

Магнетизм (история)

Название от минерала магнетита Fe_3O_4 – камень из Магнесии, магнитные явления – явления, происходящие с магнетитом и похожими веществами;

Открытие магнитного поля (МП) Земли (Вильям Гильберт, 16 век);

Взаимодействие магнитов, магнитный закон Кулона (1785);

Действие токов на магниты (Эрстед 1820);

Действие магнитов на токи и взаимодействие токов (Ампер);

Электрические токи как источник МП – закон Био-Савара;

Представление о МП и МСЛ – Фарадей;

Электромагнитная индукция – Фарадей;

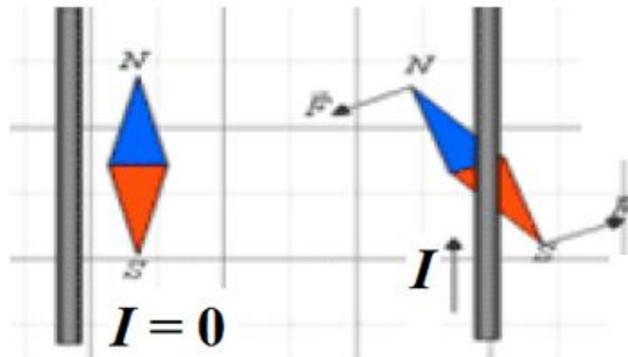
Уравнения электромагнитного поля – Максвелл;

Действие МП на движ. заряды и МП движ. зарядов – Лоренц;

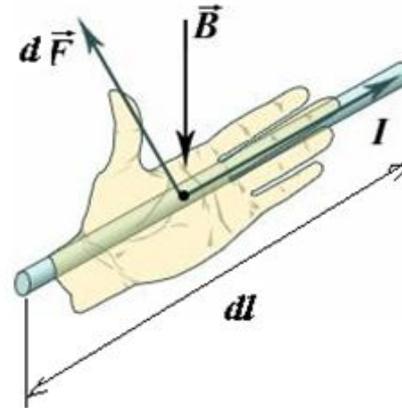
Спин и собственное МП элементарных частиц.

МП – форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие движущихся электрических зарядов.

Сила Ампера



Эрстед



Ампер

$dF \sim I dl \sin\alpha$ - угол с направлением, в кот. $dF = 0$
 К-нт пропорциональности – магнитная индукция B .

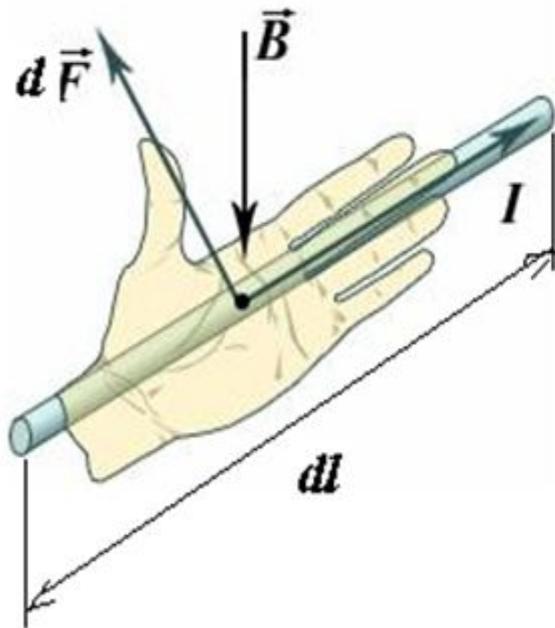
$$dF = B I dl \sin\alpha$$

Векторы: \vec{dF} - \perp напр. тока и напр., в кот. $dF = 0$

$I d\vec{l}$ - элемент тока, модуль = $I dl$, направлен по току

\vec{B} - вектор магнитной индукции, модуль = B и напр.,
 в кот. $dF = 0$, так чтобы работало ПЛР

Правило левой руки и сила Ампера



Если расположить левую руку так, чтобы вектор магнитной индукции был направлен в ладонь, а пальцы ладони были вытянуты по направлению тока, то отведенный большой палец укажет направление силы Ампера.

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

Единица изм. $[B] = \text{H/A}\cdot\text{м} = \text{В}\cdot\text{с/м}^2 = \text{Тл}$ (тесла)

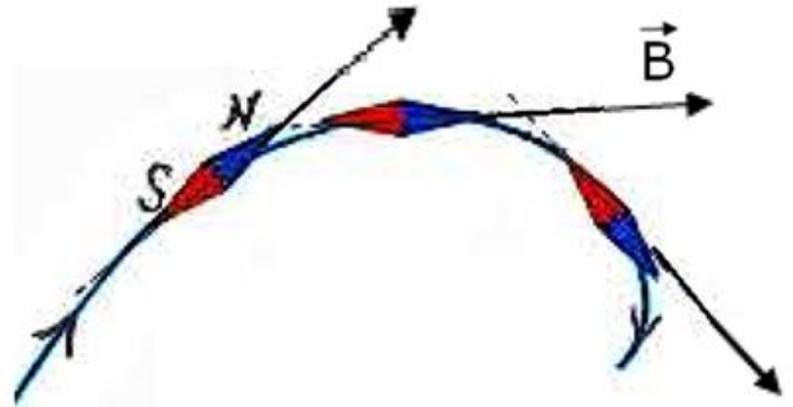
Магнитные силовые линии

Вектор, силовая хар-ка МП $d\vec{F} = [\vec{I}d\vec{l}, \vec{B}]$

Ед. изм. – тесла (Тл)

Изображается МСЛ:

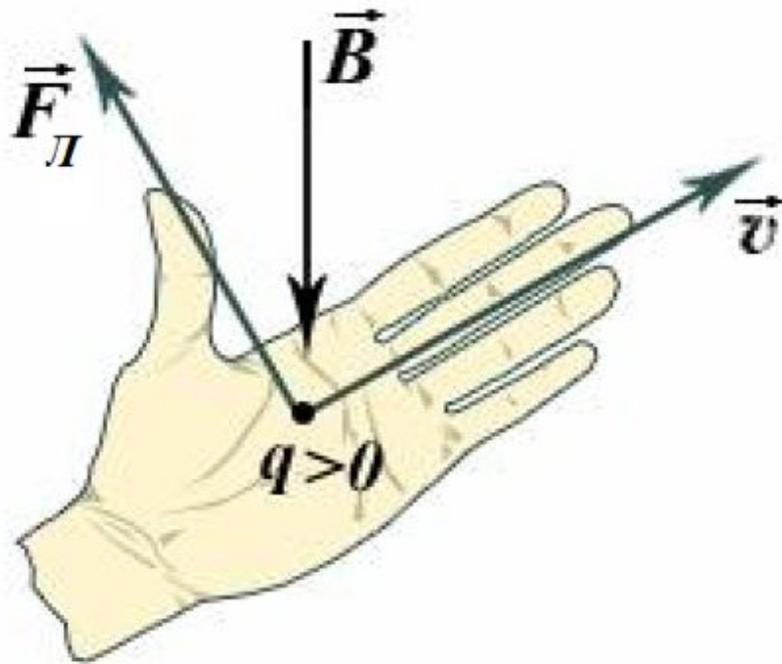
- 1) всегда замкнутые;
- 2) через \forall точку можно провести только одну МСЛ;
- 3) густота МСЛ пропорц. B .



Если проводник не прямой и не короткий:

$$\vec{F} = \sum \Delta\vec{F} \text{ или } \int d\vec{F} \quad - \text{ принцип суперпозиции}$$

Сила Ампера и сила Лоренца



$$F_L = q v B \sin \alpha$$

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

$$F_L \perp v; \quad F_L \perp B$$

$$\vec{F}_A = I \cdot [\vec{l}, \vec{B}] = jS \cdot [\vec{l}, \vec{B}]$$

$$\vec{j} = -en\vec{v}_{др} \quad - \quad \text{плотность тока}$$

$$\vec{v}_{др} \quad - \quad \text{скорость дрейфа}$$

$$n \quad - \quad \text{концентрация эл-нов}$$

Знак «-» - из-за «-» заряда электронов.

$$\vec{F}_A = -enSl [\vec{v}_{др}, \vec{B}] = -enV [\vec{v}_{др}, \vec{B}] = -e [\vec{v}_{др}, \vec{B}] N$$

$$\vec{F}_A = \sum \vec{F}_L \quad - \quad \text{сила Ампера} = \text{сумме сил Лоренца}$$

Контур с током и его магнитный МОМЕНТ

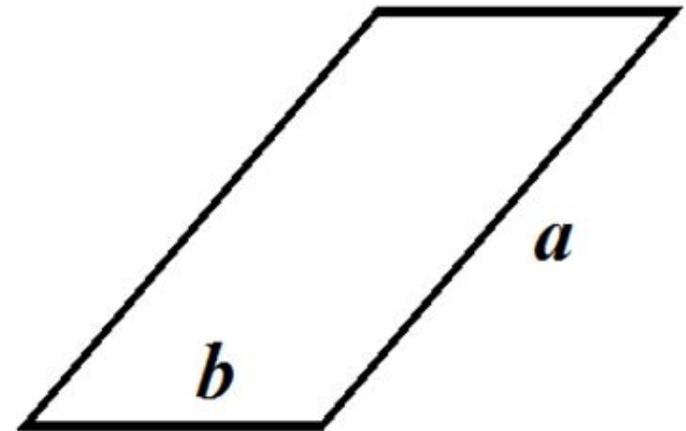


Магнитный момент контура:

$$p_m = I S$$

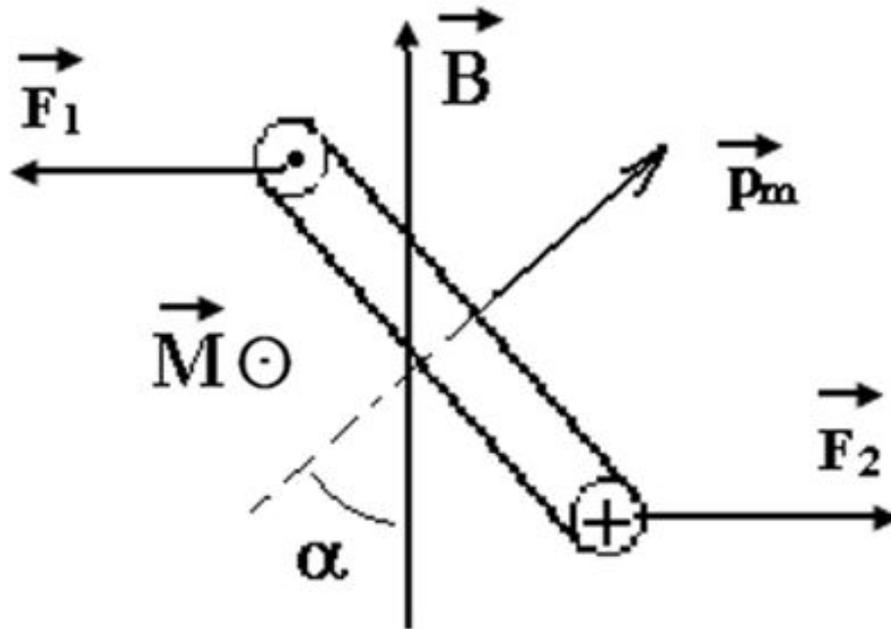
$$[p_m] = \text{А} \cdot \text{м}^2$$

Простейший случай:



Контур с током в однородном МП

$$F_1 = F_2 = I B a$$



a – размер рамки \perp пл-ти рисунка

$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = 0$ – сила равна 0, но есть вращающий момент:

$$M = F b \sin\alpha = I B a b \sin\alpha = p_m B \sin\alpha$$

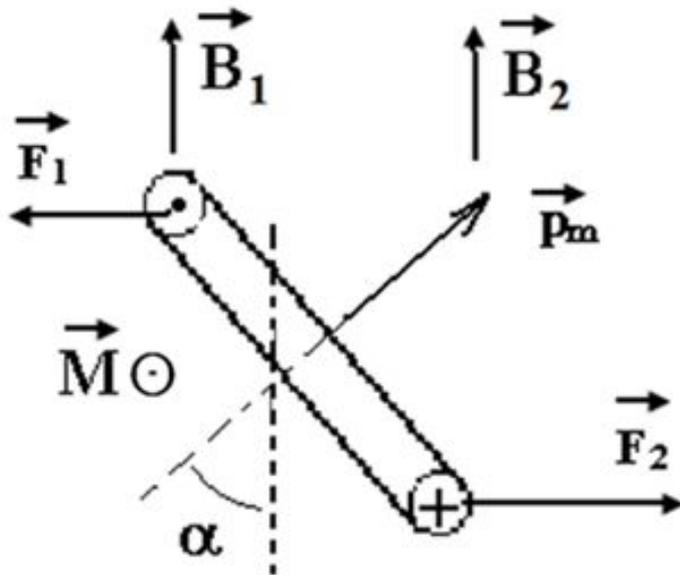
α – угол между \vec{B} и \vec{p}_m

В векторной форме: $\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$

Он разворачивает \vec{p}_m вдоль \vec{B} .

Аналогия: $\vec{M} = [\vec{p}_{\text{эл}}, \vec{E}]$ – вращ. момент, действующий на эл. диполь в ЭП

Контур с током в неоднородном МП



Вращающий момент:

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

$$B_2 > B_1 \Rightarrow F_2 > F_1$$

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 \neq 0$$

$$F = F_2 - F_1 = I(B_2 - B_1) a =$$

$$I a (dB/dx) b \sin \alpha =$$

$$IS(dB/dx) \sin \alpha = p_m (dB/dx) \sin \alpha$$

При $\sin \alpha > 0$ рамка втягивается в область сильного МП.

При $\sin \alpha < 0$ (p_m смотрит против B) рамка выталкивается из области сильного МП.

Закон Био-Савара-Лапласа

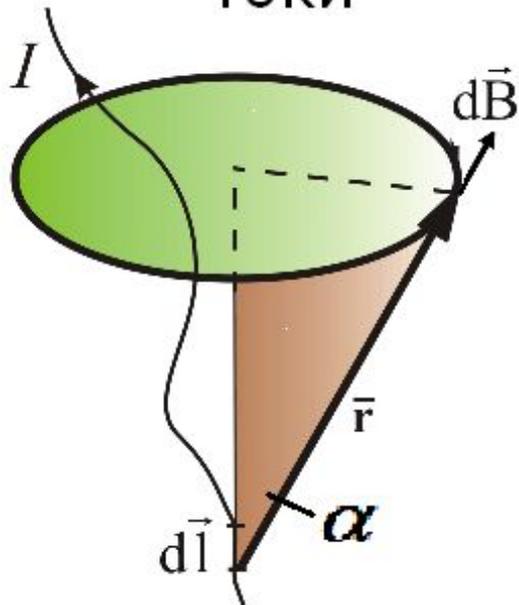
Происхождение МП

намагниченные
тела

↓
молекулярные
токи

электрические токи
в проводниках

↓
закон Био-Савара-
Лапласа



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

$$dB = (\mu_0 / 4\pi) \cdot I \cdot dl \sin\alpha / r^2$$

$$d\vec{B} \perp d\vec{l}, \vec{r}$$

μ_0 - магнитная постоянная

$$\mu_0 / 4\pi = 10^{-7} \text{ Гн/м}; \quad \mu_0 = 1.26 \cdot 10^{-6} \text{ Гн/м}$$

Принцип суперпозиции и МП в ВЕЩЕСТВЕ

Принцип суперпозиции: $d\vec{B} \Rightarrow \vec{B} = \sum \Delta \vec{B} \Rightarrow \int d\vec{B}$

1) для нескольких и длинных проводников

2) для МП в веществе

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

– для токов, текущих в вакууме

Вещество: МП от тока + МП молекулярных токов:

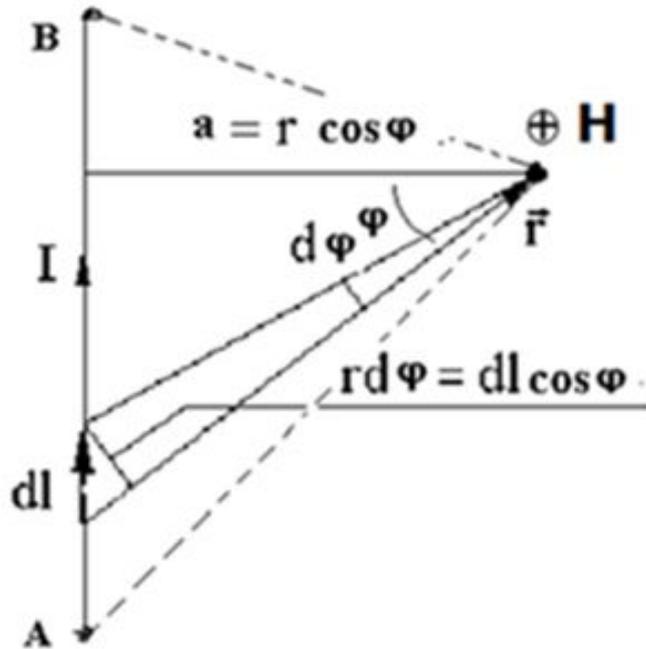
$$d\vec{B} = \mu \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}$$

μ - магнитная проницаемость, безразмерная величина показывает, во сколько раз МП в в-ве сильнее, чем в вакууме (ϵ в диэлектриках – наоборот)

МП отрезка тонкого прямого провода

(2)

a – расстояние от (\cdot) наблюдения до провода или его продолжения
 φ – угол между перпендикуляром и радиус вектором



$$dB = \frac{\mu_o}{4\pi} \cdot \frac{I dl \cos\varphi}{r^2}$$

$$B = \frac{\mu_o}{4\pi} \int I \frac{\cos\varphi}{r^2} dl$$

С учетом: $r = a/\cos\varphi$,
 координата вдоль провода:

$$x = a \operatorname{tg}\varphi; dx = dl = a (1/\cos^2\varphi)d\varphi$$

$$B = \int_{\alpha}^{\beta} \frac{\mu_o}{4\pi} I \frac{\cos\varphi \cos^2\varphi}{a^2} \frac{a}{\cos^2\varphi} d\varphi = \frac{\mu_o}{4\pi a} I (\sin\beta - \sin\alpha)$$

МП отрезка тонкого прямого провода

$$(3)$$
$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{a} (\sin\beta - \sin\alpha)$$

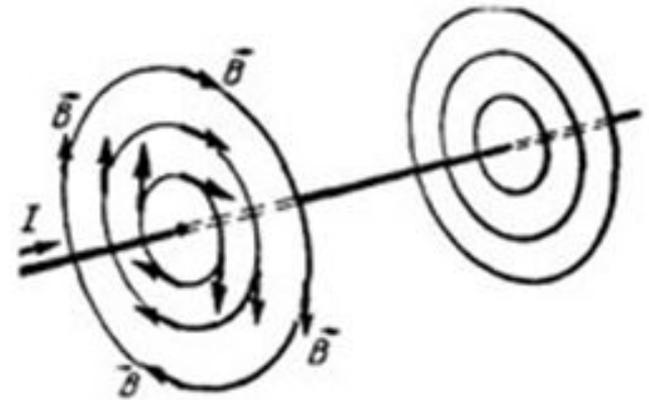
α и β - углы между перпендикуляром и лучами, проведенные в точки A и B.

Угол > 0 , если луч смещен отн. перпендикуляра в направлении протекания тока, и наоборот.

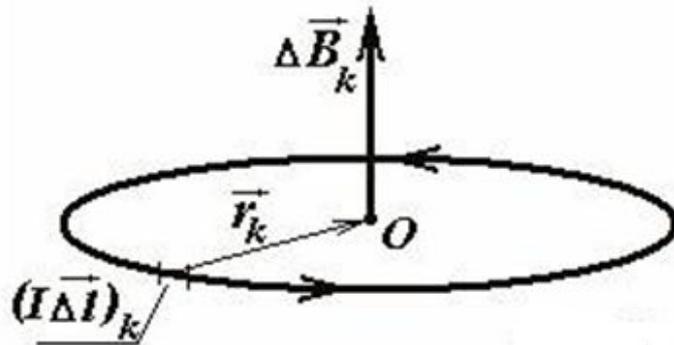
На рисунке $\alpha < 0$ и $\beta > 0$.

Провод (бесконечно) длинный \Rightarrow
 $\sin\beta \rightarrow 1$, $\sin\alpha \rightarrow -1$:

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



МП кругового тока



Ток течет по дуге окружности.

Дуга $\Delta l \Rightarrow$ элемент тока $I\Delta l$.

Все ΔB направлены в одну сторону (по оси круга) \Rightarrow можно складывать их модули.

Для \forall элемента дуги $\sin \alpha = 1$.

$$\Delta B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \Delta l}{r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I \Delta \varphi}{r}$$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{r} \Sigma \Delta \varphi = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I}{r} \varphi$$

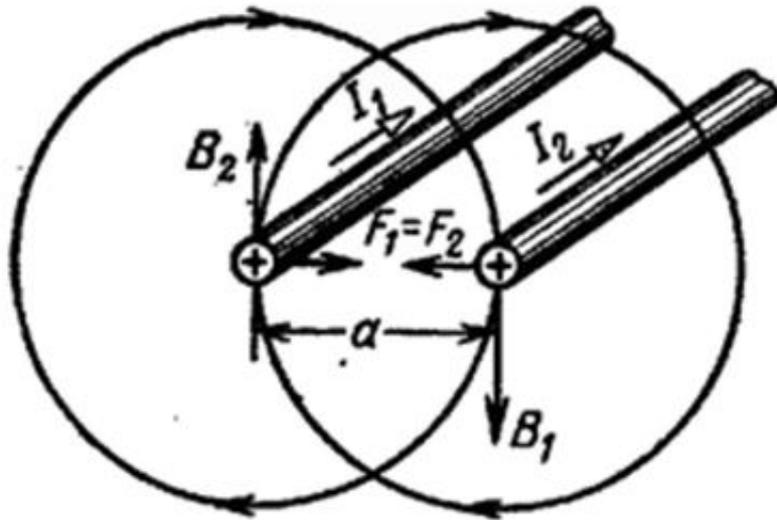
φ - центральный угол, опирающийся на проводник.

В ЧС, когда ток течет по замкнутому кольцу, $\varphi = 2\pi$:

$$B = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I}{r}$$

На оси круга на расст. x от его центра: $B = \frac{\mu_0}{2} \cdot \frac{I r^2}{(r^2 + x^2)^{3/2}}$

Взаимодействие проводников с током



$$dF = I_2 B_1 dl = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{a} dl$$

a – расст. между пров-ками.

↑↑ - притягиваются

↑↓ - отталкиваются.

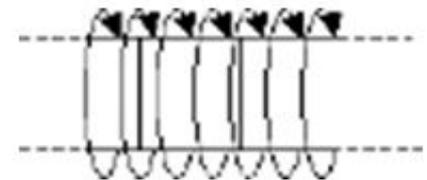
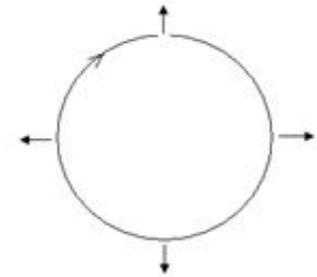
Где наблюдается?

1. натяжение витков обмотки

электромагнитов

2. продольное сжатие обмоток, в соседних витках токи параллельны и притягиваются.

3. шнурование тока в молнии.



Магнитный поток

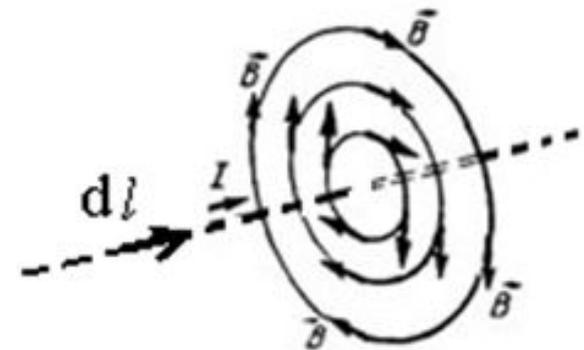
Магнитный поток – это поток вектора магнитной индукции:

$$\Phi = \oint (\vec{B}, d\vec{S})$$

Символ Φ для магнитного потока - без индекса.
 $\Phi \sim$ числу МСЛ, пересекающих поверхность.

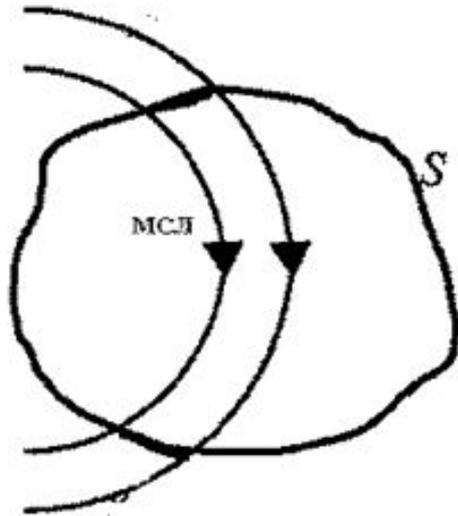
$$\oint (\vec{D}, d\vec{S}) = Q \Rightarrow \oint (\vec{B}, d\vec{S}) = ?$$

Рассмотрим МП, создаваемое элементом тока $I \Delta l$.
Любая МСЛ этого поля – это окружность.



Теорема Гаусса для вектора магнитной индукции

Окружность пересекает \forall замкнутую пов-ть четное число раз – сколько раз входит в охватываемый объем, столько же раз и выходит.



Это означает для магн. потока от $d\vec{l}$:

$$\Delta\Phi = \oint (\Delta\vec{B}, d\vec{S}) = 0$$

Т.к. $\vec{B} = \sum \Delta\vec{B}$ и $\Phi = \sum \Delta\Phi$, то

$$\oint (\Delta\vec{B}, d\vec{S}) = 0$$

– это математическое выражение ТГ для вектора магнитной индукции.

Магнитный поток через замкнутую поверхность равен нулю.

Смысл теорем Гаусса

1. для ЭП: $\oint(\vec{D}, d\vec{S}) = Q$

Если ПЧ = 0, значит, нет зарядов.

Всегда $\oint(\vec{B}, d\vec{S}) = 0 \Rightarrow$ в природе нет магнитных зарядов.

Квантовая теория их допускает, но на опыте они не обнаружены.

2. ЭСЛ начинаются на (+) зарядах и кончаются на (-).
МСЛ нигде не начинаются и не кончаются, замкнутые линии – МП вихревое.

$\oint(\vec{B}, d\vec{S}) = 0$ – интегральная форма.

Ее дифференциальная форма: $\operatorname{div} \vec{B} = 0$

ТГ для вектора \vec{B} – следствие закона Био-Савара:

З.Б.-С. \rightarrow МСЛ = окружности $\rightarrow \oint(\vec{B}, d\vec{S}) = 0$