

**Сегодня:
воскресенье, 29
октября 2023 г.**

Лекция 13. Магнитное взаимодействие токов и зарядов

- Магнитное взаимодействие
- Некоторые применения магнитного поля

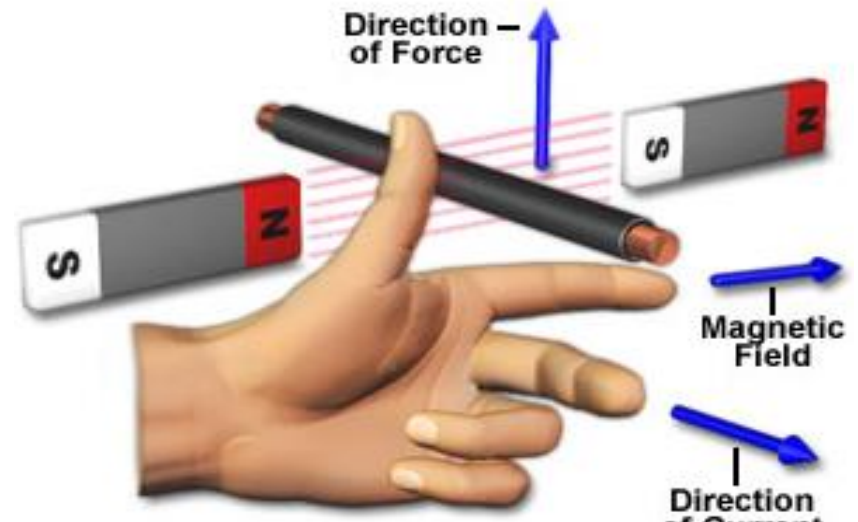
Магнитное взаимодействие

Проводники с током (движущимися электрическими зарядами) создают вокруг себя магнитное поле и изменяют окружающее их магнитное поле. Следовательно, магнитное поле действует как на движущиеся электрические заряды, так и на проводники с током.

Обобщенная формула для силы взаимодействия между движущимся электрическим зарядом и элементом тока

$$F_y = \frac{qen\Delta Sdl}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left(1 - \frac{v^2}{c^2} \right)$$

после преобразований в векторной форме можно переписать:



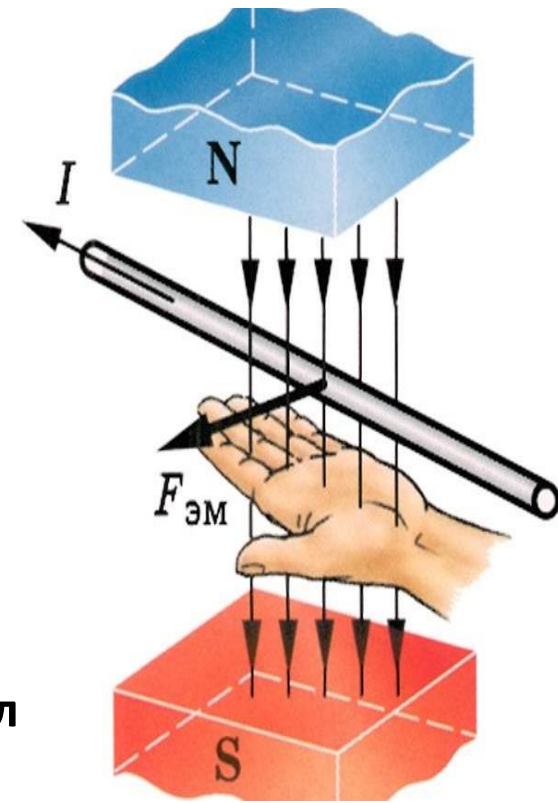
$$\vec{F} = \vec{F}_e + \vec{F}_m = q\vec{E} + q[\vec{v}\vec{B}]$$

Обобщенная сила Лоренца - сила, действующая на движущиеся электрические заряды в электромагнитном поле

$$\vec{F}_l = q[\vec{v}, \vec{B}] \quad F_l = qvB \cdot \sin\alpha$$

$$[B] = [F][q]^{-1}[v]^{-1} = 1\text{Н} \cdot 1\text{с} / (1\text{Кл} \cdot 1\text{м}) = 1\text{Н} / (1\text{А} \cdot 1\text{м}) = 1\text{Тл}$$

магниты с полем 8-10 Тл относят к рекордным



Если кисть левой руки расположить так, что четыре вытянутых пальца указывают направление скорости положительного заряда, а вектор магнитной индукции входит в ладонь, то отогнутый на 90° большой палец покажет направление силы действующей на данный заряд

Свойства силы Лоренца

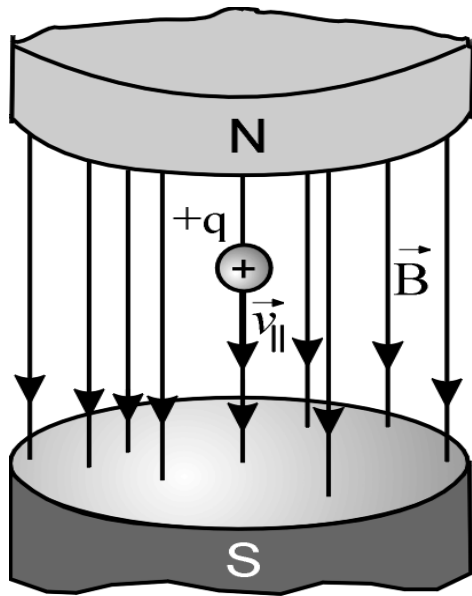
1. Сила Лоренца $F_l \perp v$, не совершает работы. Следовательно, кинетическая энергия заряженной частицы при движении в магнитном поле не изменяется = не меняется величина скорости частицы

2. Сила Лоренца изменяет направление вектора скорости, сообщает частице нормальное ускорение

3. Если заряд движется в области, где существует и электрическое и магнитное поле, то на него действует полная сила Лоренца

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

Движение заряда в однородном магнитном поле

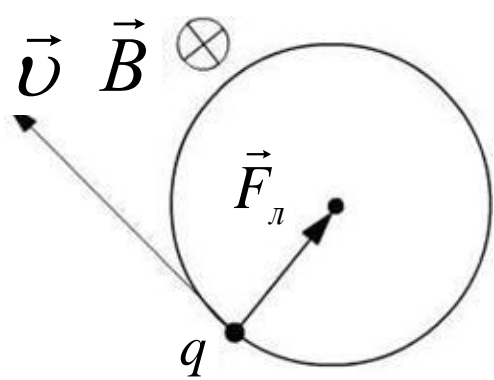


$$\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{B}$$

Частица будет двигаться в том же направлении прямолинейно и равномерно

$$\vec{v} \perp \vec{B} (q > 0) \quad \vec{v} \perp \vec{B} (q < 0)$$

Под действием силы Лоренца частица будет двигаться по окружности постоянного радиуса R



$$б, в) F_{л} = qvB \sin \alpha = \left\{ \sin \alpha = 1, \vec{v} \perp \vec{B} \right\} = qvB$$

$$F_{л} = ma_{ц.с.} = \frac{mv^2}{R} = qvB$$

Угловая скорость

$$\omega = \frac{v}{R} = \frac{qB}{m}$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi m}{qB}$$

Период обращения
не зависит от энергии частицы

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

Радиус орбиты зависит от скорости и
энергии частицы

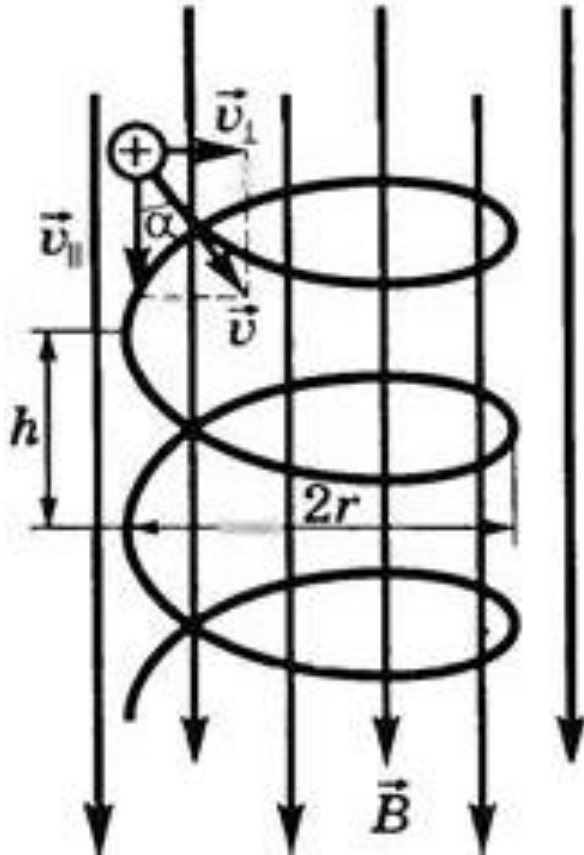
Сила Лоренца должна быть направлена к центру.

Направление вращения положительной частицы:

вращающийся в том же направлении штопор ввинчивается
против поля. Отрицательно заряженная частица вращается в
противоположном направлении

$$\vec{v} = \vec{v}_{\parallel} + \vec{v}_{\perp} \quad v_{\parallel} = v \cos \Theta,$$

$$v_{\perp} = v \sin \Theta$$



Движение частицы = сумма 2 движений:

1. равномерного вдоль поля со скоростью $v \cos \Theta$

2. вращения по окружности с угловой скоростью

$$\omega = \frac{qB}{m}$$

Траектория частицы – спираль

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv \sin \Theta}{qB}$$

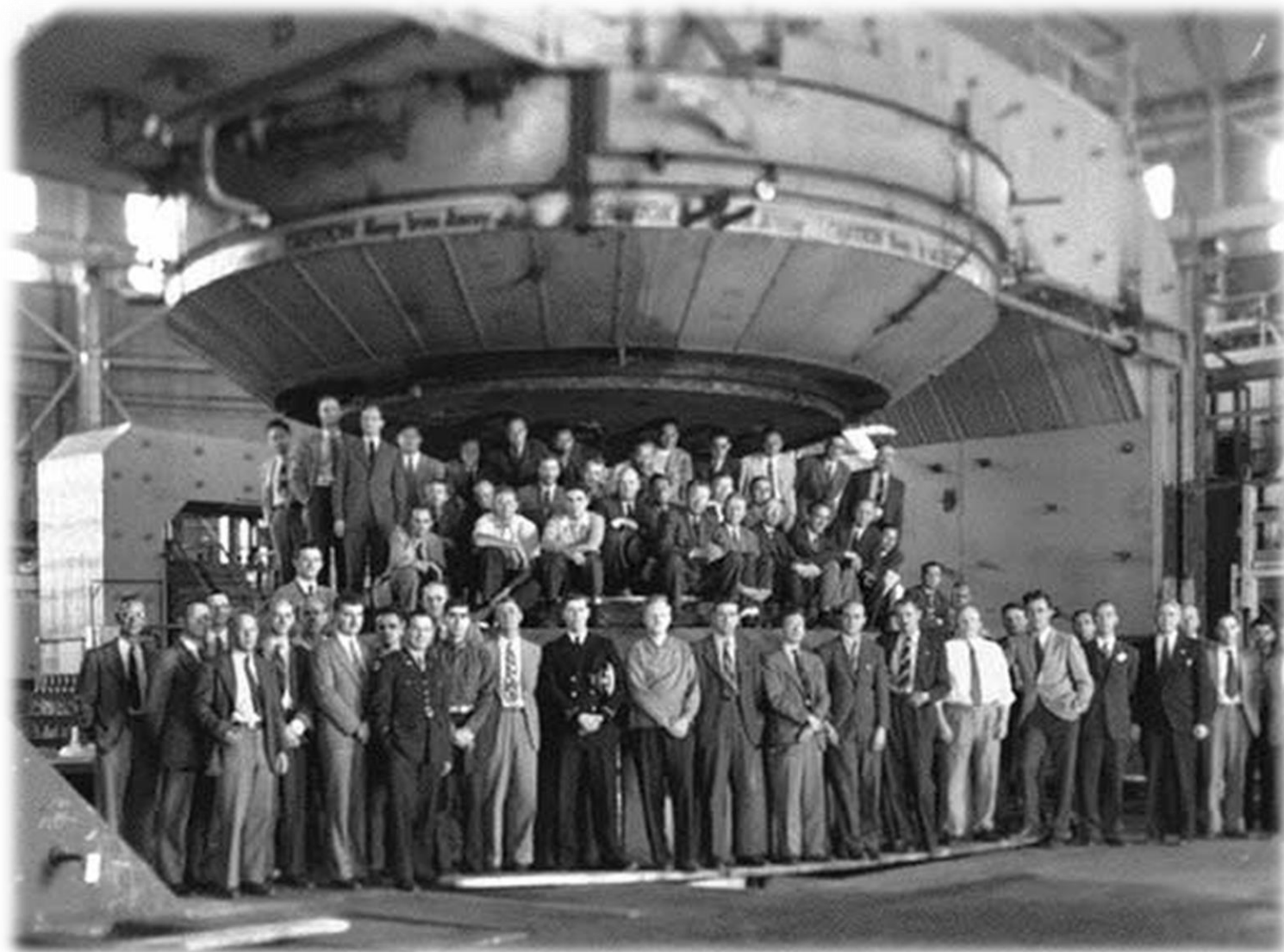
Шаг траектории

$$h = vT = v \cos \Theta \cdot T = \frac{2\pi m v \cos \Theta}{qB} = 2\pi R \operatorname{ctg} \Theta$$

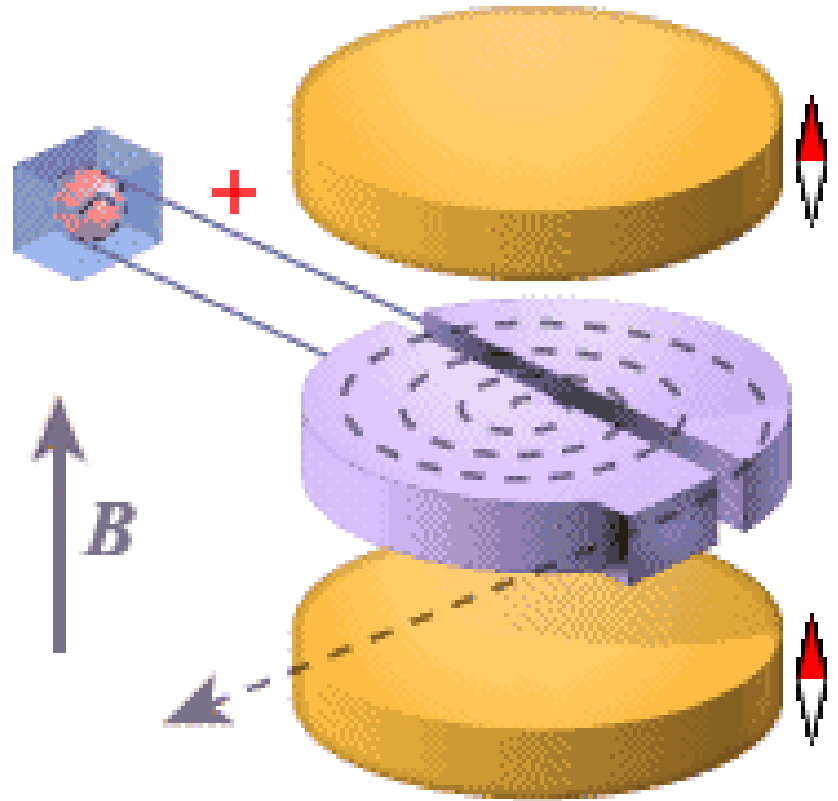
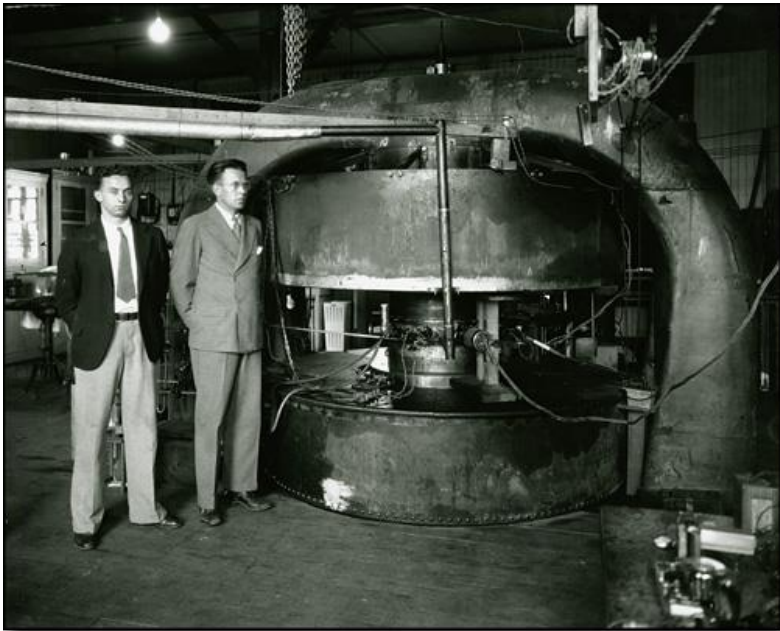
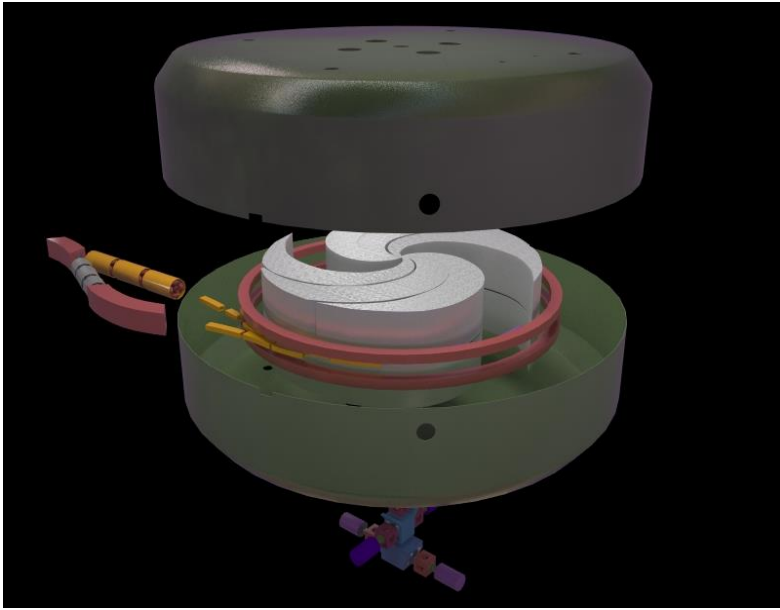
Некоторые применения магнитного поля



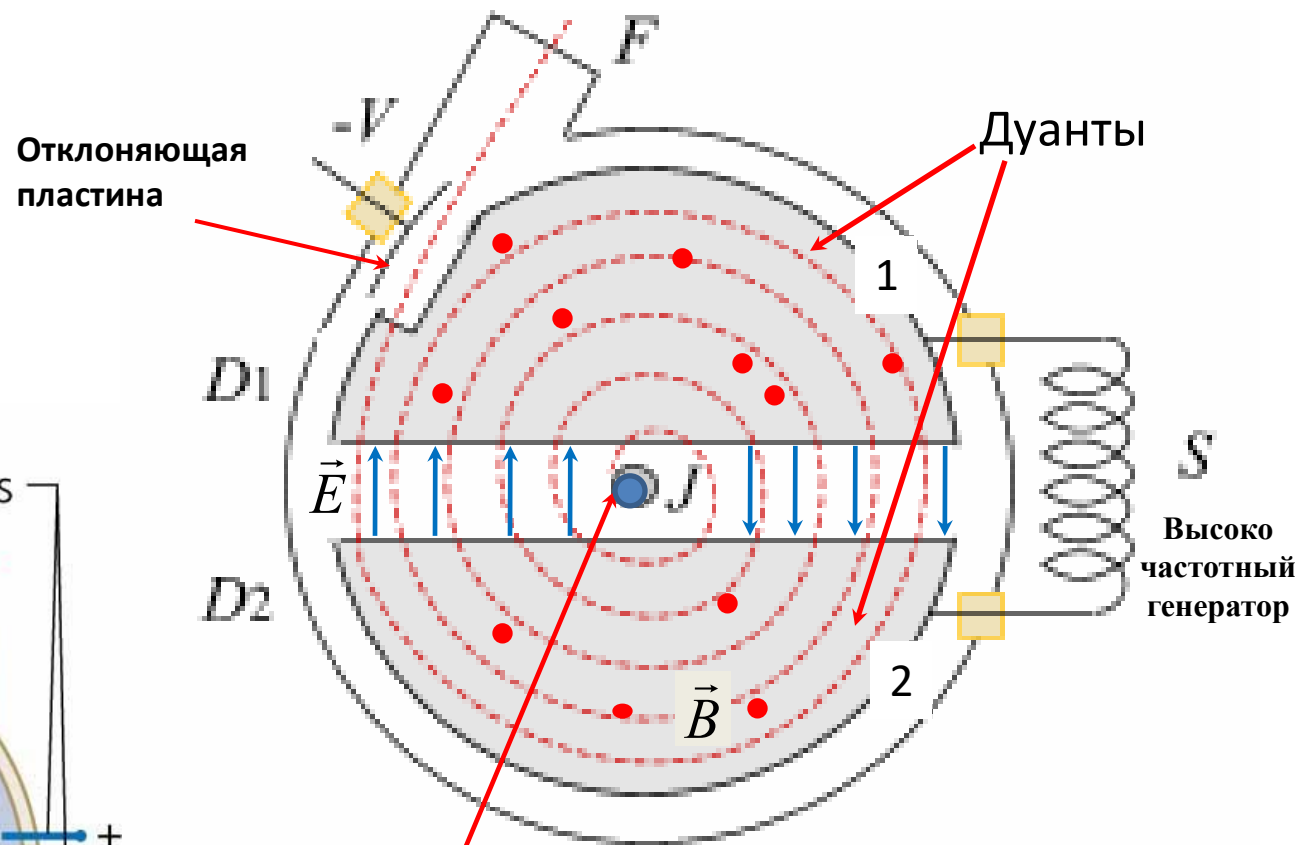
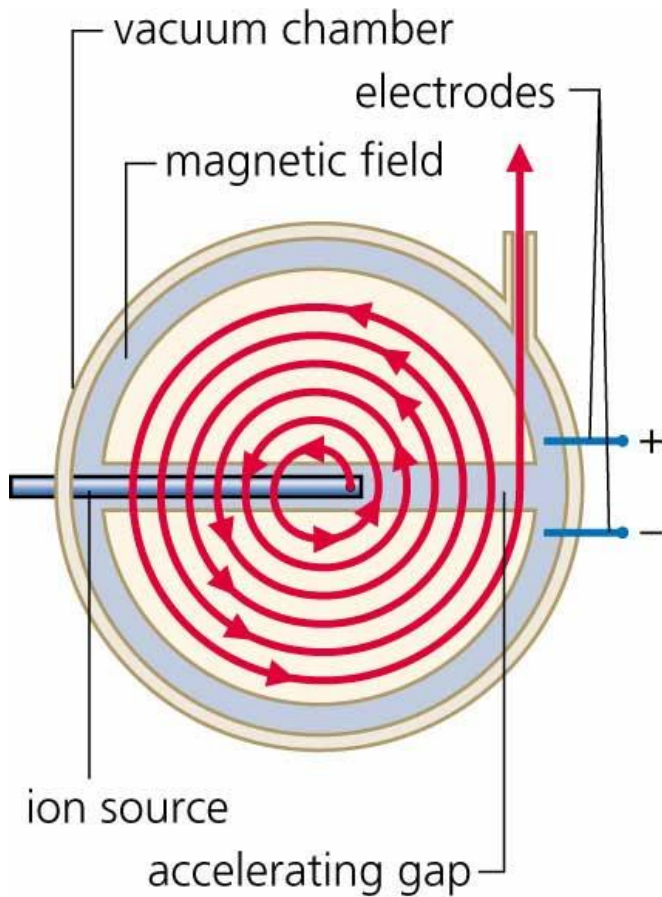
Первый циклотрон, построенный Эрнестом Лоуренсом в 1931 году, умещался на ладони и разгонял протоны всего до 0,08 МэВ.



К концу 1940-х годов циклотроны выросли до размеров небольшого здания. 184-дюймовый циклотрон в Университете Беркли в Калифорнии, разгонявший частицы до 100 МэВ



Циклотрон



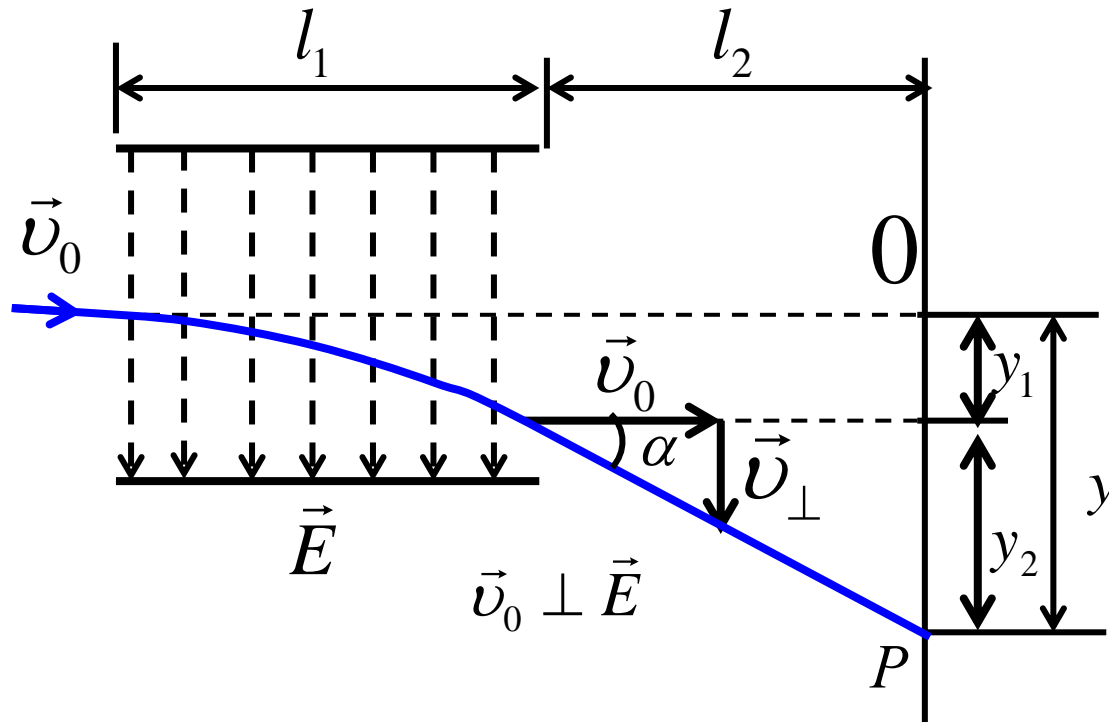
Ионный источник



Определение заряда и массы электрона $\vec{F} = q\vec{E}$

$$A = Fl = qEl = qU = q(\varphi_1 - \varphi_2) = W$$

l – путь, пройденный частицей от точки с потенциалом φ_1 до φ_2 .



$$\vec{a} = \frac{q}{m} \vec{E}$$

За время пролета области поля

$$t = \frac{l_1}{v_0}$$

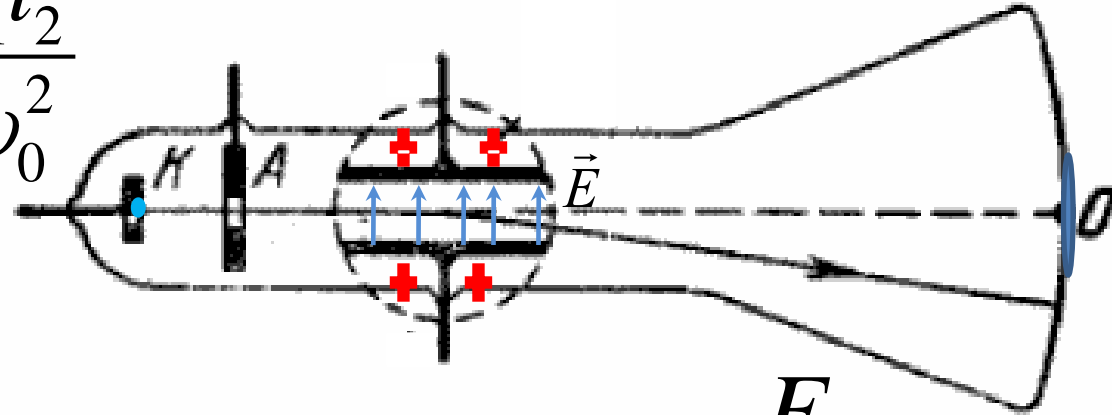
частица сместится на расстояние $y_1 = \frac{1}{2} at^2 = \frac{q}{m} E \frac{l_1^2}{2v_0^2}$

За время подлета к экрану частица успеет сместится еще на расстояние

$$eE = e\nu B$$

$$y_2 = l_2 \operatorname{tg} \alpha = \frac{q}{m} E \frac{l_1 l_2}{\nu_0^2}$$

В итоге она попадает в т. Р экрана, отстоящую от О на расстояние



$$y = y_1 + y_2 = \frac{q}{m} E \frac{l_1^2 + 2l_1 l_2}{2\nu_0^2}$$

$$\nu_0 = \frac{E}{B}$$

и приобретет скорость

$$\nu_{\perp} = a_{\perp} t = \frac{q}{m} E \frac{l_1}{\nu_0}$$

$$\left(\frac{e}{m} \right)_{\text{Томсон}} = 1,7 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

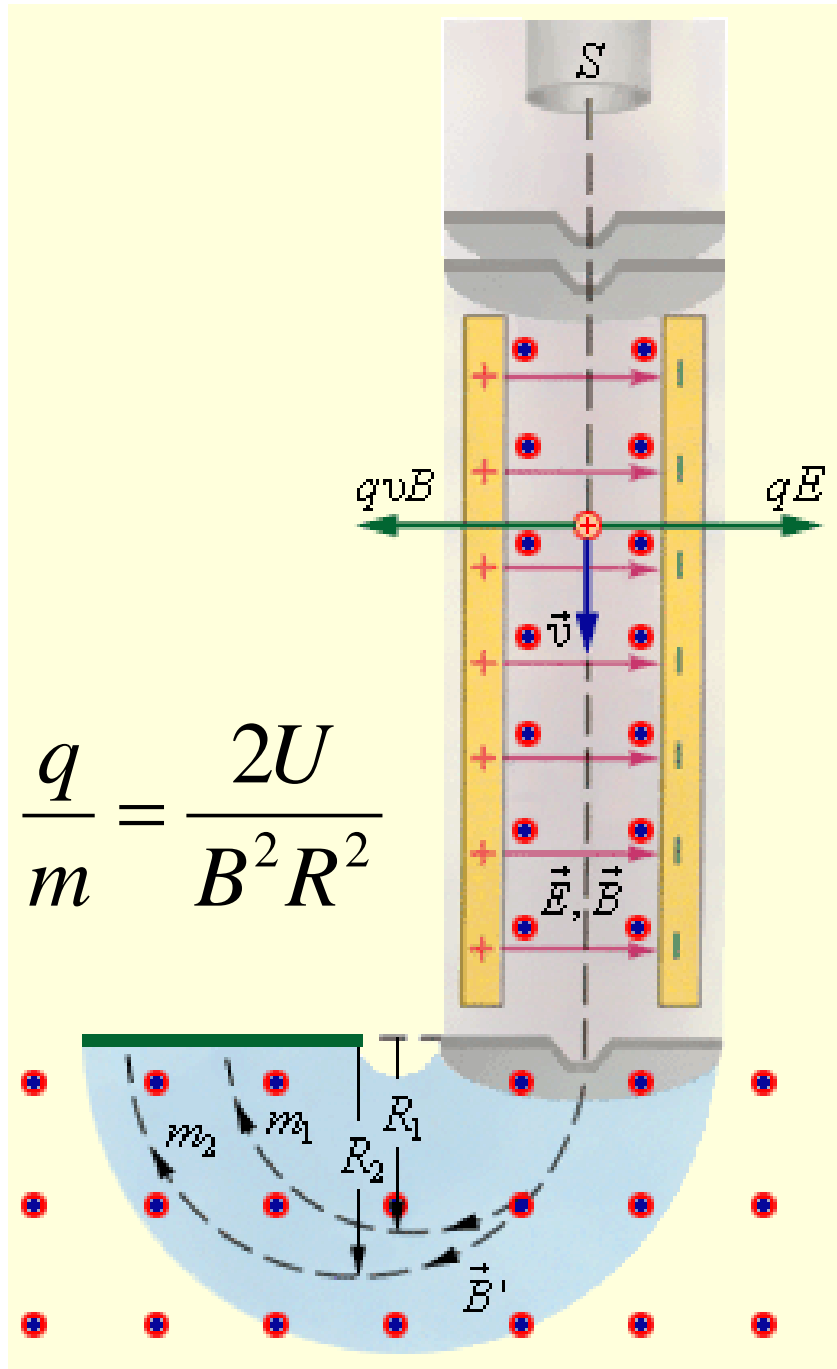
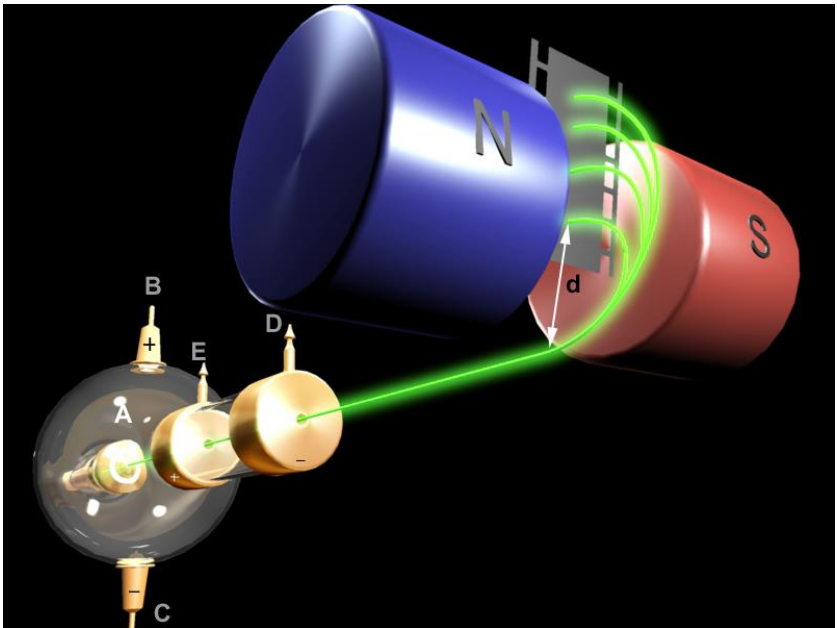
$$\left(\frac{e}{m} \right)_{\text{совр}} = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ Кл/кг}$$

Масс-спектрометры

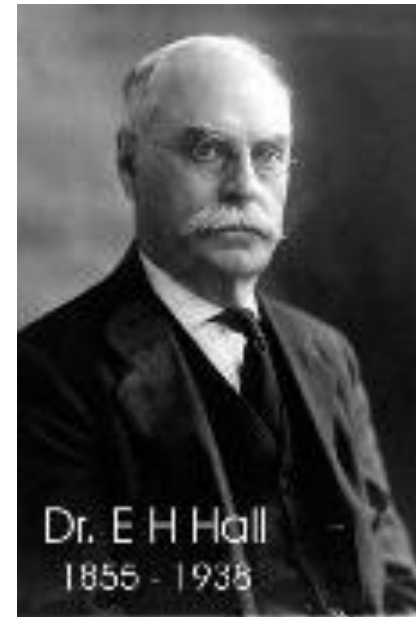
$$E = \frac{mv^2}{2} = qU \quad (1)$$

$q = Ze$ – заряд иона

$$\frac{mv^2}{R} = qvB \quad (2)$$

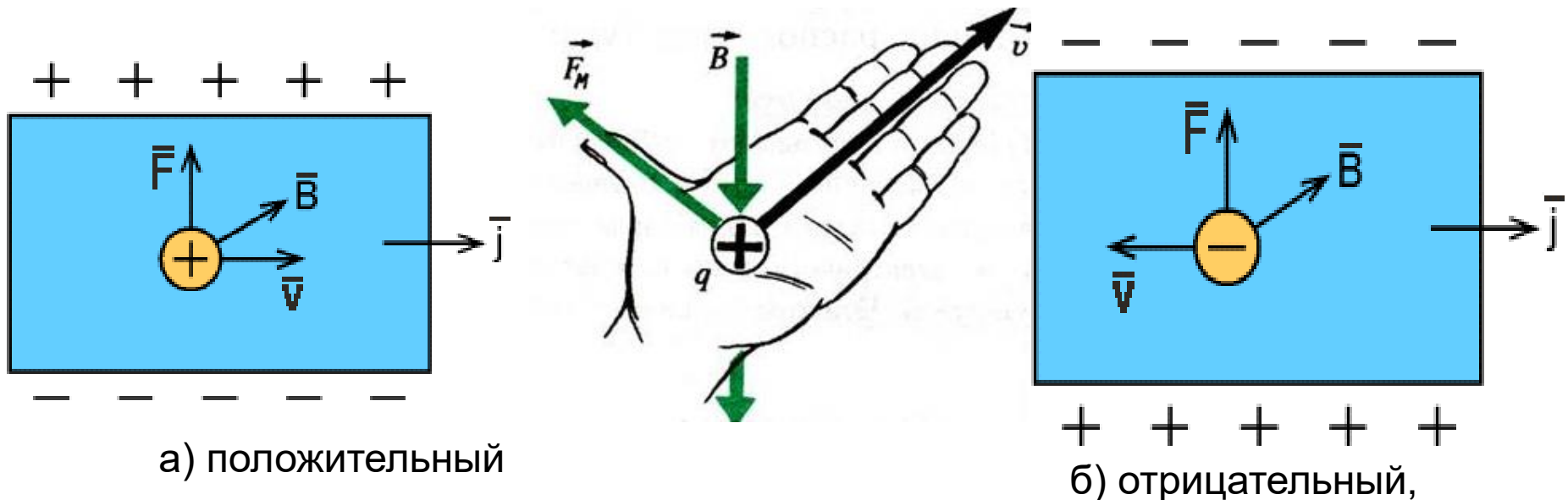


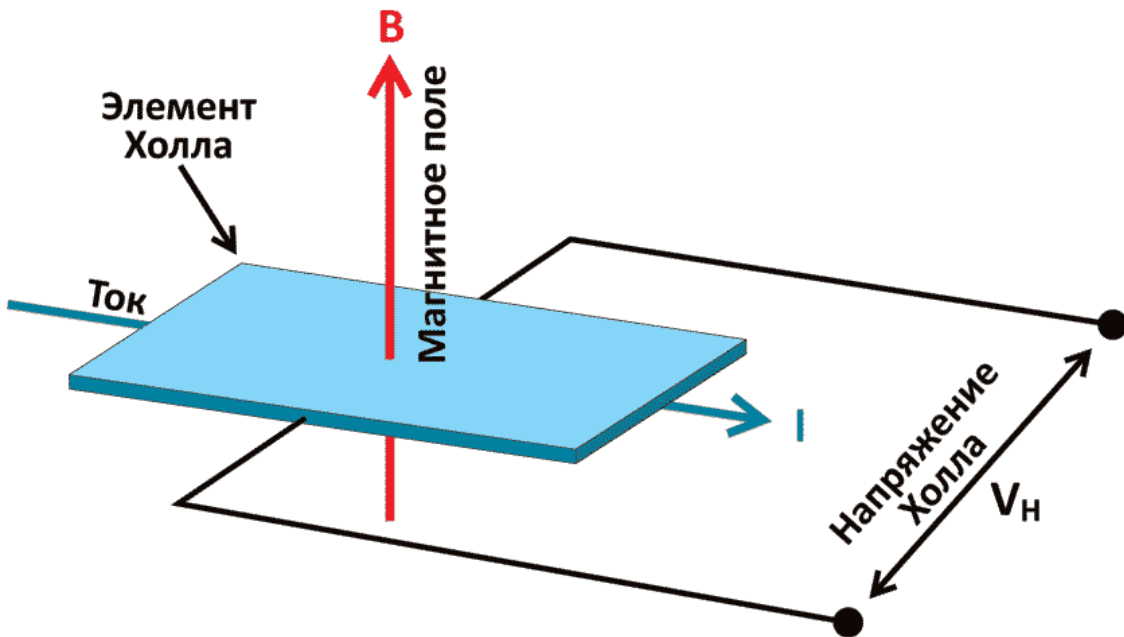
Эффект Холла



1880 г. Эдвин Холл :

появление в проводнике, помещенном в магнитное поле, разности потенциалов в направлении, перпендикулярном вектору магнитной индукции B и току I .



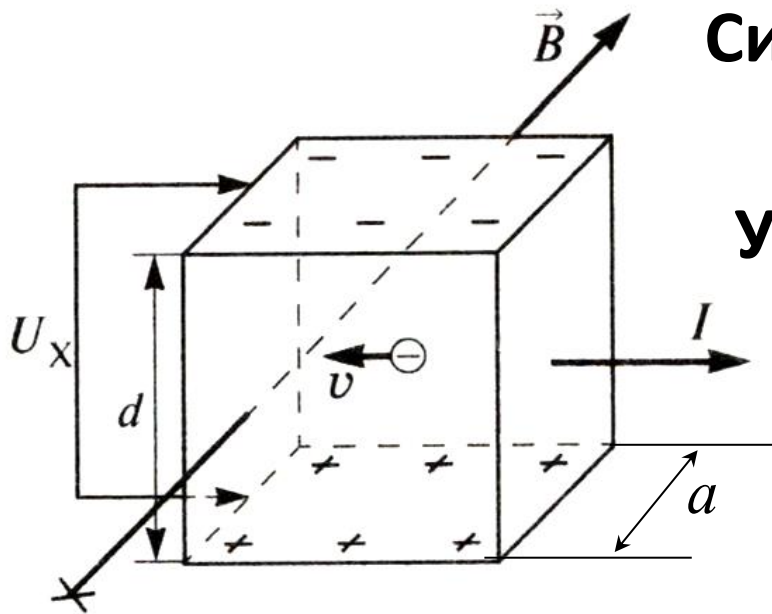


$$F_l = e v B \sin \alpha =$$

$$= \left\{ \vec{v} \perp \vec{B} \right\} = e v B$$

В случае полупроводника под действием силы Лоренца электроны отклоняются к верхней грани пластины, а дырки – к нижней

Возникает поперечное электрическое поле E_x и поперечная разность потенциалов U_x .



Сила поперечного ЭП

$$F = qE_x$$

Условие равновесия

$$F_{\text{л}} = F, \quad e\nu B = eE_x$$

$$E_x = \nu B$$

$$j = qn\nu$$

$$I = jS = jda$$

$$U_x = d \cdot E_x = d \cdot \nu B = d \frac{j}{ne} B = d \left(\frac{I}{S} \right) \frac{B}{ne} = d \frac{I}{ad} \frac{B}{ne}$$

$$R_x = \frac{1}{en} = \operatorname{tg} \alpha$$

**Постоянная
Холла**

$$U_x = \frac{IB}{ena} = R_x \frac{IB}{a}$$

$$R_x \gamma = \mu_H$$

**Холловская
ПОДВИЖНОСТЬ**

$n \sim 10^{28} \text{ м}^{-3}$ – металлы

$R_x \sim 10^{-9} \text{ м}^3/\text{Кл}$ – металлы

$R_x \sim 0,1 \text{ м}^3/\text{Кл}$ – полупроводники

