

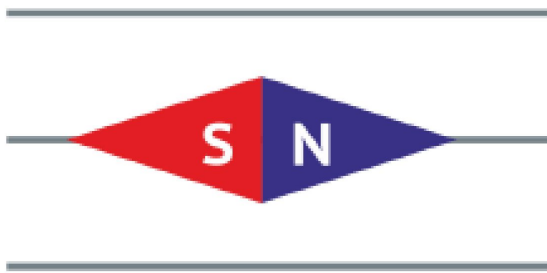
Лекция 7

Магнитное поле

В пространстве, окружающем намагниченные тела, возникает силовое поле - **МАГНИТНОЕ**

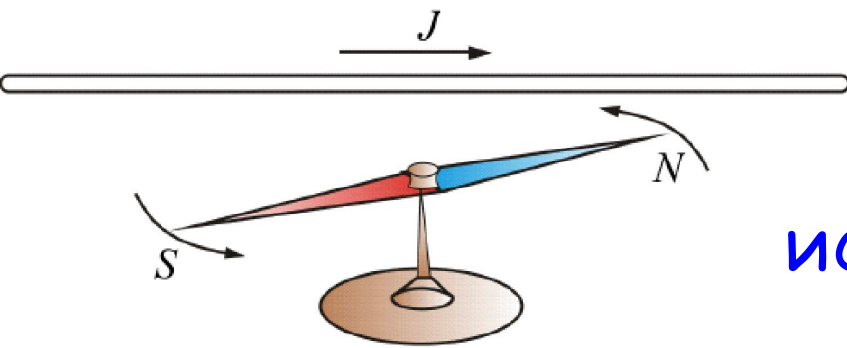
Наличие МП обнару-ся по силовому действию на постоянные магниты или на внесенные в него проводники с током

Помещенная магнитная стрелка устанавливается в каждой его точке определенным образом, указывая направление поля



Конец стрелки, который в МП Земли указывает на север, наз-ся **северным**, а противоположный - **ЮЖНЫМ**

При отклонении стрелки от направления МТТ на стрелку действует мех. крутящий момент $M_{кр}$ пропорциональный синусу угла отклонения α и стремящиеся повернуть ее вдоль указанного направления



При взаимодействии постоянных магнитов они испытывают результирующий момент сил, но не силу!!!

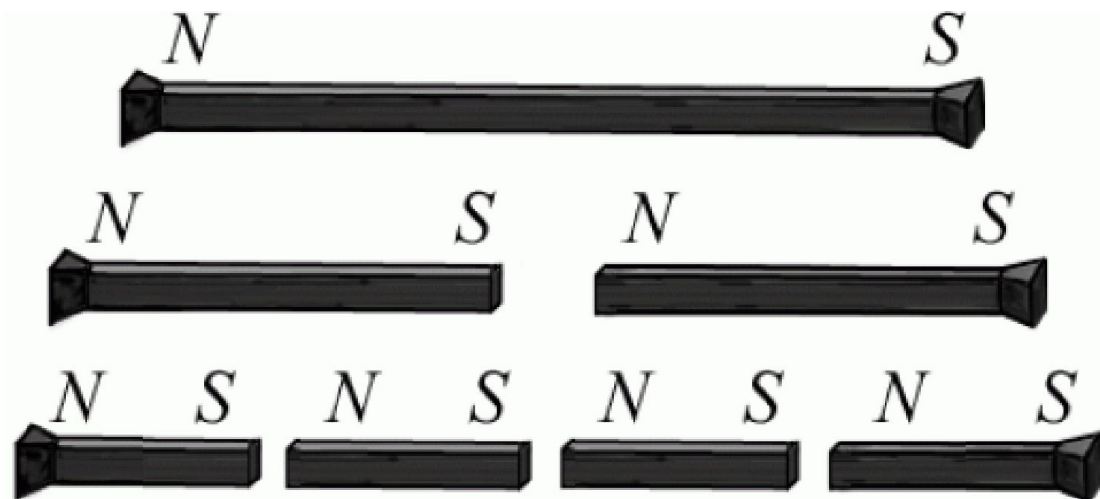
Подобно электрическому диполю, постоянный магнит в однородном поле стремится повернуться по полю, но не перемещаться в нем.

Отличие постоянных магнитов от электрических диполей

Электрический диполь всегда состоит из зарядов, равных по величине и противоположных по знаку, к-рые можно разделить

Постоянный магнит, будучи разрезан пополам, превращается в два меньших магнита, каждый из к-х имеет и северный и южный полюса

*«МАГНИТНЫХ
зарядов» в
природе не
существует!!!*



Опыт Эрстеда (1820 г., Дания)

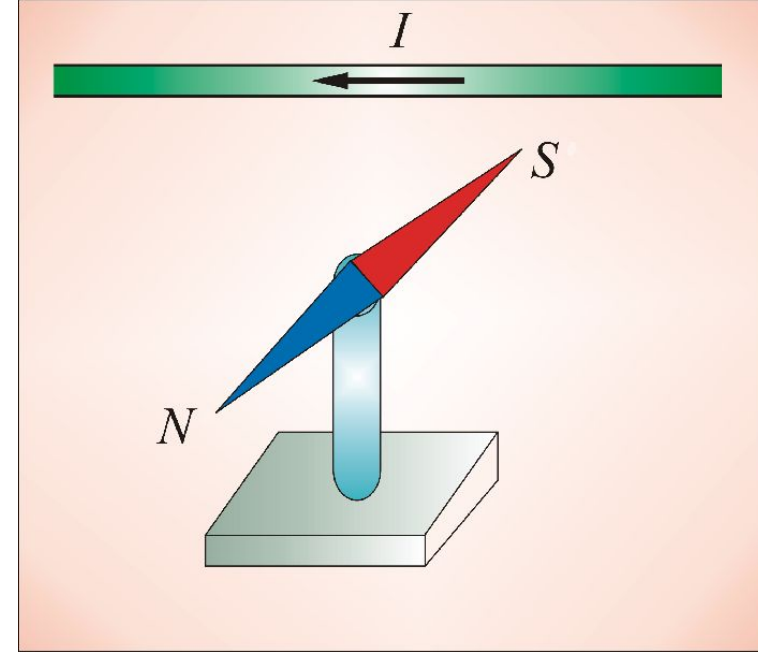
Провод с током
действует на магнитную
стрелку

Вокруг всякого проводника с
током есть МП

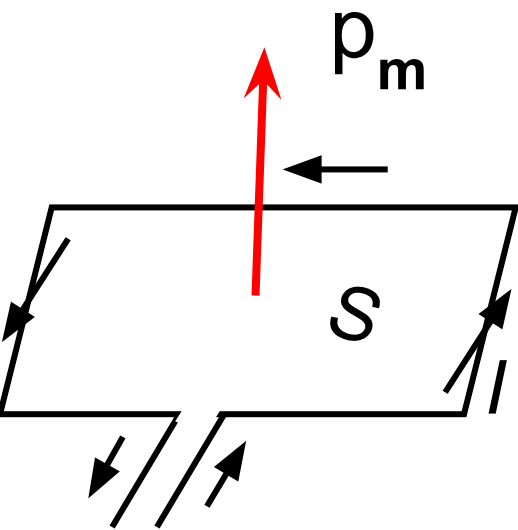
Ток - это направленное движение зарядов

Вокруг всякого движущегося заряда помимо
электрического поля существует еще и магнитное

Хар-р воздействия МП зависит от формы
проводника, расположения и направления тока в
нем



На рамку с током, в магн. поле действует
вращающий момент сил



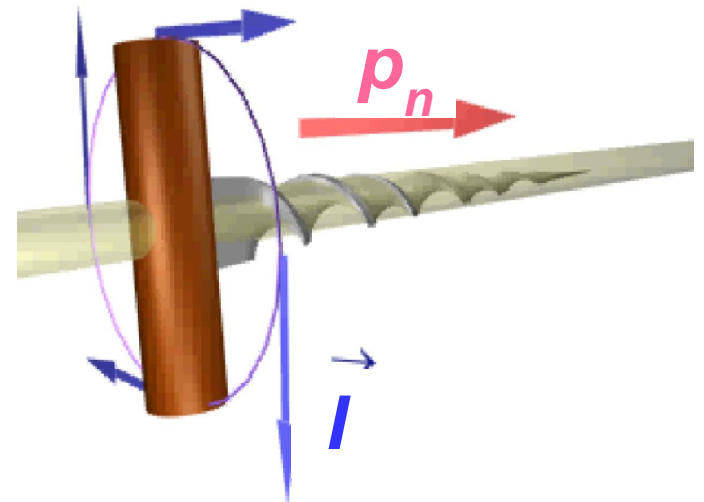
Рамка с током обладает **МАГН.
МОМЕНТОМ:**

$$p_m = ISn$$

$$[p_m] = \text{А} \cdot \text{М}^2$$

I - ток, S - площадь рамки, n -
нормаль, опред-щая ориентацию
 p_m в пр-ве.

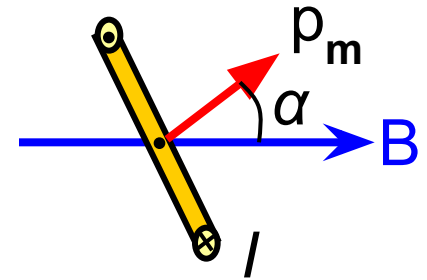
Направл. вектора p_m опред.
правилом правого винта,
вращая винт по направл.
тока в рамке



Величину и направл. магн. поля опред. вектор B - **МАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ**

На рамку с током в магн. поле действует момент сил M , поворачив-щий p_m вдоль напр. поля B .

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

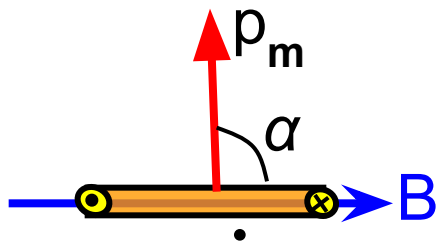


$M \rightarrow \text{max}$, если $\alpha = 90^\circ$.

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

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

**Магн. индукция -
силовая хар-ка
магн. поля**



Условие M_{max}

$$[B] = [Tл]$$

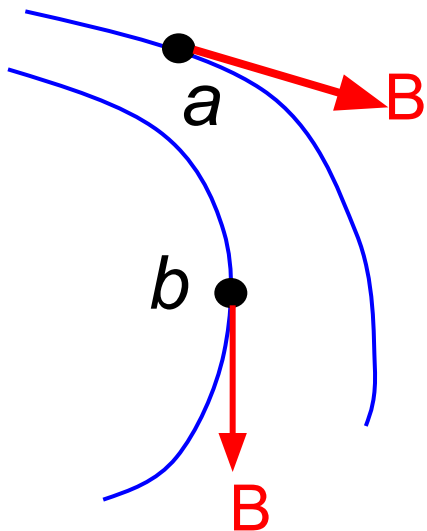
(Тесла)

Магнитное поле- вихревое ,т.к. M и p_m - хар-ки вращательного движения

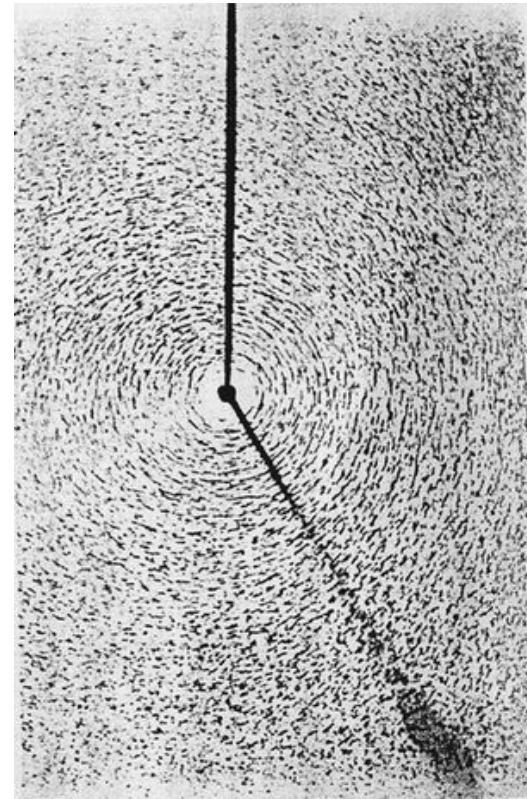
МП представляют силовыми линиями- **ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ**

Касательная к сил. линии в данной точке дает направление вектора B

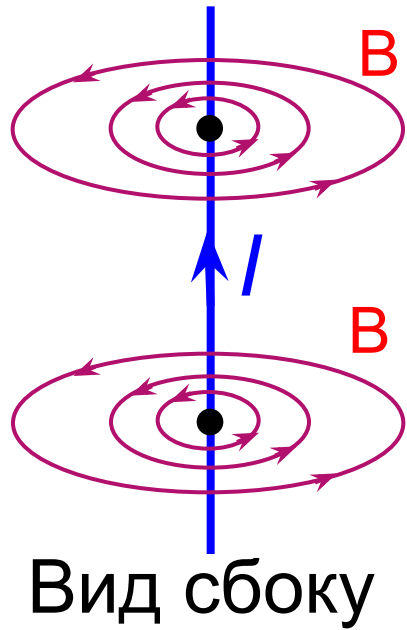
Густота сил. линий опред. величину вектора B



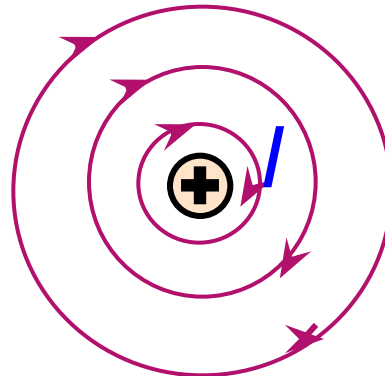
Визуализация - железные опилки- каждая как стрелка компаса



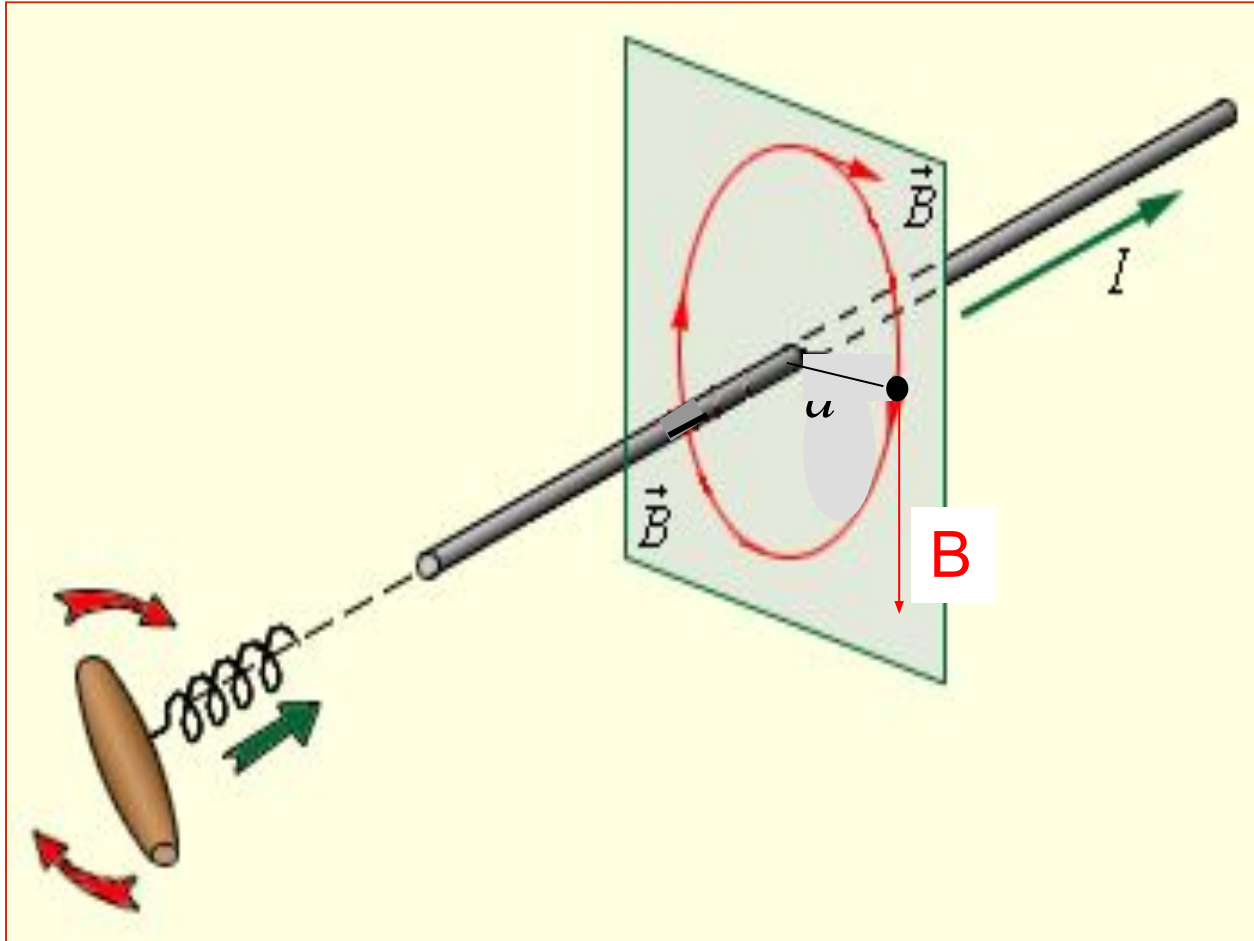
Опыт: силовые линии поля B от прямого провода с током



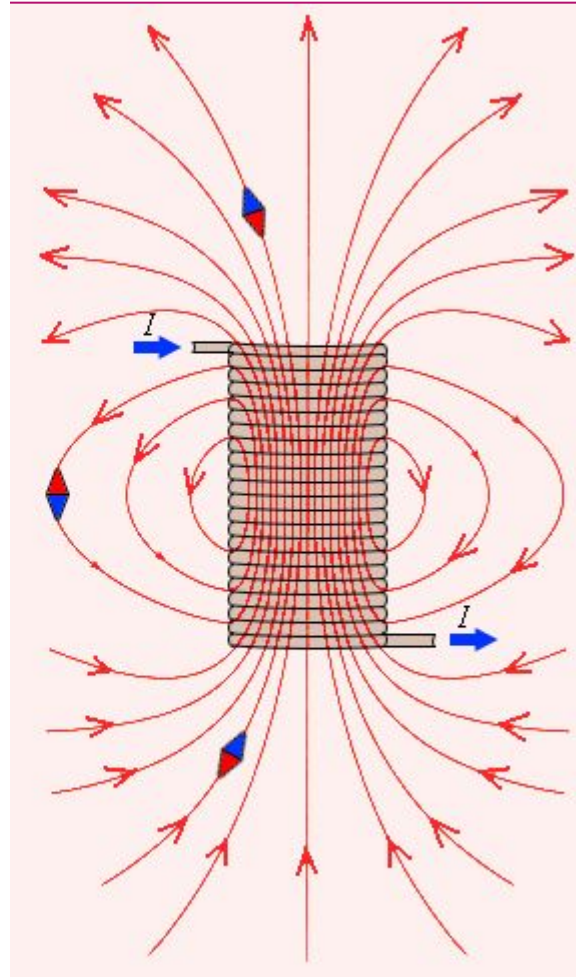
Силовые линии поля B замкнуты. Их направление по отношению к току определяется правилом правого винта.



Направл. вектора B от пров-ка с током



Силловые линии поля B



катушки с
ТОКОМ

Источники МП

Проводники с током, движ-ся эл. заряженные частицы и тела, переменные эл. поля, **постоянные магниты**

В атомах е движ-ся по орбитам, т.е. текут микроскопические токи, создавая элементар. магн.

моменты p_{ma}

Провод с током (макроток) нах-ся в среде.

Попадая в МП макротоков, p_{ma} среды ориентир-ся в нём, создавая дополнит-ое МП.

Магн. индукция B есть результирующее поле макротоков и микротоков среды.

МП больше в среде чем в вакууме, в отличие
от эл.поля

Магн. поле макротоков определяет напряженность
магн. поля H H - вектор, [А/м]

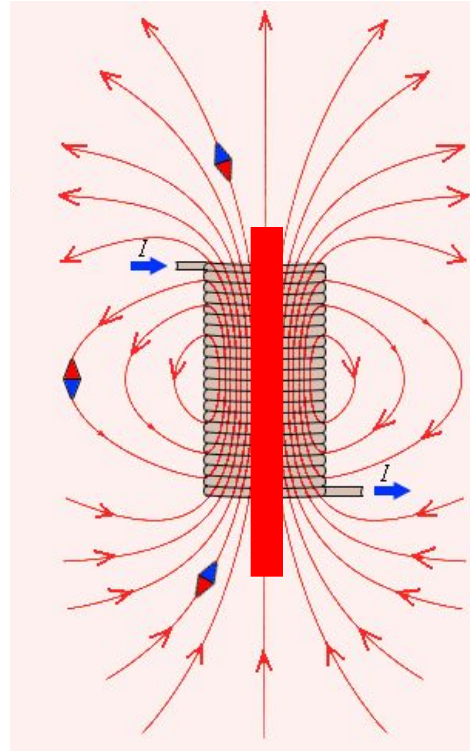
$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ - магн. постоянная,

μ - магн. проницаемость среды

μ показ-т, во сколько раз МП макро-и
микротоков среды больше поля
макротоков

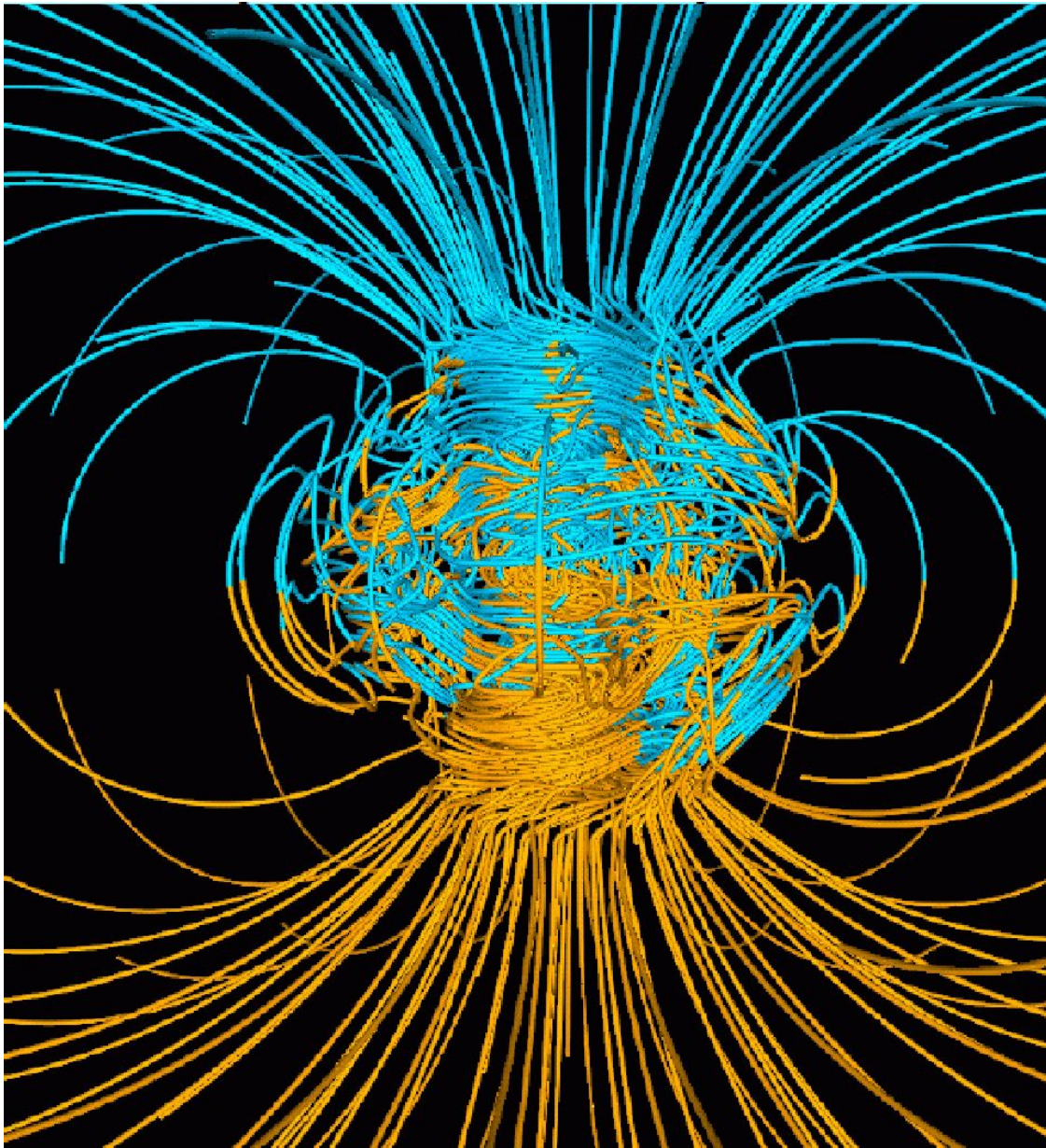
Для воздуха $\mu \approx 1$, для железа $\mu = 10^2 - 10^5$.



$$\mu = 100$$

Пример. В катушку с током вставлен железный сердечник с $\mu = 100$. Магн. поле B в катушке с сердечн. в 100 раз больше, чем в катушке без сердечника.

Магнитное поле Земли. Компьютерная модель. Вихревой хар-р





Движение
заряженных частиц
в магнитосфере
Земли

МП в пр-ве явл-ся не потенциальным, а вихревым

Источник - электр. поля

Магнитного аналога электр. заряда не существует

Нет зарядов из которых выходят линии В

Не имея ни начала ни конца, линии В возвращаются в исходную точку, образуя замкнутую петлю

МТ - это одна из форм проявления
электромагнитного поля

Действует только на движ-ся частицы и тела,
обладающие эл.зарядом, а также на
намагниченные тела

Создается проводником с током, движ-ся эл.
заряд-ми частицами и телами, а так же
переменными эл. полями

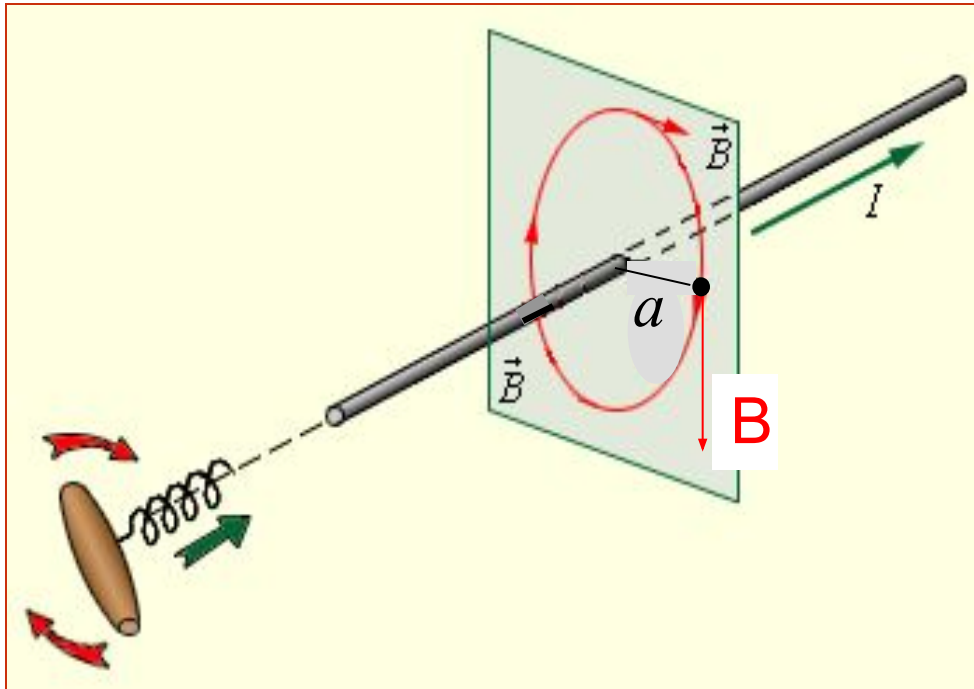
$$B = \frac{M_{\max}}{P_m}$$

Магн. индукция - силовая хар-ка МТ
(макροтоки + микротоки)

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

**Напряженность МТ. Только
макροтоки**

Направл. вектора B от пров-ка с током

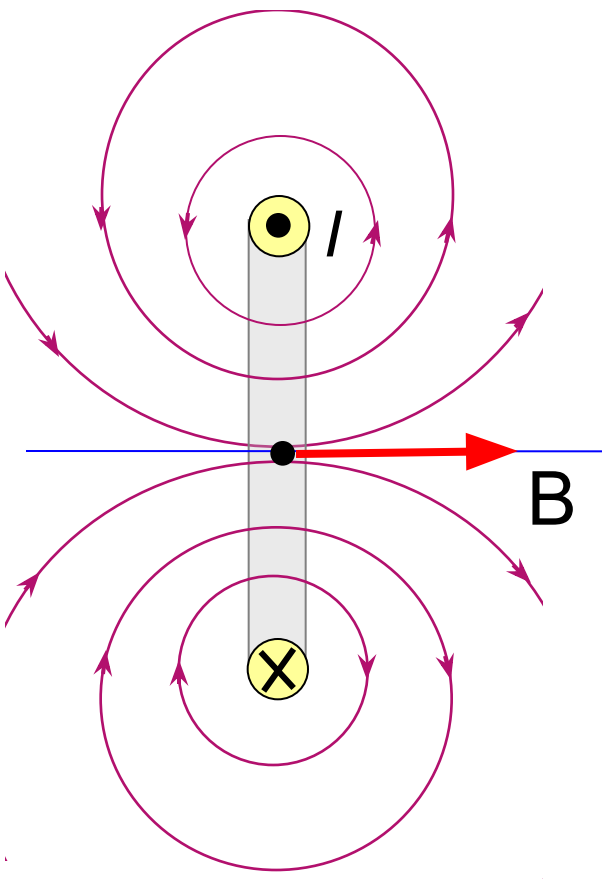


$$H = \frac{I}{2\pi a}$$

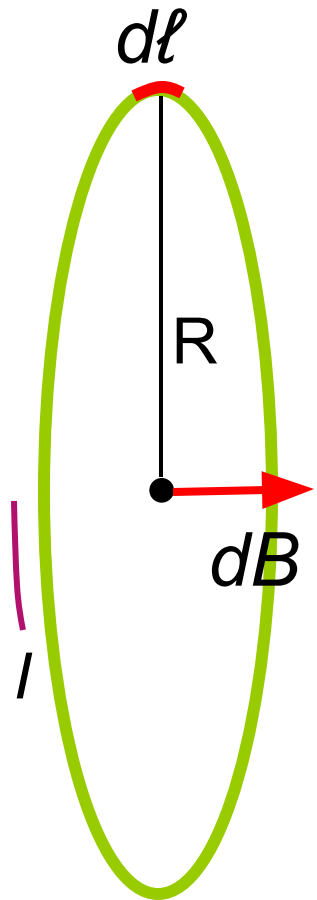
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

Индукция МПТ на расст. a
от ∞ длин-ного пр-ка с
ТОКОМ.

Магн. поле в центре кругового тока



Сечение витка с током

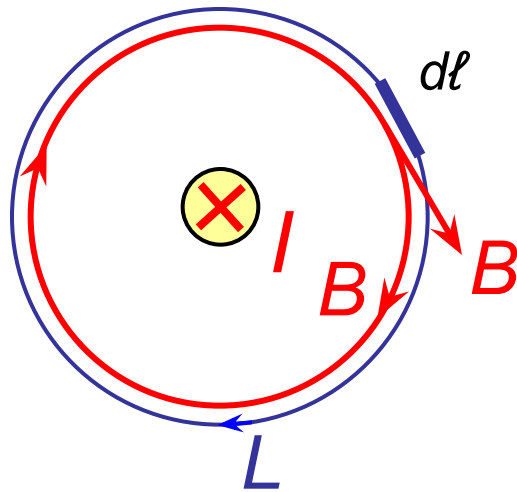


Поле B в центре витка с током

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

$$H = \frac{I}{2R}$$

Вихр. поле B



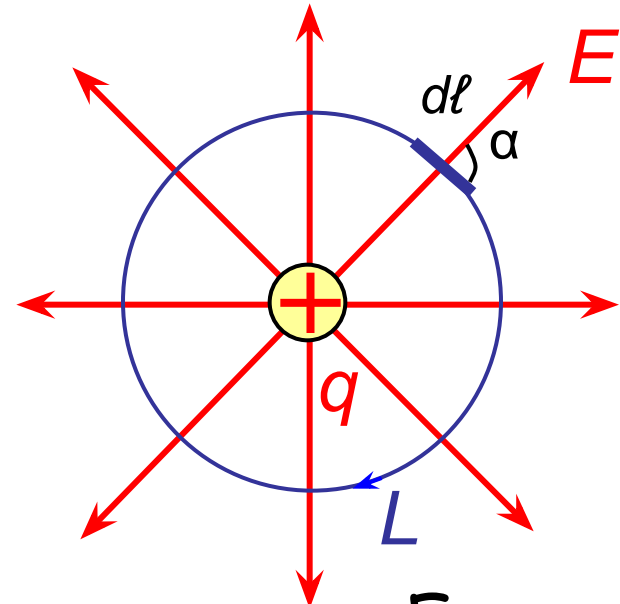
Сил. линии поля B
замкнуты.

$$B \parallel dl \Rightarrow \alpha = 0$$

$$\Phi = \int_S d\Phi$$

Φ - поток вектора $B = 0$

Потенц. поле E



Сил. линии поля E начин-ся
и заканч-ся на q или в ∞

$$E \perp dl \Rightarrow \alpha = 90^\circ$$

Φ - поток вектора $E \neq 0$

Опыт: на пр-к с током в магн. поле действует сила

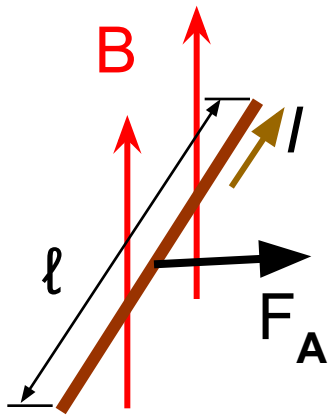
Ампера F_A :

$$\vec{F}_A = I[\vec{\ell} \times \vec{B}]$$

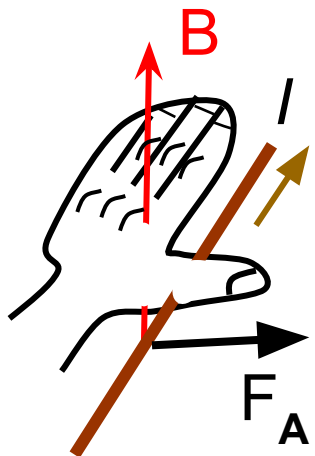
I - ток, ℓ - длина пров-ка, B - инд. магн. поля

$$F_A = I \ell B \sin \alpha$$

α - угол между \vec{B} и пр-ком с током



Направл-е F_A опред-ся правилом левой руки:

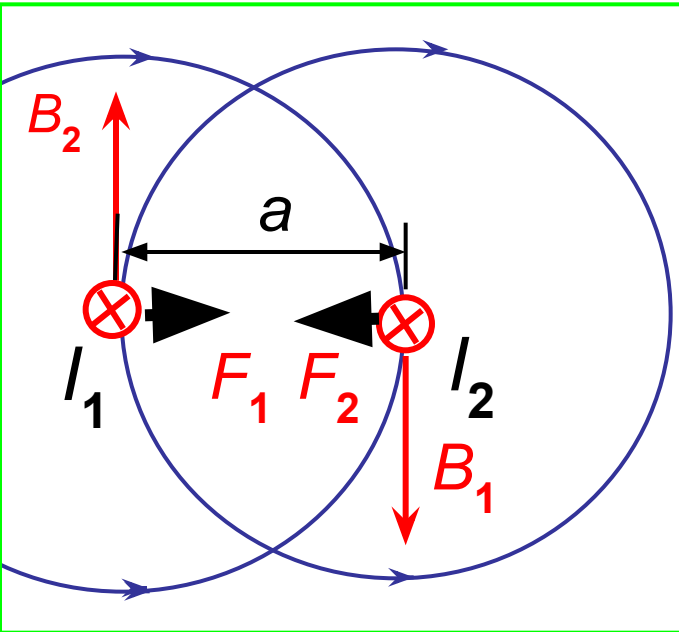


Вектор B входит в ладонь лев. руки, пальцы - вдоль ℓ с током, Б. палец - F_A

Прим-ние: Эл.двиг-ли, реле, эл-магниты

Взаимодействие параллельных токов

На расст. a два // ∞ пр-ка с токами одного направ.



На пр-к с током I_2 , находясь в поле B_1 от I_1 , действует F_A

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi a}; F_2 = B_1 I_2 \times \sin \alpha =$$

$$\frac{F_2}{\times} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a}$$

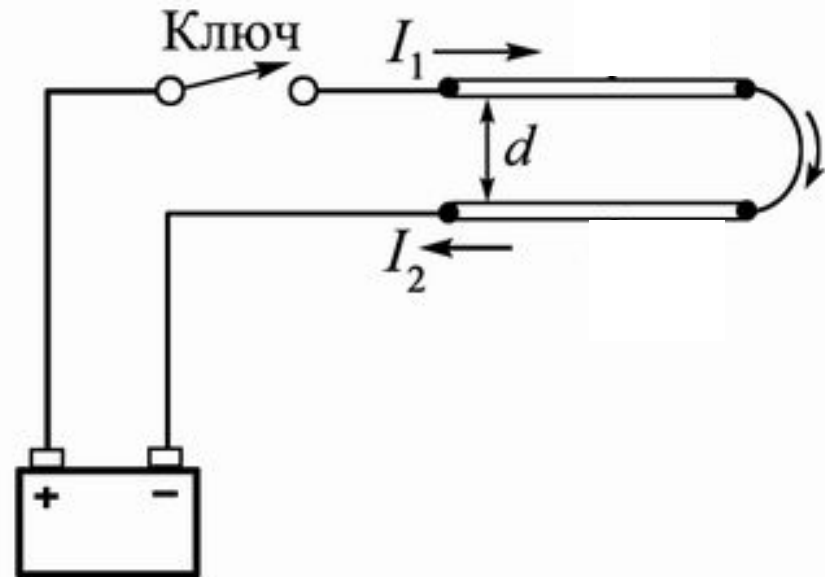
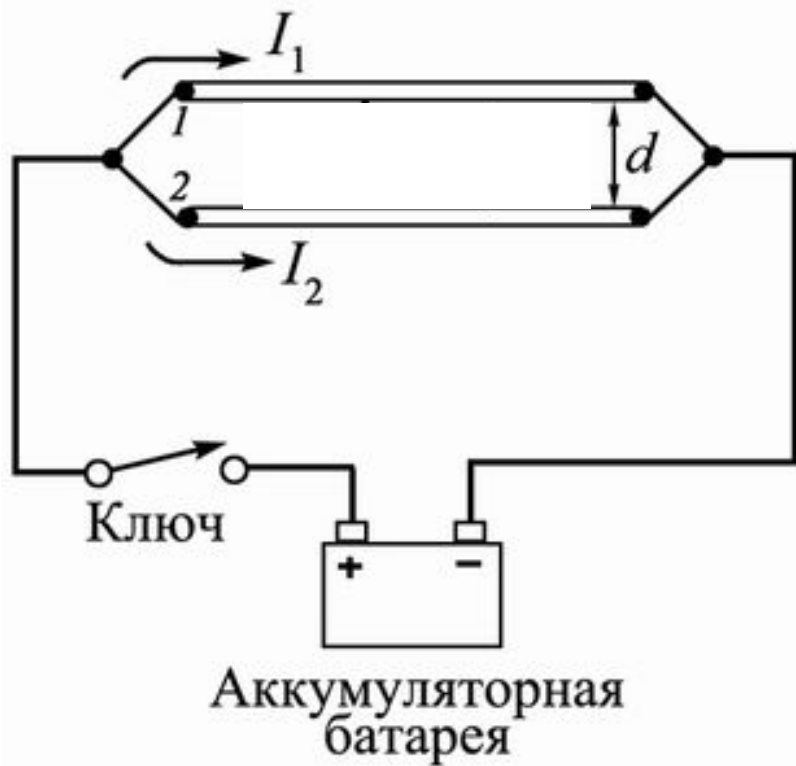
F_A на ед. длины пров-ка.

F_1 -?

Напр-ние F_2 - правилом лев. руки.

$$\frac{F_1}{\times} = \frac{\mu_0 I_2 I_1}{2\pi a}$$

Токи текущие в одном направл. - притяг-ся, в разных - отталк-тся.

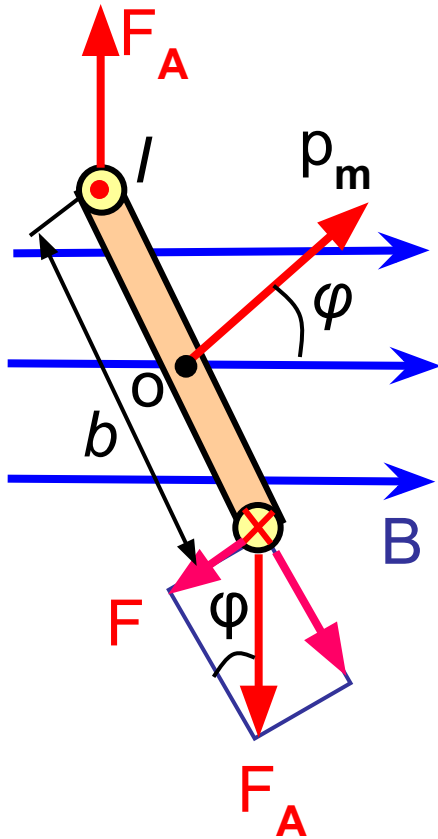


По величине силы отталкивания или притяжения, действующей на единицу длины проводника, можно определить силу тока, идущего по проводникам.

При $I_1 = I_2 = 1 \text{ А}$, $d = 1 \text{ м}$ $F = 2 \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}$

Рамка площ. S с током I обладает $p_m = IS$

В поле B на нее действует F_A : куда?



$$F_A = I \times B \sin \alpha \quad \alpha = 90^\circ \quad F_A = I \times B$$

Пусть p_m нах-ся под угл. φ к B .

$F = F_A \sin \varphi$ созд. вращ. момент рамки

$$\vec{M} = [\vec{F} \times \vec{b}]$$

(Сечение рамки
вид сверху)

$$M = B p_m \sin \varphi$$

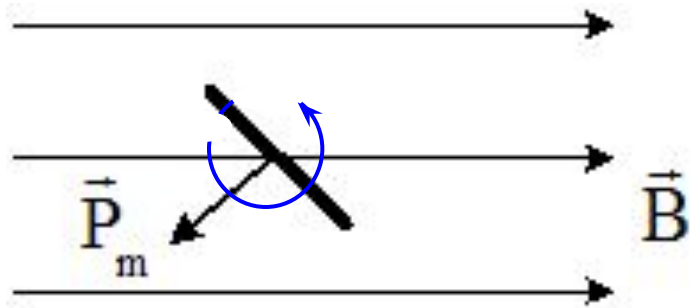
В поле B рамка поворачив-ся так,
что вектор p_m становится вдоль
вектора B .

Принцип раб.эл.двиг-ей, стрел. приборов

Тест 3. Рамка с током с магн. дипольным

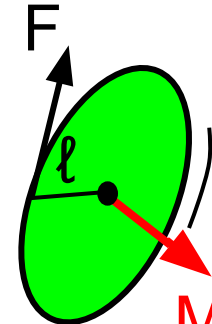
МОМЕНТОМ

\vec{P}_m , направление которого указано на рис., находится в однородном магн. поле.



Момент сил, действующих на магнитный диполь, направлен ...

$$\vec{M} = [\vec{P}_m \times \vec{B}].$$

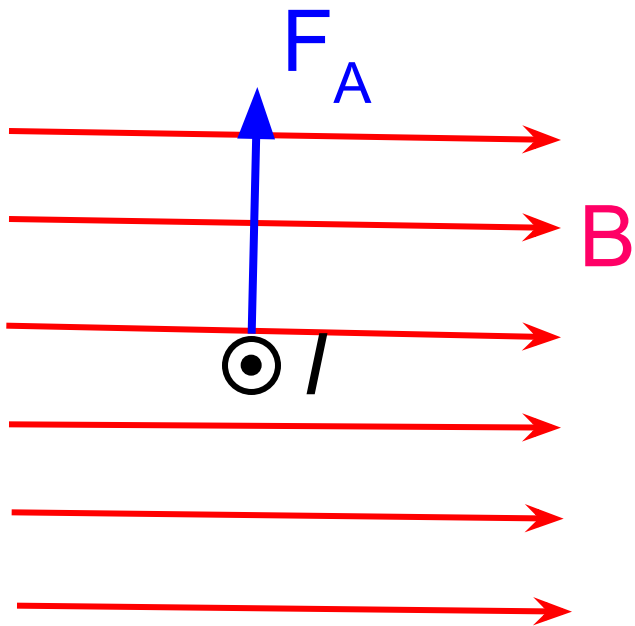


M по правилу

правого винта

- 1) перпендикулярно плоскости рис. «к нам»,
- 2) перпендикулярно плоскости рис. «от нас»,
- 3) по направлению вектора **B**,

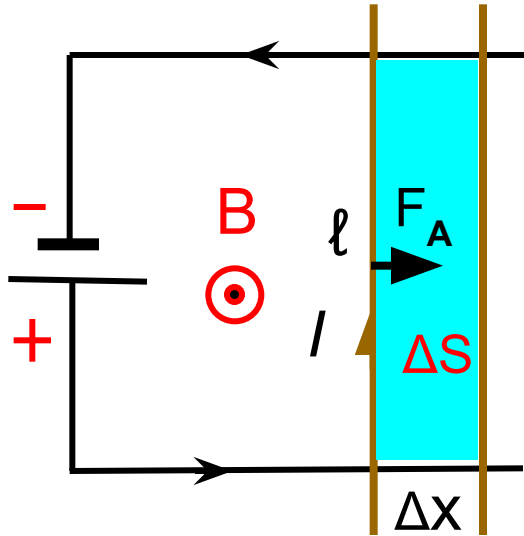
Тест 2. Прямолинейный пров-к с током помещен в однородное магн. поле (см. рис.). Сила Ампера, действующая на пр-ник, направлена:



- вправо,
- влево,
- вниз,
- **вверх**

Работа по перемещ-ю пр-ка с током в МТТ равна произвед-ю тока на магн. поток, пересекаемый движущимся пр-ком

В поле $B = \text{const}$ на пр-к с током действ-ет F_A :



$$F_A = I B \sin(\alpha) = I B$$

Пр-к перемещается, соверш. A

$$A = F_A \Delta x = I B \Delta x = I B \Delta S = I \Delta \Phi$$

$$A = I \Delta \Phi$$

Работа по перемещ-ю контура с током в неоднород. МТТ равна произвед-ю I в контуре на изменение магн. потока, сцепленного с контуром

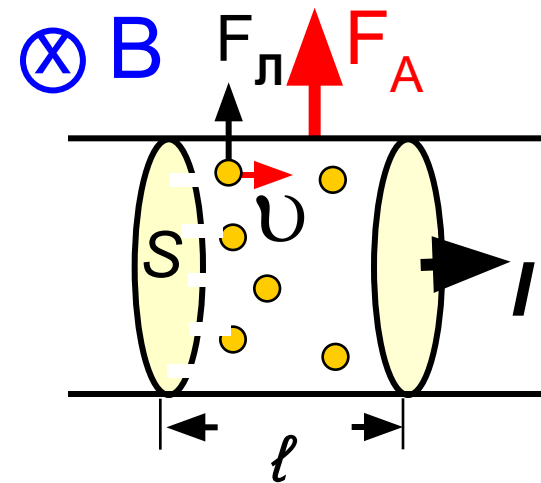
На пр-к с током в поле B действ. сила F_A

$$\vec{F}_A = I[\vec{\ell} \times \vec{B}]$$

$$F_A = I\ell B \sin \alpha; \quad \text{Пусть } B \perp \ell$$

F_A - это сила, действ. на N дв. зарядов через пр-к со скор. u

$$\alpha = 90^\circ$$



На один заряд

$$\vec{F}_L = q[\vec{u} \times \vec{B}]$$

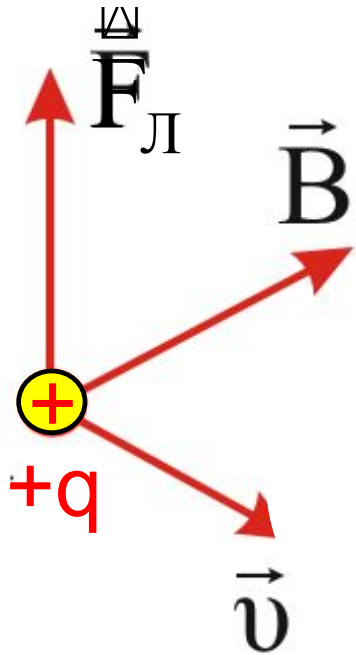
$$F_L = q u B \sin \alpha$$

Сила Лоренца, действует на q , движущ. в МТТ B со скоростью u

Видно, что $F_L = 0$, когда $u = 0$ или $\alpha = 0$.

(q летит вдоль сил. линий поля B)

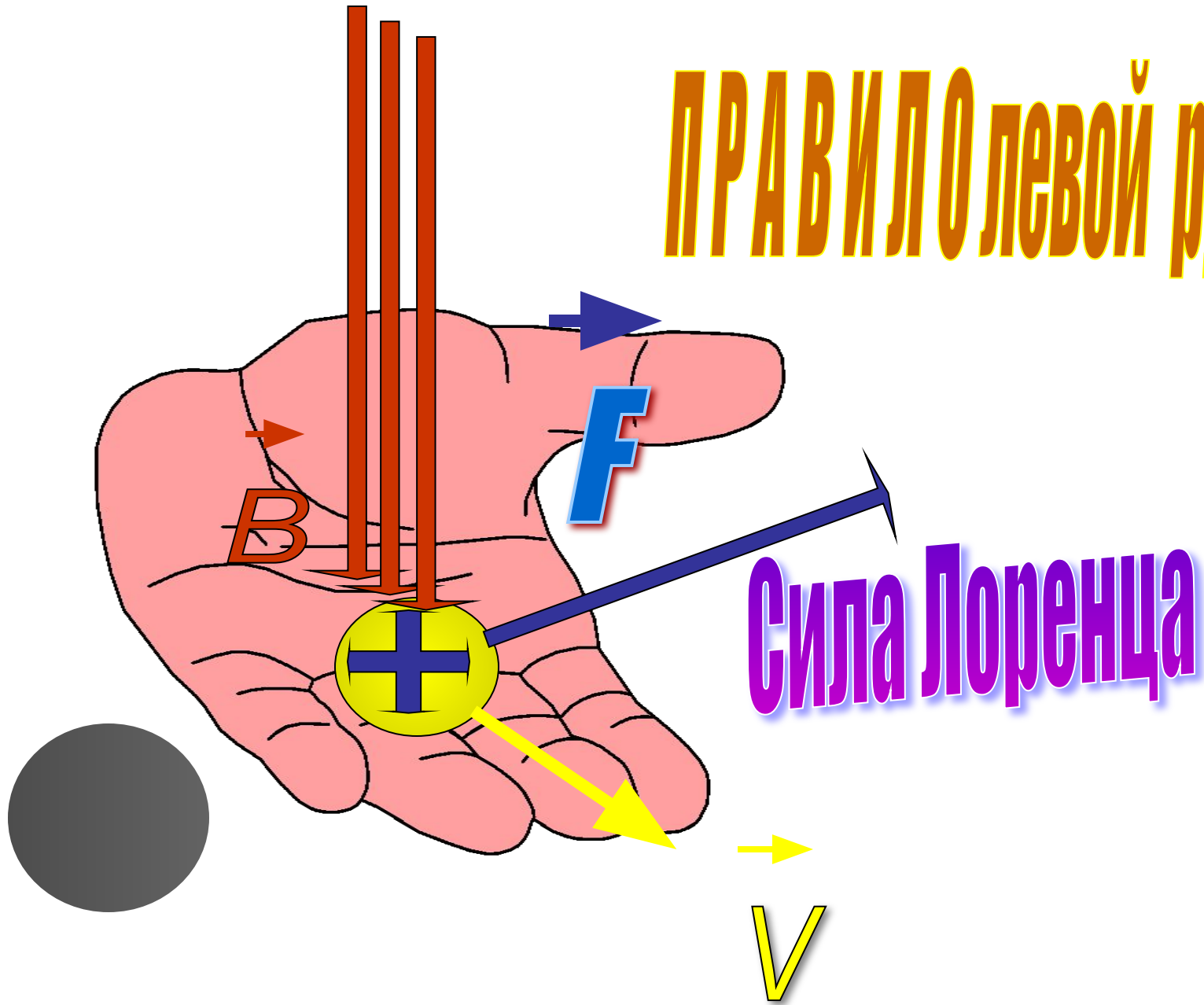
$\vec{F}_L \perp$ к плоскости, в которой лежат векторы \vec{u} и \vec{v}
и для $+q$ опред-ся **правилом левой руки**

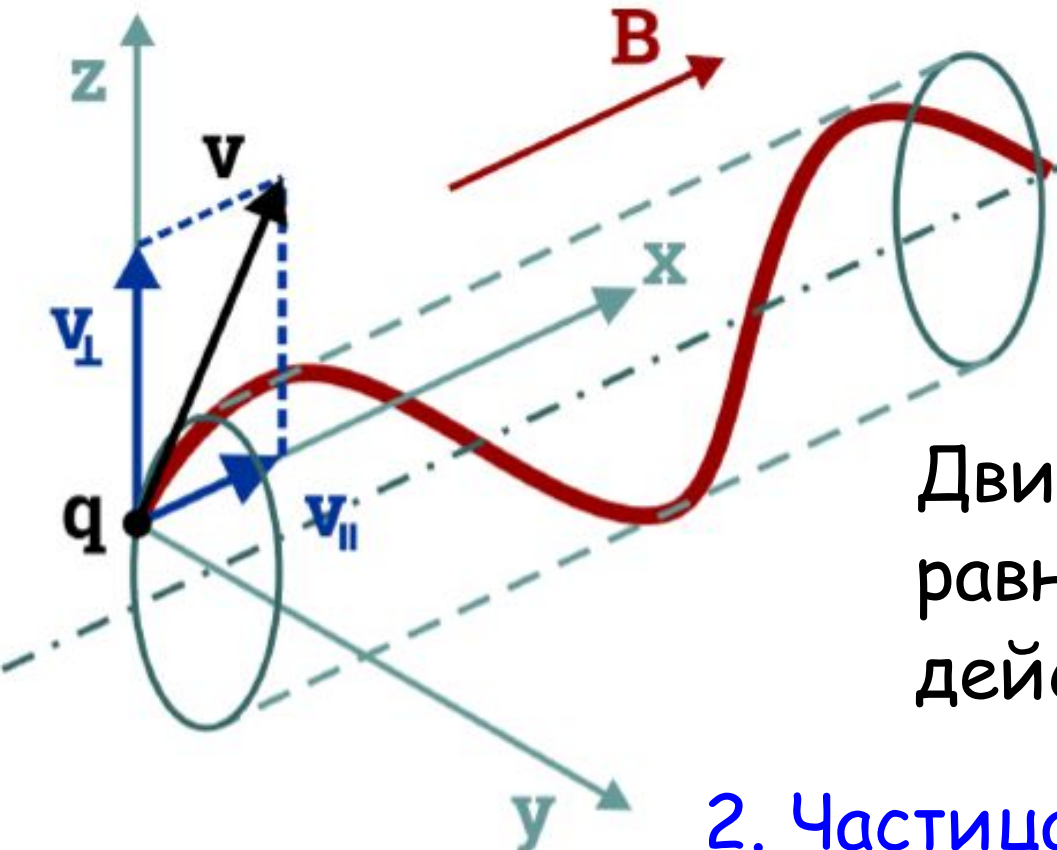


Вектор \vec{v} входит в ладонь лев. руки, пальцы - вдоль вектора \vec{u} , Б. палец - \vec{F}_L .

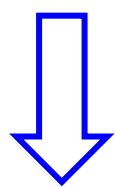
Если заряд отриц. ($-q$), то \vec{F}_L опред-ют так же правил. левой руки, но направ. берут противоположное.

ПРАВИЛО левой руки





1. Частица движется со скоростью $u \parallel B$



Движение прямолинейное равномерное. Поле не действует

2. Частица движется с $u \perp B$

Движение по окружности с радиусом

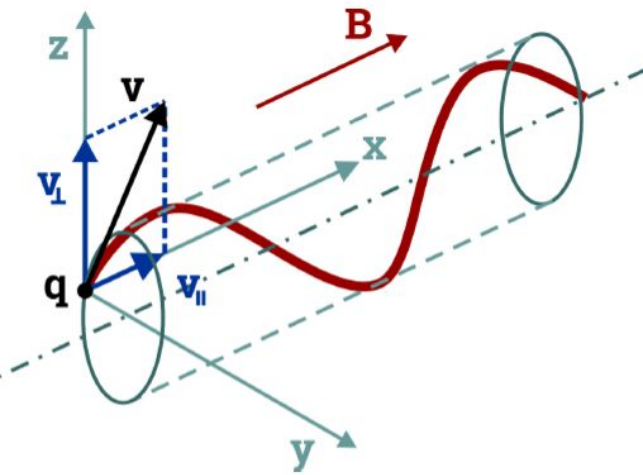
$$F_{\text{л}} = F_{\text{цстр}}$$



$$R = \frac{mv}{qB}$$

При этом измен-ся направление скорости, а величина $u = \text{const.}$

3. Если v под углом α к B



$$v_x = v \cos \alpha$$
$$v_{\perp} = v \sin \alpha$$

Суперпозиция
двух
движений

Частица движ-ся по спирали с
шагом h и рад. R

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB}$$

Радиус спирали

$$h = \frac{2\pi m v_x}{qB}$$

Шаг спирали

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

T -период враще-ния
частицы

Сила Лоренца F_L всегда \perp u заряда

Действуя на заряж. частицу, F_L не может изменить её кинетич. энергию

$$A = F_L \ell \cos \alpha = F_L \ell \cos 90^\circ = 0$$

Работа силы Лоренца всегда равна нулю.

if на q одновр. действуют эл. и магн. силы:

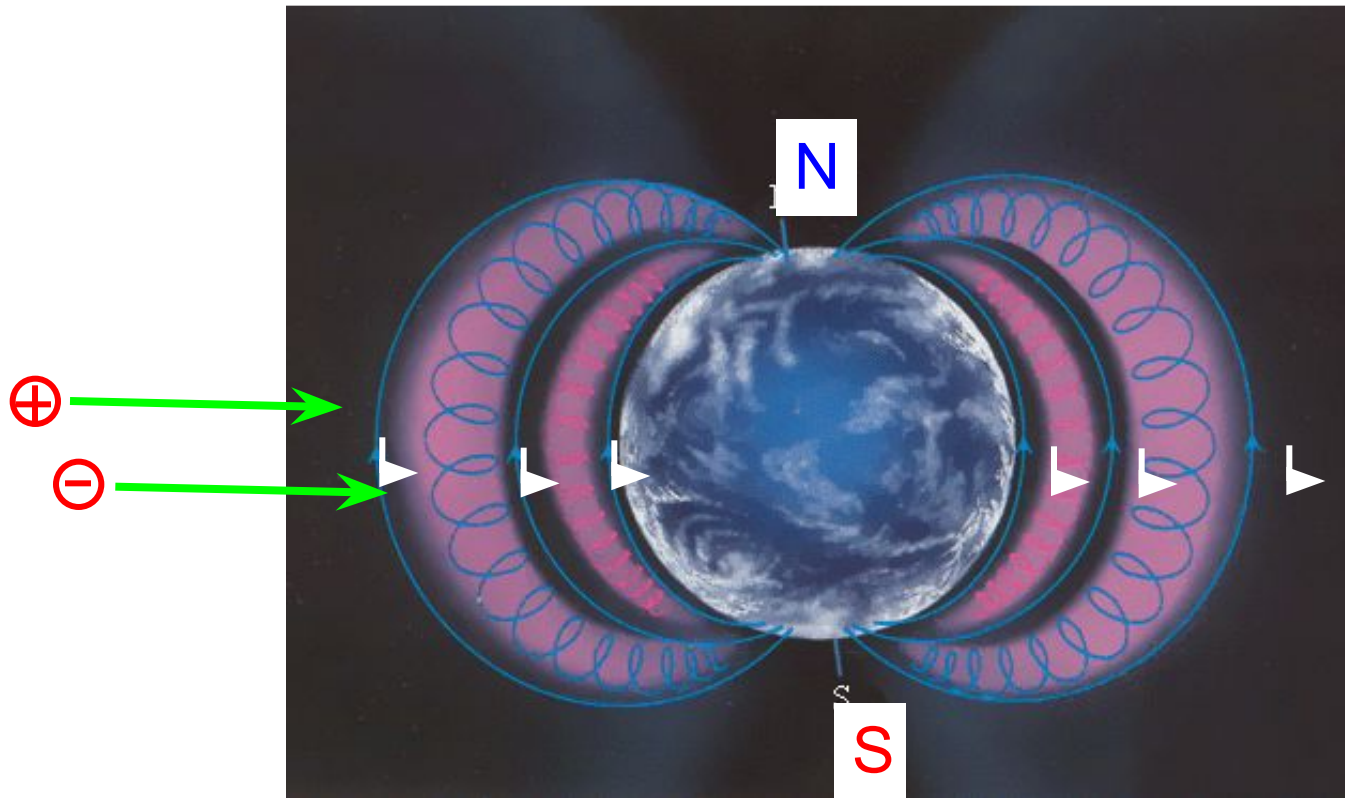
$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}]$$

Формула Лоренца

Сила Кулона F_K ускоряет q , изменяет их энергию, действ. на неподв. и движ-ся q .

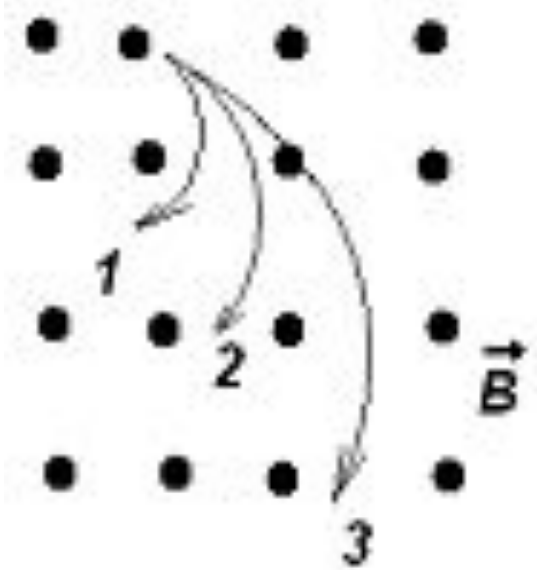
F_L действует только на движ-ся q , изменяя направл. их движения.

Радиационные пояса Земли



Быстрые заряж. частицы от Солнца (электроны и протоны) попадают в магн. ловушки радиационных поясов, защищая Землю от радиации. Частицы покидают пояса в полярных областях. Попадая в верхние слои атмосферы, они вызывают полярные сияния.

Тест 3. Однозарядные ионы, имеющие **одинаковые скорости**, влетают в однородное магнитное поле. Их траектории приведены на рисунке:



Наименьшую массу имеет ион, движущийся по траектории ...

1, 2, 3

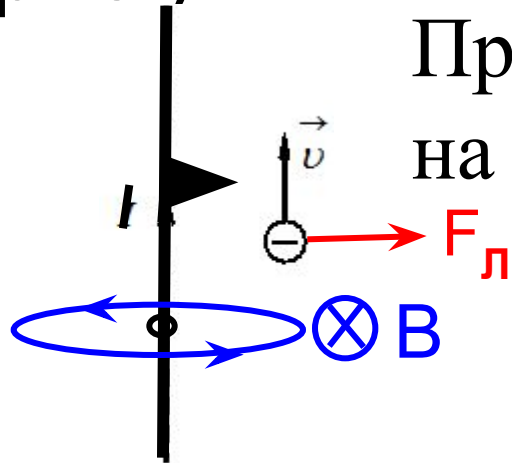
$$F_{\text{л}} = F_{\text{цстр}} \Rightarrow qvB = \frac{mv^2}{R};$$

$$v = \text{const.}$$

Наим. **m**. соответ.наим. **R**

$$R = \frac{mv}{qB}$$

Тест 3. Электрон влетает в магн. поле, создаваемое длинным пр-ком с током в направлении, параллельном пр-ку (см. рис.).



При этом сила Лоренца, действующая на электрон, ...

1. Лежит в плоскости чертежа и направлена влево,
2. Перпендикулярна плоскости чертежа и направлена «к нам»,
3. Перпендикулярна плоскости чертежа и направлена «от нас»,
- ④ 4. Лежит в плоскости чертежа и направлена направо