

**ЭЛЕКТРИЧЕСТВО И**

---

**МАГНЕТИЗМ**

**МАГНИТНОЕ ПОЛЕ**

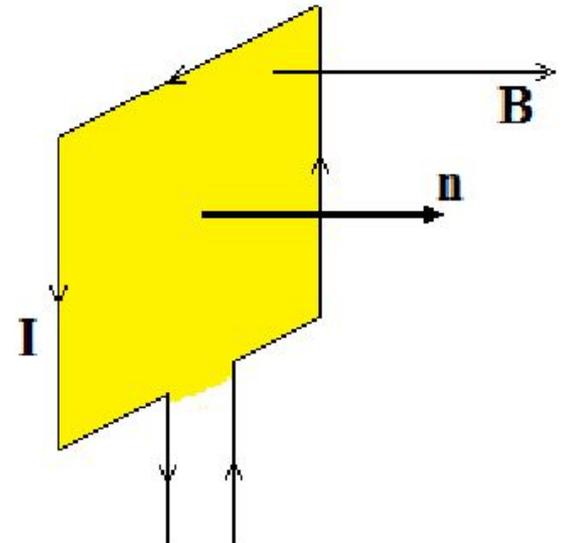
1. Магнитное поле и его свойства
2. Магнитная индукция. Магнитный момент рамки с током
3. Магнитное поле тока. Закон Био—Савара—Лапласа
4. Применение закона Био—Савара—Лапласа к расчёту простейших магнитных полей
5. Действие магнитного поля на ток. Закон Ампера. Взаимодействие параллельных токов
6. Действие магнитного поля на движущийся заряд. Сила Лоренца. Циклотрон. Масс-спектрометр

## Магнитное поле и его свойства

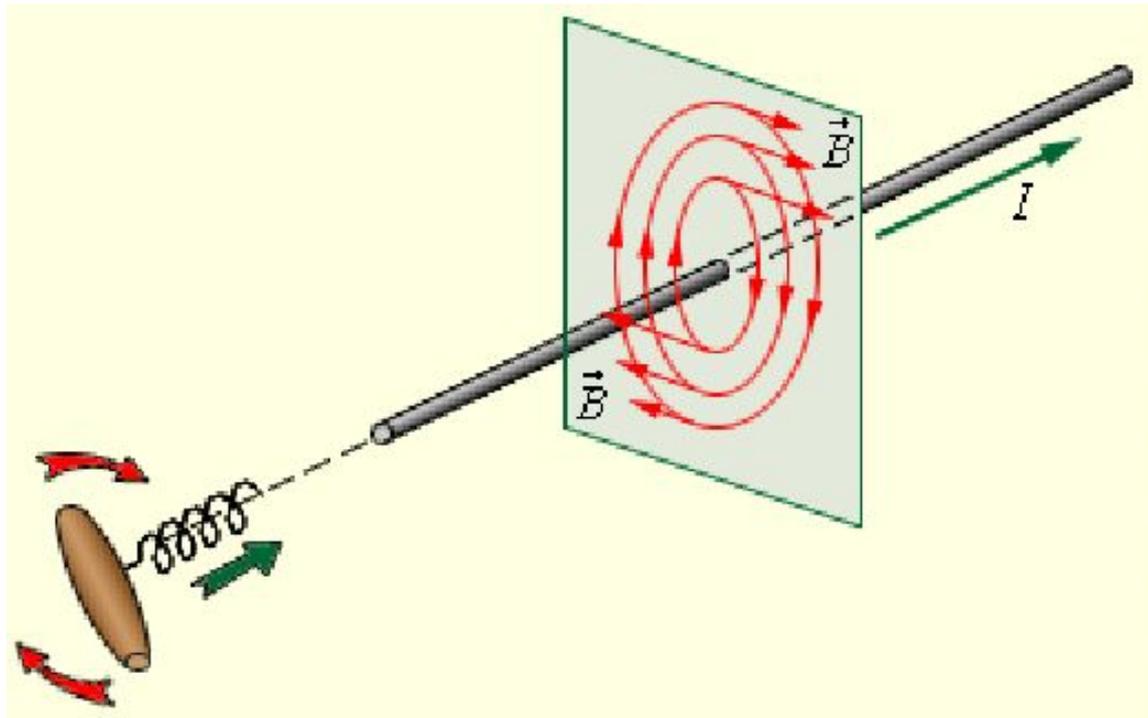
- Источниками магнитного поля являются движущиеся электрические заряды (токи) и постоянные магниты, в том числе и Земля.
- Магнитное поле является вихревым (силовые линии магнитного поля замкнуты).
- Магнитное поле оказывает силовое действие только на движущиеся заряды (токи).
- Изолированных магнитных зарядов не существует.

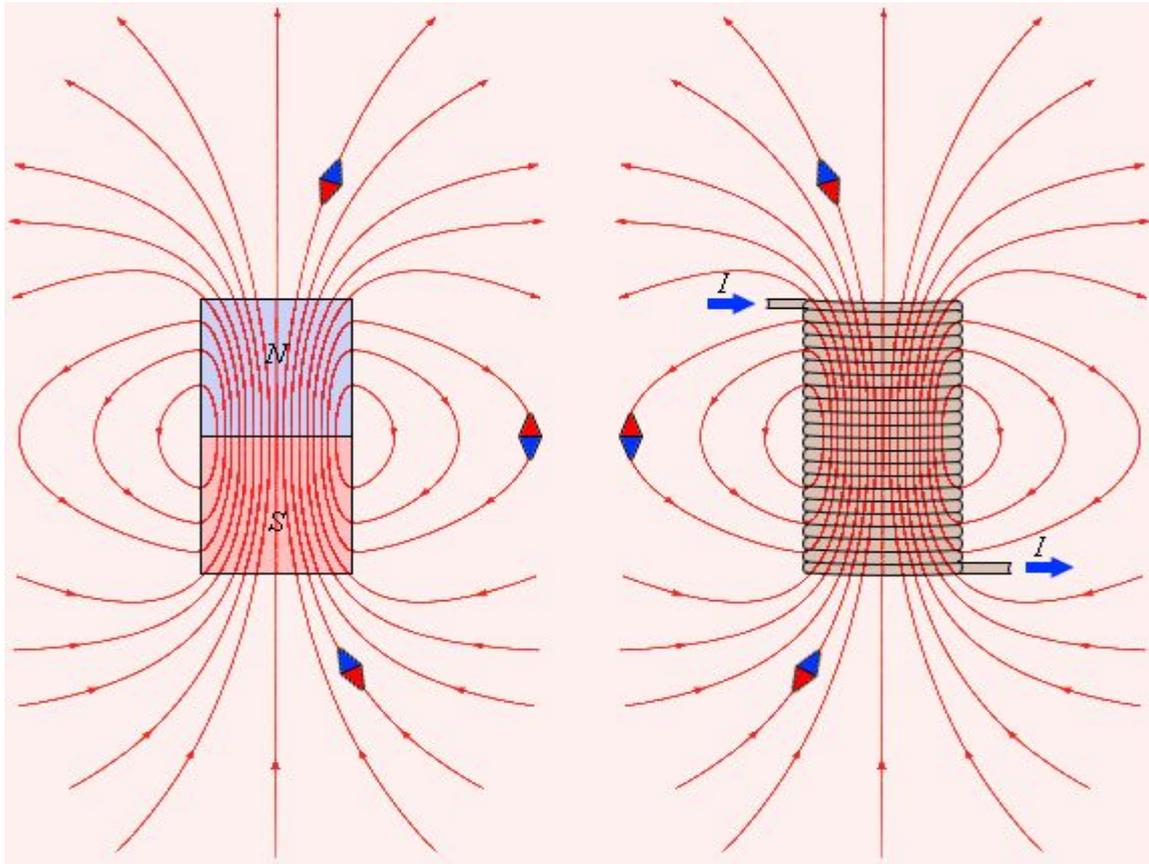
# Магнитная индукция. Магнитный момент рамки с током

Силовая характеристика магнитного поля — **вектор магнитной индукции**  $\vec{B}$ .  
**Направление вектора**  $\vec{B}$  определяется направлением, вдоль которого ориентируется вектор нормали рамки с током, помещённой в данную область магнитного поля или направлением от южного конца (S) к северному концу (N) магнитной стрелки, свободно ориентирующейся в магнитном поле.



Для определения направления вектора  $\vec{B}$  магнитного поля прямолинейного проводника с током применяют правило буравчика: *направление вращения рукоятки буравчика совпадает с направлением вектора  $\vec{B}$ , если при вращении рукоятки буравчик перемещается в направлении тока.*





Численное значение вектора  $\vec{B}$  определим по силовому (вращающему) воздействию магнитного поля на рамку с током.

Пусть  $M_{\max}$  — максимальный вращающий момент сил, действующий на рамку в магнитном поле.

Опыт показывает, что  $M_{\max}$  зависит от силы тока в рамке, её площади и не зависит от её формы.

Поэтому магнитные свойства рамки с током определяет вектор  $\vec{p}_m$  – вектор магнитного момента плоской рамки с током произвольной формы

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}.$$

Если в данную бесконечно малую область (в пределе – в точку) магнитного поля помещать рамки с различными магнитными моментами, то на них будут действовать различные  $M_{\max}$ .

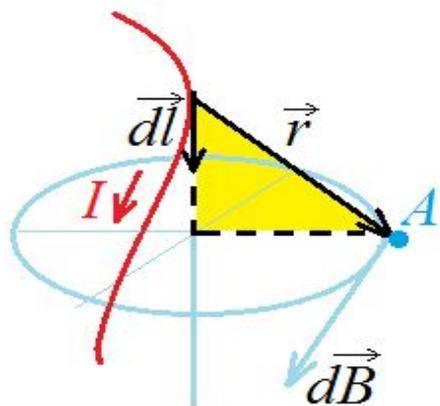
В то же время отношение  $\frac{M_{\max}}{p_m}$  будет для всех рамок одно и то же.

Это отношение и будет определять численное значение вектора  $\vec{B}$  в данной точке магнитного поля:

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

# Магнитное поле тока. Закон Био–Савара–Лапласа

Закон Био–Савара–Лапласа позволяет рассчитывать магнитные поля токов различных конфигураций.



$d\vec{B}$  – индукция магнитного поля в точке А элемента проводника длиной  $dl$ , по которому течет ток  $I$ ;

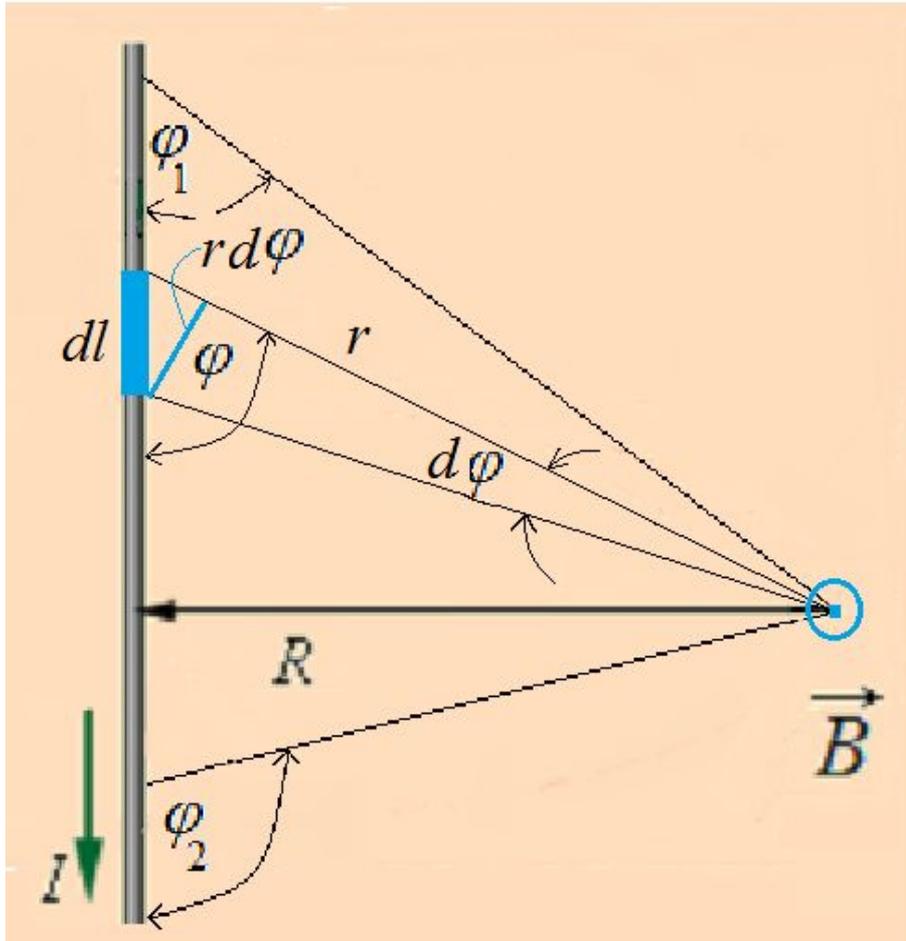
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} I \frac{[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}.$$

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

$\mu$  – магнитная проницаемость среды;  
 $d\vec{l}$  – вектор, по модулю равный длине элемента проводника  $dl$  и совпадающий по направлению с током;  
 $\vec{r}$  – радиус-вектор, проведённый из элемента  $dl$  проводника в точку А поля.

Направление вектора  $d\vec{B}$  перпендикулярно векторам  $d\vec{l}$  и  $\vec{r}$

# Применение закона Био–Савара–Лапласа к расчету магнитных полей.



1. Индукция магнитного поля прямолинейного проводника.

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

$$r = \frac{R}{\sin \varphi}, \quad dl = \frac{r d\varphi}{\sin \varphi} =$$

$$= \frac{r d\varphi}{\sin \varphi} = \frac{R}{\sin \varphi} \frac{d\varphi}{\sin \varphi} = \frac{R d\varphi}{\sin^2 \varphi}.$$

$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R^2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} R d\varphi \sin^2 \varphi \sin \varphi =$$

$$\frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin^3 \varphi d\varphi = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} (\cos \varphi - \frac{1}{3} \cos^3 \varphi) \Big|_{\varphi_1}^{\varphi_2}$$

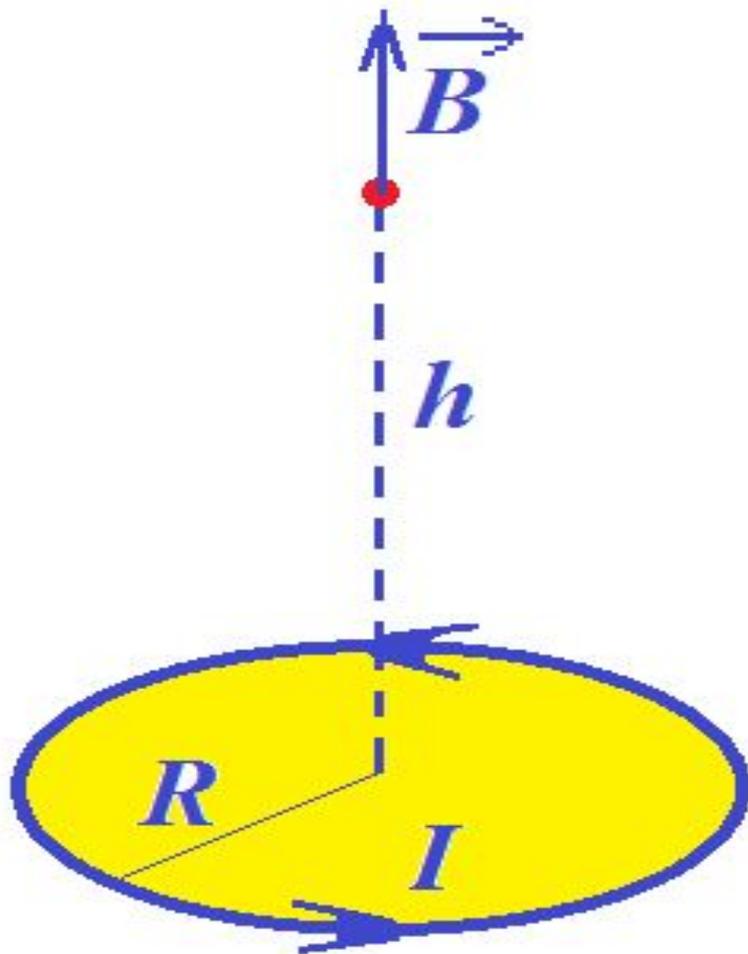
$$B = \frac{\mu_0 \mu I}{4\pi R} (\cos \varphi_1 - \frac{1}{3} \cos^3 \varphi_1 - \cos \varphi_2 + \frac{1}{3} \cos^3 \varphi_2)$$

Для бесконечно длинного прямолинейного проводника:

$$\varphi_1 \rightarrow 0, \quad \varphi_2 \rightarrow \pi.$$

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

## 2. Индукция магнитного поля кругового тока в точке, расположенной на его оси



$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} \frac{IR^2}{(R^2 + h^2)^{\frac{3}{2}}}$$

При  $h = 0$ :

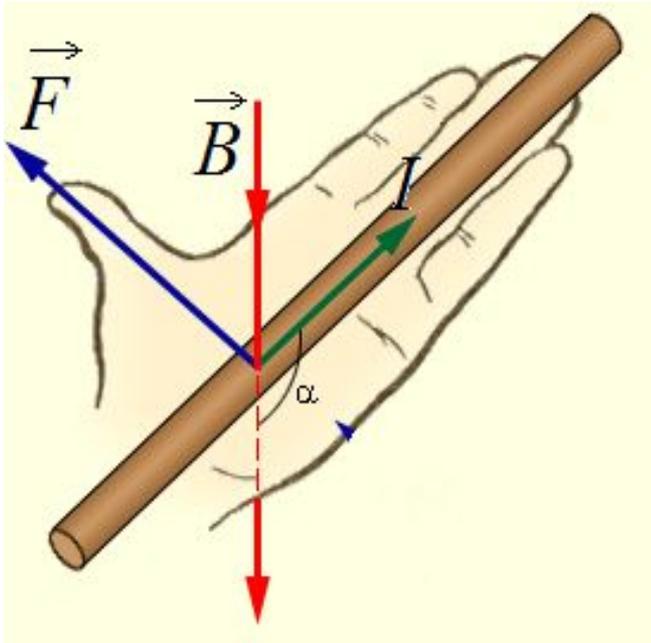
$$B = \frac{\mu\mu_0}{2} \frac{I}{R}$$

# Действие магнитного поля на ток.

## Сила Ампера

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

$$dF = IBdl \sin$$



Из закона Ампера определим единицу магнитной индукции: при  $\vec{B} \perp d\vec{l}$ ;

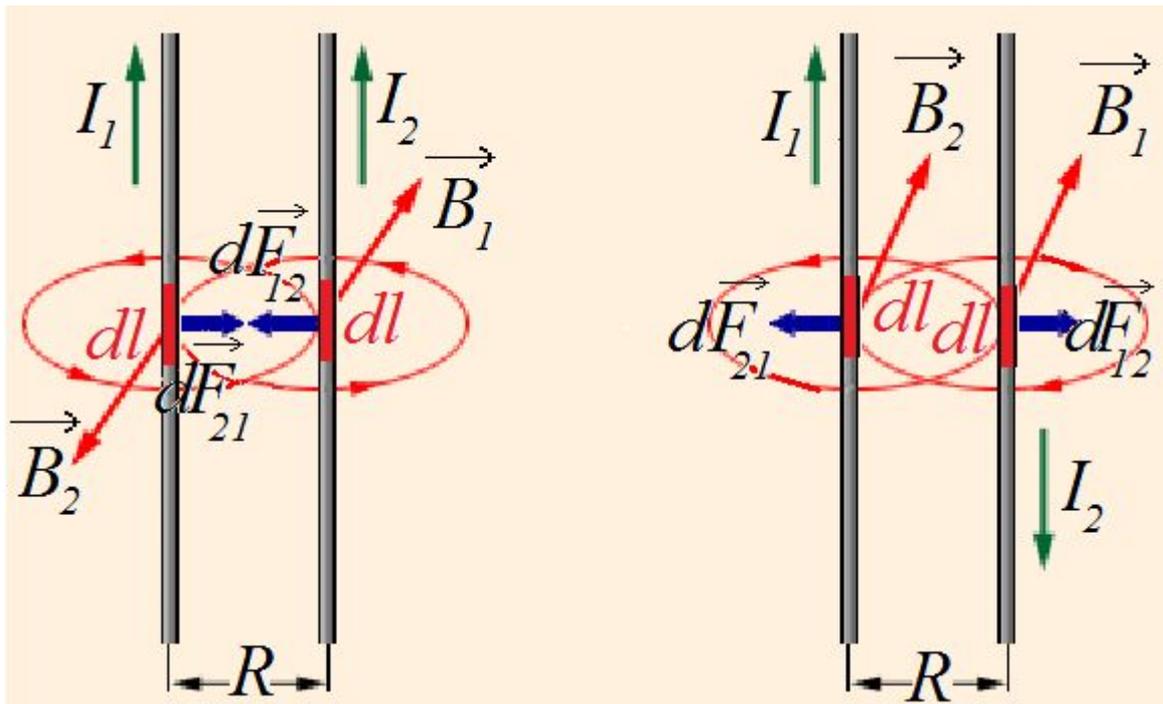
$$dF = I B dl.$$

Откуда:  $B = \frac{1}{I dl} dF$ . Единица магнитной индукции **тесла** (Тл).

Правило левой руки

$$\text{Тл} \equiv \frac{\text{Н}}{\text{А} \cdot \text{м}}$$

# Взаимодействие параллельных токов



$$B_1 = \frac{\mu_0 \mu}{\hat{x}} \frac{I_1}{R};$$

$$dF_1 = I_2 B_1 dl;$$

$$dF_1 = \frac{\mu_0 \mu}{\hat{x}} \frac{I_1 I_2}{R} dl;$$

$$B_2 = \frac{\mu_0 \mu}{\hat{x}} \frac{I_2}{R};$$

$$dF_2 = I_1 B_2 dl;$$

$$dF_2 = \frac{\mu_0 \mu}{\hat{x}} \frac{I_1 I_2}{R} dl$$

$$dF_2 = dF_1 = \frac{\mu_0 \mu}{2R} I_1 I_2 dl.$$

Два параллельных тока одинакового направления притягиваются друг к другу на единицу длины с силой:

$$F = \frac{\mu_0 \mu}{2R} I_1 I_2.$$

# Действие магнитного поля на движущийся заряд.

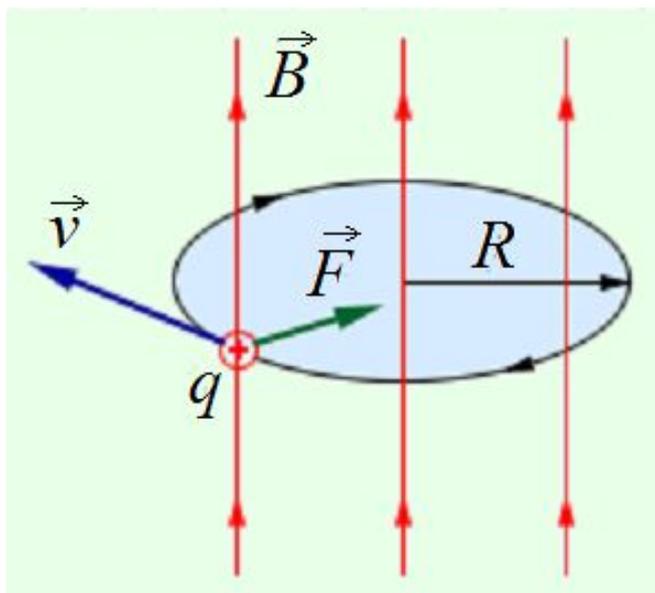
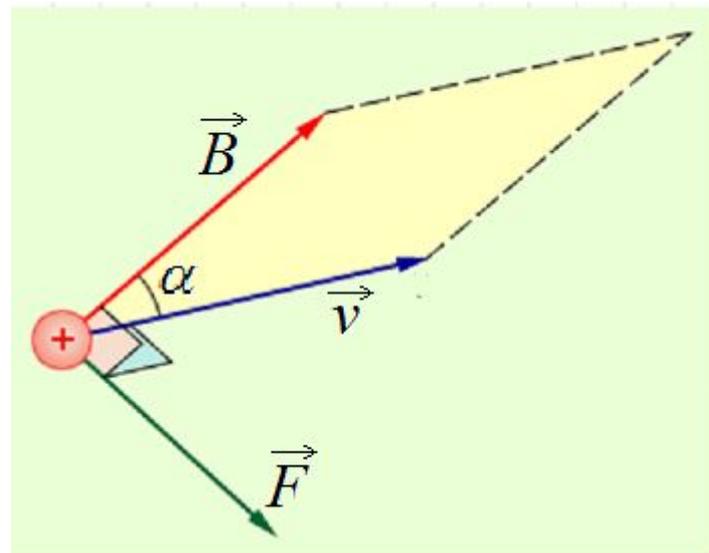
## Сила Лоренца

Сила, действующая на электрический заряд  $q$ , движущийся в магнитном поле индукцией  $B$  со скоростью  $v$  называется **силой Лоренца**:

$$\vec{F} = q [\vec{v} \times \vec{B}] \text{ р.} \quad F = qvB \sin$$

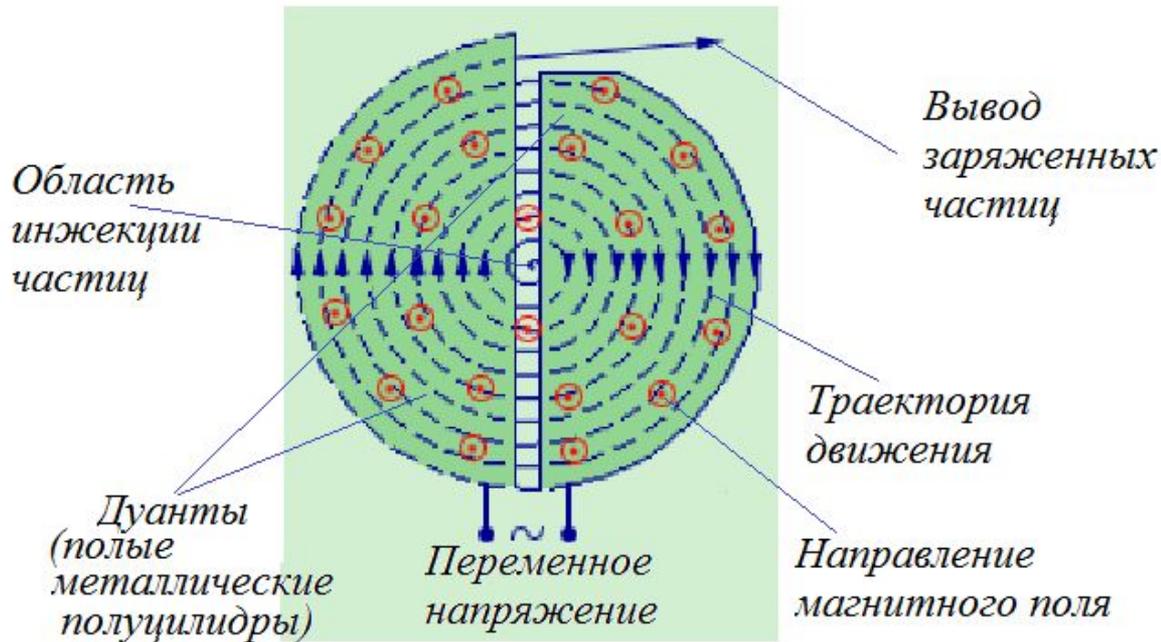
Направление силы Лоренца, действующей на положительный заряд, определяется правилом левой руки (аналогично силе Ампера). Она направлена перпендикулярно плоскости, в которой лежат вектора  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ .

Модуль силы Лоренца равен площади параллелограмма, построенного на векторах  $\vec{B}$  и  $\vec{v}$ , помноженной на  $q$ .



При движении заряженных частиц в магнитном поле **сила Лоренца** **работы не совершает**.

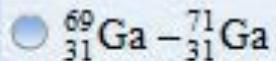
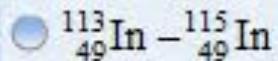
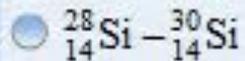
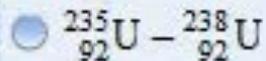
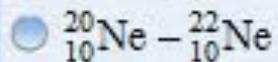
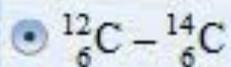
Если  $\vec{v} \perp \vec{B}$ , то частица будет двигаться по окружности радиуса  $R = \frac{mv}{qB}$  с периодом обращения  $T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$  и угловой скоростью  $\omega = \frac{qB}{m}$ . (**циклотронной частотой**).



Схема

**циклотрона** — циклического резонансного ускорителя тяжёлых заряженных частиц (протонов, ионов).

### Изотопы



### Параметры системы

$B =$   мТл

$v =$   м/с

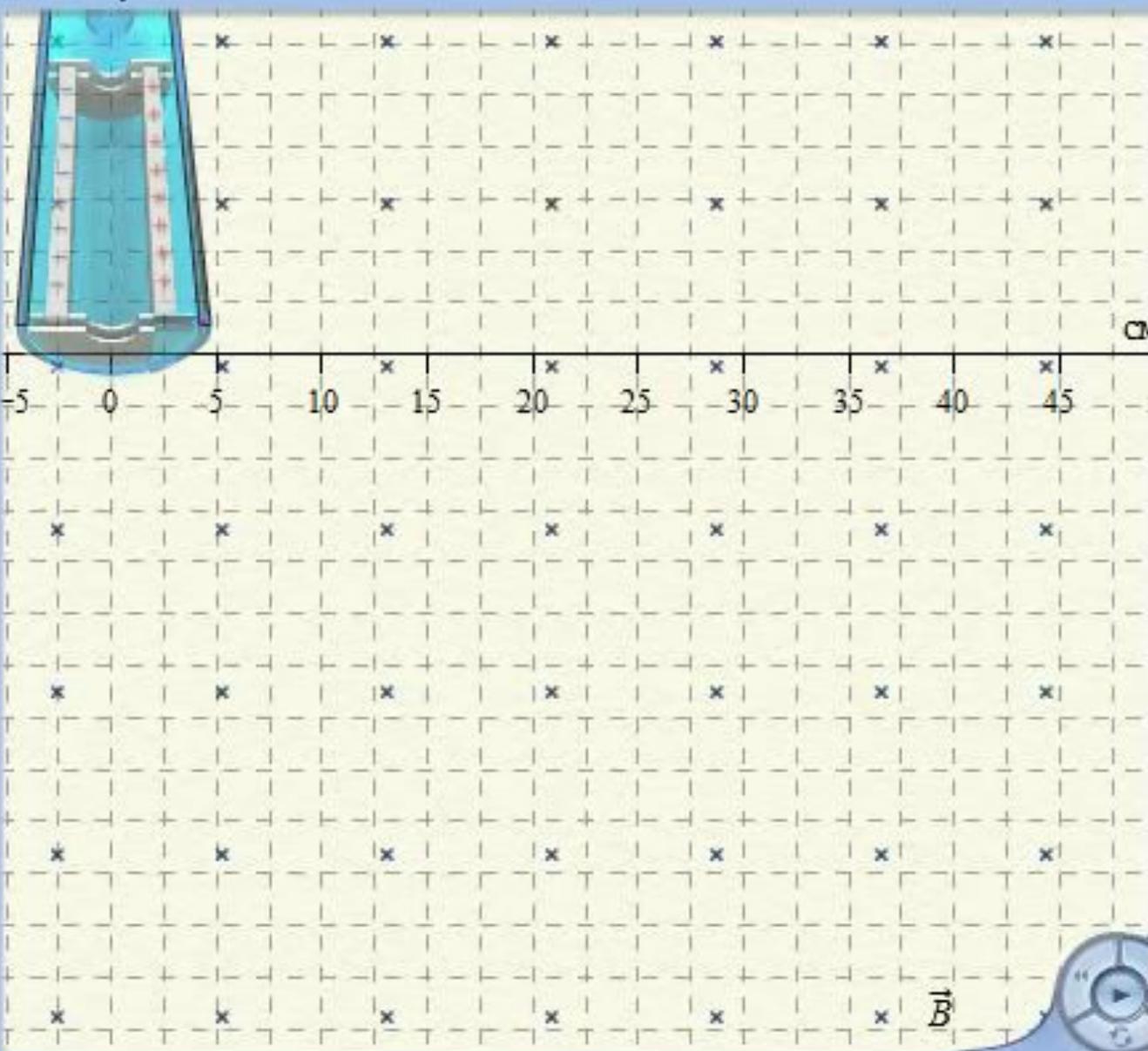
### Показать

Вектор  $\vec{v}$

Вектор  $\vec{F}$

### Радиусы траекторий

### Анимация



**ЛЕКЦИЯ ОКОНЧЕНА**

---