

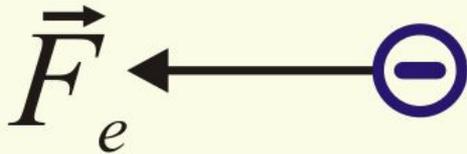
# движение зарядов в электрическом и магнитном поле



часть 1: движение  
в электрическом поле

# §§ Движение заряда в ЭП

$$1) \vec{v} \parallel \vec{E}$$



На частицу действует сила Кулона

$$\vec{F}_e = q\vec{E}$$

При прохождении разности потенциалов

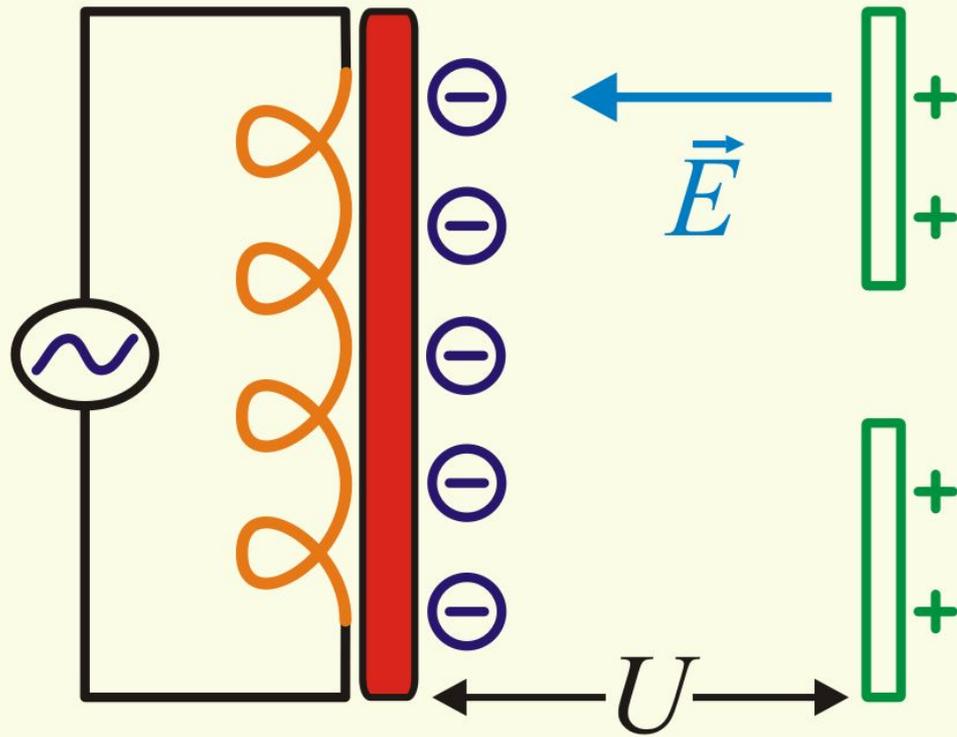
$$\Delta\varphi = U$$

эта сила совершает работу, изменяя кинетическую энергию частицы

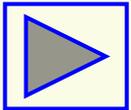
$$\Delta E_k = A = qU$$

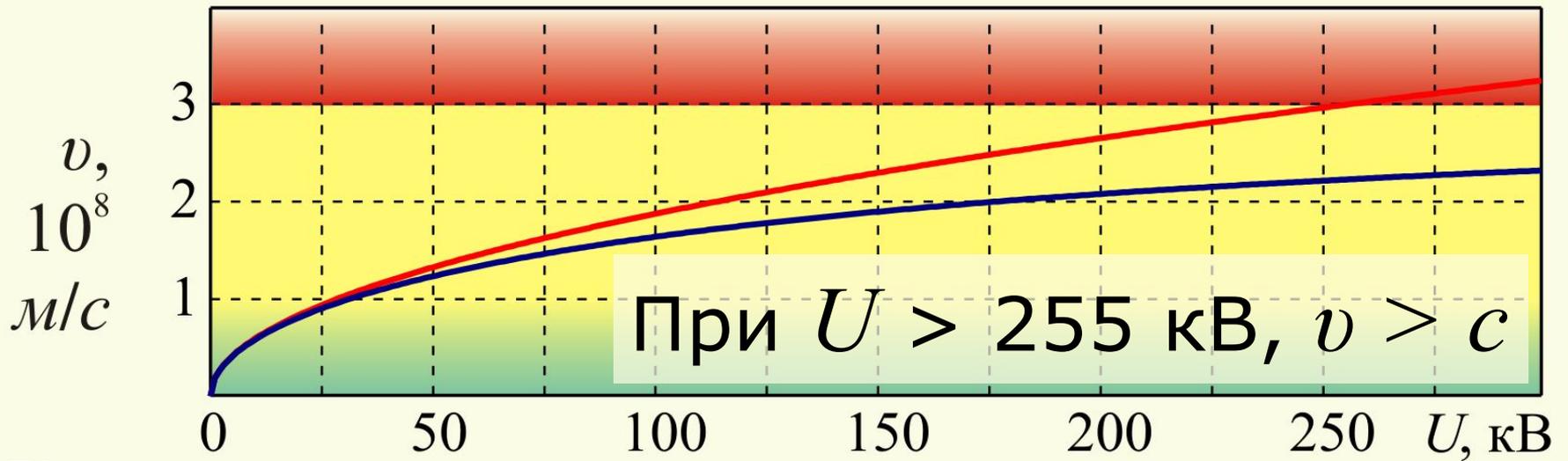
$$1 \text{ эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ Дж}$$

# Рассмотрим принцип действия электронной пушки



$$a) v \ll c: \frac{mv^2}{2} = qU \Rightarrow v = \sqrt{2 \frac{|q|}{m} U}$$





б)  $v \sim c$

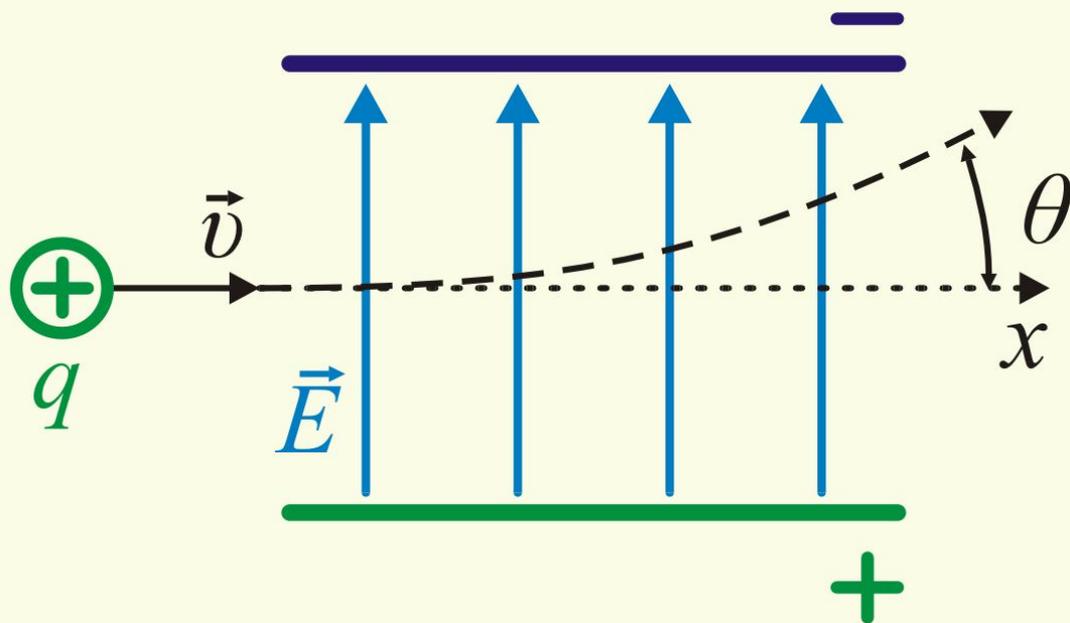
$m_0$  – **масса покоя** частицы

$E_0 = m_0 c^2$  – **энергия покоя** частицы

$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$  – **масса движения**

Кин.энергия:  $E_{\text{kin}} = E - E_0 = (m - m_0)c^2$

2)  $\vec{v} \perp \vec{E}$  – движение заряда  $\perp$  полю



II-й 3-н Ньютона:  $q\vec{E} = m\vec{a}$

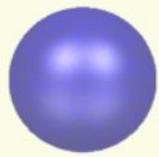
$$\begin{cases} 0 = ma_x \\ qE = ma_y \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} v_x = v_{0x} = \text{const} \\ v_y = v_{0y} + (qE/m)t \end{cases}$$

Траектория частицы – парабола и конечная скорость частицы отличается от начальной

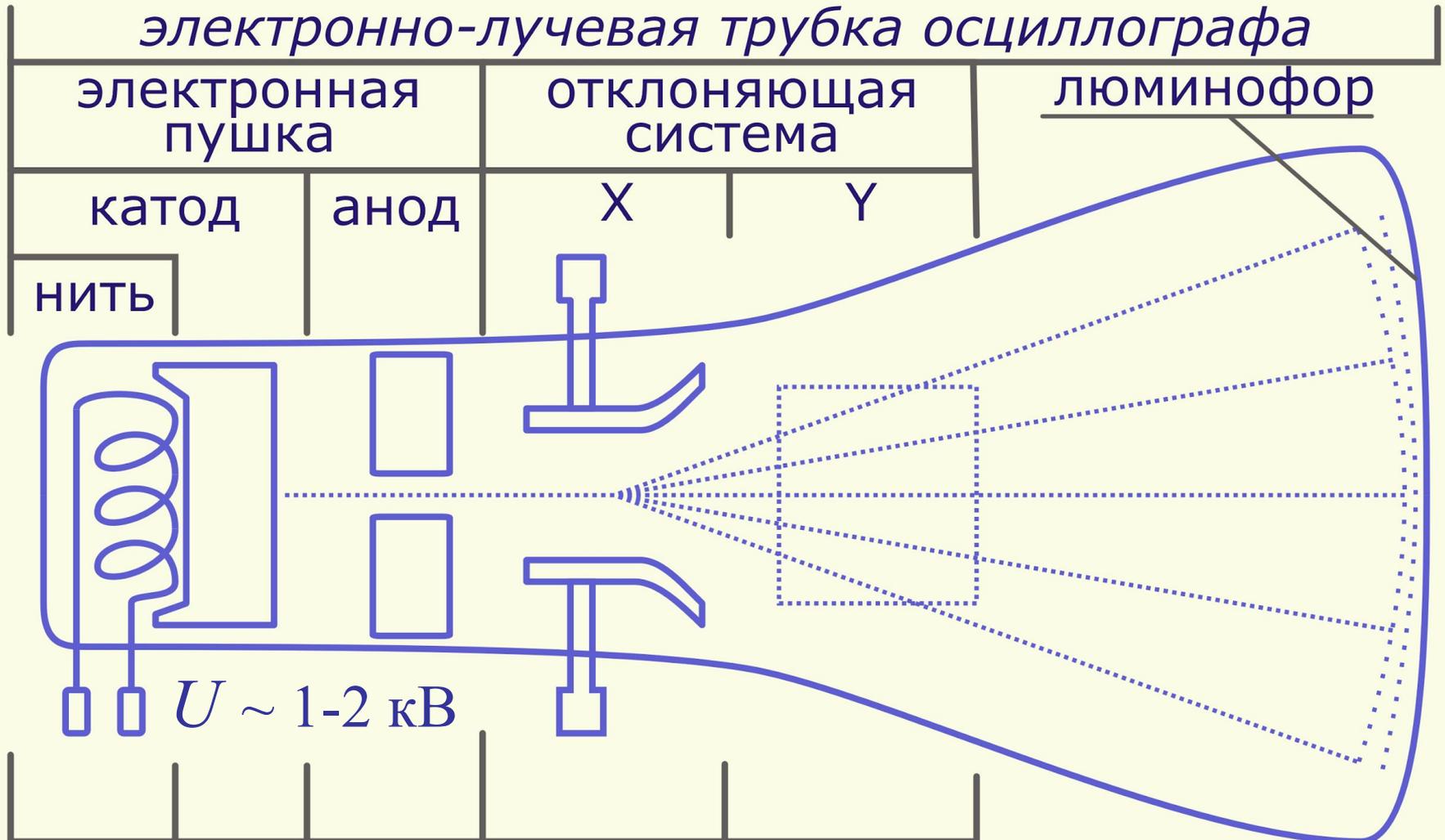
$$\operatorname{tg} \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{qE}{mv} t = \frac{q}{m} \frac{EL}{v^2}$$

где  $L$  – длина пробега частицы в поле

Отклонение пучка в электрическом поле существенно зависит от удельного заряда частиц  $q/m$ .



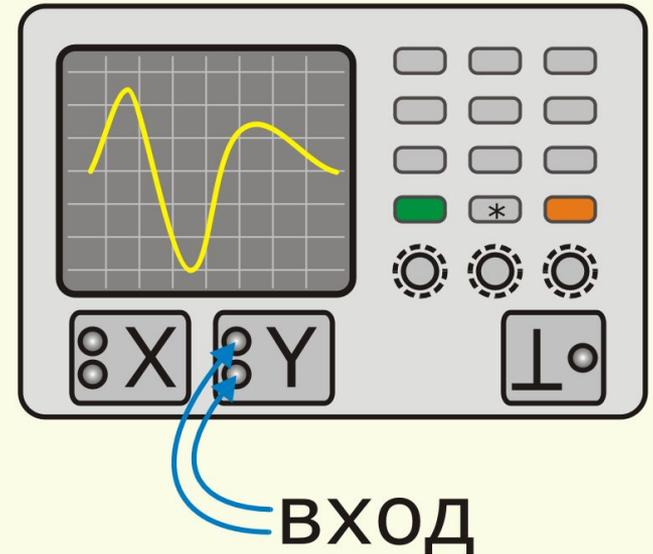
# §§ Катодная трубка



**Осциллограф** – устройство, позволяющее наблюдать быстропротекающие электрические процессы.

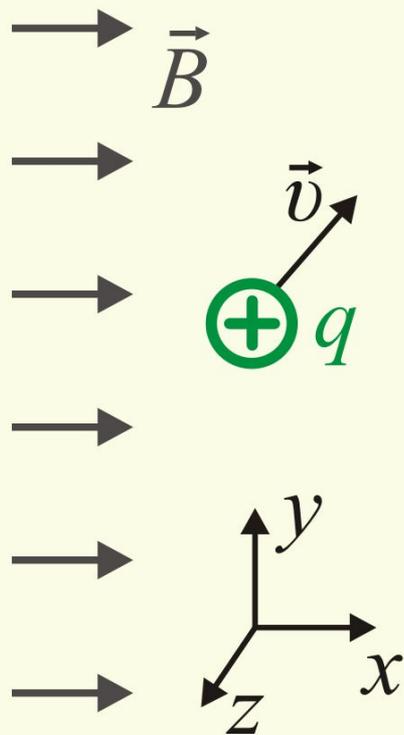
Поскольку отклонение луча пропорционально напряжению между пластинами, то осциллограф – это быстродействующий вольтметр

Основное свойство – сравнительная безинерционность (масса электронов очень мала).



# §§ Движение заряда в МП

$$a) \vec{B} \not\perp \vec{v}$$



Пусть частица со скоростью

$$\vec{v} = \{v_x, v_y, v_z\}$$

влетела в магнитное поле

$$\vec{B} = \{B_x, 0, 0\} = \text{const}$$

Найдем уравнение движения заряда

Запишем II-й закон Ньютона

$$q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}] = m\vec{a}, \quad \vec{a} = \frac{d\vec{v}}{dt}$$

ИЛИ

$$q \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ v_x & v_y & v_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} = m \frac{d\vec{v}}{dt} \Rightarrow \begin{cases} 0 = m \frac{dv_x}{dt} \\ qv_z B_x = m \frac{dv_y}{dt} \\ -qv_y B_x = m \frac{dv_z}{dt} \end{cases}$$

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} \psi \\ v_x = v_{0x} = \text{const} \\ \frac{d^2 v_y}{dt^2} + \frac{q^2 B_x^2}{m^2} v_y = 0 \end{array} \right.$$

аналогично

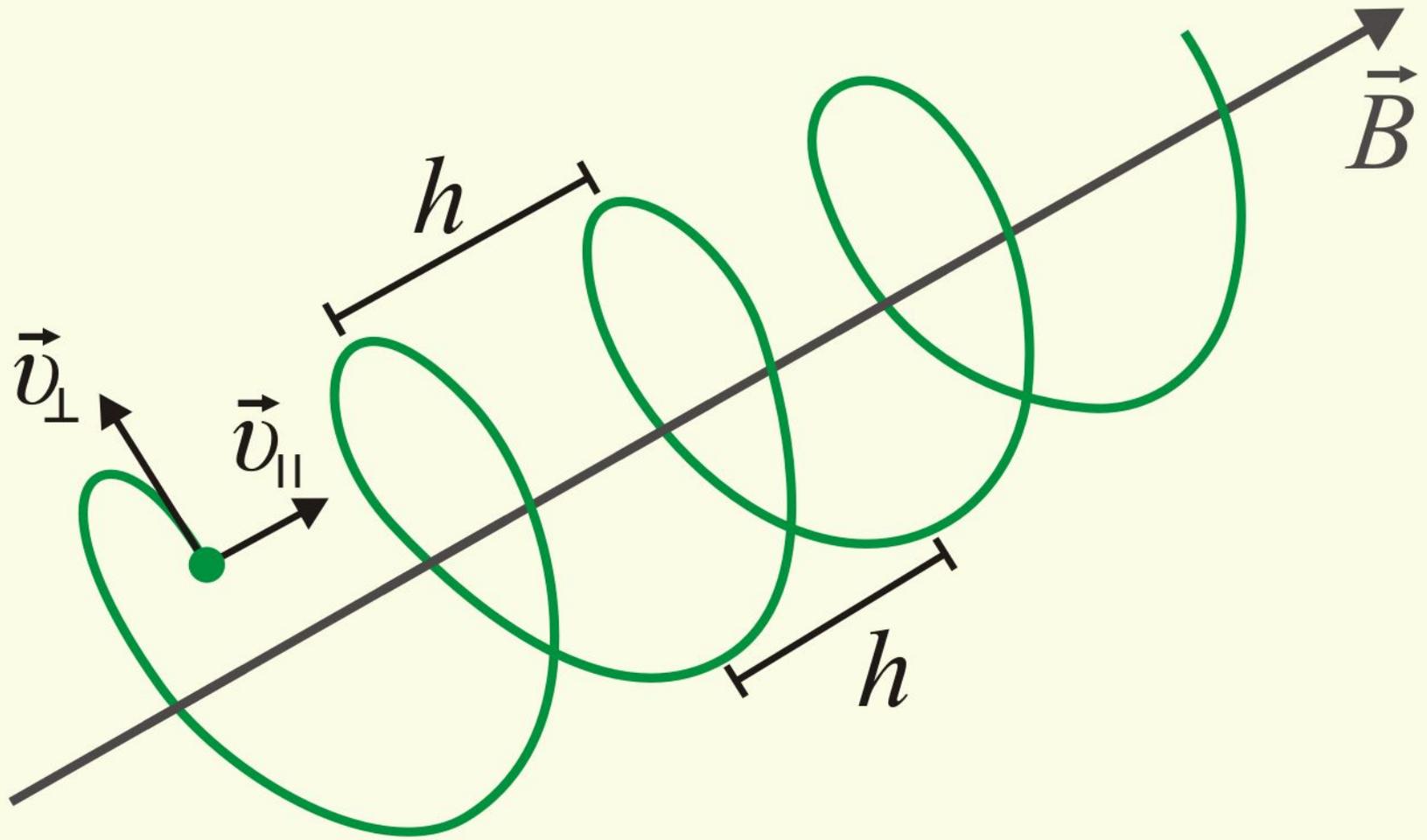
аналогично

$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} v_x = v_{0x} = \text{const} \\ v_y = v_{0y} \cos\left(\frac{qB_x}{m}t + \varphi_0\right) \\ v_z = v_{0z} \sin\left(\frac{qB_x}{m}t + \varphi_0\right) \end{array} \right.$$

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + v_{0x}t \\ y(t) = \frac{mv_{0y}}{qB_x} \sin\left(\frac{qB_x}{m}t + \varphi_0\right) \\ z(t) = \frac{mv_{0z}}{qB_x} \cos\left(\frac{qB_x}{m}t + \varphi_0\right) \end{cases}$$

Получаем винтовую линию с осью, параллельной оси  $x$ :

$$y^2 + z^2 = R^2 \quad R = \frac{m}{qB_x} \sqrt{v_{0y}^2 + v_{0z}^2}$$



$$v_{\parallel} = v_{0x}, v_{\perp} = \sqrt{v_y^2 + v_z^2}$$

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

$$\omega = \frac{qB_x}{m} - \text{ ЦИКЛОТРОННАЯ } \\ \text{ (гиромагнитная) } \text{ ЧАСТОТА }$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB_x} - \text{ период обращения}$$

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - \text{ масса частицы}$$

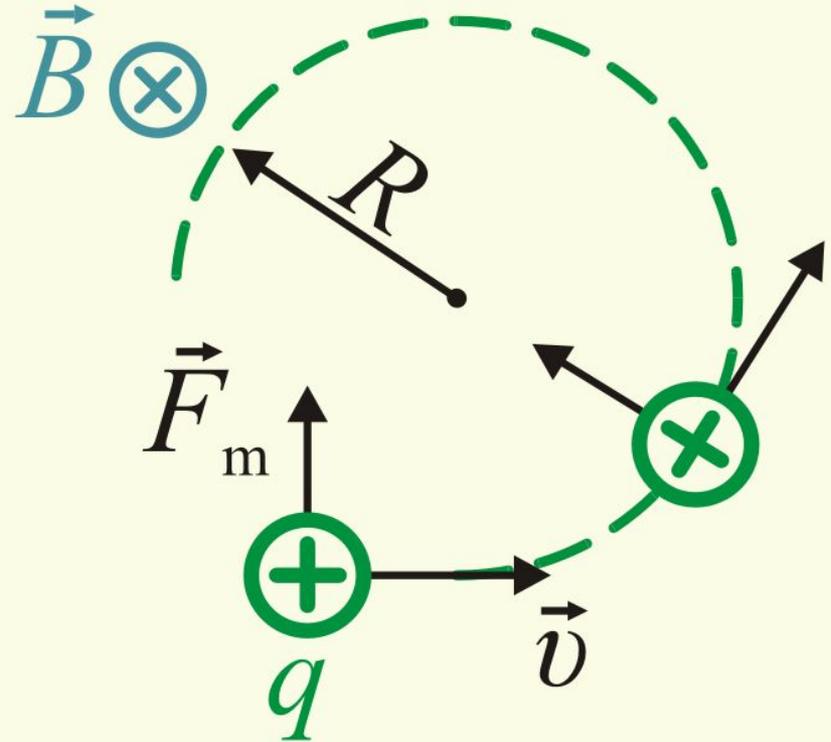
$$h = v_{0x}T = v_{||}T - \text{ шаг винтовой линии}$$

Магнитное поле изменяет скорость частицы **только по направлению**

$$б) \vec{B} \perp \vec{v}$$

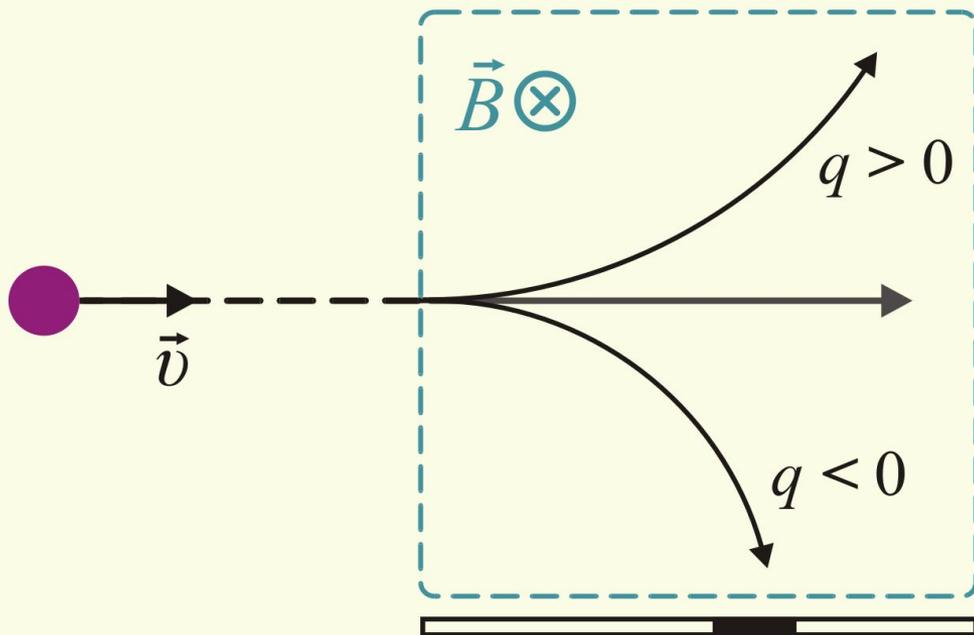
$$F_m = ma_n$$

$$qvB = m \frac{v^2}{R}$$



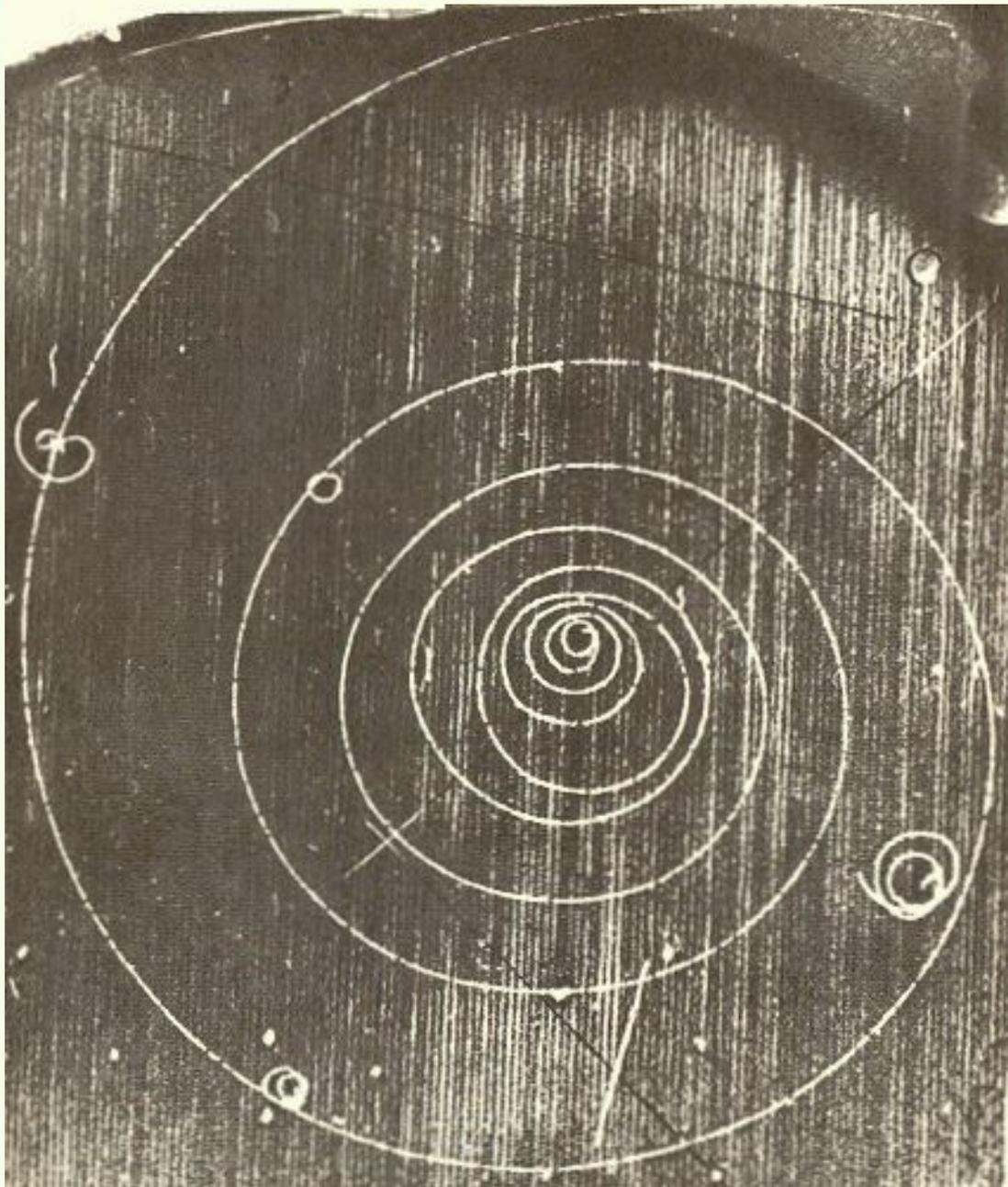
В однородном МП заряды двигаются по окружностям – **орбитам Лармора**

$$R = \frac{mv}{qB} \sim \frac{m}{q} \sim \frac{v}{B}, \quad \omega = \frac{q}{m} B \text{ – частота Лармора}$$



Для зарядов  
разных знаков  
направление  
движения  
различно

На зависимости траектории частицы от ее энергии (скорости) и удельного заряда при движении в Э и М полях основано действие **масс-спектрометра**

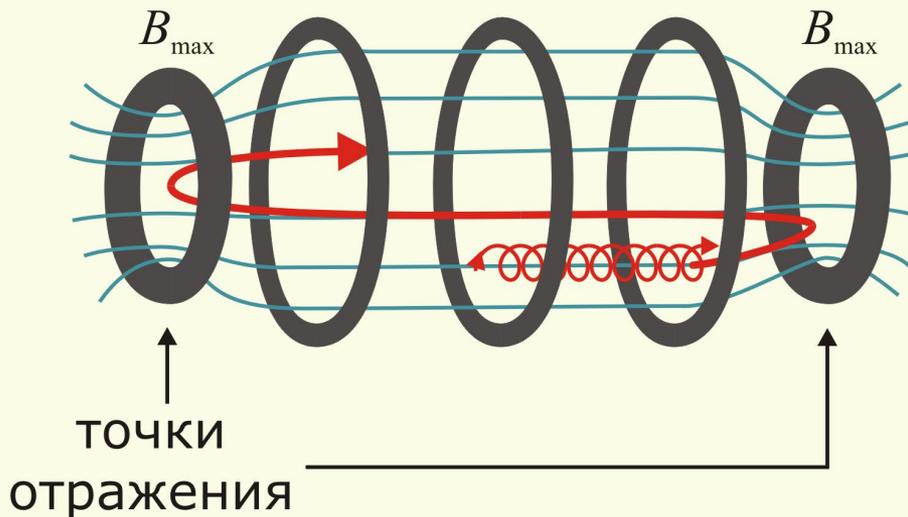


След электрона  
в камере с  
жидким  
водородом.

Магнитное поле  
однородное,  
направлено  
к нам.

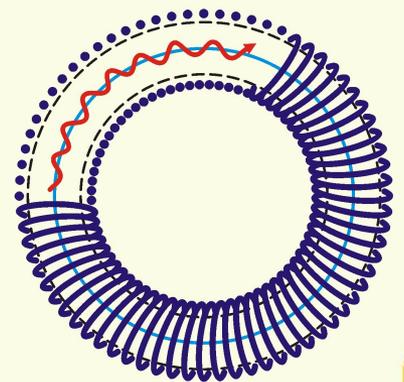
# §§ Магнитные ловушки

Рассмотрим движение заряженной частицы в неоднородном МП

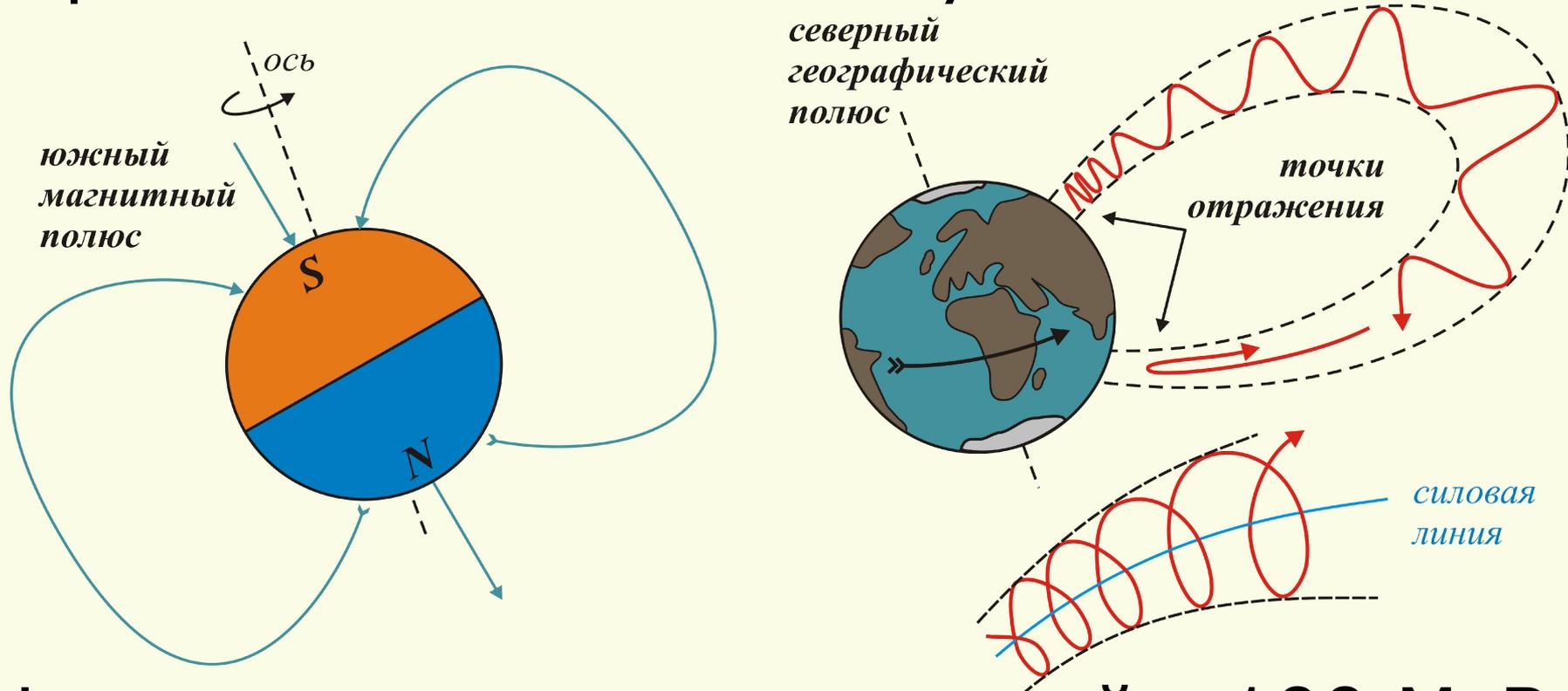


Области с большим значением индукции МП отражают частицы обратно

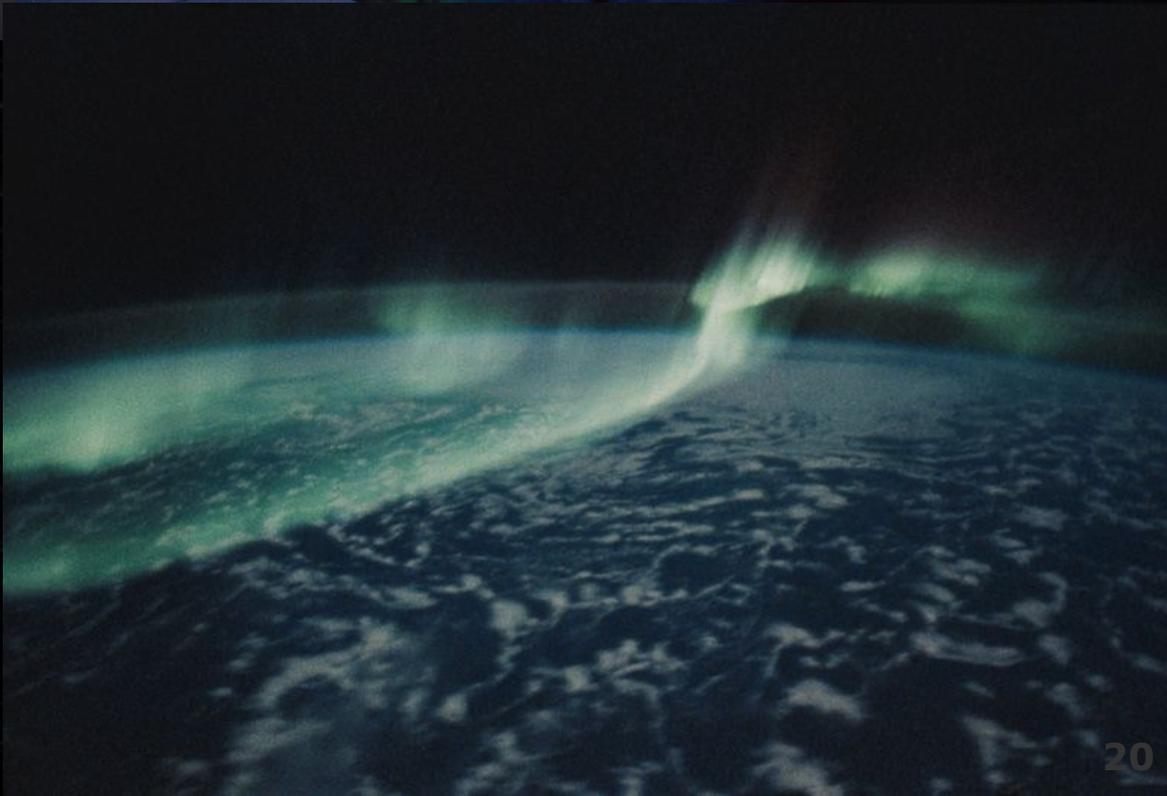
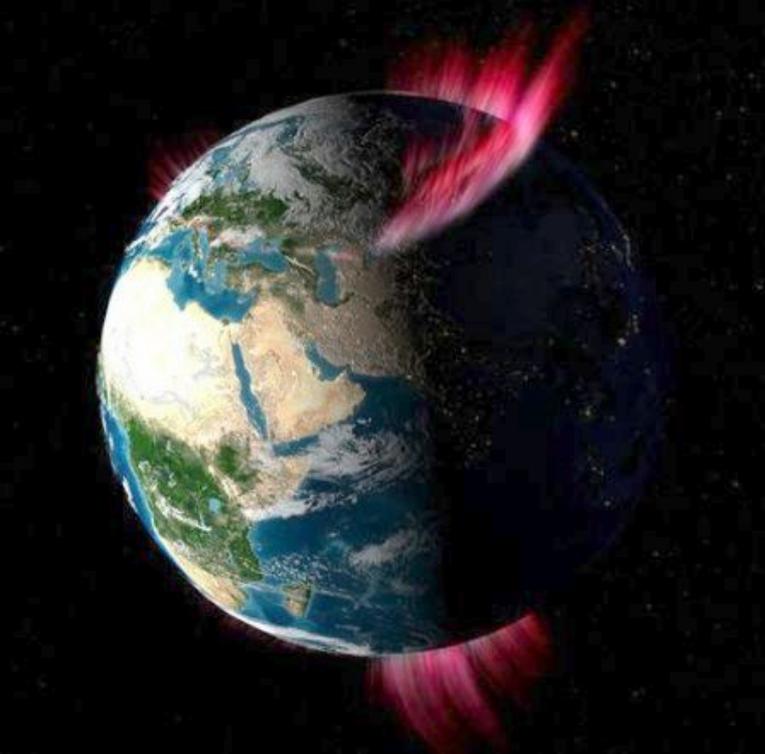
Такие устройства используют для удержания плазмы



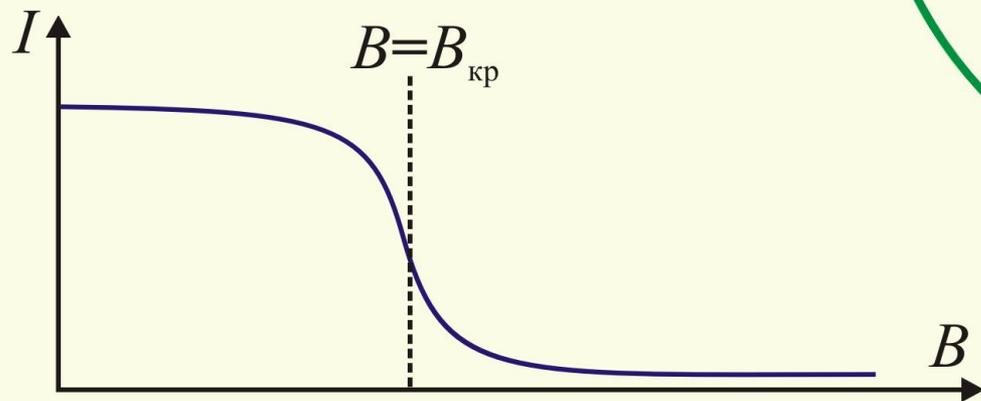
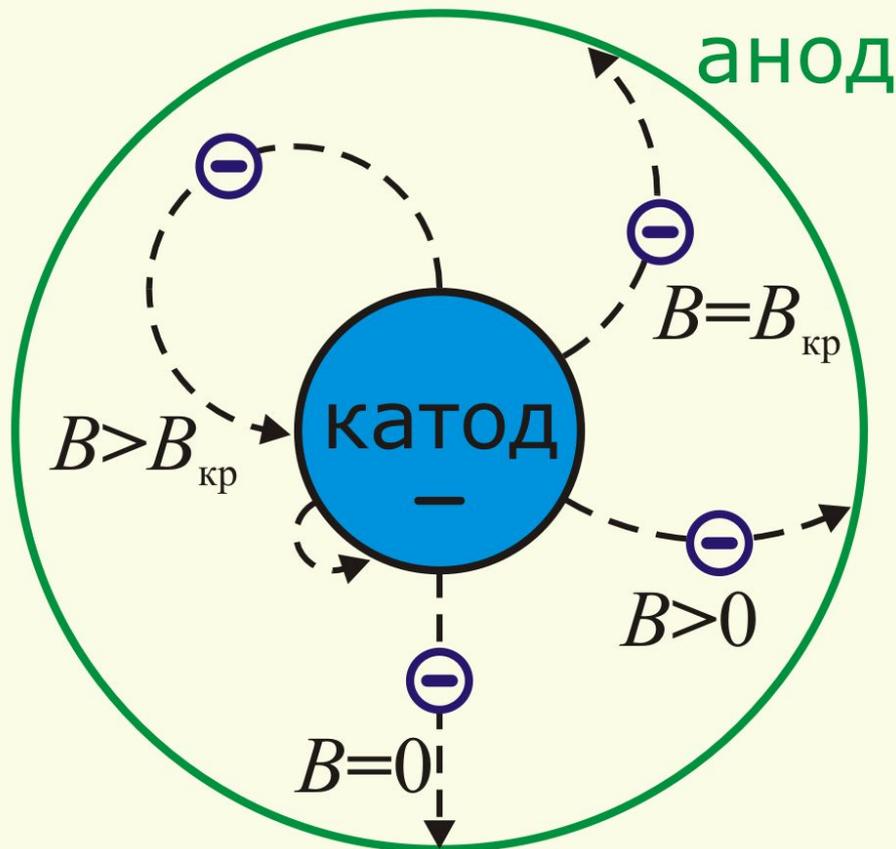
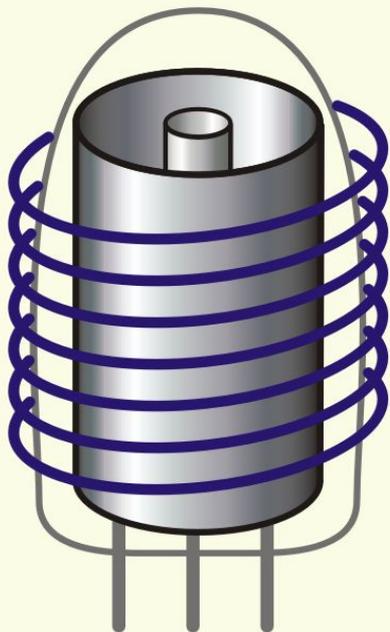
# Образование радиационных поясов Земли также объясняется удержанием зарядов в подобных ловушках



Например, протон с энергией  $\sim 100$  МэВ может находиться в такой ловушке до 100 лет. Период колебаний  $\sim 0,3$  с.



# §§ Магнетрон



Зависимость тока через лампу от индукции МП имеет особенность – точку перегиба.

Так определяют  $B_{кр}$  – индукцию, при которой траектории электронов только касаются анода.

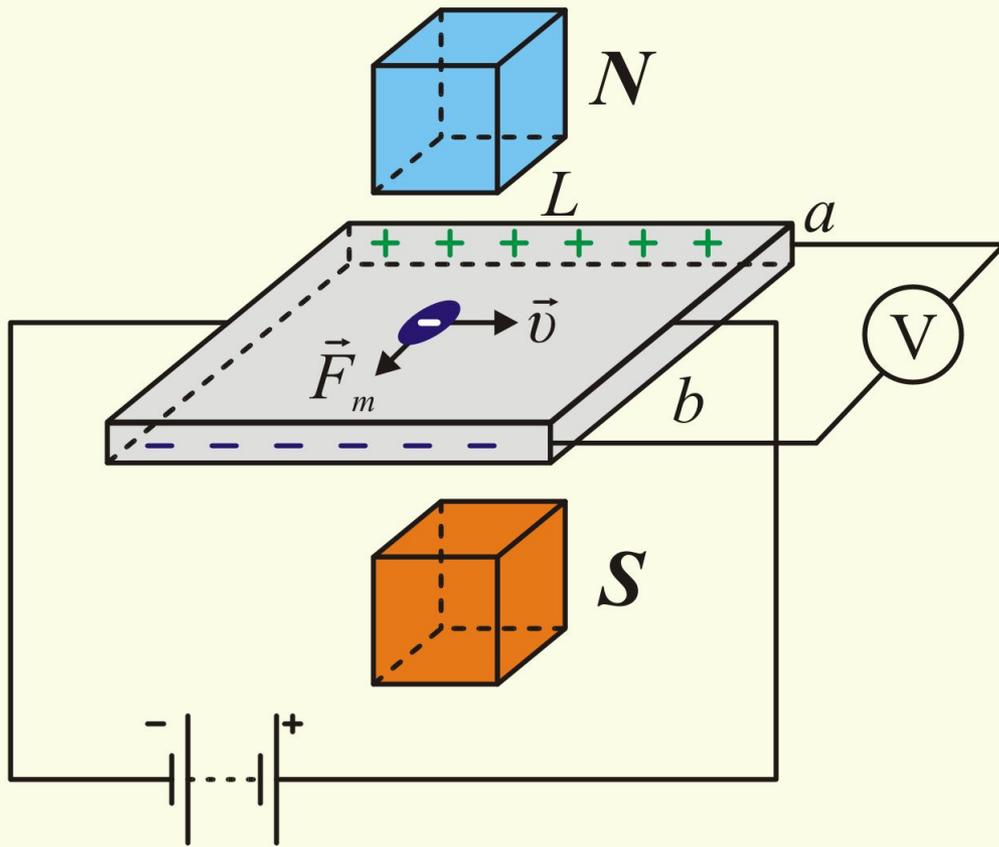
Это позволяет определить удельный заряд электрона (л/р №6)

# §§ Эффект Холла

Электроны, двигающиеся в проводнике, также отклоняются под действием магнитного поля.

В результате, возникает разность потенциалов на концах проводника в направлении, перпендикулярном направлению тока (**эффект Холла**)

Рассмотрим движение электрона под действием силы Кулона и силы Лоренца.



$$F_e = qE_{\parallel} = q \frac{\Delta\phi_{\parallel}}{L}$$

$$F_m = qBv$$

$$q \frac{\Delta\phi_{\perp}}{b} = qvB \Rightarrow q \frac{\Delta\phi_{\perp}}{b} = \frac{nqvS}{nS} B$$

$S = ab$  – площадь поперечного сечения

$j = nqv$  – плотность тока

$I = jS$  – ток в проводнике

Для поперечной разности потенциалов получаем

$$\Delta\varphi_{\perp} = \left( \frac{1}{nq} \right) \frac{IB}{a} = R_{\text{ХОЛЛ}} \frac{IB}{a}$$

$R_{\text{ХОЛЛ}}$  – постоянная Холла.

Она бывает и  $>0$  и  $<0$ , хотя носители заряда – электроны.

## Эффект Холла используют

- 1) для точного измерения МП
- 2) для определения концентрации носителей тока в различных веществах

Например, в металлах  $n \sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$  и совпадает, по порядку величины, с концентрацией атомов в металле

