

# Магнетизм (история)

Название от минерала магнетита  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  – 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;

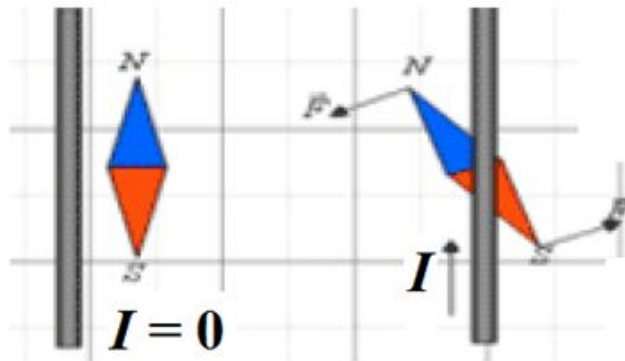
Уравнения электромагнитного поля – Максвелл;

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

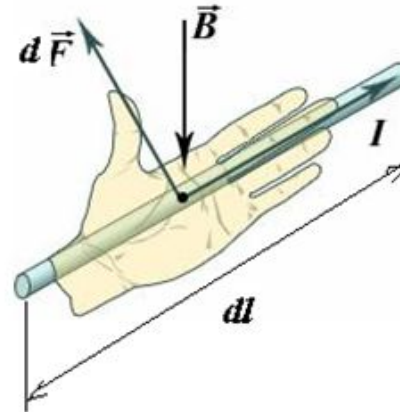
Спин и собственное МП элементарных частиц.

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  $B$ .

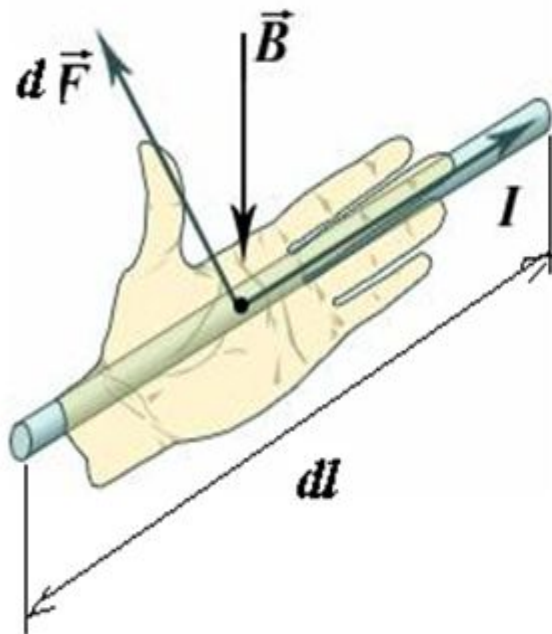
$$dF = B I dl \sin\alpha$$

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)

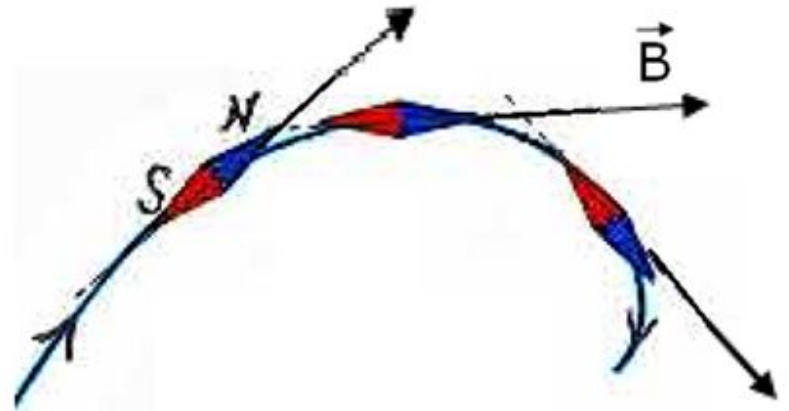
# Магнитные силовые линии

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

Ед. изм. – тесла (Тл)

Изображается МСЛ:

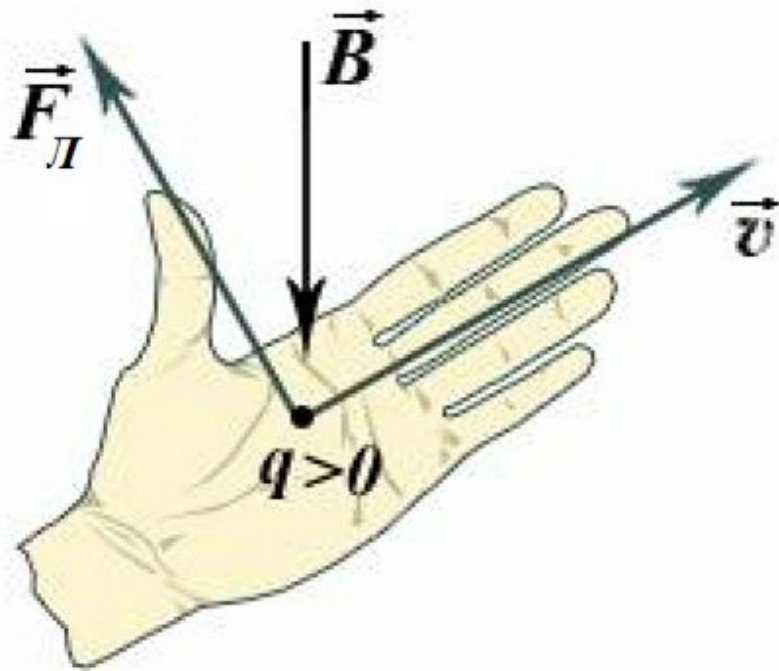
- 1) всегда замкнутые;
- 2) через  $\forall$  точку можно провести только одну МСЛ;
- 3) густота МСЛ пропорц.  $B$ .



Если проводник не прямой и не короткий:

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

# Сила Ампера и сила Лоренца



$$F_{\text{Л}} = q v B \sin \alpha$$

$$\vec{F}_{\text{Л}} = q [\vec{v}, \vec{B}]$$

$$F_{\text{Л}} \perp v; \quad F_{\text{Л}} \perp B$$

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

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

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

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

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

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

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

# Контур с током и его магнитный МОМЕНТ

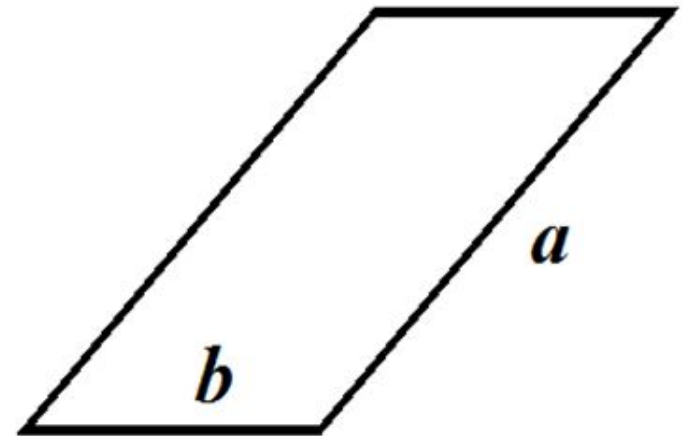


Магнитный момент контура:

$$p_m = I S$$

$$[p_m] = A \cdot m^2$$

Простейший случай:



# Контур с током в однородном МП

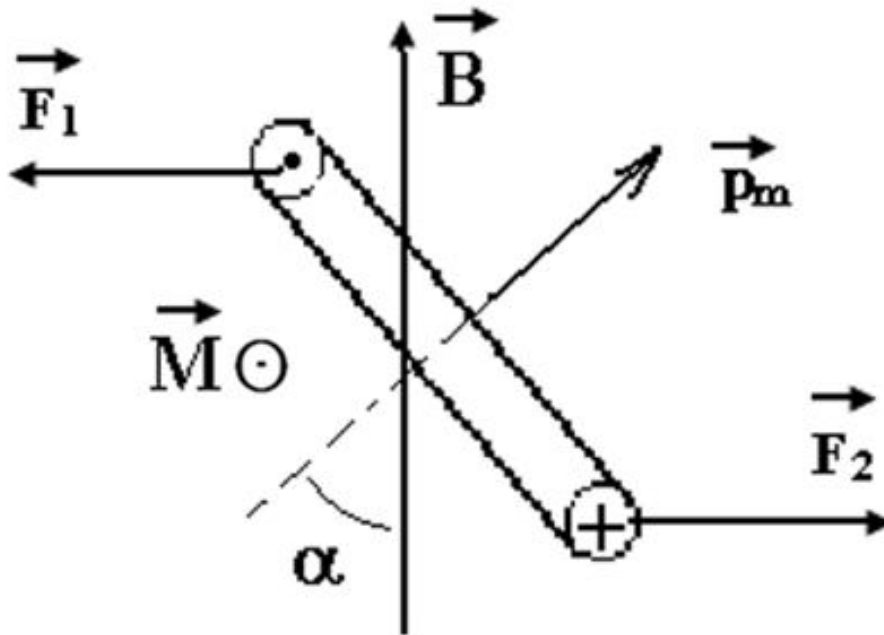
$$F_1 = F_2 = I B a$$

$a$  – размер рамки  $\perp$  пл-ти рисунка

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

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

$\alpha$  – угол между  $\vec{B}$  и  $\vec{p}_m$

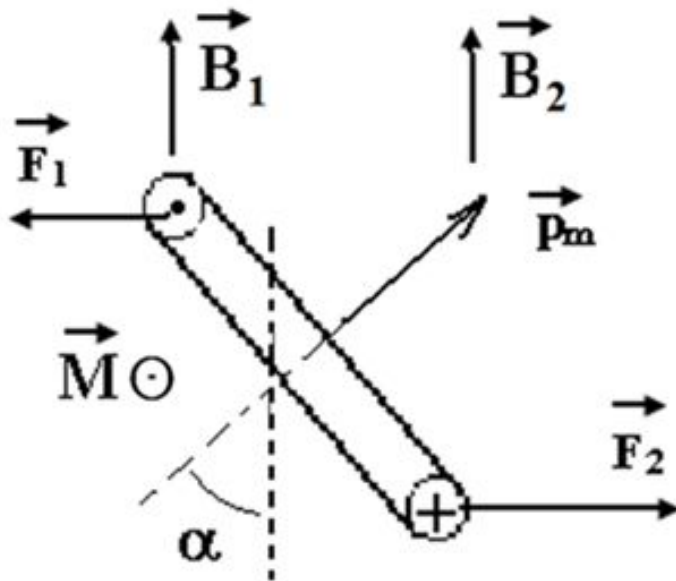


В векторной форме:  $\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$

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

Аналогия:  $\vec{M} = [\vec{p}_{эл}, \vec{E}]$  – 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

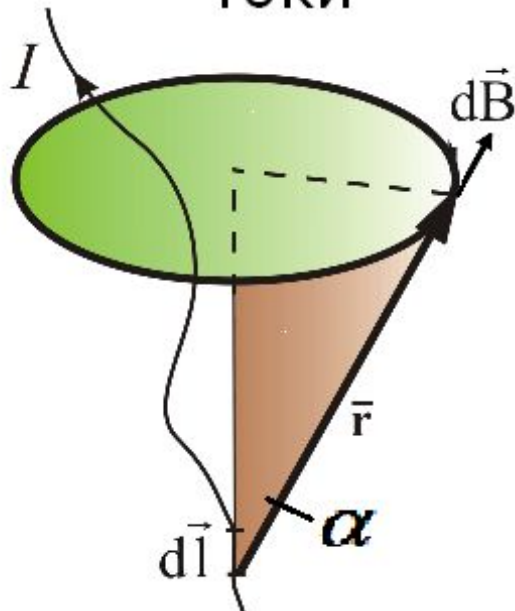
Происхождение МП

намагниченные  
тела

↓  
молекулярные  
токи

электрические токи  
в проводниках

↓  
закон Био-Савара-  
Лапласа



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

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

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

$\mu_0$  - 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

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

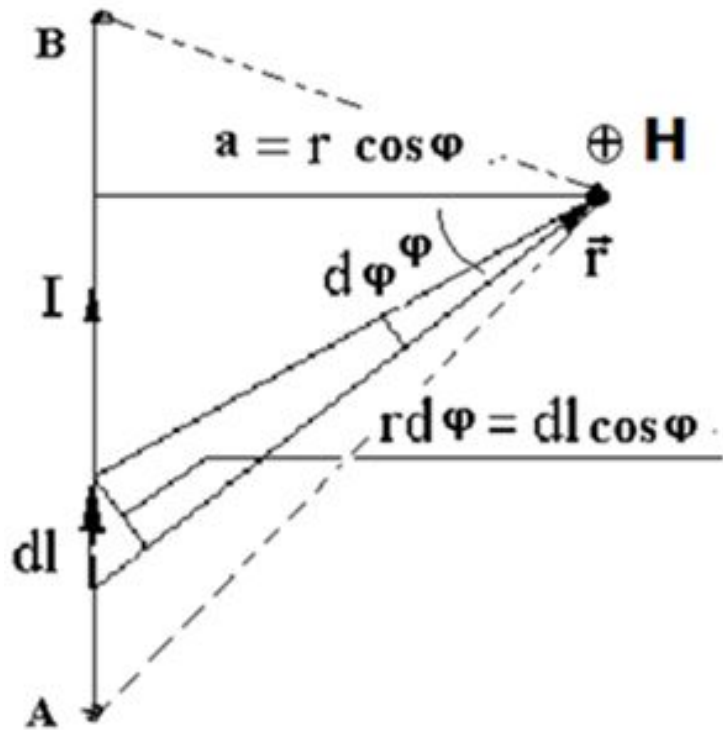
– для токов, текущих в вакууме

Вещество: МП от тока + МП молекулярных токов:

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

$\mu$  - магнитная проницаемость, безразмерная величина показывает, во сколько раз МП в в-ве сильнее, чем в вакууме ( $\epsilon$  в диэлектриках – наоборот)

# МП отрезка тонкого прямого провода



В т. А ток втекает, из т. В вытекает.

$\vec{B}$  = сумме  $d\vec{B}$  - вкладов от

отдельных элементов тока  $I d\vec{l}$

Все  $d\vec{B}$  направлены в одну сторону  $\Rightarrow$  можно считать

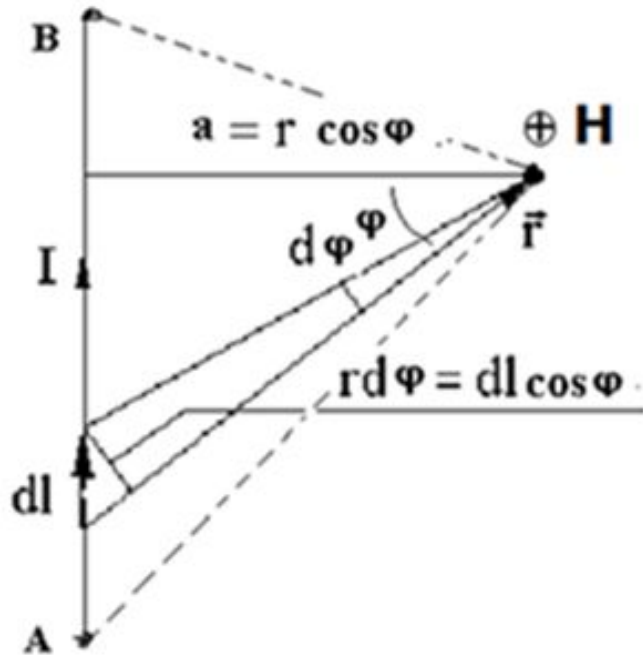
только модуль  $\vec{B}$

$\vec{r}$  - радиус-вектор из  $d\vec{l}$  в точку наблюдения

# МП отрезка тонкого прямого провода

(2)

$a$  – расстояние от ( $\cdot$ ) наблюдения до провода или его продолжения  
 $\varphi$  – 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

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

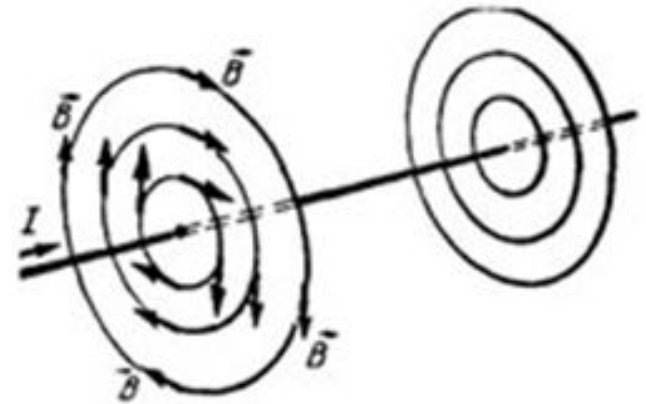
$\alpha$  и  $\beta$  - углы между перпендикуляром и лучами, проведенные в точки A и B.

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

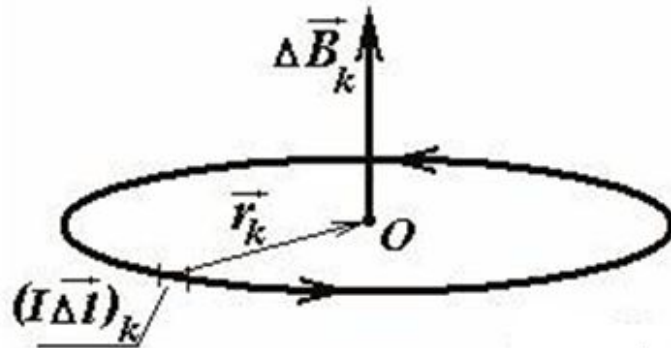
На рисунке  $\alpha < 0$  и  $\beta > 0$ .

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  $\Delta B$  направлены в одну сторону (по оси круга)  $\Rightarrow$  можно складывать их модули.

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

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

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

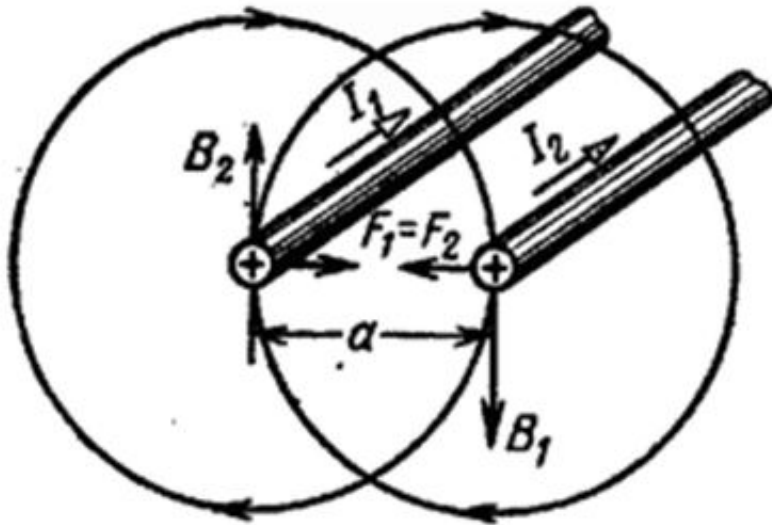
$\varphi$  - центральный угол, опирающийся на проводник.

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.

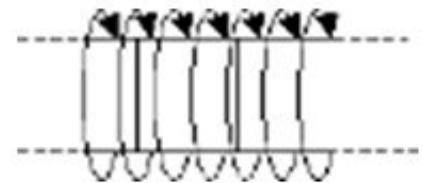
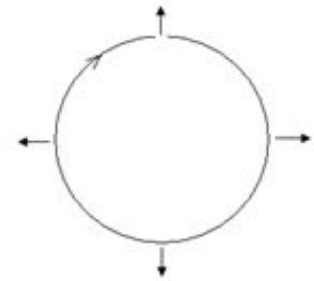
Где наблюдается?

1. натяжение витков обмотки

электромагнитов

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

3. шнурование тока в молнии.



# Магнитный поток

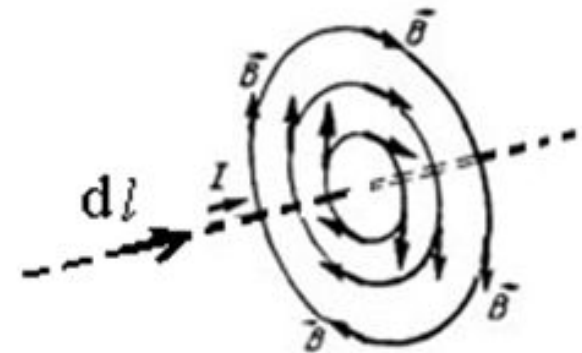
Магнитный поток – это поток вектора магнитной индукции:

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

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

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

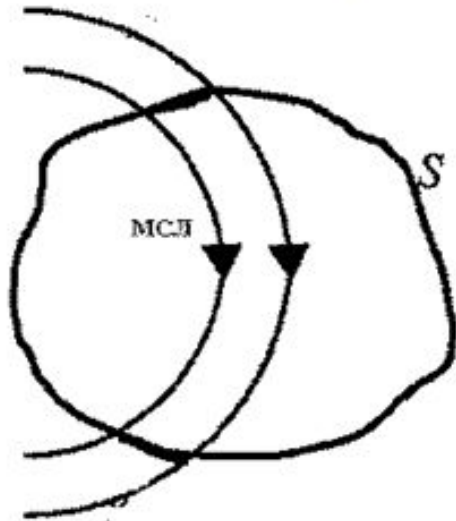
Рассмотрим МП, создаваемое элементом тока  $I \Delta l$ .  
Любая МСЛ этого поля – это окружность.





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