

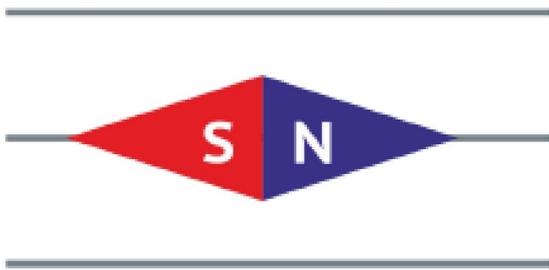
# Лекция 7

## Магнитное поле

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

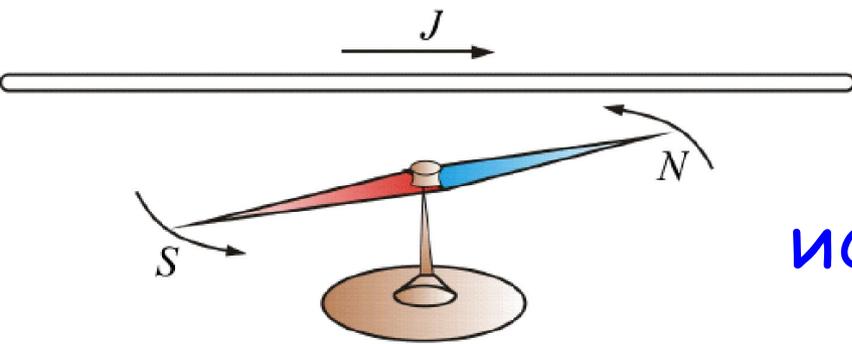
Наличие МП обнару-ся по силовому действию на постоянные магниты или на внесенные в него проводники с током

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  $\alpha$  и стремящиеся повернуть ее вдоль указанного направления



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

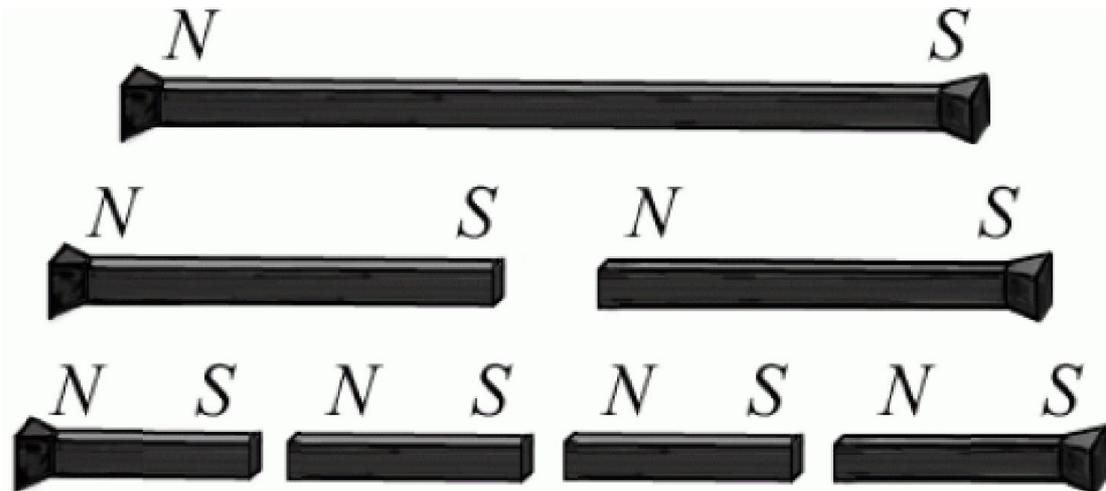
Подобно электрическому диполю, постоянный магнит в однородном поле стремится повернуться по полю, но не перемещаться в нем.

# 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)

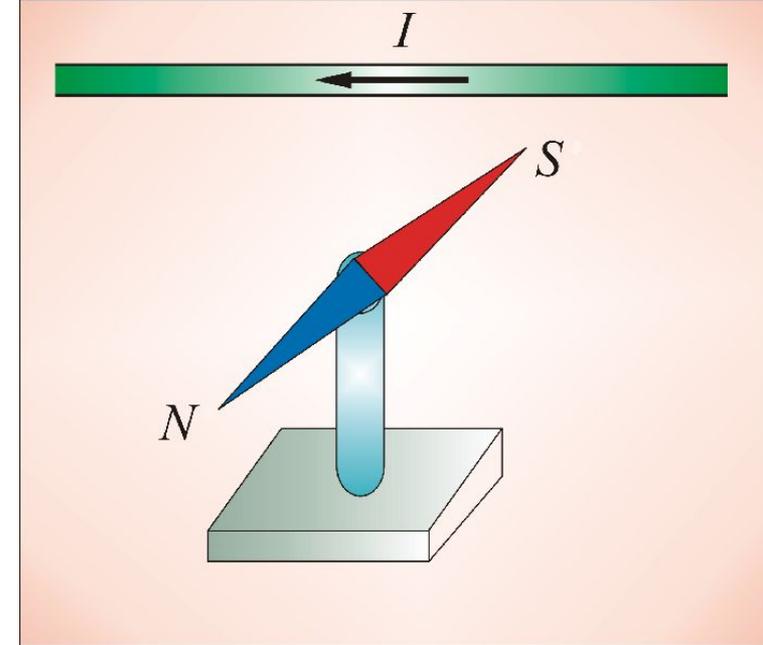
Провод с током  
действует на магнитную  
стрелку

Вокруг всякого проводника с  
током есть МП

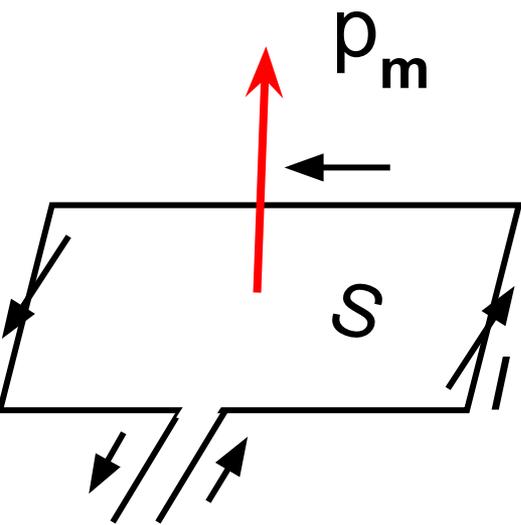
*Ток - это направленное движение зарядов*

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



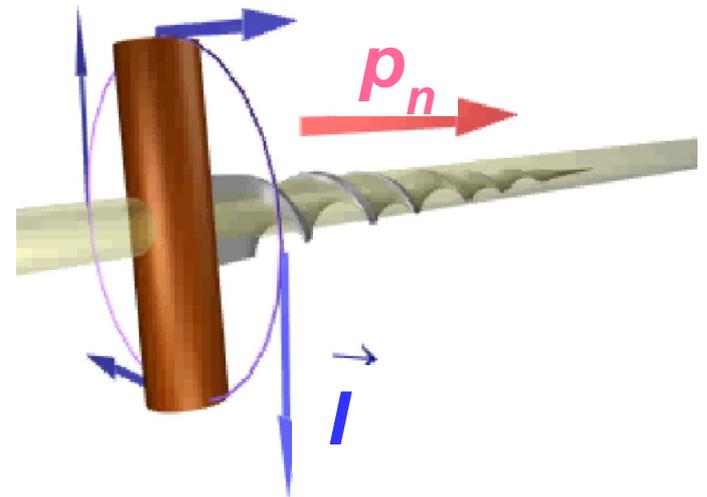
Рамка с током обладает **МАГН.**  
**МОМЕНТОМ:**

$$p_m = ISn$$

$$[p_m] = \text{А} \cdot \text{М}^2$$

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

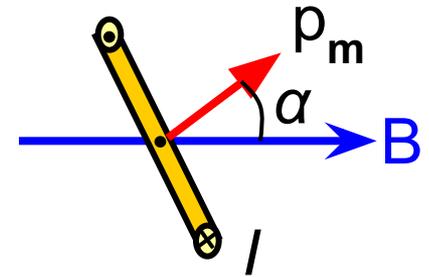
Направл. вектора  $p_m$  опред.  
правилом правого винта,  
вращая винт по направл.  
тока в рамке



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  $B$ .

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

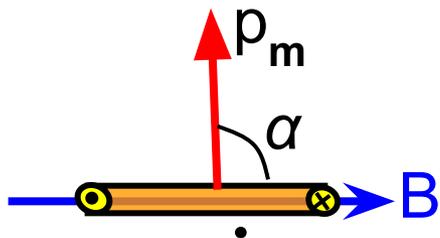


$M \rightarrow \max$ , если  $\alpha = 90^\circ$ .

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

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

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



**Условие  $M_{\max}$**

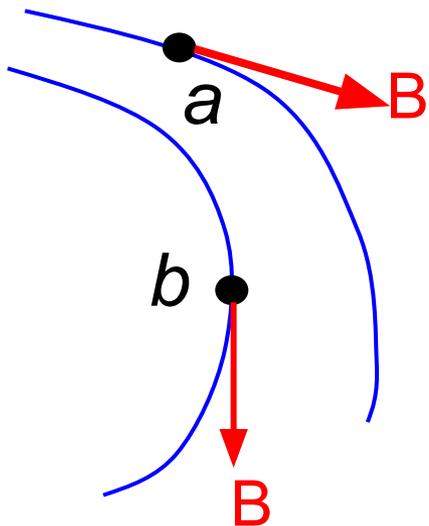
$$[B] = [Tл] \quad (\text{Тесла})$$

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

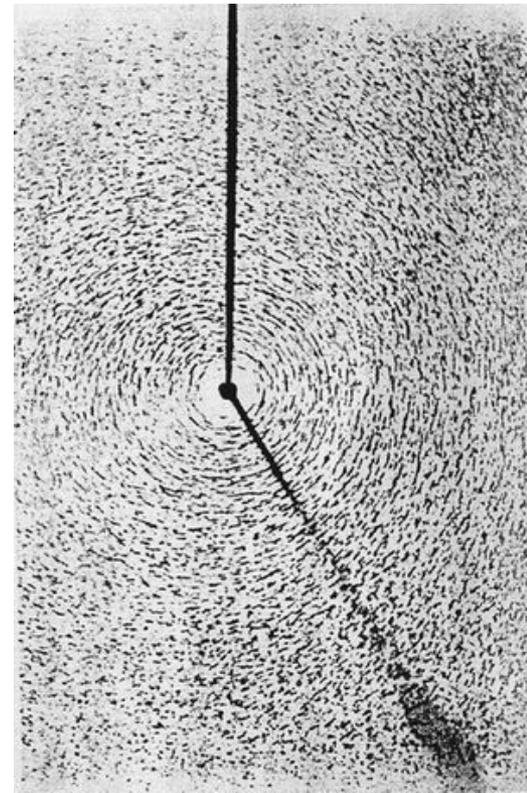
МП представляют силовыми линиями- **ЛИНИИ МАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ**

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

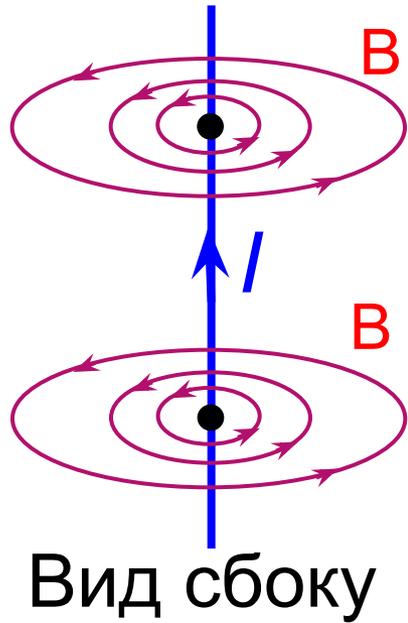
Густота сил. линий опред. величину вектора  $B$



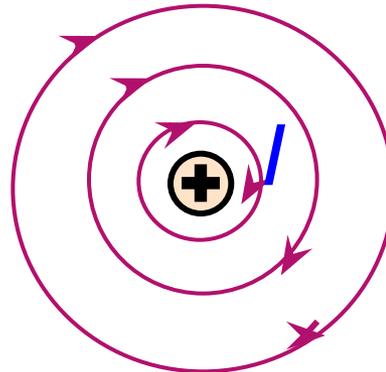
Визуализация - железные опилки- каждая как стрелка компаса



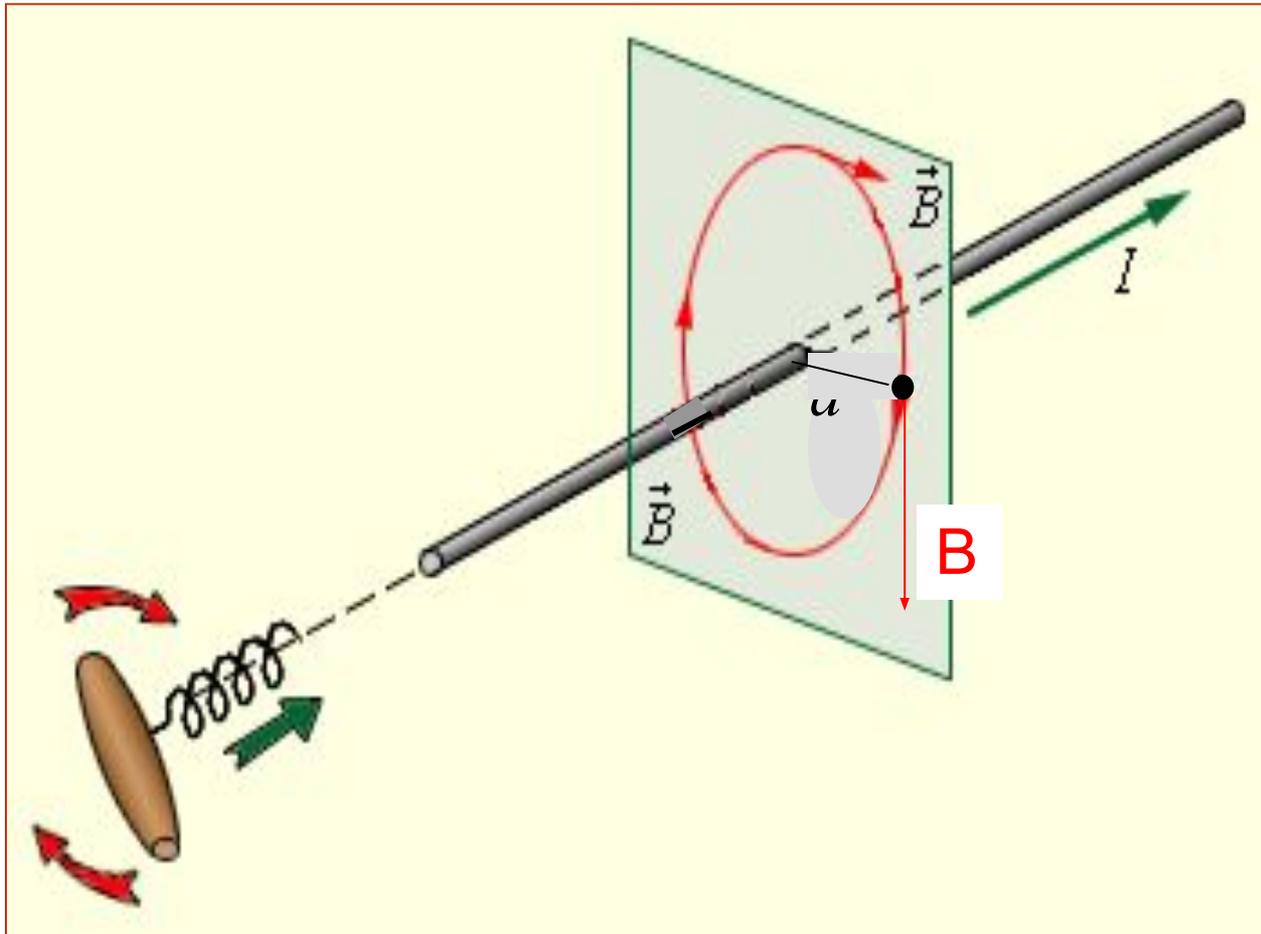
# Опыт: силовые линии поля $B$ от прямого провода с током



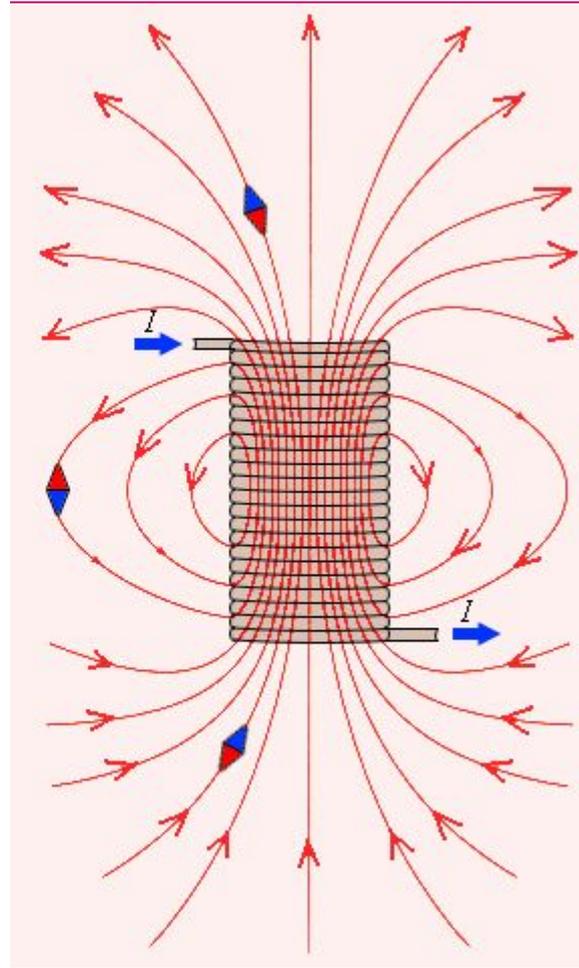
Силовые линии поля  $B$  замкнуты. Их направление по отношению к току определяется правилом правого винта.



# Направл. вектора $B$ от пров-ка с током



# Силловые линии поля В



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  $p_{ма}$**

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

Попадая в МП макротоков,  $p_{ма}$  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]

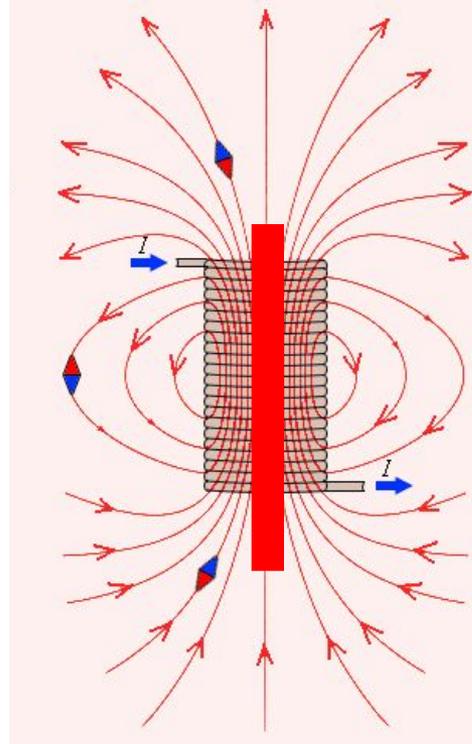
$$\vec{B} = \mu_0 \mu \vec{H}$$

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

$\mu$  - магн. проницаемость среды

$\mu$  показ-т, во сколько раз МП макро-и  
микротоков среды больше поля  
макротоков

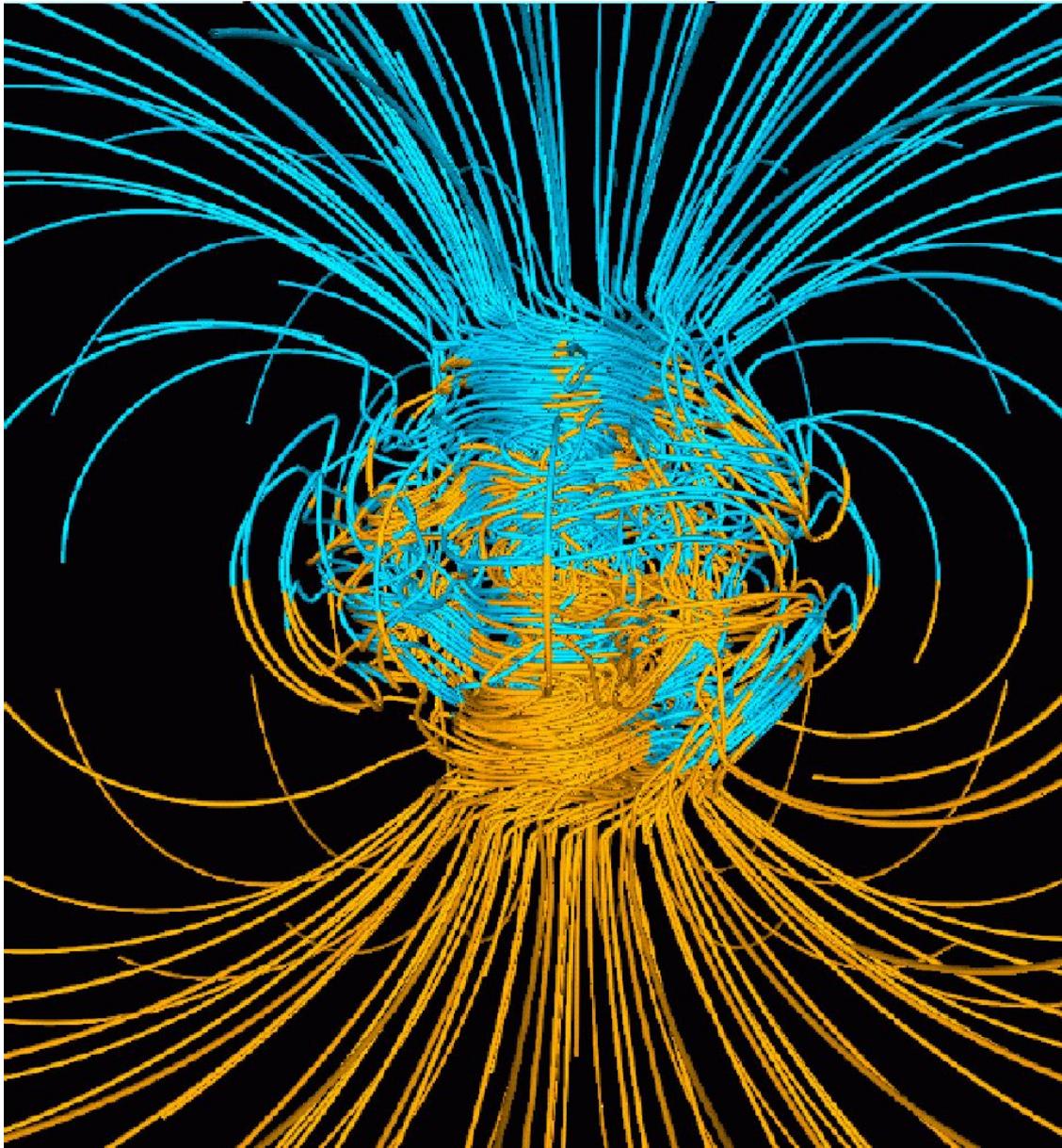
Для воздуха  $\mu \approx 1$ , для железа  $\mu = 10^2 - 10^5$ .



$$\mu = 100$$

**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

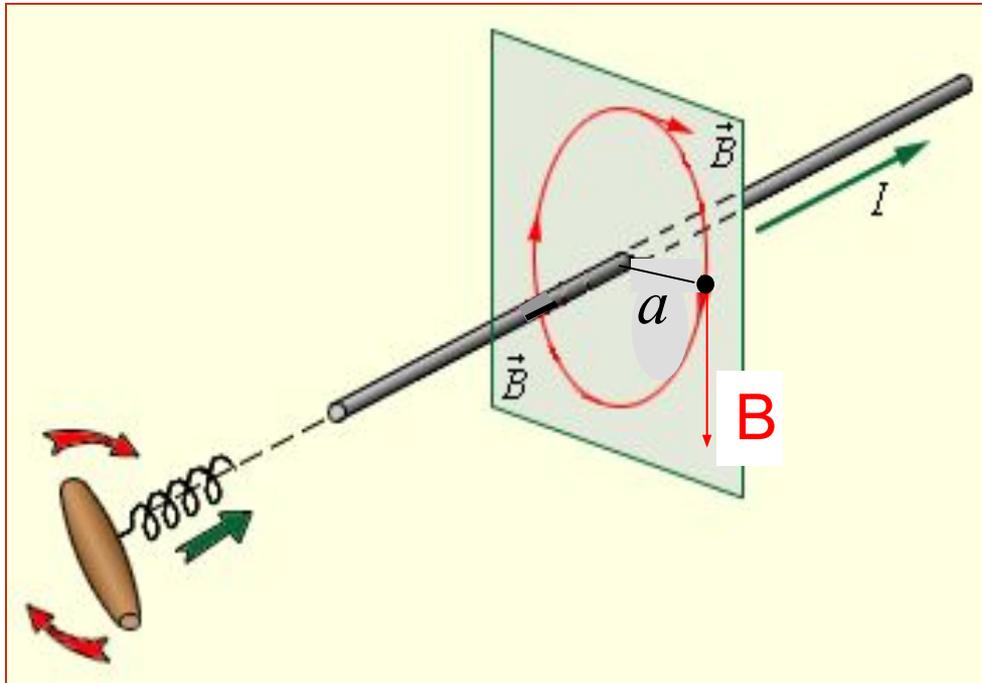
$$B = \frac{M_{\max}}{P_m}$$

**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

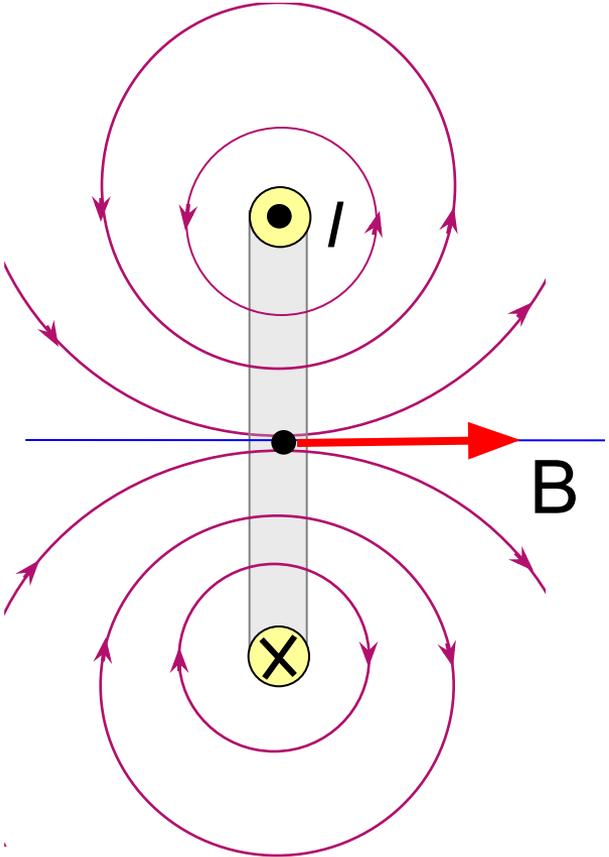


$$H = \frac{I}{2\pi a}$$

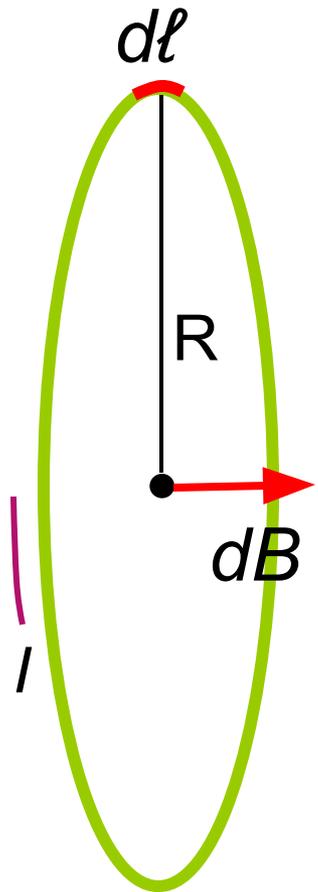
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$$

Индукция МТТ на расст.  $a$   
от  $\infty$  длин-ного пр-ка с  
ТОКОМ.

# Магн. поле в центре кругового тока



Сечение витка с током

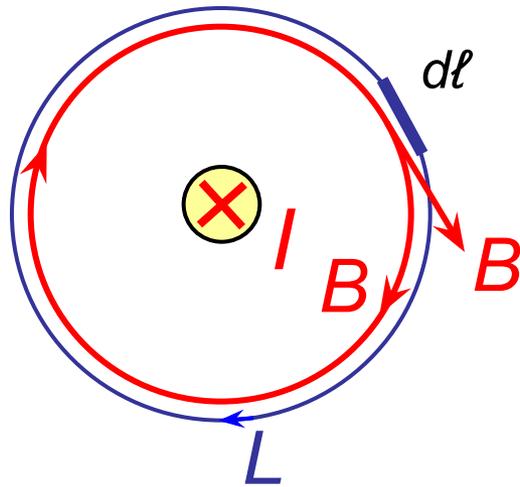


Поле  $B$  в центре витка с током

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

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

# Вихр. поле $B$



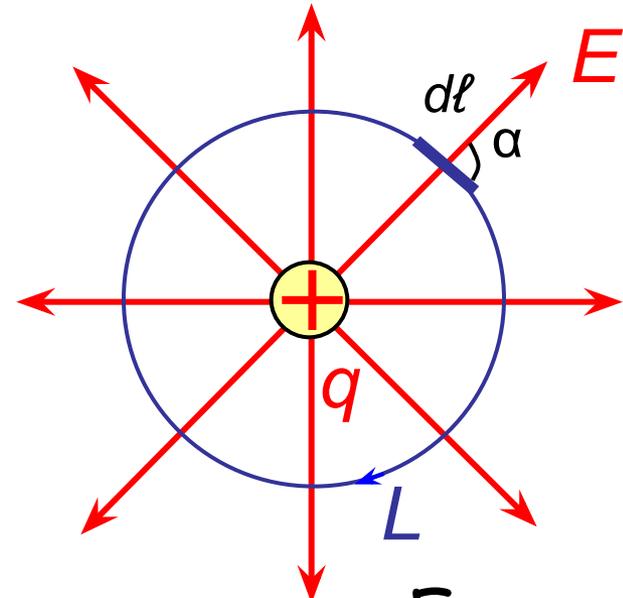
Сил. линии поля  $B$   
замкнуты.

$$B \parallel d\ell \Rightarrow \alpha = 0$$

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

$\Phi$  - поток вектора  $B = 0$

# Потенц. поле $E$



Сил. линии поля  $E$  начин-ся  
и заканч-ся на  $q$  или в  $\infty$

$$E \perp d\ell \Rightarrow \alpha = 90^\circ$$

$\Phi$  - поток вектора  $E \neq 0$

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

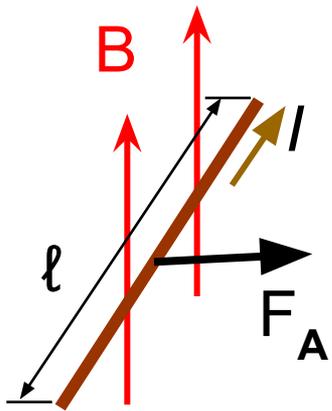
Ампера  $F_A$ :

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

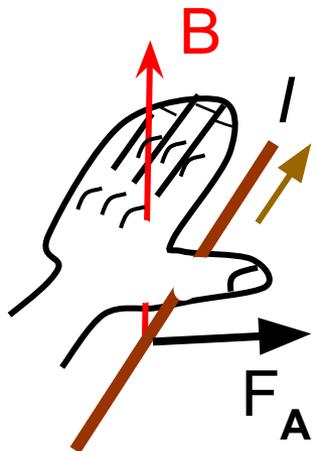
$I$  - ток,  $\ell$  - длина пров-ка,  $B$  - инд. магн. поля

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

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



Направл-е  $F_A$  опред-ся правилом левой руки:

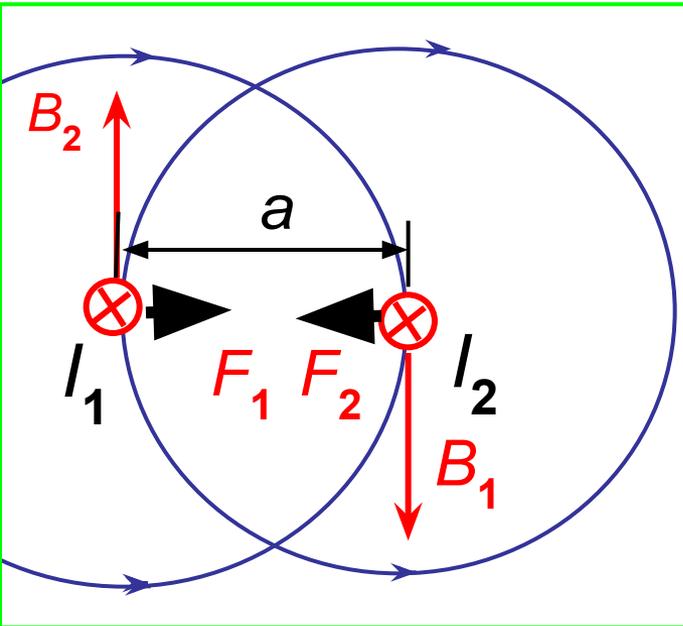


Вектор  $B$  входит в ладонь лев. руки, пальцы - вдоль  $\ell$  с током, Б. палец -  $F_A$

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

# Взаимодействие парал-ых токов

На расст.  $a$  два  $// \infty$  пр-ка с токами одного направ.



На пр-к с током  $I_2$ , наход-ся в поле  $B_1$  от  $I_1$ , дейст-ет  $F_A$

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

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

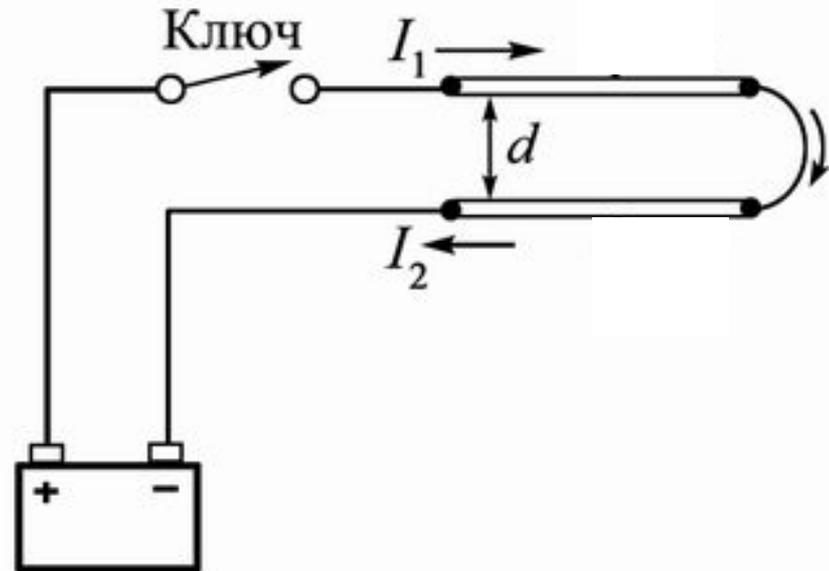
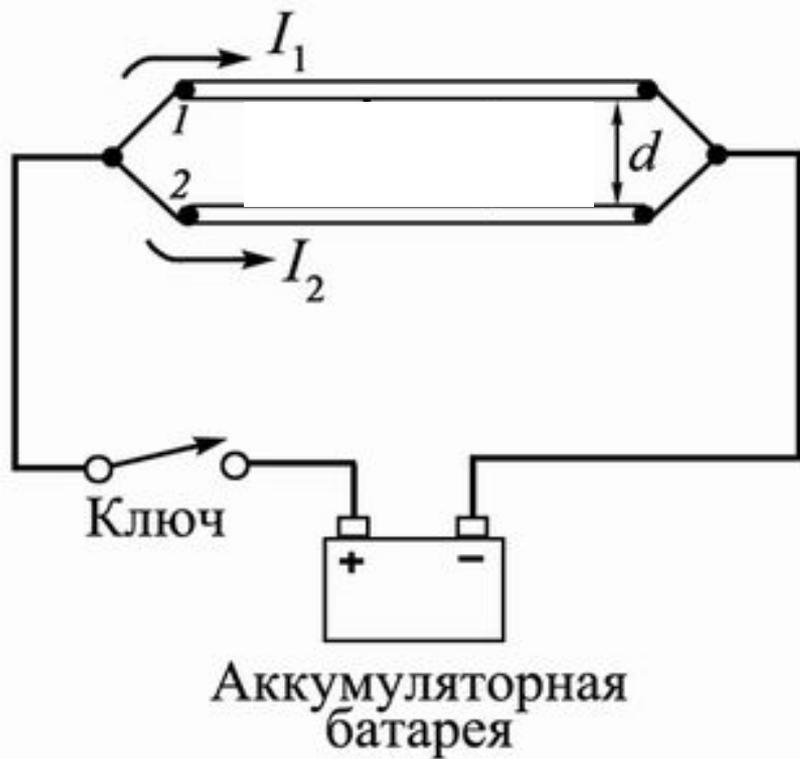
$F_A$  на ед. длины пров-ка.

$F_1$ -?

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.

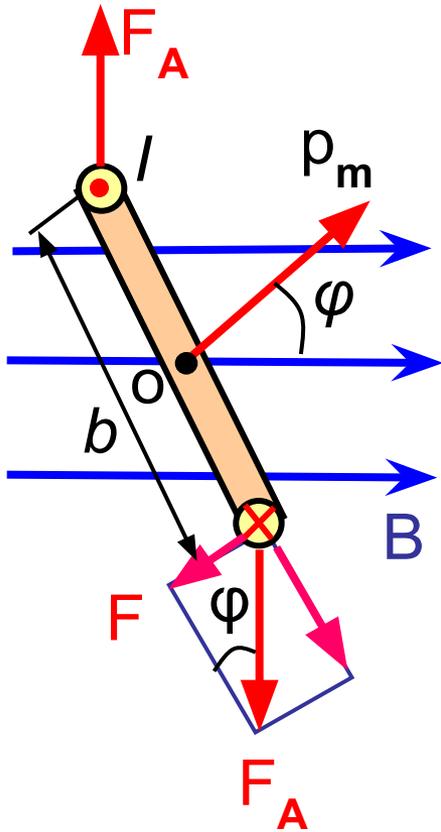


По величине силы отталкивания или притяжения, действующей на единицу длины проводника, можно определить силу тока, идущего по проводникам.

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?



$$F_A = I \vec{B} \sin \alpha \quad \alpha = 90^\circ \quad F_A = I \vec{B}$$

Пусть  $p_m$  нах-ся под угл.  $\varphi$  к  $B$ .

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

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

(Сечение рамки  
вид сверху)

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

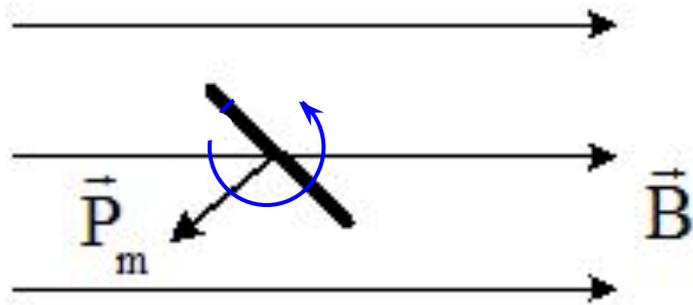
В поле  $B$  рамка поворачив-ся так,  
что вектор  $p_m$  становится вдоль  
вектора  $B$ .

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

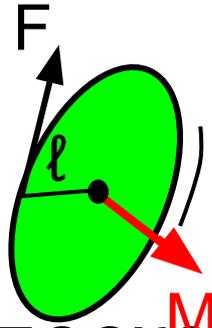
# Тест 3. Рамка с током с магн. дипольным

## МОМЕНТОМ

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



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

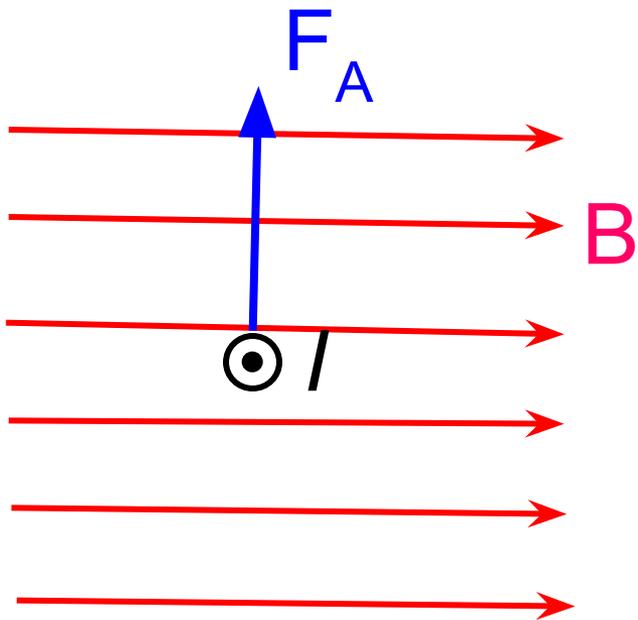


$$\vec{M} = [\vec{\mu} \times \vec{F}].$$

M по правилу

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

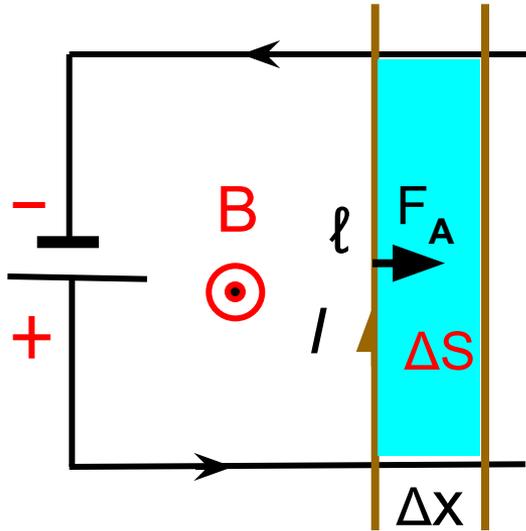
**Тест 2.** Прямолинейный пров-к с током помещен в однородное магн. поле (см. рис.). Сила Ампера, действующая на пр-ник, направлена:



- 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

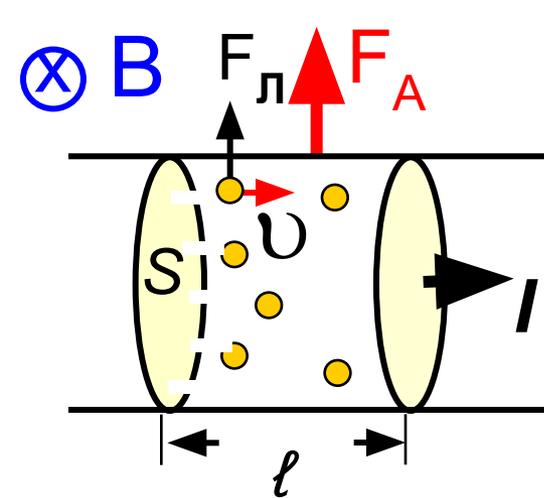
На пр-к с током в поле  $B$  действ. сила  $F_A$

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

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

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

$$\alpha = 90^\circ$$



На один заряд

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

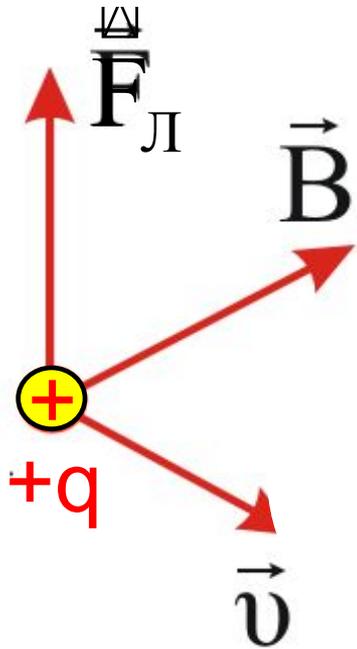
$$F_L = qvB \sin \alpha$$

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  $B$ )

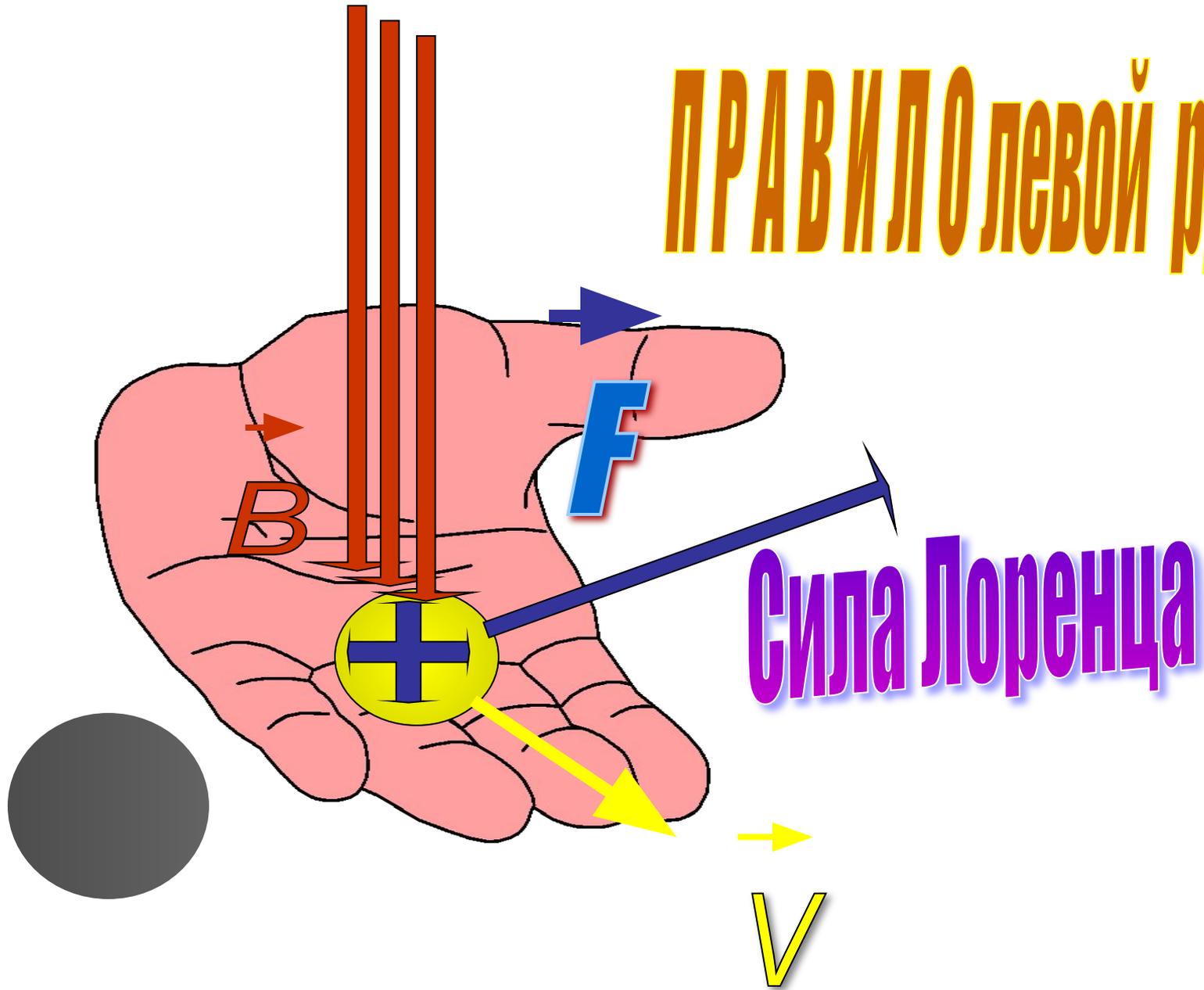
$\vec{F}_L \perp$  к плоскости, в которой лежат векторы  $\vec{u}$  и  $\vec{v}$   
и для  $+q$  опред-ся **правилом левой руки**



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

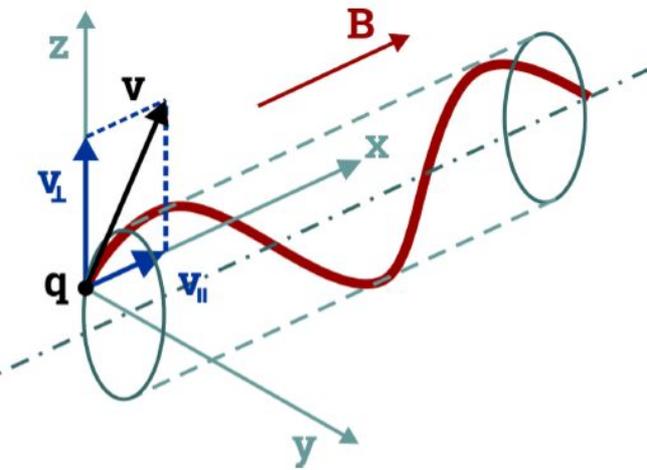
Если заряд отриц. ( $-q$ ), то  $\vec{F}_L$  опред-ют так же правил. левой руки, но направ. берут противоположное.

# ПРАВИЛО левой руки





### 3. Если $v$ под углом $\alpha$ 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

$$h = \frac{2\pi mv_x}{qB}$$

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:

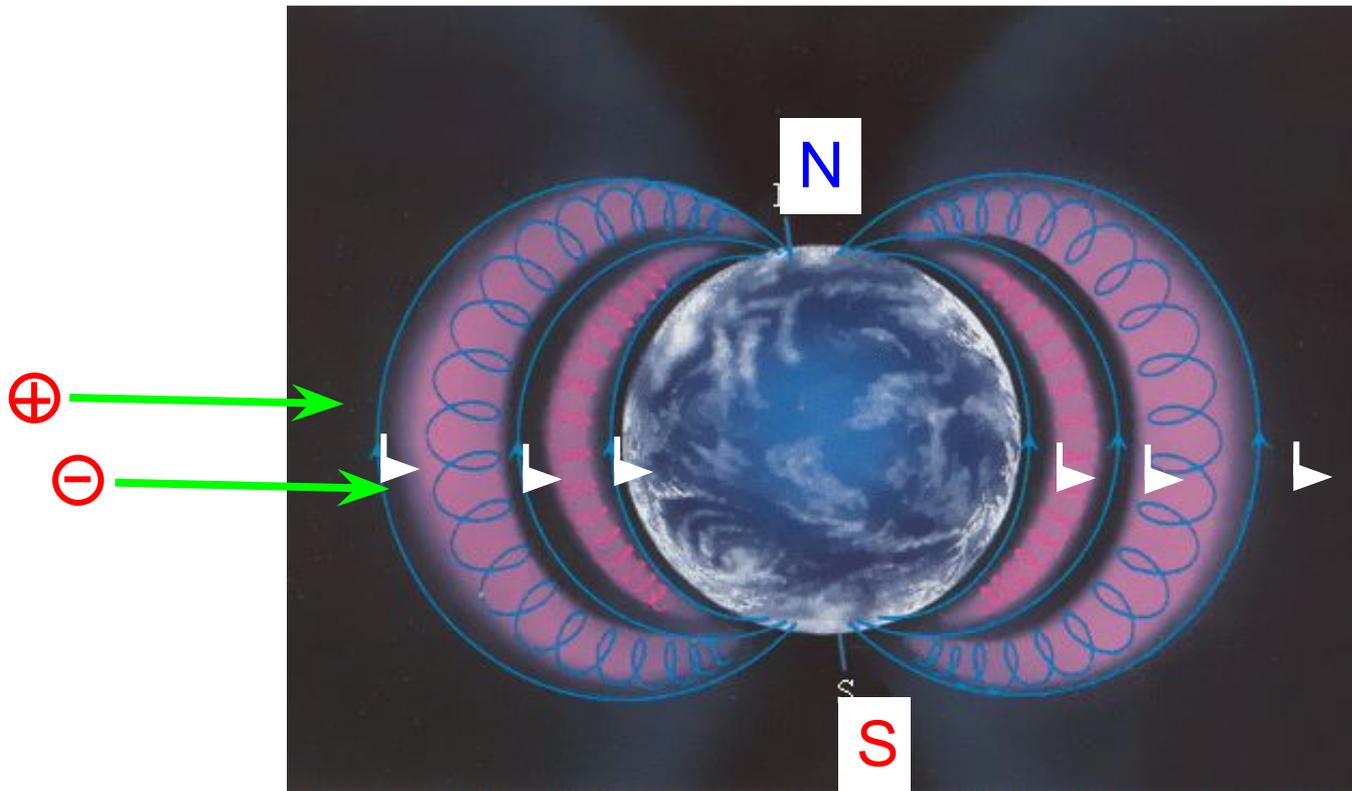
$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}]$$

Формула Лоренца

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

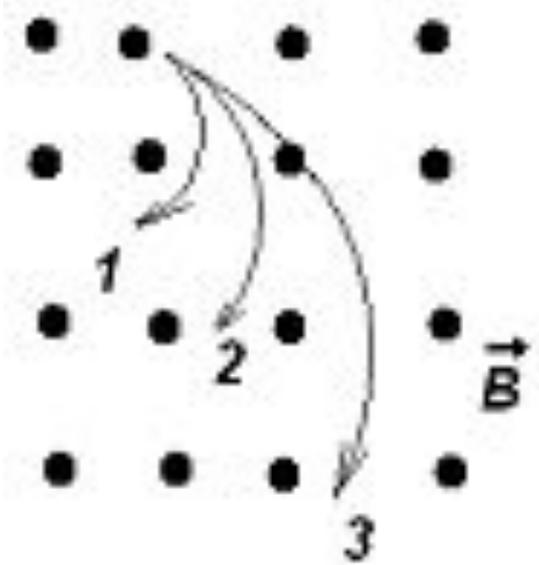
$F_L$  действует только на движ-ся  $q$ , изменяя направл. их движения.

# 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

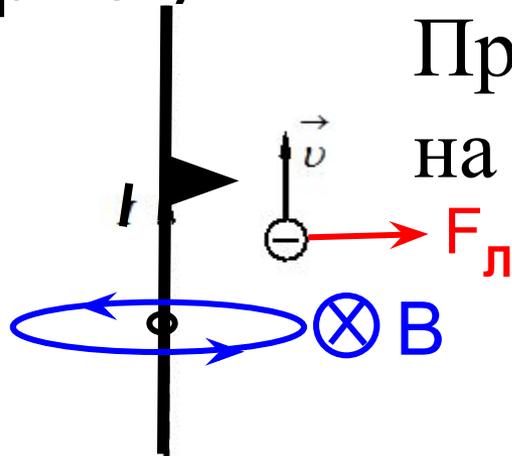
$$F_{\text{л}} = F_{\text{цстр}} \Rightarrow qvB = \frac{mv^2}{R};$$

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

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. Лежит в плоскости чертежа и направлена направо