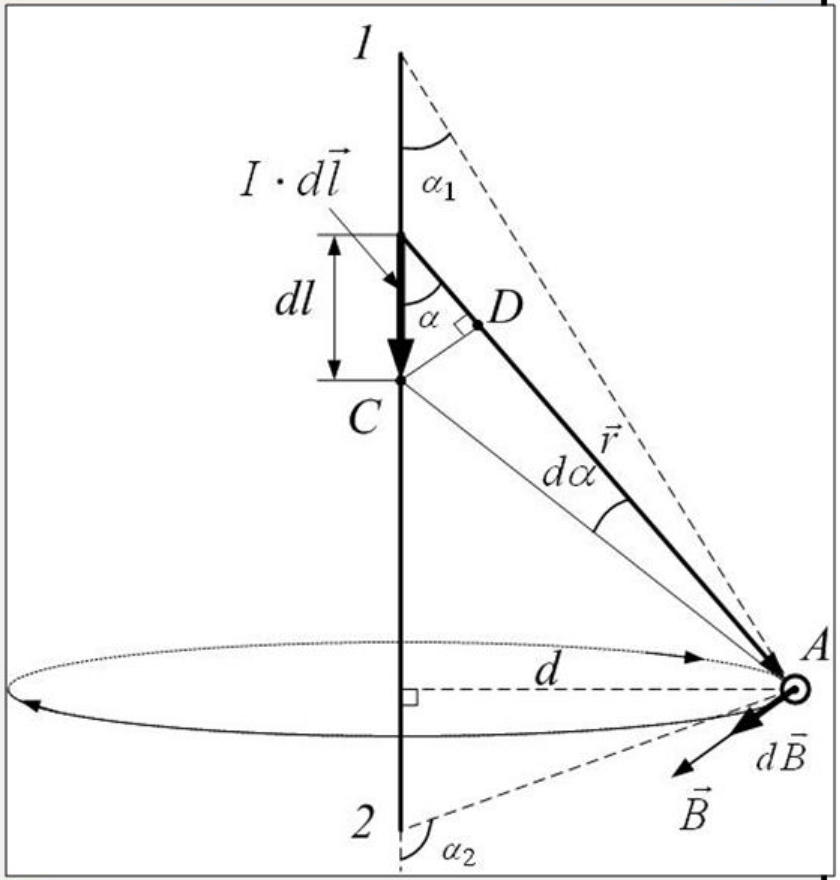
1. Индукция поля прямого бесконечного проводника с током

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

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

$$B = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{d} \cdot \left(-\cos\alpha\right)\Big|_{\alpha_1}^{\alpha_2}$$

$$\boxed{B = \frac{\mu\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot d}\left(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2\right)}$$

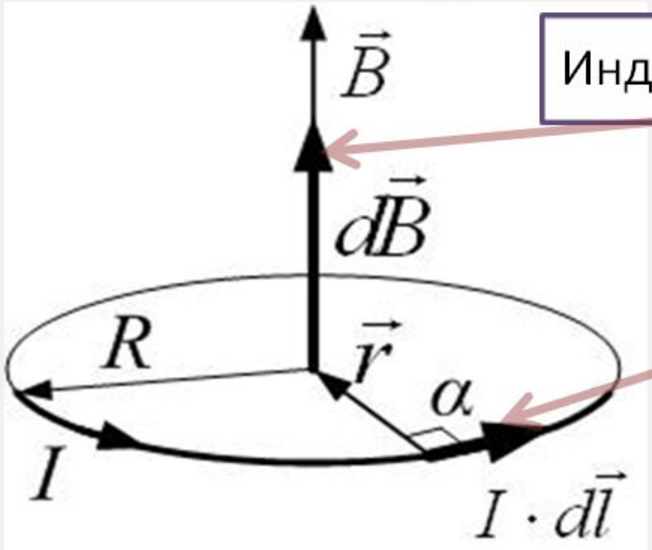


Если проводник бесконечен, $\alpha_1 = 0$; $\alpha_2 = \pi$

$$\Downarrow$$

$$B_\infty = \frac{\mu\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot d}\left(\cos 0 - \cos\pi\right) = \frac{\mu\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot d}\left(1 - (-1)\right) = \frac{\mu\mu_0 \cdot I}{2\pi \cdot d}$$

2. Индукция в центре кругового тока



Индукцию $d\vec{B}$ создаёт элемент тока $I \cdot d\vec{l}$

Все $d\vec{B}$ направлены одинаково

$\Downarrow$

$$\vec{B} = \int_L d\vec{B} \quad \Rightarrow \quad B = \oint_L dB$$

Интегралы по контуру (по окружности)

Закон Био-Савара-Лапласа:

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

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin 90^0}{R^2}$$

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

Длина окружности

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

3. Индукция на оси кругового тока

Из симметрии: поле направлено по оси кругового тока

$\Downarrow$

$$\vec{B} = \int_L d\vec{B} \quad \Rightarrow \quad B = B_y = \oint_L dB_y = \oint_L \cos\beta \cdot dB$$

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

Закон Био-Савара-Лапласа:

$$dB = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl \cdot \sin 90^0}{r^2}$$

$$B = \oint_L \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \cdot dl}{r^2} \cdot \cos\beta = \frac{\mu\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot r^2} \cos\beta \cdot \oint\limits_{\text{по окруж-ности}} dl$$

$$r = \sqrt{R^2 + h^2}$$

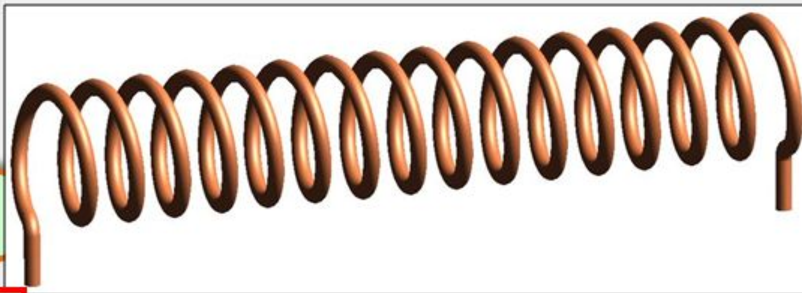
$$B = \frac{\mu\mu_0 \cdot I}{4\pi \cdot r^2} \cdot \frac{R}{r} \cdot 2\pi R = \frac{\mu\mu_0 \cdot I \cdot R^2}{2 \cdot r^3}$$

$$B_{\text{на оси}} = \frac{\mu\mu_0 \cdot I \cdot R^2}{2 \cdot \sqrt{\left(R^2 + h^2\right)^3}}$$

4. Поле соленоида

Без доказательства

Соленоид – это катушка:



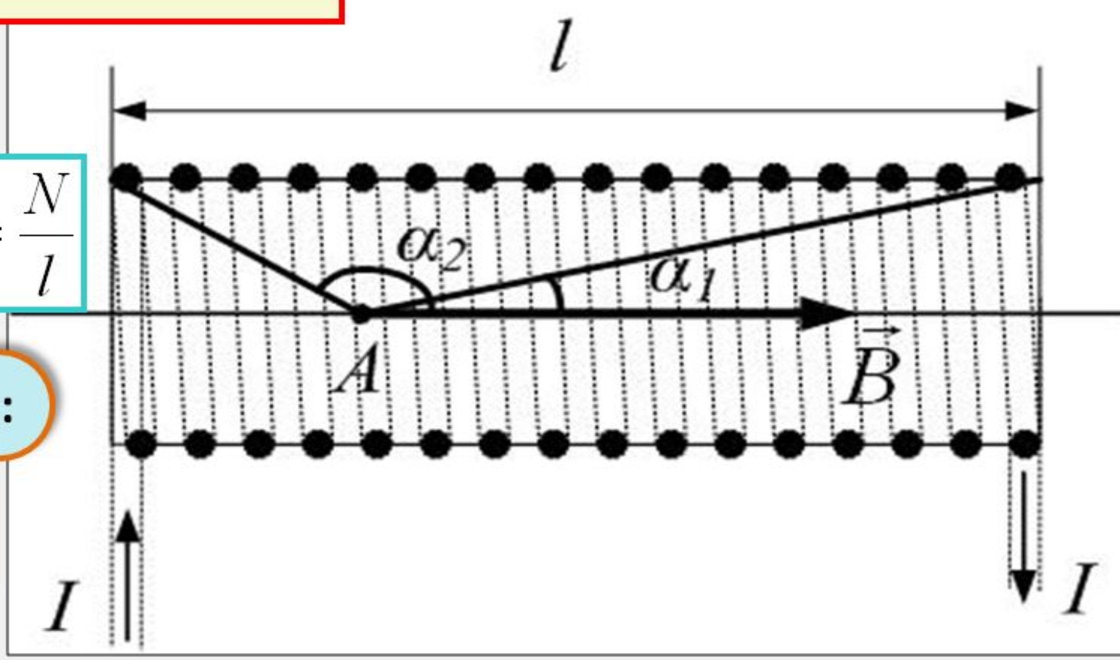
$$B_{\text{сол.}} = \frac{\mu\mu_0 I n}{2}\left(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2\right)$$

– на оси соленоида

n – плотность намотки соленоида (число витков на единицу длины)

N – полное число витков

$$n = \frac{N}{l}$$



Для длинного соленоида:

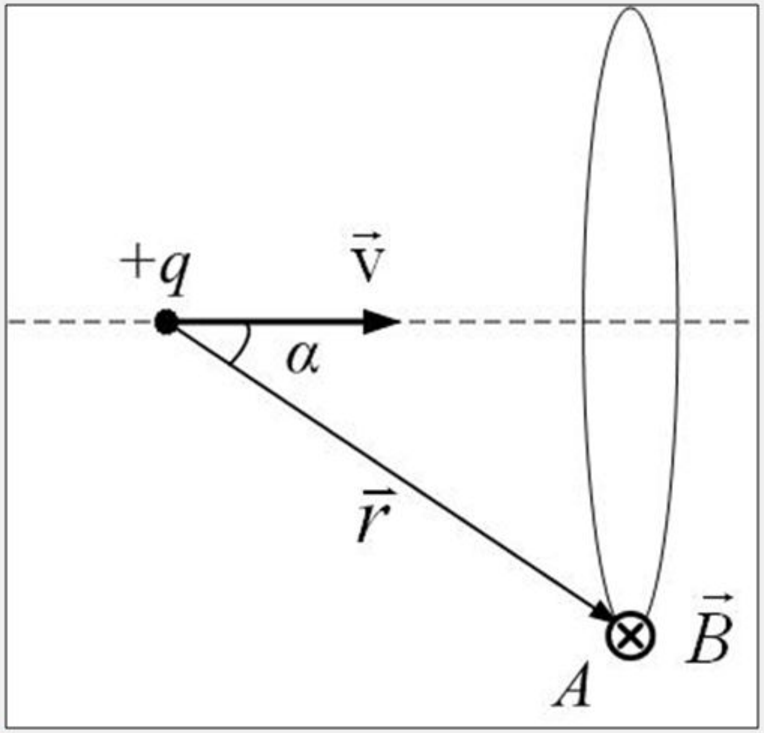
$$\alpha_1 = 0 \qquad \alpha_2 = \pi$$

$$B_{\infty\ \text{солен.}} = \frac{\mu\mu_0 I n}{2}\left(1 - (-1)\right) \Rightarrow B_{\infty\ \text{солен.}} = \mu\mu_0 I n$$

5. Поле движущегося заряда

Закон Био-Савара-Лапласа:

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



Замена:

$$I\cdot d\vec{l} \quad\rightarrow\quad q\cdot\vec{\mathrm{v}}$$

$$d\vec{B} \quad\rightarrow\quad \vec{B}$$

$$\left[I\cdot dl\right] = A\cdot м$$

$$\left[q\cdot \mathrm{v}\right] = Кл\cdot\frac{м}{c} = \frac{Кл}{c}\cdot м = A\cdot м$$

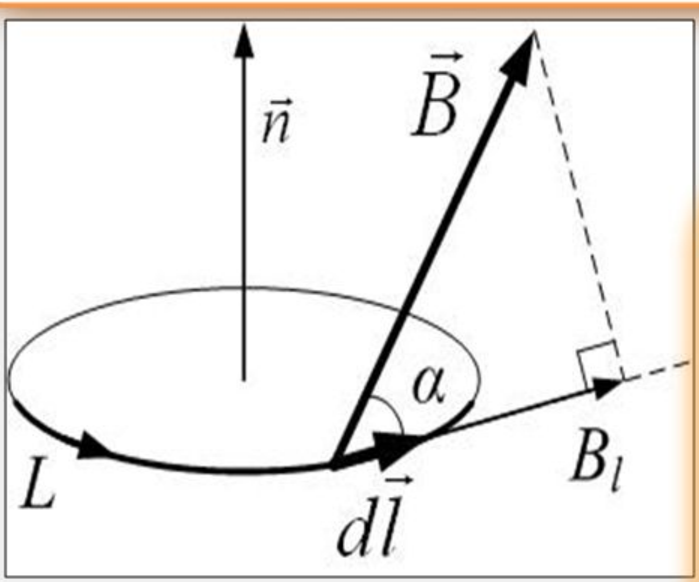
$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{q\left[\vec{\mathrm{v}}\times\vec{r}\right]}{r^3}$$

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

Закон полного тока (теорема о циркуляции) для магнитного поля в вакууме

Напоминалка:
что такое циркуляция вектора

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \oint_L B\cos\alpha \cdot dl = \oint_L B_l \cdot dl$$



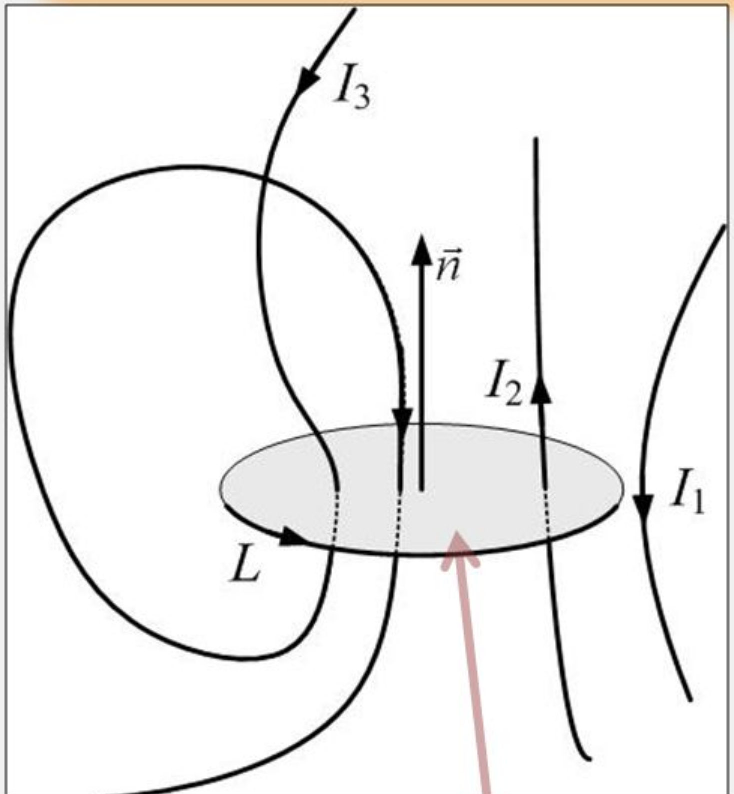
Теорема о циркуляции:

Циркуляция вектора магнитной индукции для поля в вакууме по произвольному замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, охваченных контуром, умноженной на магнитную постоянную

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i$$

<u>Пример</u> применения теоремы о циркуляции (закона полного тока)

Циркуляция вектора магнитной индукции для поля в вакууме по произвольному замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, охваченных контуром, умноженной на магнитную постоянную



$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i$$

$$\Downarrow$$

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 (I_2 - 2I_3)$$

Теорема о циркуляции, если заданы не токи, а плотность тока:

$$\oint_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \cdot \int_S \vec{j} \cdot d\vec{S}$$

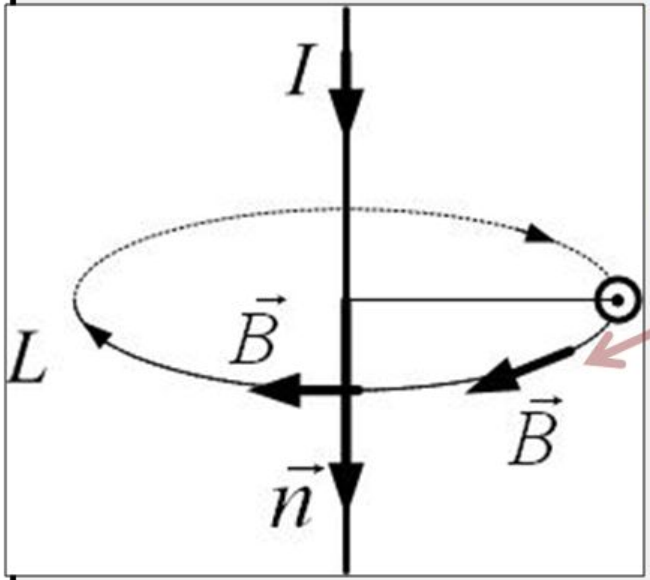
Интеграл берётся по поверхности, натянутой на контур

Применение закона полного тока

$$\oint\limits_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i$$

Циркуляция вектора магнитной индукции для поля в вакууме по произвольному замкнутому контуру равна алгебраической сумме токов, охваченных контуром, умноженной на магнитную постоянную

Поле прямого бесконечного провода



В любой точке контура вектор $\vec{B}$ одинаков и направлен по касательной к нему

$$\Downarrow$$

$$\oint\limits_L \vec{B}d\vec{l} = B \cdot \int\limits_L dl = B \cdot 2\pi R$$

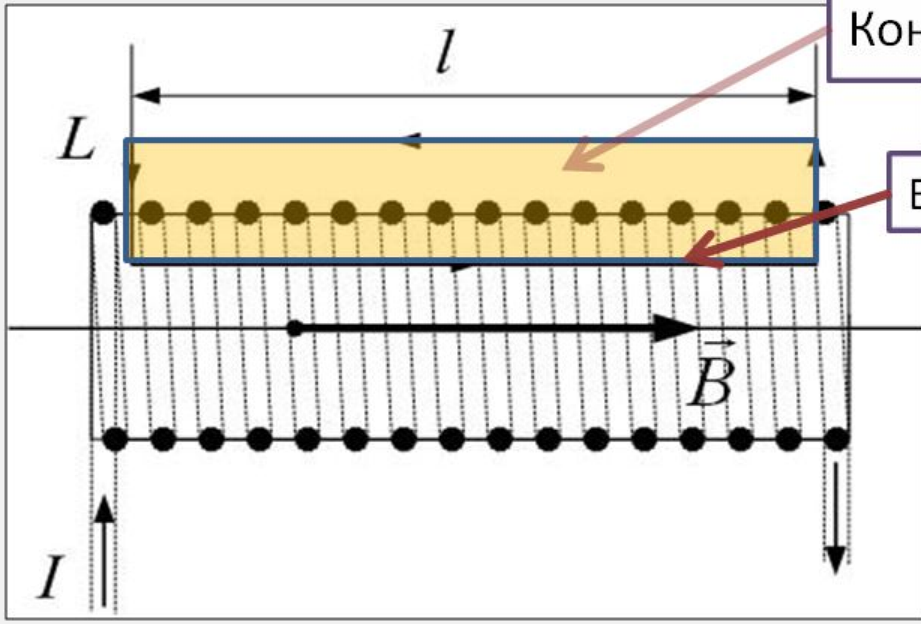
$$B \cdot 2\pi R = \mu_0 \cdot I$$

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

Применение закона полного тока

$$\oint\limits_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i$$

Поле длинного (бесконечного) соленоида



Контур – узкий длинный прямоугольник

В интеграл даёт вклад только эта сторона

$$\Downarrow$$

$$\oint\limits_L \vec{B}d\vec{l} = B \cdot \int\limits_L dl = B \cdot l$$

$$\Downarrow$$

Ток I пронизывает контур N раз:

$$\sum_i I_i = I \cdot N$$

$$B \cdot l = \mu_0 \cdot I \cdot N$$

$$\Downarrow$$

$$B = \frac{\mu_0 \cdot I \cdot N}{l} = \mu_0 \cdot I \cdot n$$

Непотенциальность магнитного поля

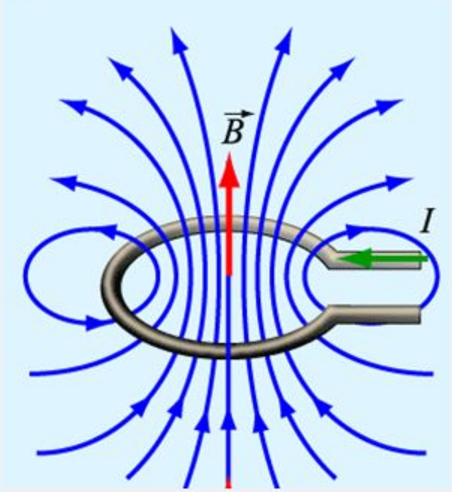
$$\oint\limits_L \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i \quad \Rightarrow \quad \oint\limits_L \vec{B}d\vec{l} \neq 0$$

Магнитное поле непотенциально, так как циркуляция вектора магнитной индукции по замкнутому контуру в общем случае не равна нулю

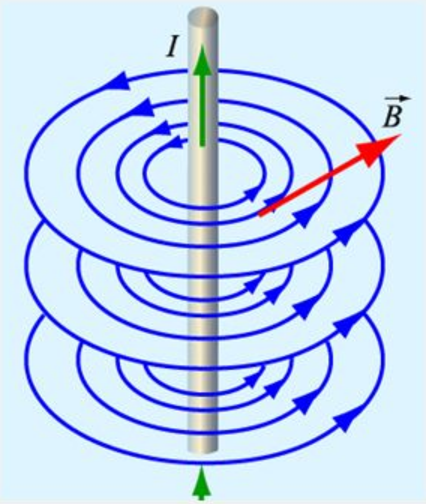
Магнитное поле носит вихревой характер
Линии магнитной индукции замкнуты

Непотенциальность магнитного поля

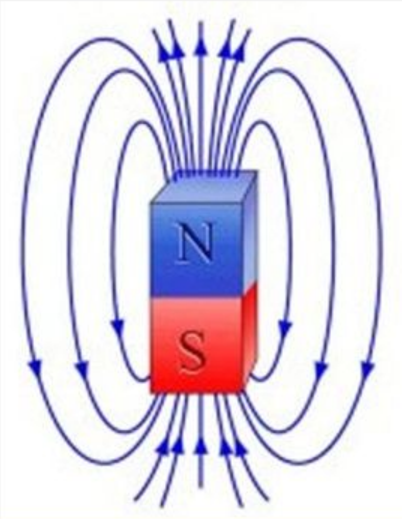
Линии магнитной индукции замкнуты



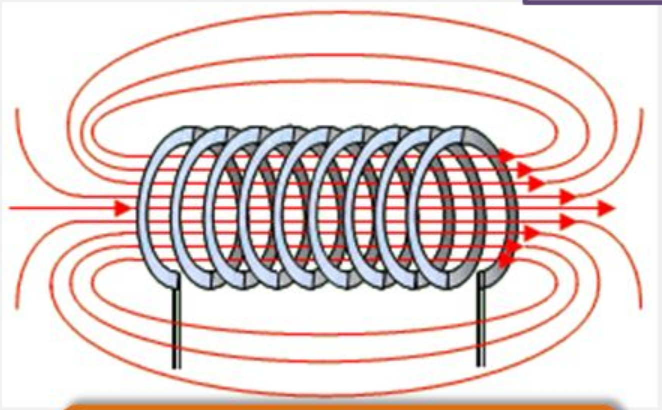
Поле кругового тока



Поле прямого провода



Поле полосового магнита



Поле соленоида

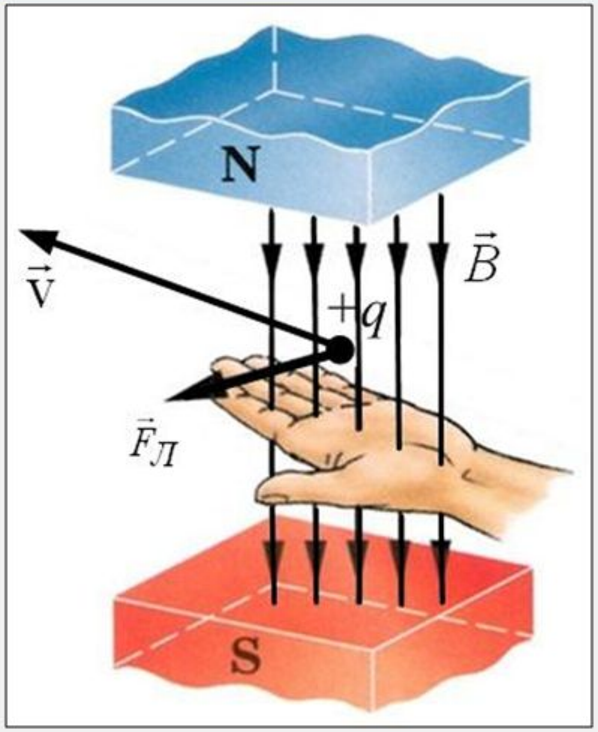
Действие магнитного поля для движущиеся заряды и токи

<u>Сила Лоренца</u>

$$F_Л = qvB\sin\alpha$$

На заряд, движущийся в магнитном поле, действует сила Лоренца:

Направлена по правилу буравчика или по правилу левой руки



$$\vec{F}_Л = q\left[\vec{v}\times\vec{B}\right]$$

$$\Downarrow$$

$$\vec{F}_Л \perp \vec{B} \qquad \vec{F}_Л \perp \vec{v}$$

<u>Сила Лоренца не совершает работы</u>, так как не имеет касательной составляющей к траектории

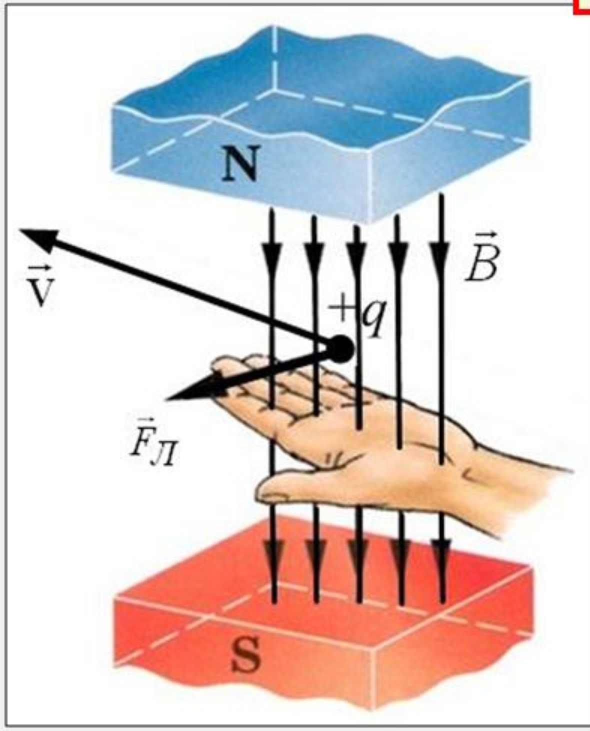
$$dA = \vec{F}_Л\cdot d\vec{S} = \vec{F}_Л\cdot\vec{v}\cdot dt = 0$$

$F_л$ не изменяет скорость частицы

$F_л$ действует только на движущиеся заряды

Сила Лоренца

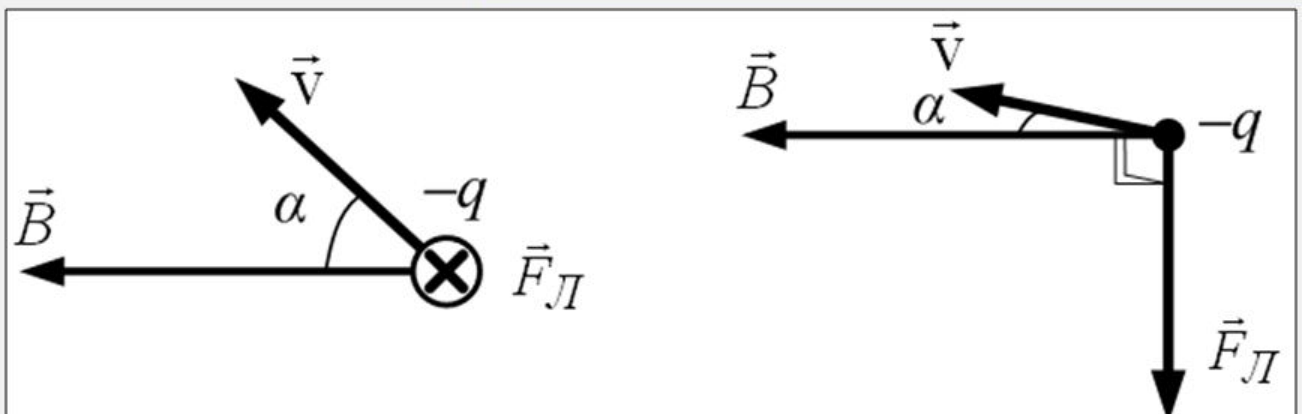
$$\vec{F}_Л = q\left[\vec{v} \times \vec{B}\right]$$



Правило левой руки:

Четыре пальца левой ладони нужно направить по скорости, а линии индукции должны входить в ладонь, тогда большой палец покажет направление силы Лоренца
(так для **положительного** заряда)

Если заряд отрицателен, нужно направление силы сменить на противоположное:



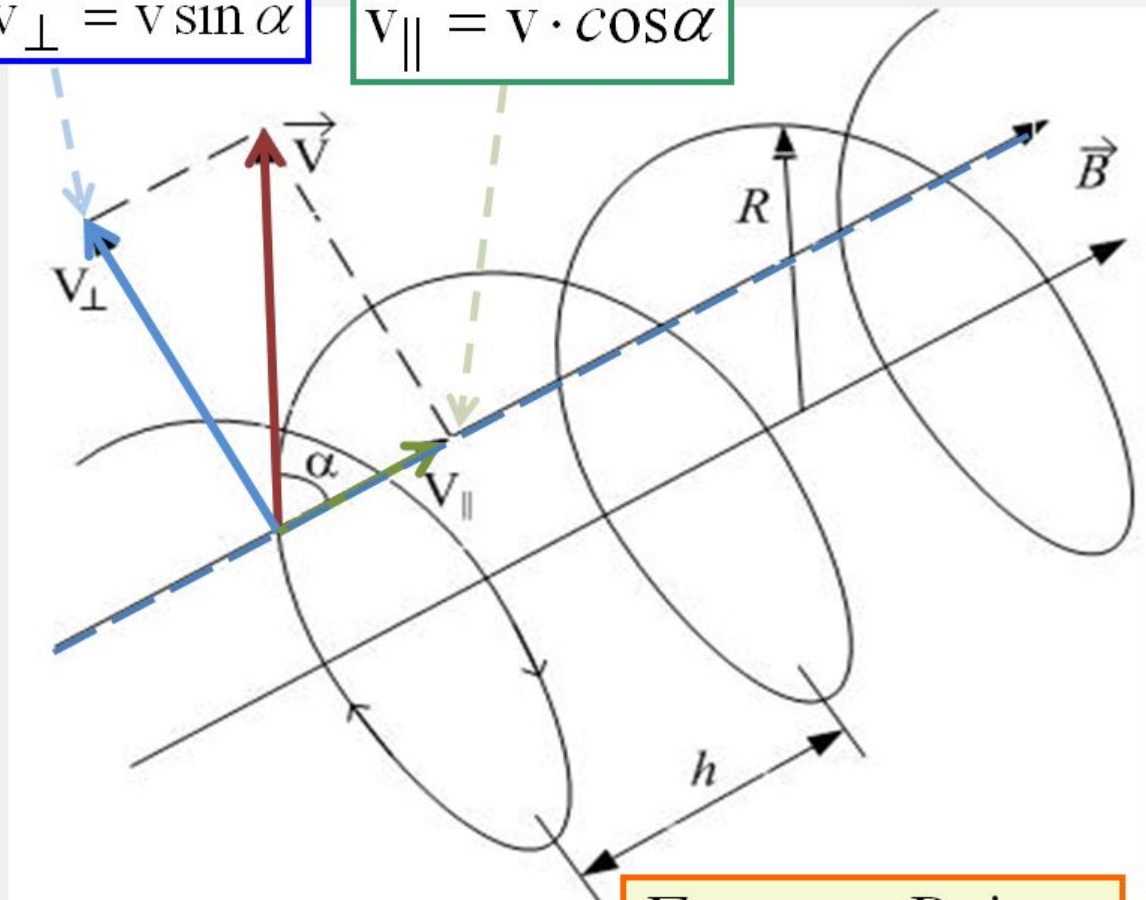
Движение заряженной частицы в магнитном поле под действием силы Лоренца

Положительно заряженная частица влетает в однородное магнитное поле под углом α к направлению линий индукции

$$\mathrm{v}_{\perp} = \mathrm{v}\sin\alpha$$

$$\mathrm{v}_{\parallel} = \mathrm{v}\cdot\cos\alpha$$

$$\vec{\mathrm{v}} = \vec{\mathrm{v}}_{\parallel} + \vec{\mathrm{v}}_{\perp}$$



$$F_{Л} = q\mathrm{v}B\sin\alpha$$

Движение частицы – суперпозиция двух движений:

1. **Вращение по окружности** в плоскости, перпендикулярной полю, со скоростью $\mathrm{v}_{\perp}$
2. Равномерное **поступательное движение вдоль линий поля** со скоростью $\mathrm{v}_{\parallel}$

Результат – **движение по винтовой линии**

Движение частицы в магнитном поле под действием силы Лоренца

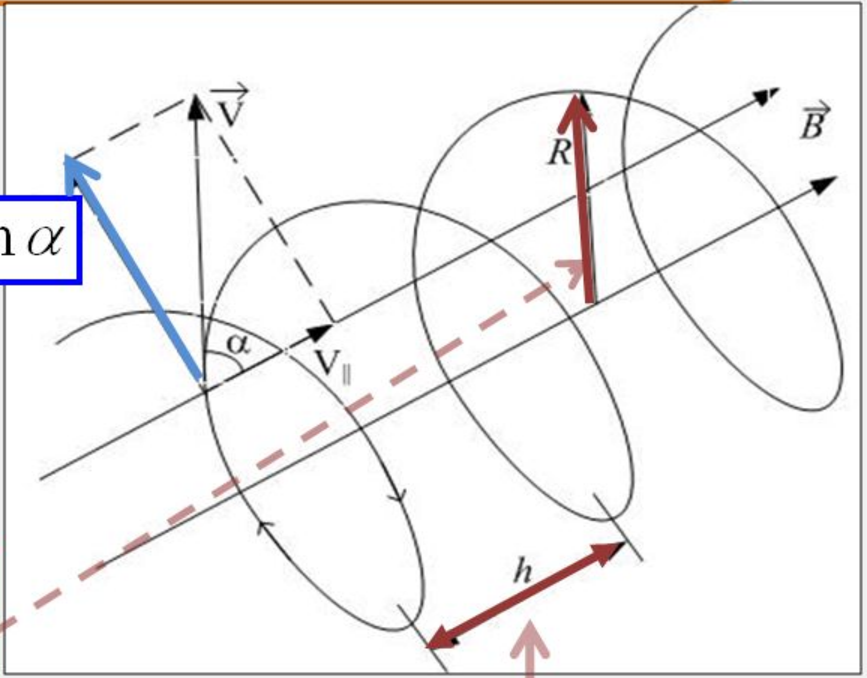
1. Вращение по окружности:

$$F_Л = qvB\sin\alpha = qv_\perp \cdot B$$

$$v_\perp = v\sin\alpha$$

$$F_{Л.} = m \cdot a_{ц.с.}$$

$$q \cdot v_\perp \cdot B = m\frac{v_\perp^2}{R}$$



Радиус винтовой линии:

$$R = \frac{m \cdot v_\perp}{q \cdot B}$$

Период вращения:

$$T = \frac{2\pi R}{v_\perp} = \frac{2\pi}{v_\perp} \cdot \frac{mv_\perp}{qB} = \frac{2\pi \cdot m}{qB}$$

Не зависит от скорости

2. Равномерное поступательное движение вдоль линий поля со скоростью $v_\parallel = v \cdot \cos\alpha$

Смещение вдоль поля за период – шаг спирали:

$$h = v_\parallel \cdot T = v_\parallel \cdot \frac{2\pi m}{qB}$$

Магнетизм – релятивистский эффект

Полная сила, действующая на заряженную частицу в электромагнитном поле, равна

Это формула Лоренца:

$$\vec{F} = \underbrace{q\left[\vec{\mathrm{v}} \times \vec{B}\right]}_{} + \underbrace{q\vec{E}}_{}$$

$$\vec{F}_{M} = q\left[\vec{\mathrm{v}} \times \vec{B}\right]$$ – магнитная составляющая

$$\vec{F}_{Э} = q\vec{E}$$ – электрическая составляющая

Поля – электрическое и магнитное – неразрывно связаны

Нет отдельно электрического поля, нет отдельно магнитного поля

Есть единое электромагнитное поле

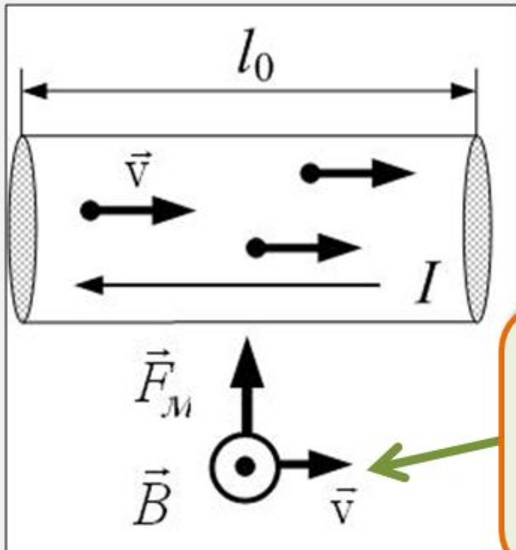
Магнетизм – релятивистский эффект

К-система отсчёта:

Пример:

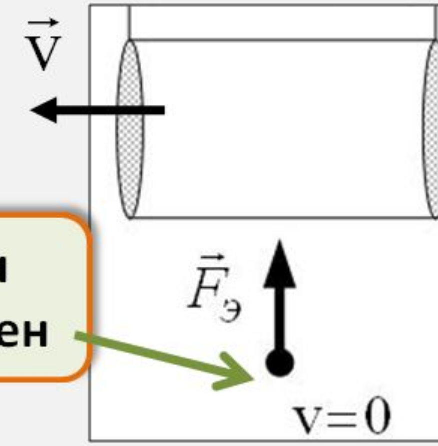
К’-система отсчёта

движется вместе с электроном



Электрон летит параллельно проводу

Электрон неподвижен



Действует магнитная составляющая силы Лоренца

На неподвижный электрон сила Лоренца не действует

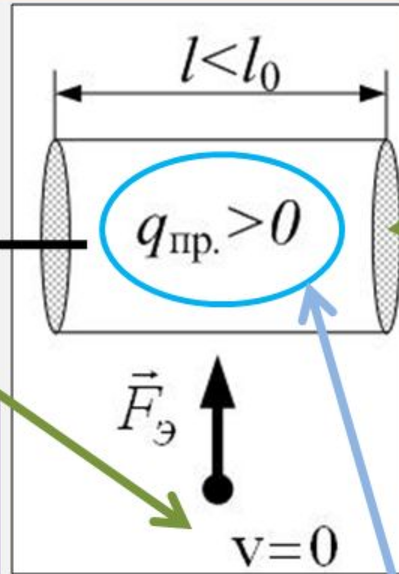
Сила не может исчезнуть, если мы перешли к другой системе отсчёта
Объяснение силы другое, но сила не исчезла

Магнетизм – релятивистский эффект

К'-система отсчёта

Электрон неподвижен

Движется провод



На неподвижный электрон сила Лоренца не действует

Из-за релятивистского сокращения длины проводник стал короче:

$$l = l_0 \cdot \sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} < l_0$$

Концентрация положительных ионов в проводнике больше → <u>проводник заряжен положительно</u>

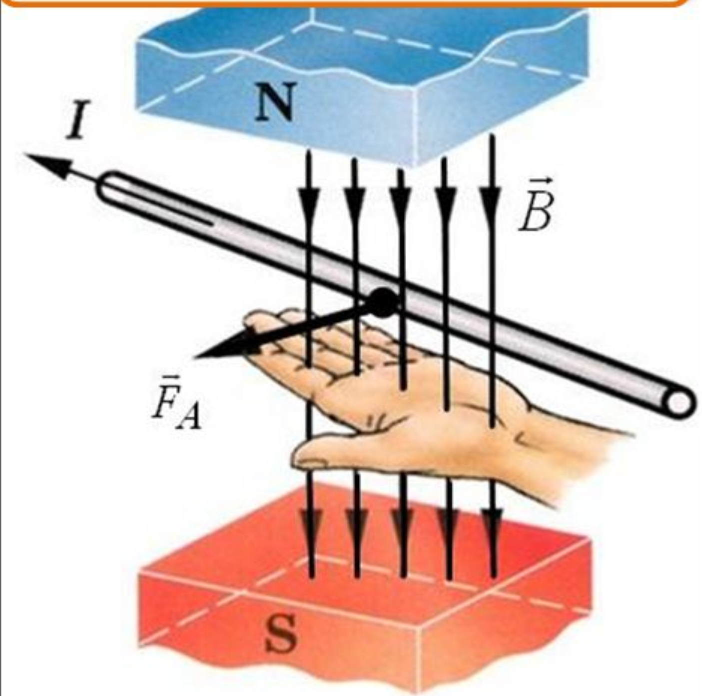
Электрон притягивается к проводнику → действует электрическая составляющая силы Лоренца *$F_э$*

<u>Сила не исчезла, изменилось лишь наше её описание</u>: в одной системе отсчёта на электрон действовало магнитное поле тока, в другой – электрическое поле заряженного проводника

Действие магнитного поля на движущиеся заряды и токи

Сила Ампера действует на проводник с электрическим током, находящийся в магнитном поле

Правило левой руки:



$$d\vec{F}_A = I\left[d\vec{l} \times \vec{B}\right]$$

$$dF_A = I \cdot dl \cdot B \sin\alpha$$

Угол между током и полем

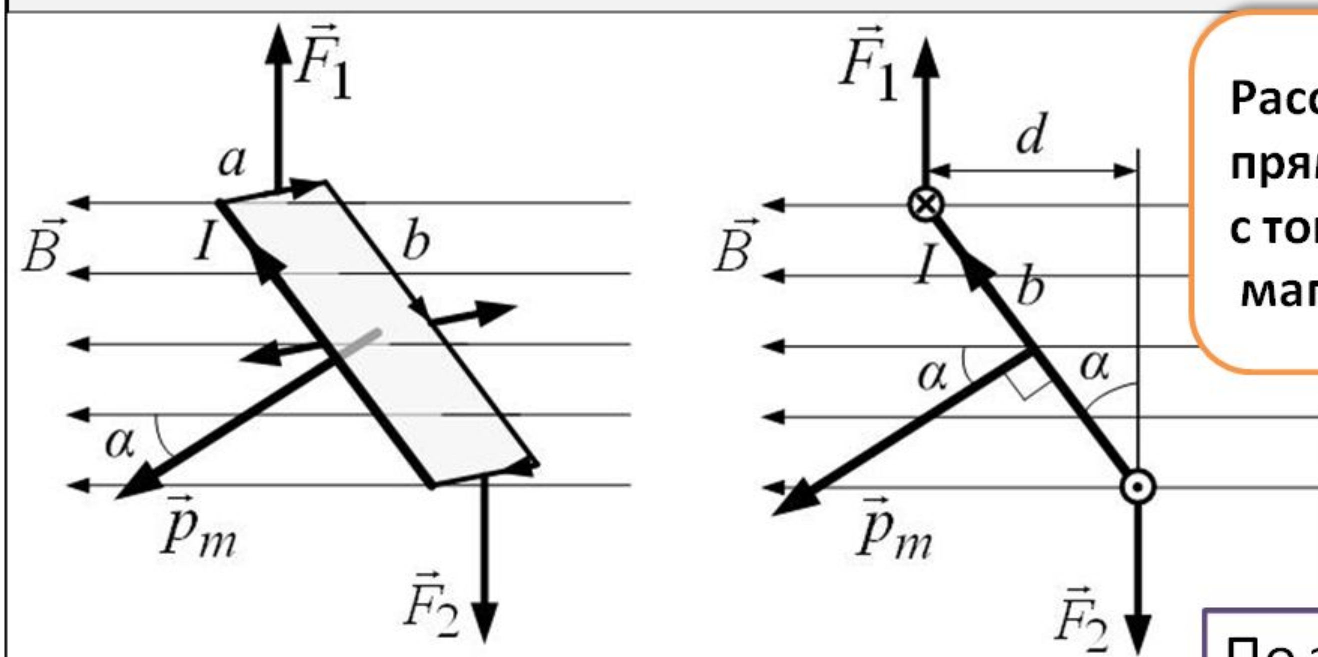
Определение: $I \cdot d\vec{l}$ **– элемент тока**

$d\vec{F}_A \perp I \cdot d\vec{l}$ $\qquad$ $d\vec{F}_A \perp \vec{B}$

Для отрезка прямого провода в однородном поле: $\vec{F}_A = I\left[\vec{l} \times \vec{B}\right]$

Сила Ампера

Рамка с током в однородном магнитном поле



Рассматривается прямоугольная рамка с током в однородном магнитном поле

По закону Ампера:

$$\left|\vec{F}_1\right| = \left|\vec{F}_2\right| \equiv F = I \cdot a \cdot B \cdot \sin 90^0$$

Это пара сил

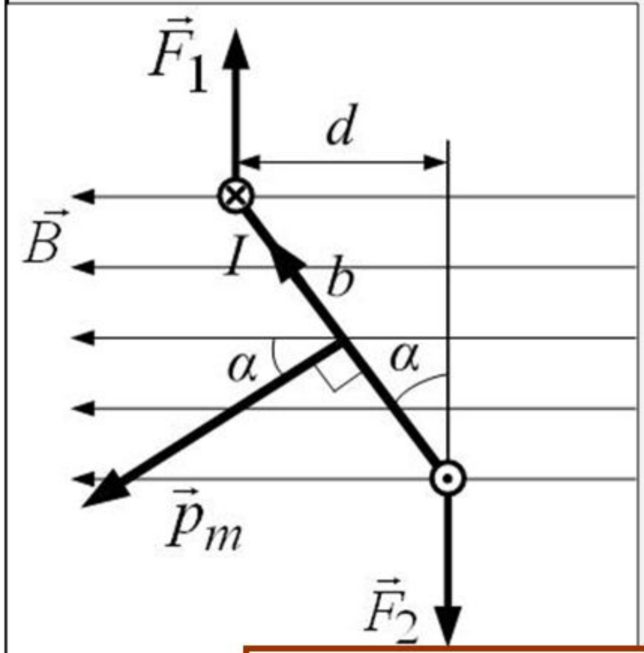
$$d = b \cdot \sin\alpha$$ **– плечо пары**

p_m

Момент пары сил: $$M = F \cdot d = I \cdot (a \cdot b) B \cdot \sin\alpha = (I \cdot S) \cdot B \cdot \sin\alpha$$

$$M = p_m \cdot B \cdot \sin\alpha \longrightarrow \vec{M} = \left[\vec{p}_m \times \vec{B}\right]$$

Работа по повороту рамки с током в магнитном поле
Энергия рамки в магнитном поле



Работа внешних сил по повороту рамки с током, имеющей магнитный момент *p_m*, на угол $\alpha>0$ равна:

$$dA = M \cdot d\alpha$$

Работа идёт на увеличение энергии рамки в магнитном поле: $dA = dW$

$$dW = M \cdot d\alpha$$

$$M = p_m \cdot B \cdot \sin\alpha$$

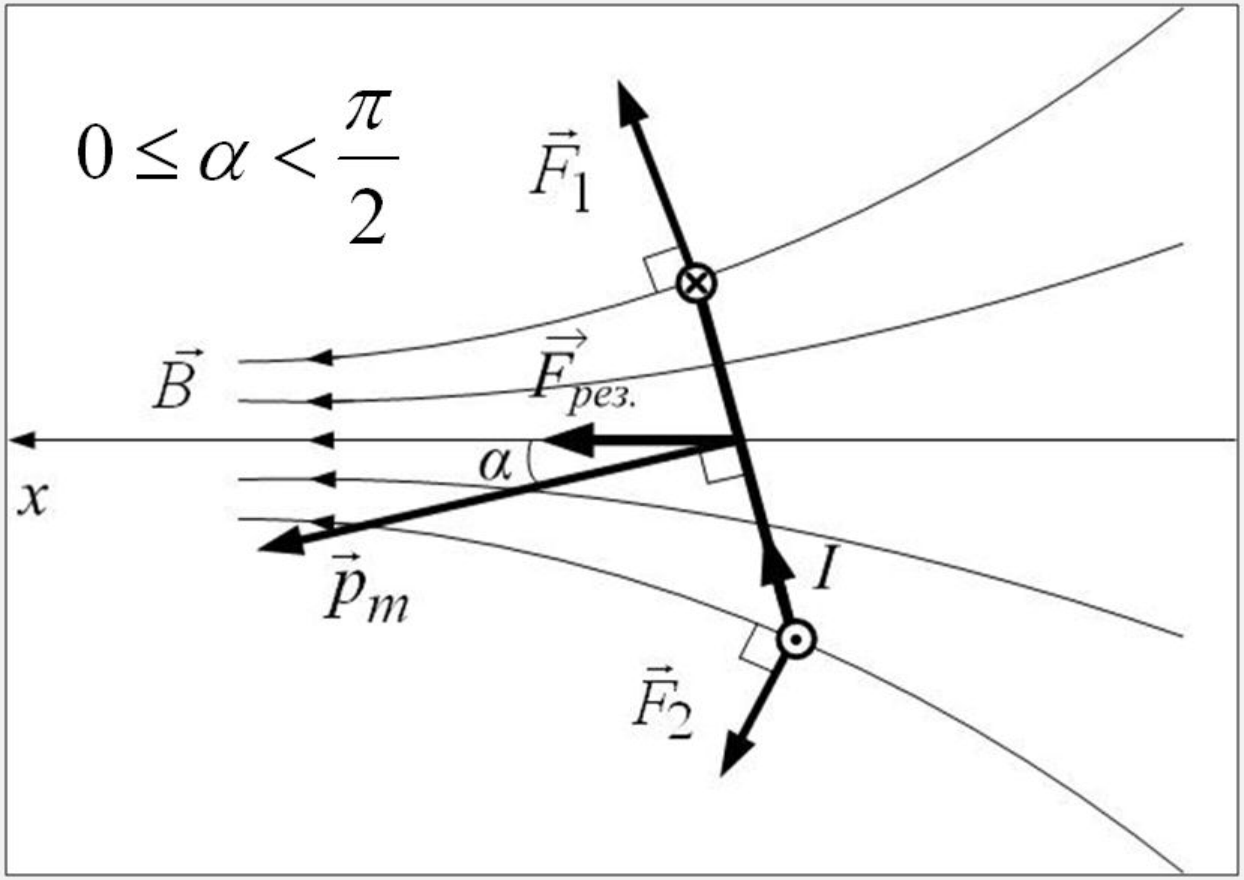
$$\frac{dW}{d\alpha} = M = p_m B \sin\alpha$$

$$W = -p_m B \cos\alpha$$

$$W = -\vec{p}_m \vec{B}$$

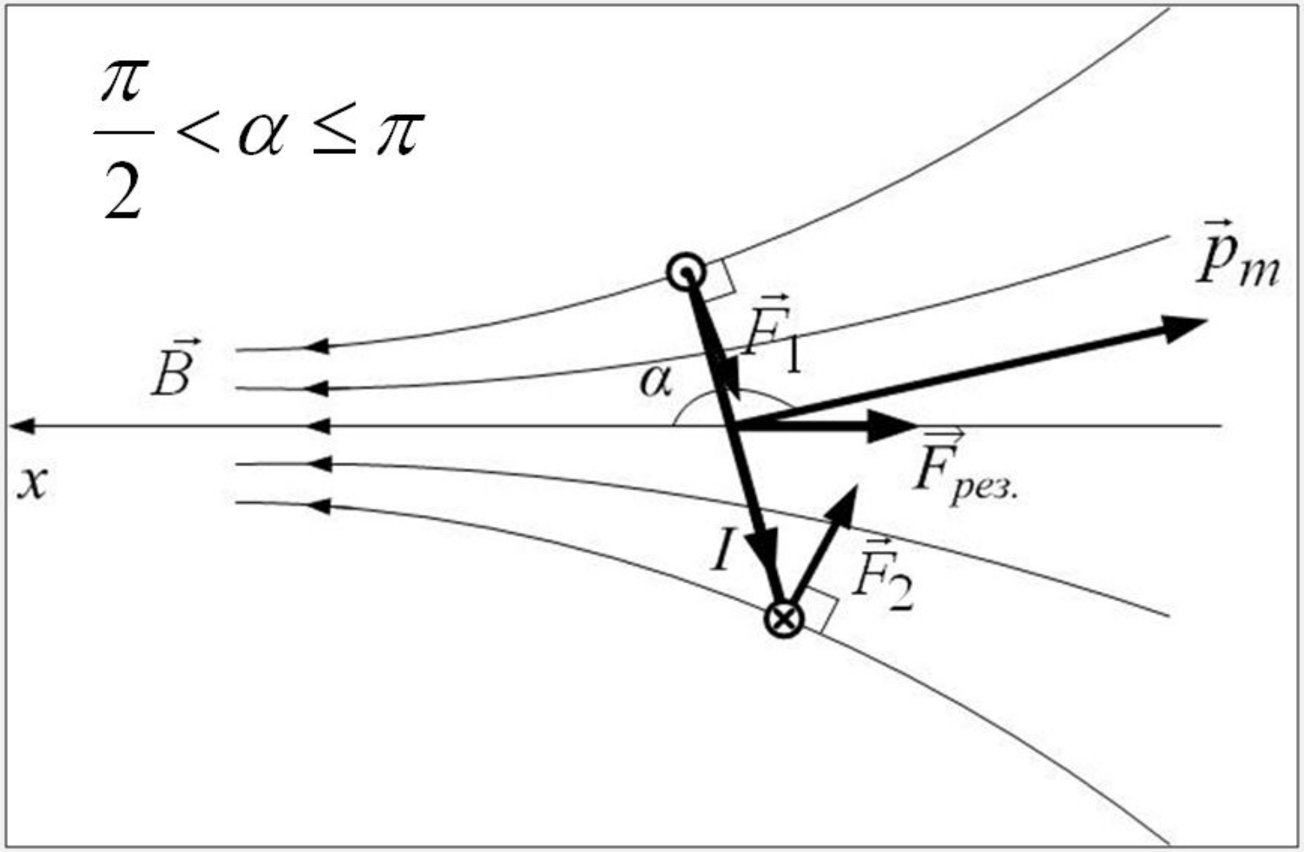
Это энергия рамки с током в магнитном поле

Рамка с током в <u>неоднородном</u> магнитном поле



Если угол α – острый, то магнитный момент втягивается в область сильного поля

Рамка с током в <u>неоднородном</u> магнитном поле



Если угол α – тупой, то магнитный момент выталкивается из области сильного поля

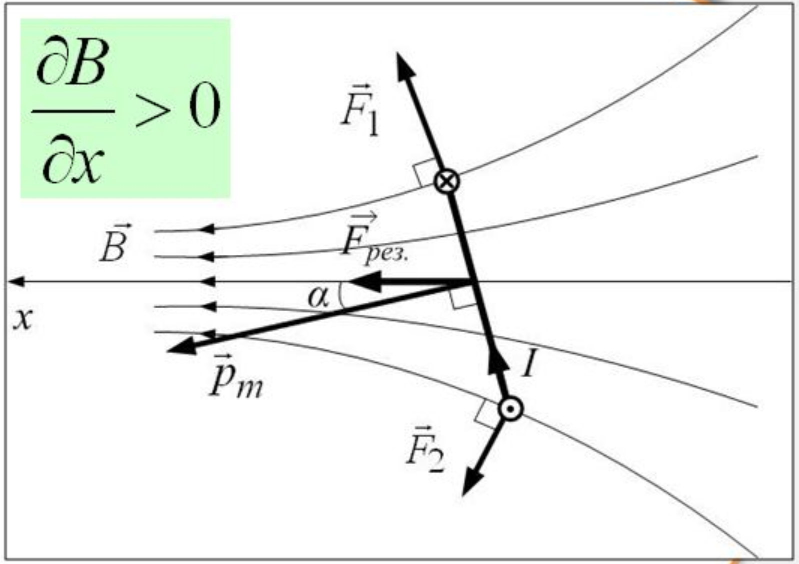
Сила, действующая на рамку с током в **неоднородном** магнитном поле

$$\vec{F} = -gradW_{\text{пот.}}$$

$$F_x = -\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x}\left(p_m B\cos\alpha\right) = p_m \cos\alpha\frac{\partial B}{\partial x}$$

$$0 \le \alpha < \frac{\pi}{2} \quad \Rightarrow \quad \cos\alpha > 0$$

$$F_x = p_m \cos\alpha\frac{\partial B}{\partial x} > 0$$



Эффект Холла

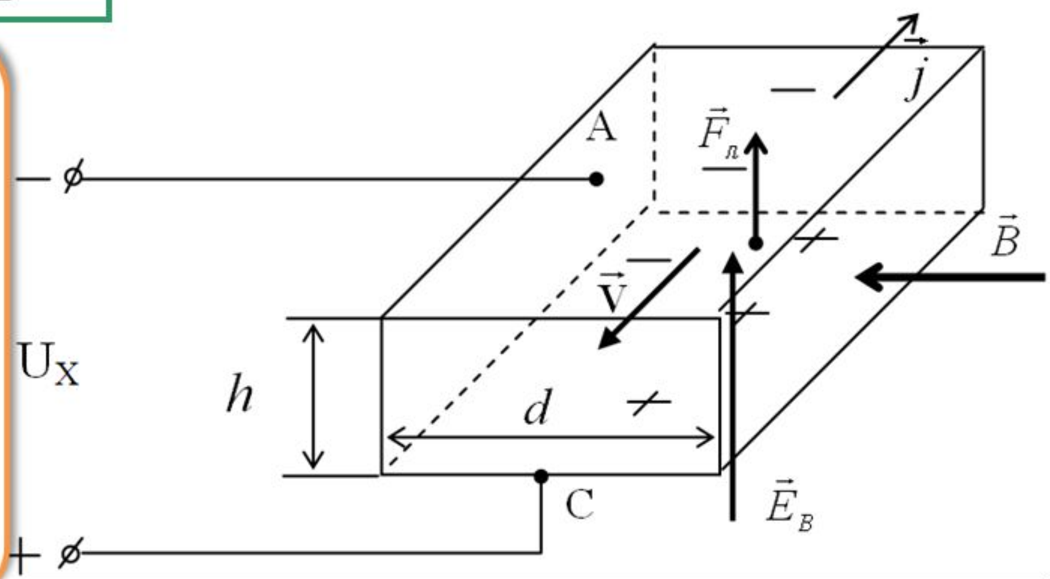
(см.лаб.работу 2-15)

Если металлическую или полупроводниковую пластинку, по которой течет ток *I*, поместить в перпендикулярное току магнитное поле , то между гранями пластинки, параллельными и полю , и току *I*, возникает Холловская разность потенциалов U_x

Эффект Холла объясняется действием силы Лоренца на движущиеся заряды

$$F_л = qvB\sin\alpha = qvB$$

Сила Лоренца отклоняет заряды: на верхней грани пластинки возникнет повышенная концентрация электронов (она зарядится отрицательно), а на нижней грани – их недостаток (зарядится положительно)



<u>Появляется дополнительное поперечное электрическое поле E_B</u>
<u>Оно препятствует дальнейшему отклонению зарядов</u>

$$qvB = qE_B$$

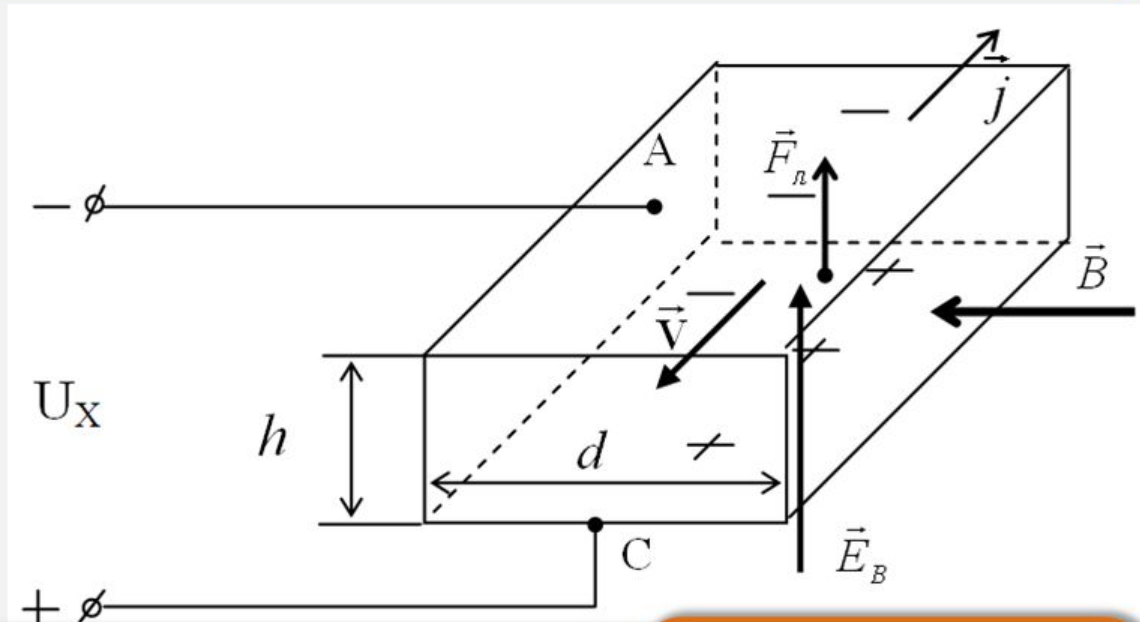
Эффект Холла

Эффект Холла объясняется действием силы Лоренца на движущиеся заряды

$$qvB = qE_B$$

$$U_X = h \cdot E_B$$

$$U_X = hvB$$



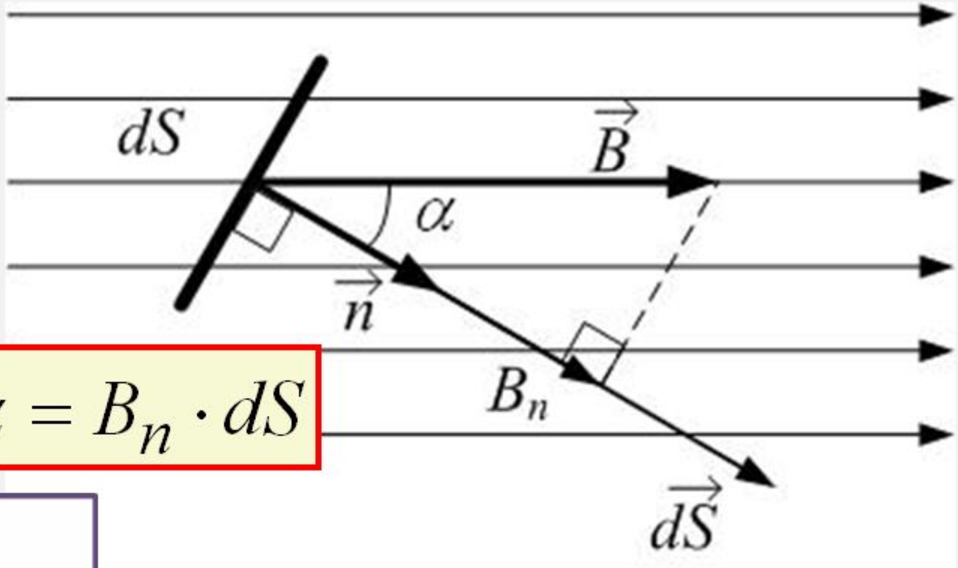
$$j = qvn$$

$$\left.\mathrm{v} = \frac{j}{qn}\right\}$$

Постоянная Холла

$$U_x = h \cdot \frac{j}{qn} \cdot B = h \frac{1}{qn} \cdot \frac{I}{(hd)} B = R_X \frac{IB}{d}$$

Поток вектора магнитной индукции



По определению

Поток вектора магнитной индукции через площадку ***dS***

$$d\Phi = \vec{B} \cdot d\vec{S} = B \cdot dS \cdot \cos\alpha = B_n \cdot dS$$

Поток вектора магнитной индукции через любую поверхность ***S*** :

$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = \int_S B_n \cdot dS$$

Размерность:

$$[\Phi] = Тл \cdot м^2 = Вб \qquad \text{(вебер)}$$

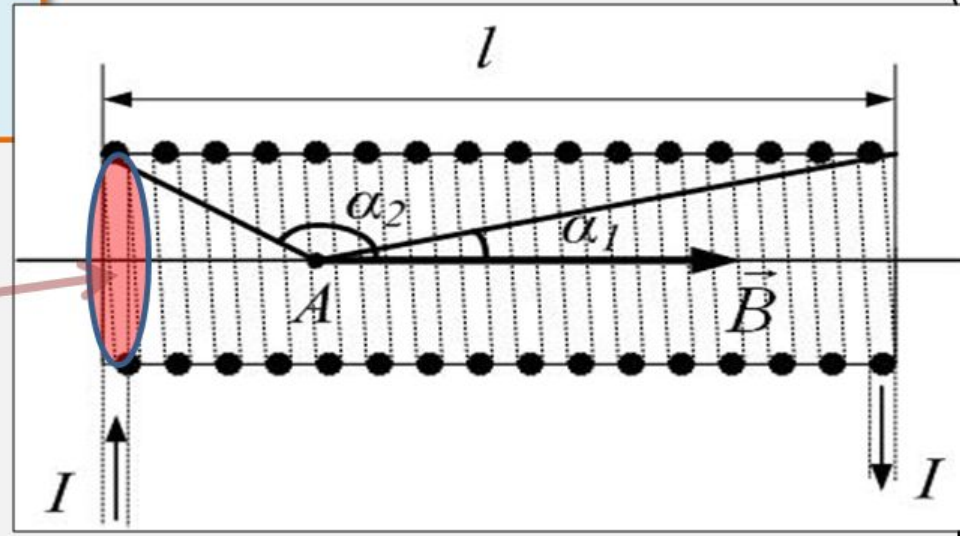
Физический смысл:

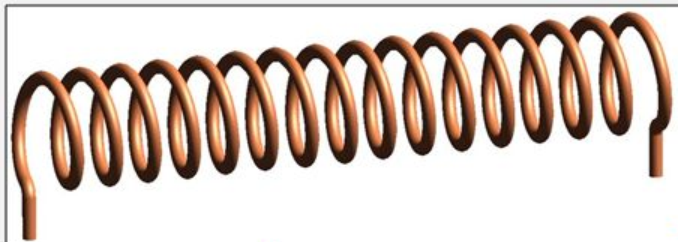
Магнитный поток численно равен числу линий магнитной индукции, пронизывающих площадку

Поток вектора магнитной индукции

Пример:

Поток вектора магнитной индукции через сечение ***S*** длинного соленоида





$$\Phi = \int\limits_S B \cdot dS = B \int\limits_S dS = B \cdot S = \mu\mu_0 In \cdot S = \mu\mu_0 I \frac{N}{l} \cdot S$$

Полное потокосцепление (суммарный поток через все *N* витков соленоида):

$$\Psi = N \cdot \Phi = N \cdot \mu\mu_0 I \frac{N}{l} \cdot S = \mu\mu_0 I \frac{N^2}{l} \cdot S$$

Теорема Остроградского-Гаусса для магнитного поля

Магнитный поток через произвольную замкнутую поверхность равен нулю

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Физический смысл пеоремы: **магнитных зарядов нет**

Для сравнения теорема Гаусса для электростатического поля:

поток вектора электрического смещения через произвольную замкнутую поверхность равен алгебраической сумме зарядов, охваченных поверхностью

$$\oint_S \vec{D} \cdot d\vec{S} = \sum_i q_i$$

Если отдельные тела можно зарядить либо только положительно, либо только отрицательно, поскольку существуют элементарные заряженные частицы – носители электрических зарядов двух разных видов, – то отделить один из магнитных полюсов от противоположного невозможно.

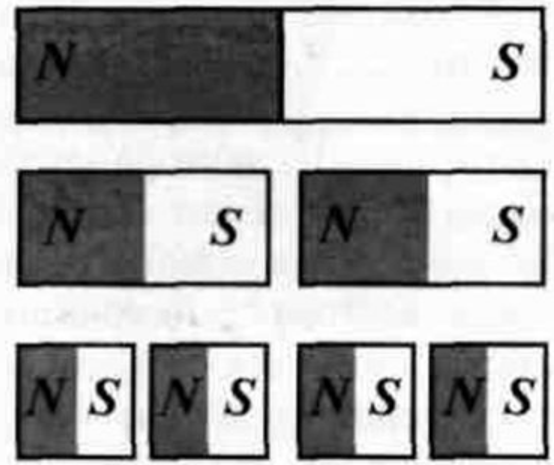
Теорема Остроградского-Гаусса для магнитного поля

Магнитный поток через произвольную замкнутую поверхность равен нулю

$$\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$$

Магнитных зарядов нет

Если разрезать на две части магнит, то каждая часть будет снова вести себя как самостоятельный магнит, имеющий на своих концах противоположные полюсы



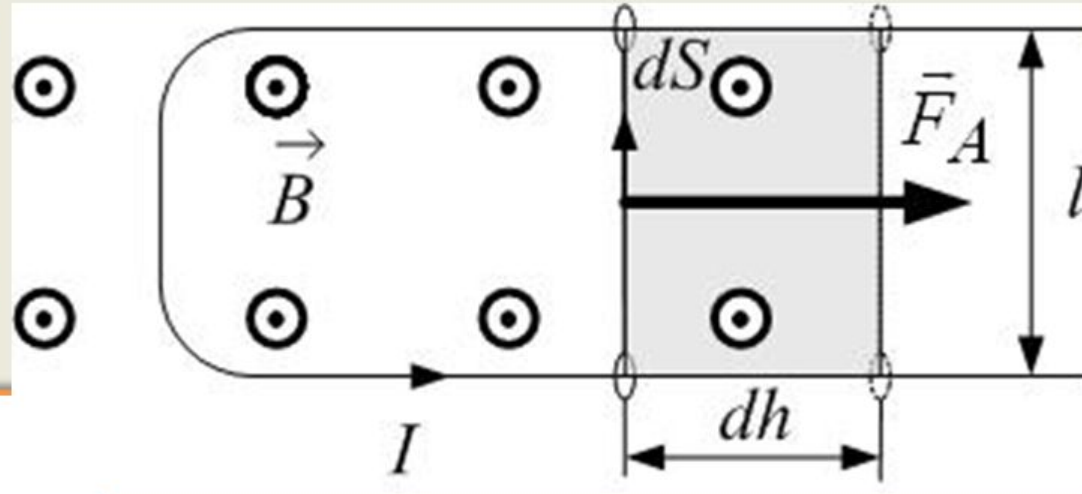
Отсутствуют экспериментальные доказательства того, что в природе могут существовать отдельные магнитные заряды (монополи), подобные электрическим.

В отличие от электрических зарядов **свободных магнитных “зарядов” в природе не существует**.

Нет их и в полюсах постоянных магнитов.

Поэтому линии магнитной индукции не могут обрываться на полюсах

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле



Работа силы Ампера:

$$dA = F_A \cdot dh = I \cdot l \cdot B \cdot dh = I \cdot B \cdot dS = I \cdot d\Phi$$

$$\boxed{dA = I \cdot d\Phi}$$

заметённая проводником в процессе движения площадь

Если ток не меняется: $\boxed{\Delta A = I \cdot \Delta\Phi}$

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока на изменение магнитного потока

(на пересечённый проводником магнитный поток)