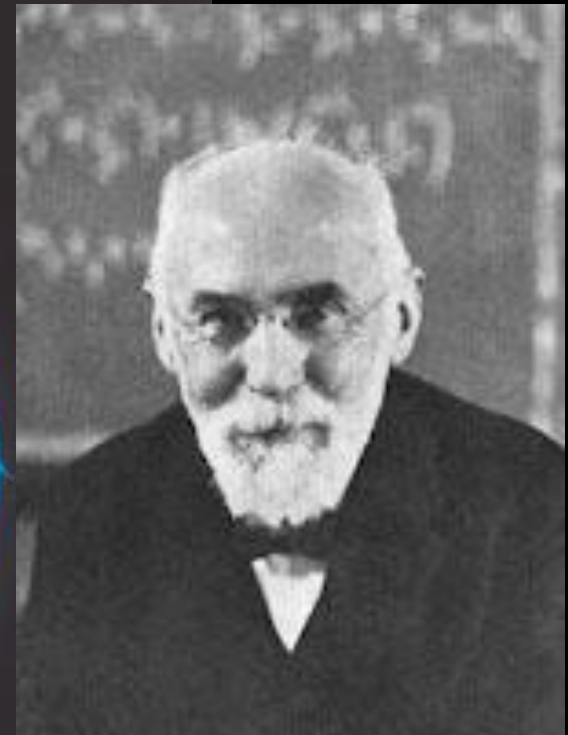
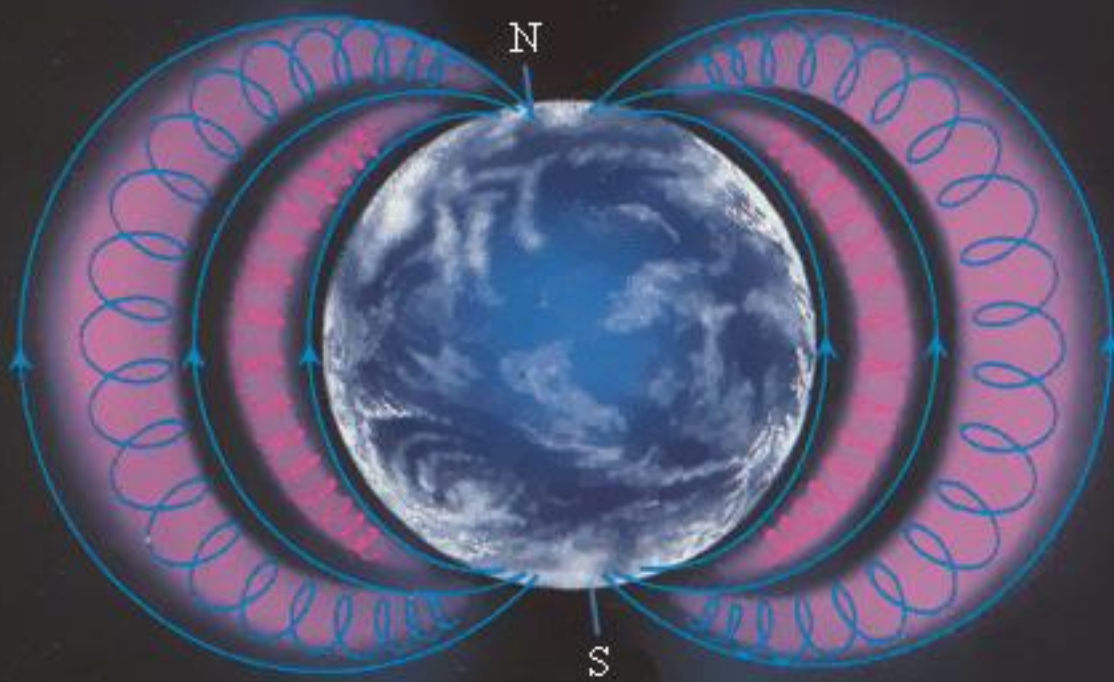


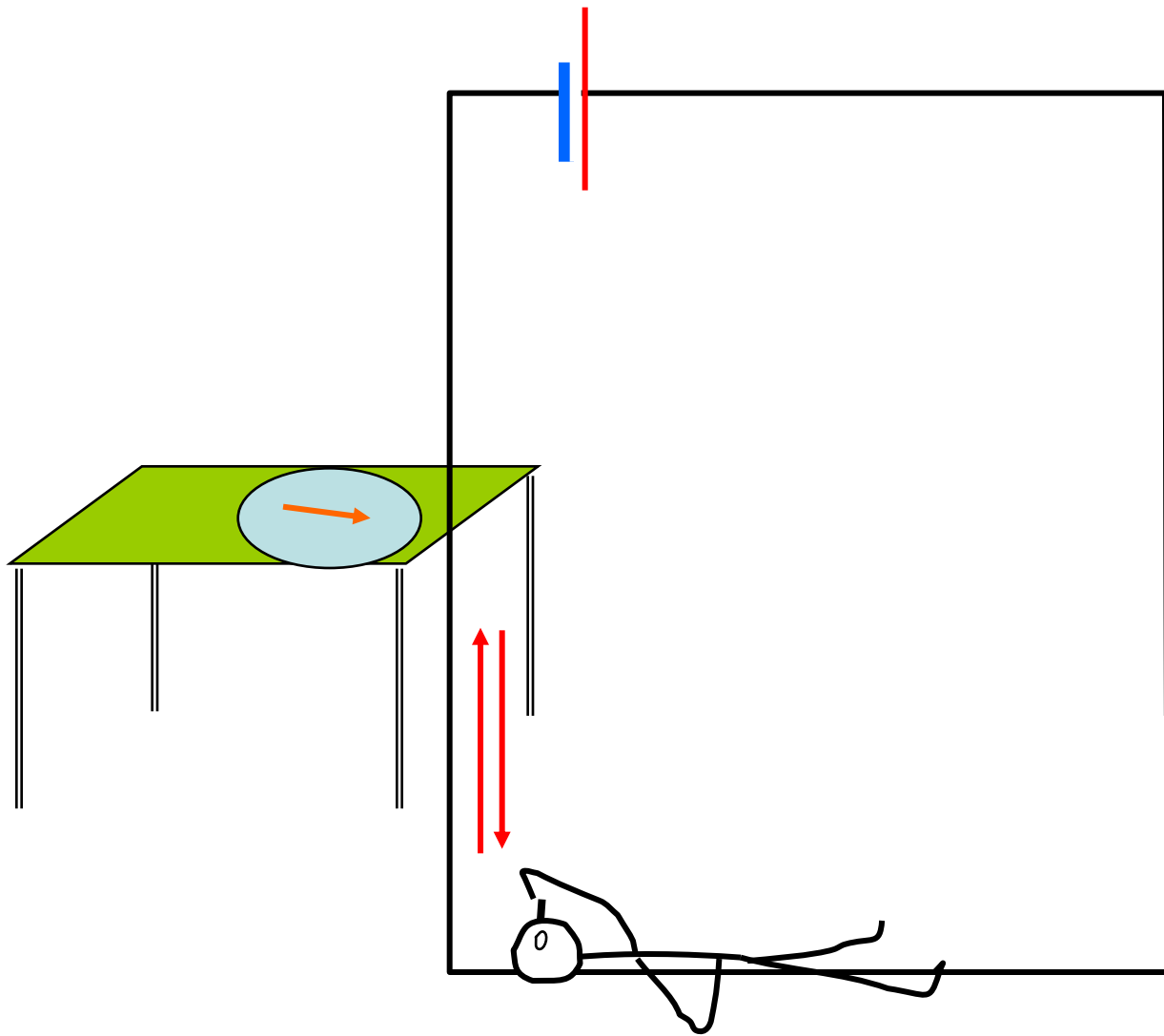
# Тема 5. Магнитное поле движущихся зарядов

- 5.1. Понятие о магнитном поле. Сила Лоренца



Лоренц Хендрик  
(18.VII.1853–4.II.1898)

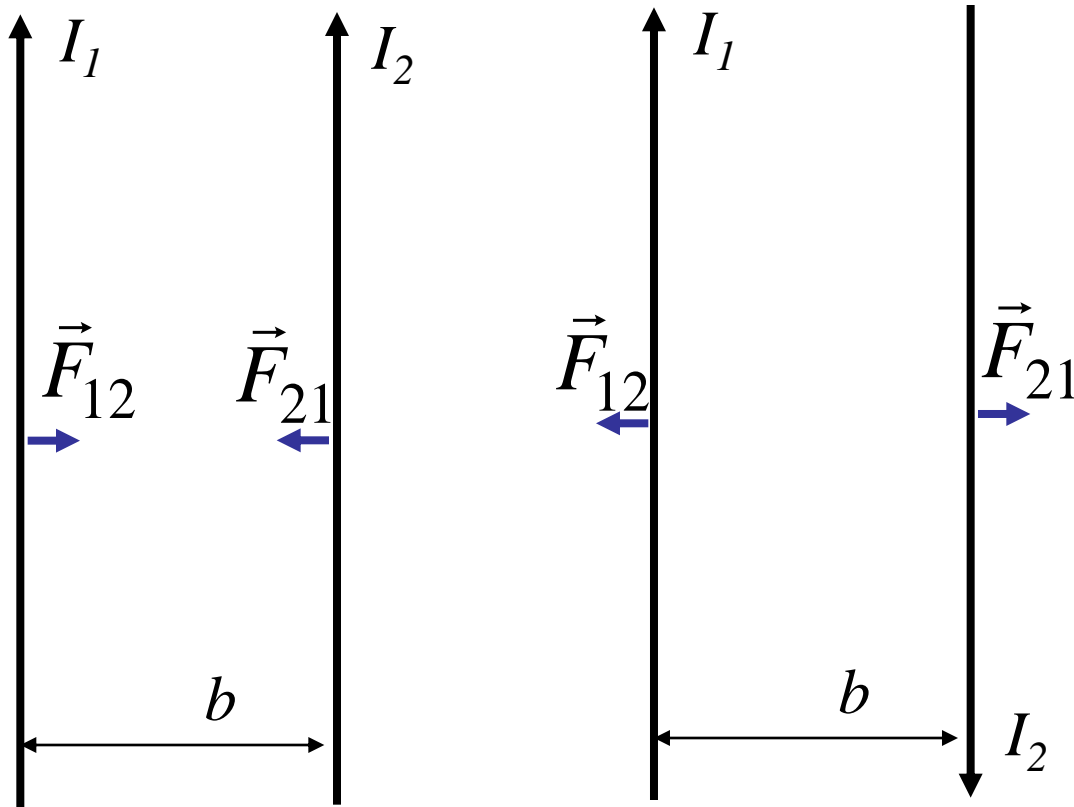
# «Случайные» опыты Эрстеда 1819/1820



**Эрстед Ханс**  
(14.VIII.1777–9.III.1851)

# Магнитное взаимодействие параллельных и антипараллельных токов

## Закон Ампера (1820)



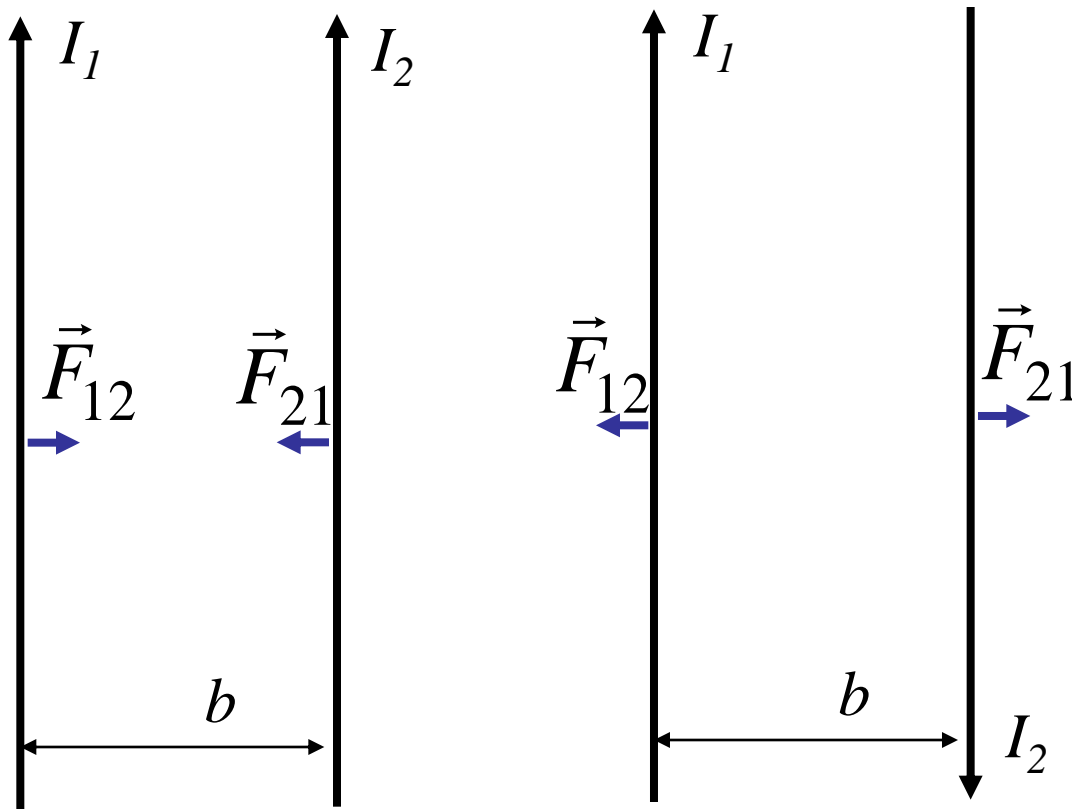
$$F \sim I_1 I_2$$



**Ампер** Андре-Мари  
(22.I.1775–10.VI.1836)

# Магнитное взаимодействие параллельных и антипараллельных токов

## Закон Ампера (1820)

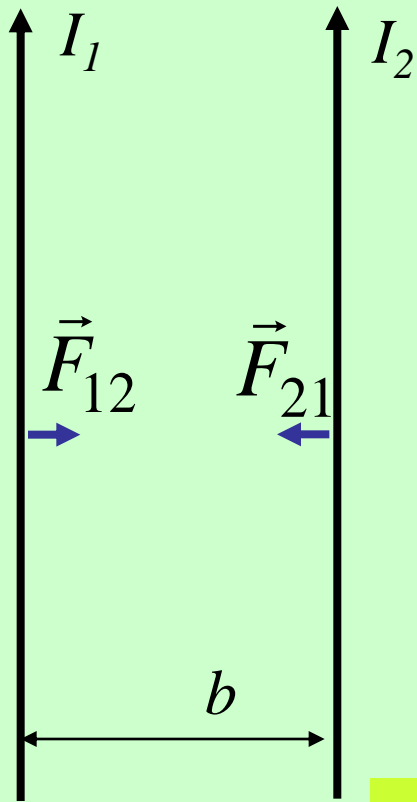


$$F_{\text{ед}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 \cdot I_2}{b}$$

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

Вывод:

Действующая сила  
связана с движением  
зарядов



$$F_{\text{ед}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 \cdot I_2}{b}$$

$$I_2 = js = envs$$

$$F_e = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2I_1 \cdot e n v s \lambda}{b n s \lambda}$$

$$F_e = ev \left( \frac{\mu_0 I_1}{2\pi b} \right)$$

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

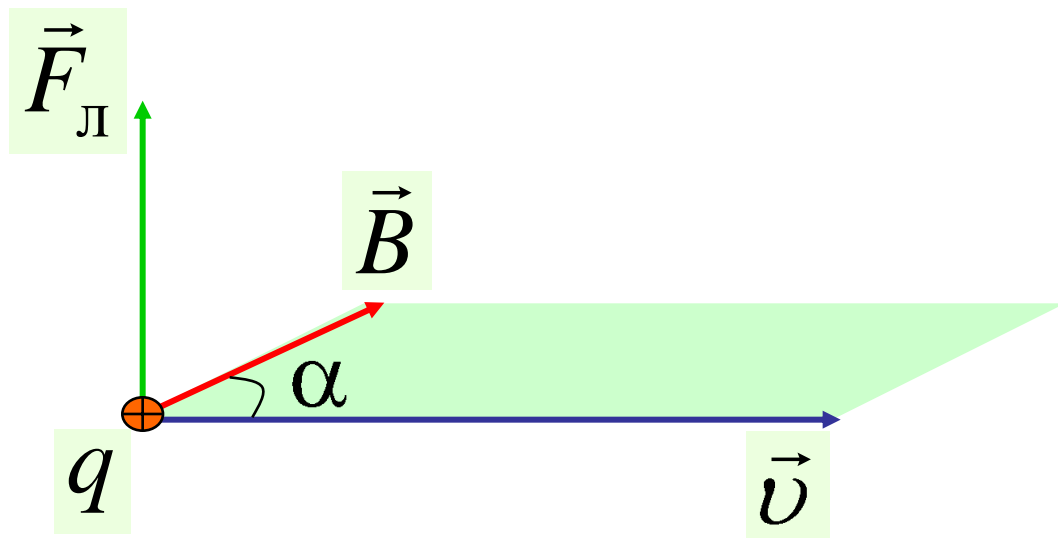
$$F_e = evB$$

# Сила Лоренца

$$\vec{F}_{\text{Л}} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

$B$  – магнитная индукция.

$$[B] = \text{Н} / (\text{Кл}\cdot\text{м}/\text{с}) = \text{Тл}$$



По модулю:

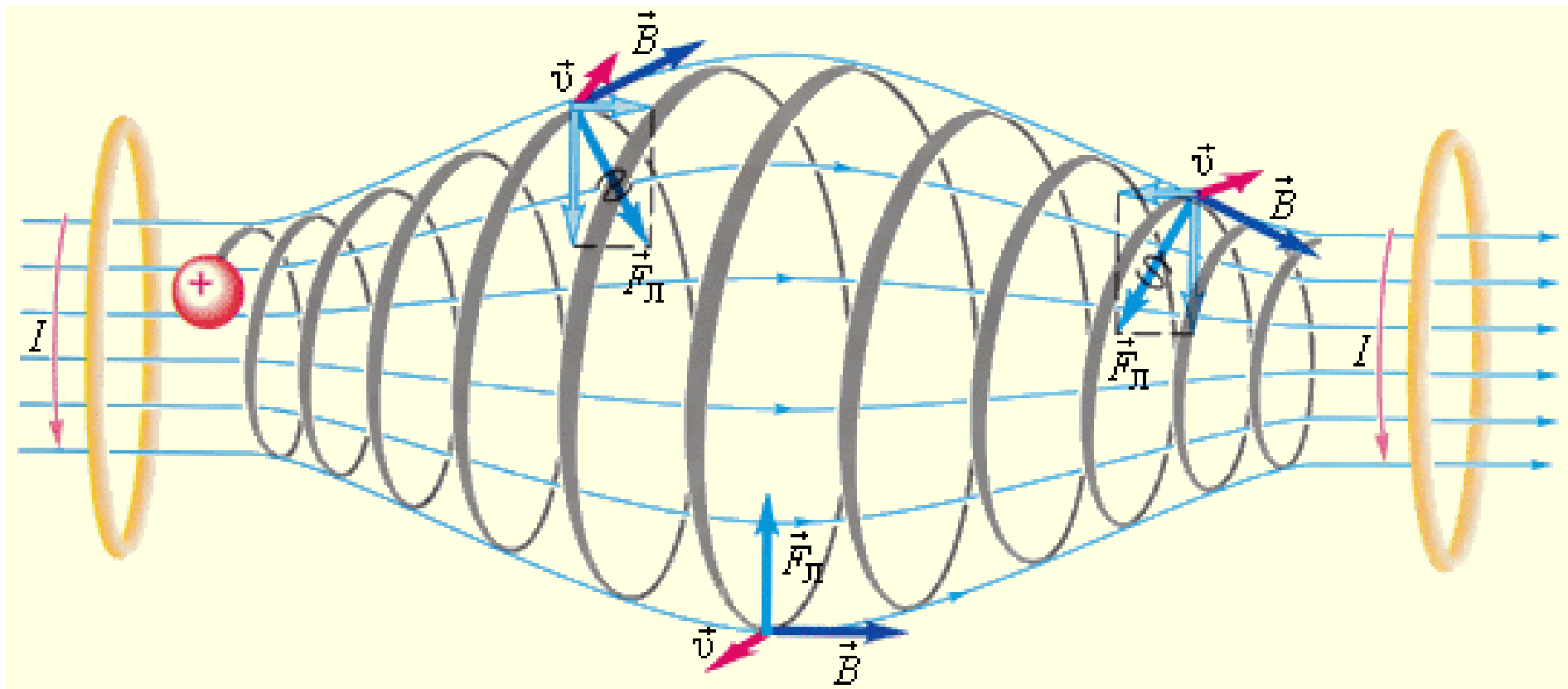
$$F_{\text{Л}} = qvB \sin \alpha$$

# Принцип суперпозиции

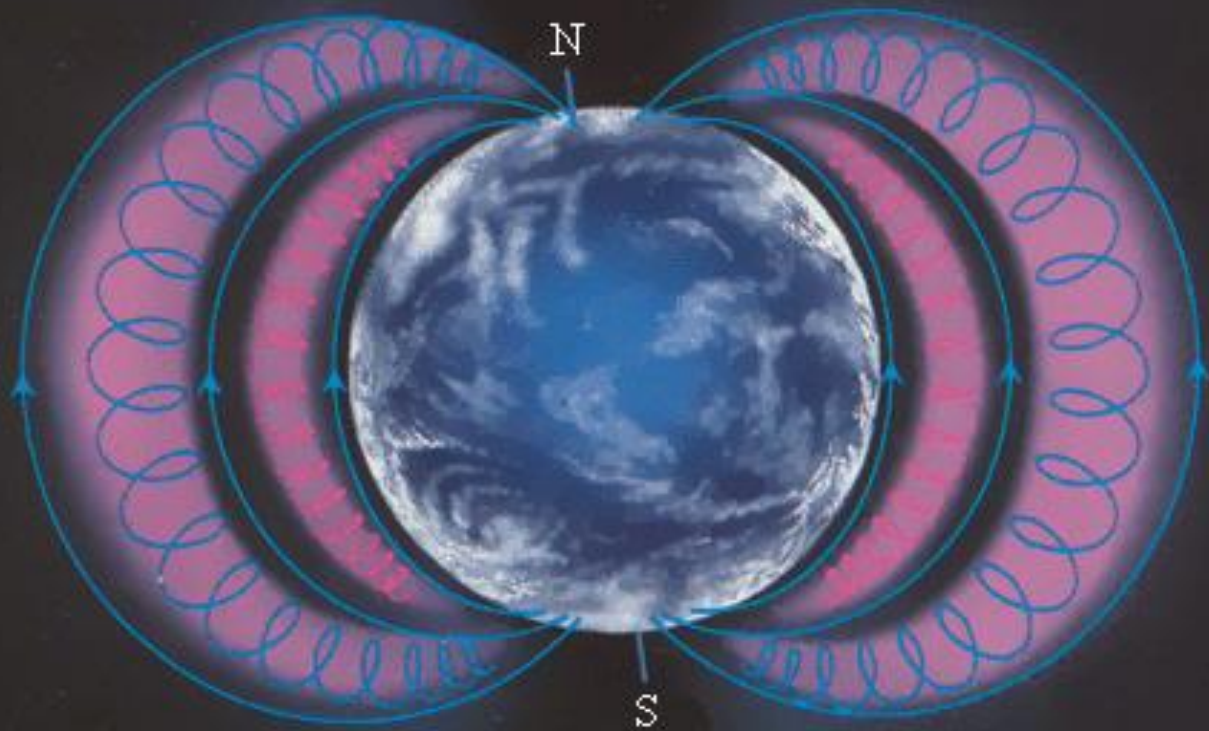
$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i$$



# Магнитная «бутылка».

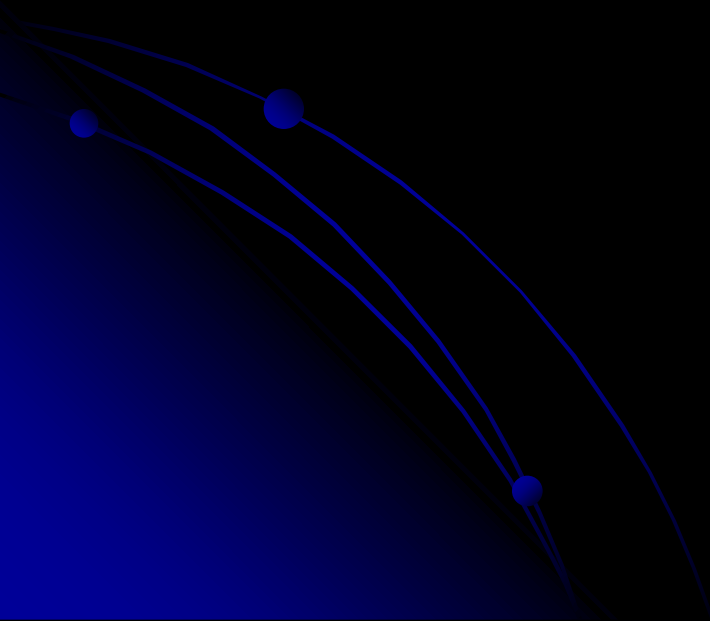


# Радиационные пояса Земли

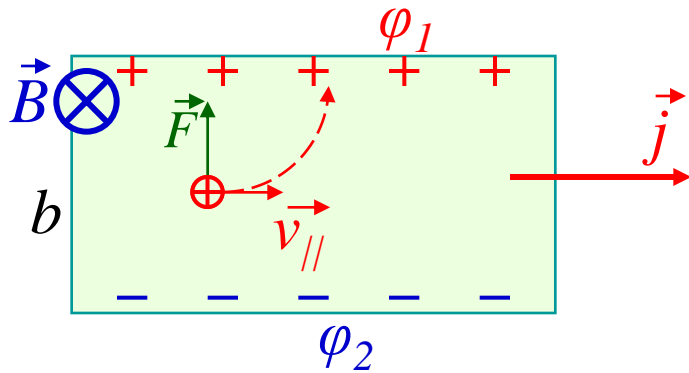


# Тема 5. Магнитное поле движущихся зарядов

- 5.1. Понятие о магнитном поле. Сила Лоренца
- 5.2. Эффект Холла



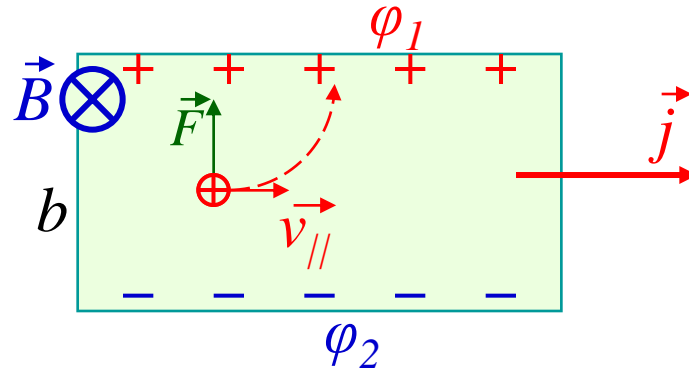
## Эффект Холла



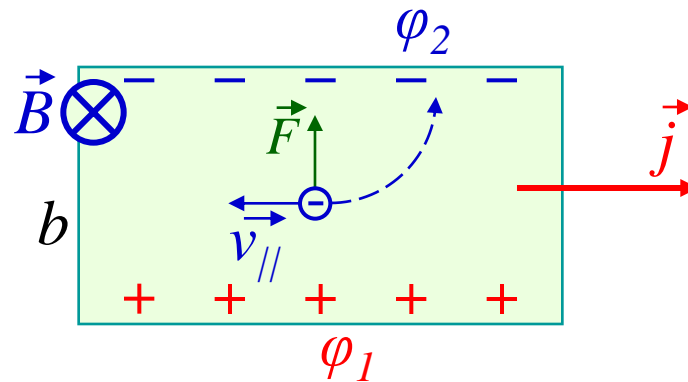
$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2 \equiv U_H = R j B b$$

$R$  – константа Холла

## Положительные носители заряда



## Отрицательные носители заряда



# Тема 5. Магнитное поле движущихся зарядов

- 5.2. Эффект Холла
- 5.3. Электрическое поле движущихся зарядов



Лоренц Хендрик  
(18.VII.1853–4.II.1898)

# Определение $q$ и $m$

$$\vec{F} = k \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2} \vec{e}_{\vec{r}}$$

$$\vec{F} = G \frac{m_1 \cdot m_2}{r^2} \vec{e}_r$$

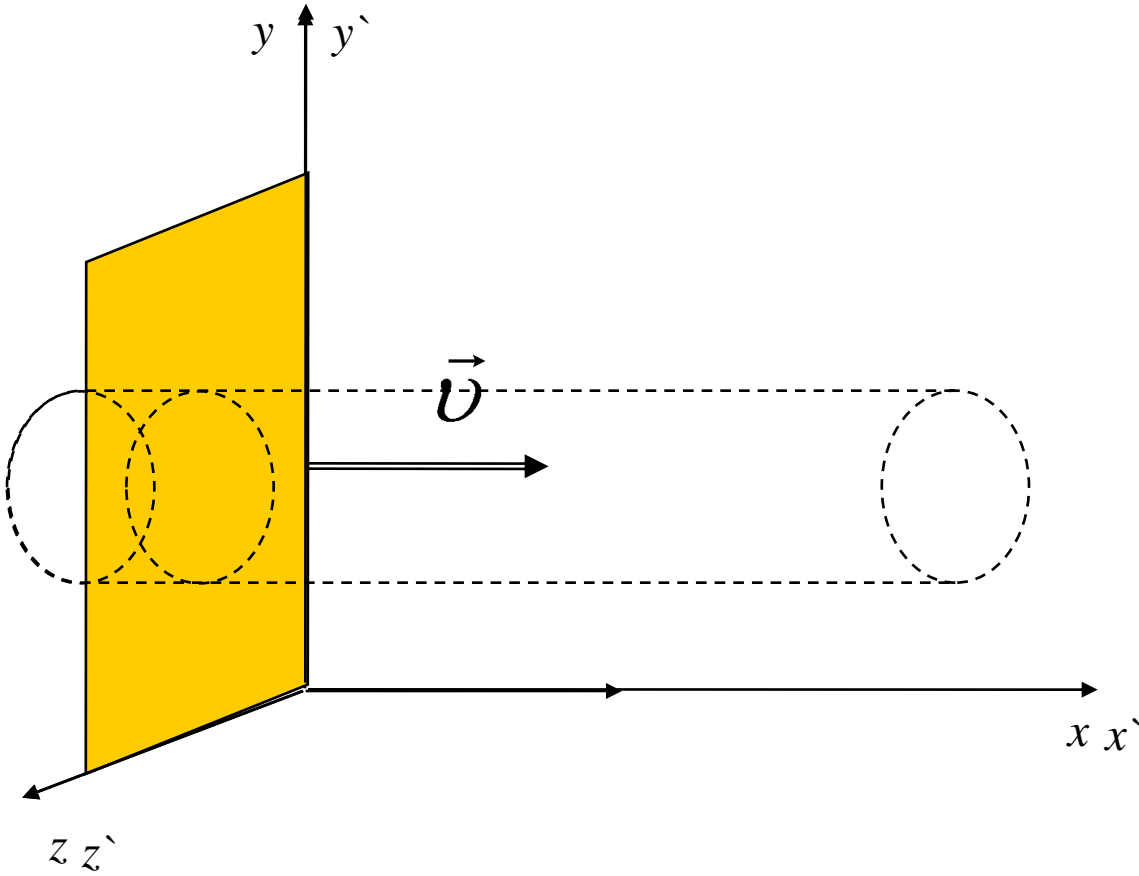
- $q=f(v)$ -?

- $m=f(v)$ -?

$q$  - inv

$$y = y' \quad z = z' \quad s = s'$$

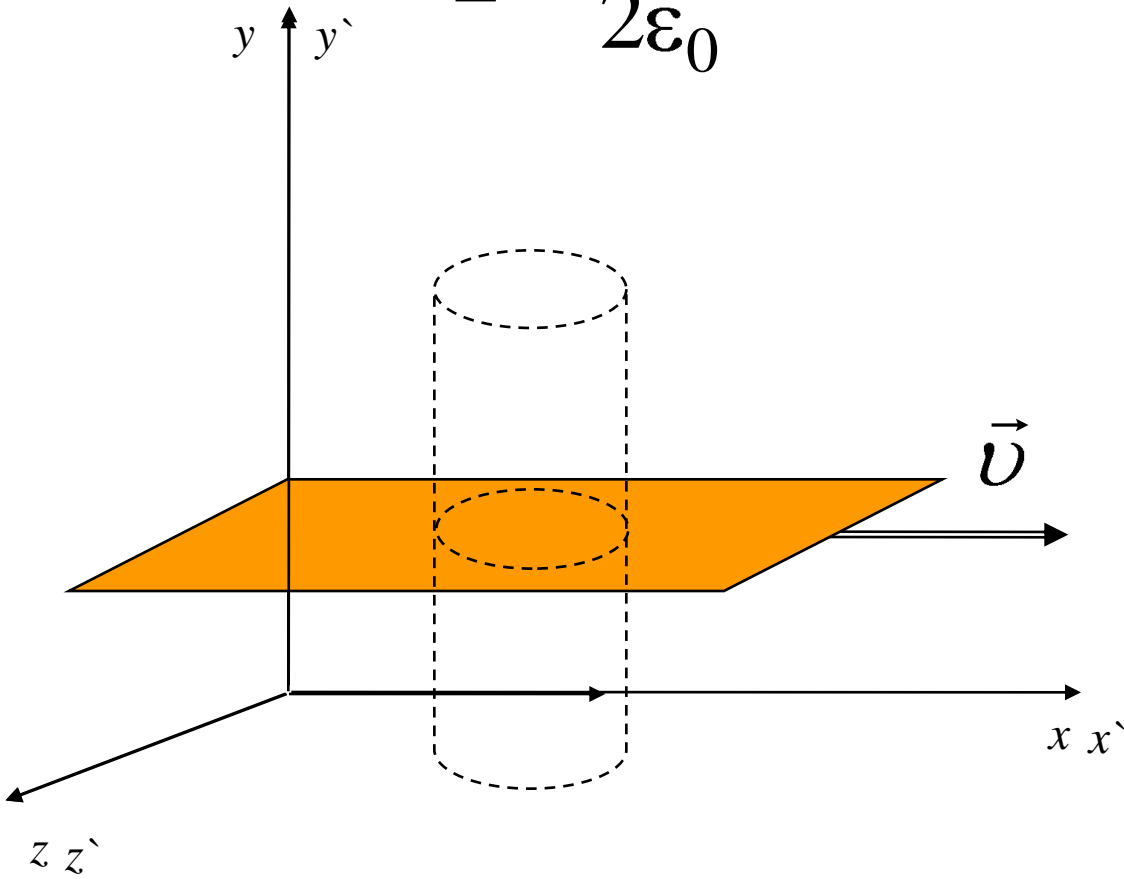
$$\sigma = \sigma'$$



$$E_{\parallel} = E'_{\parallel}$$



$$E'_{\perp} = \frac{\sigma'}{2\epsilon_0}$$



$$s = s' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\sigma = \frac{\sigma'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \sigma'$$

$$E_{\perp} = \gamma E'_{\perp}$$

# ВЫВОД

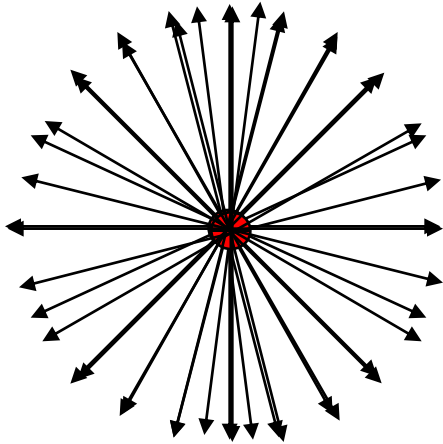
$$E_{\parallel} = E'_{\parallel}$$

$$E_{\perp} = \gamma E'_{\perp}$$

$$\vec{E} \neq i n \omega$$

$$E_{\parallel} = E'_{\parallel}$$

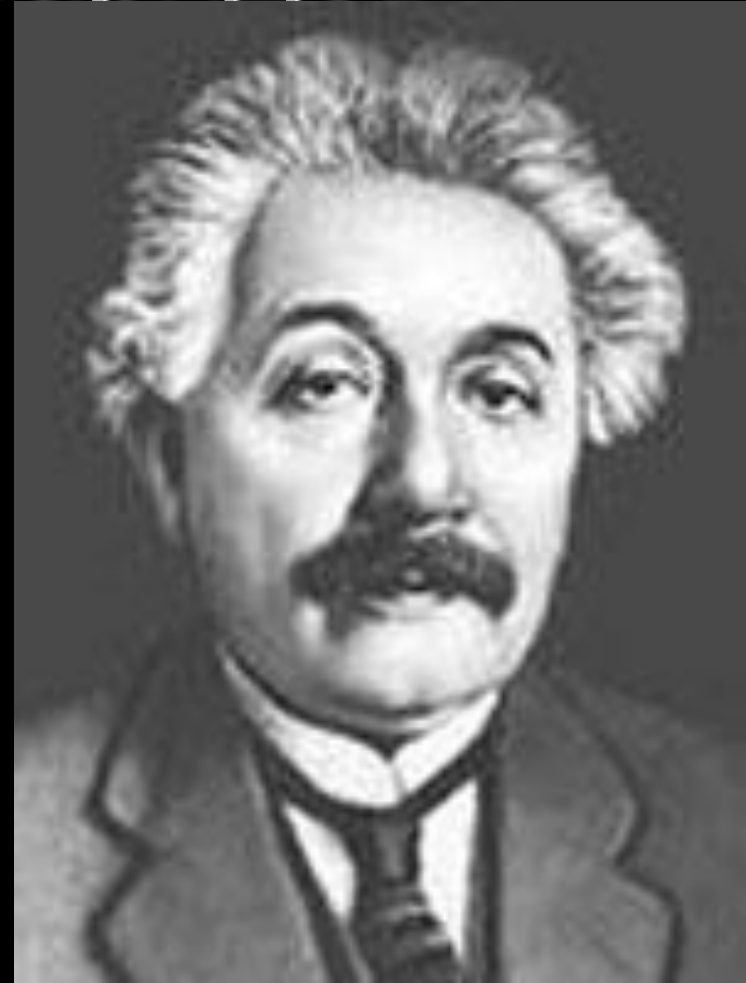
$$E_{\perp} = \gamma E'_{\perp}$$



$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} \neq 0$$

# Тема 5. Магнитное поле движущихся зарядов

- 5.3. Электрическое поле движущихся зарядов
- 5.4. Магнетизм как релятивистский эффект



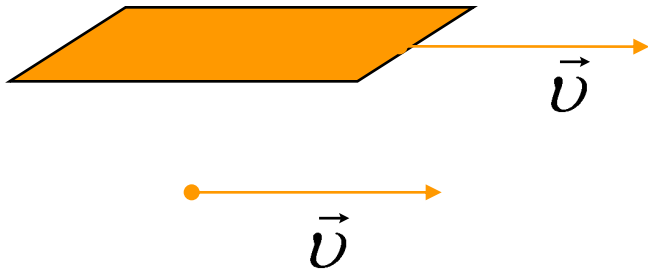
Эйнштейн Альберт (1879–1955)

# Следствия СТО

$$F_{\perp} = \frac{1}{\gamma} F'_{\perp}$$

$$F_{\parallel} = F'_{\parallel}$$

# 1. Движущийся заряд в поле движущейся заряженной пластинки

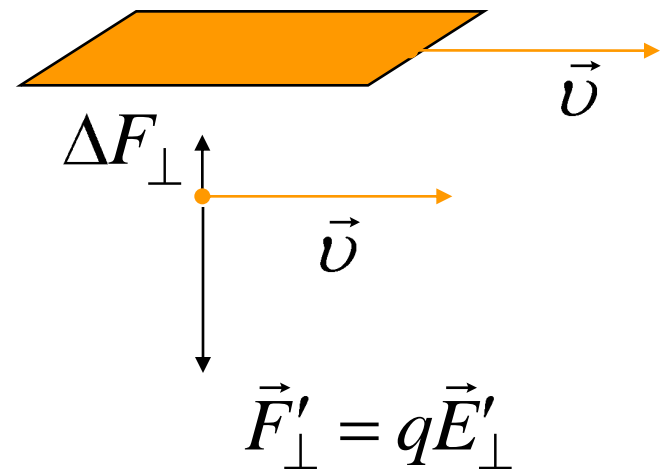


# 1. Движущийся заряд в поле движущейся заряженной пластинки

$$F_{\perp} = \frac{1}{\gamma} F'_{\perp} = \frac{1}{\gamma} q E'_{\perp} = \frac{1}{\gamma} q \frac{1}{\gamma} E_{\perp}$$

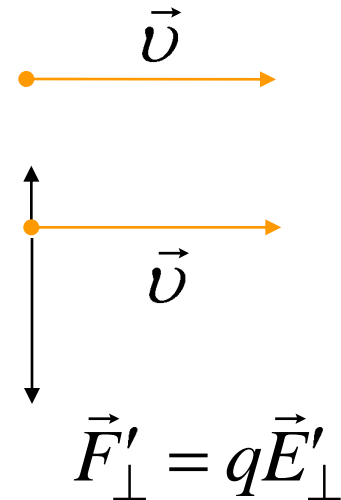
$$\frac{1}{\gamma^2} = 1 - \frac{v^2}{c^2}$$

$$F_{\perp} = qE_{\perp} - qv \left( \frac{v \cdot E_{\perp}}{c^2} \right) \quad (*)$$



## 2. Движущийся заряд в поле движущегося заряда

$$F_{\perp} = qE_{\perp} - qv \left( \frac{v \cdot E_{\perp}}{c^2} \right) \quad (**)$$





Для движущегося заряда в поле движущейся цепочки зарядов

$$F_{\perp} = qE_{\perp} - qv \left( \frac{v \cdot E_{\perp}}{c^2} \right)$$

Для движущегося заряда в поле неподвижной цепочки зарядов противоположного знака

$$F_{\perp} = -qE_{\perp}$$

# Для движущегося заряда в поле провода с током

$$F_{\perp} = -qv \left( \frac{v \cdot E_{\perp}}{c^2} \right)$$

# Выводы:

1. Т.к.

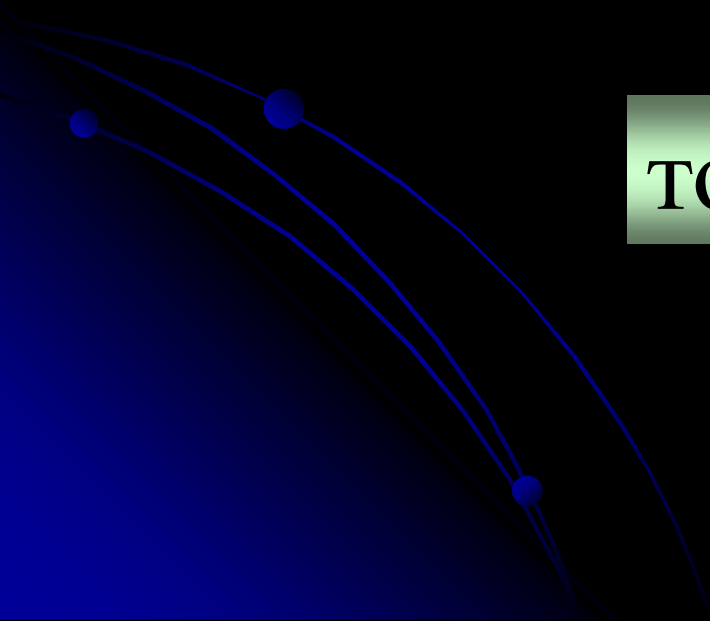
$$\Delta \vec{F} \perp \vec{v}$$

и

$$\Delta F = qv \left( \frac{v \cdot E_{\perp}}{c^2} \right)$$

то

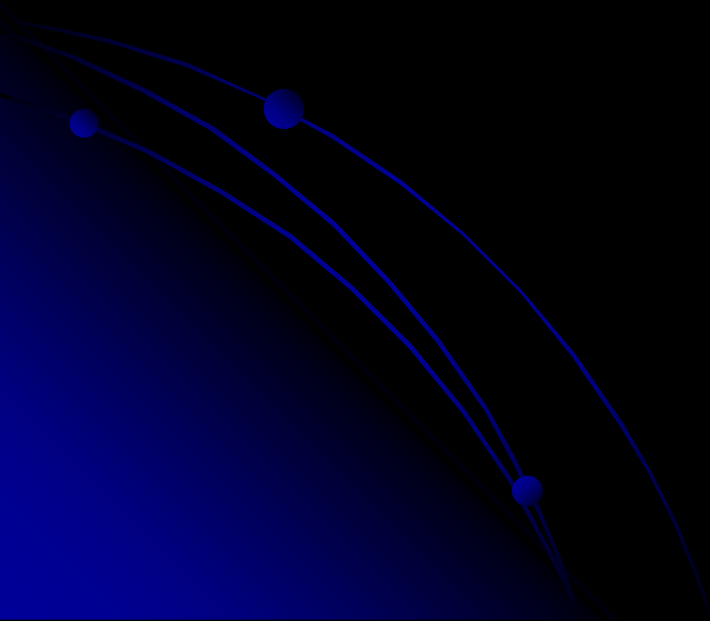
$$\vec{B} = \frac{\vec{v} \times \vec{E}_{\perp}}{c^2}$$



2. Т.к.

$$\vec{E} = \sum \vec{E}_i, \text{ то}$$

$$\vec{B} = \sum \vec{B}_i$$



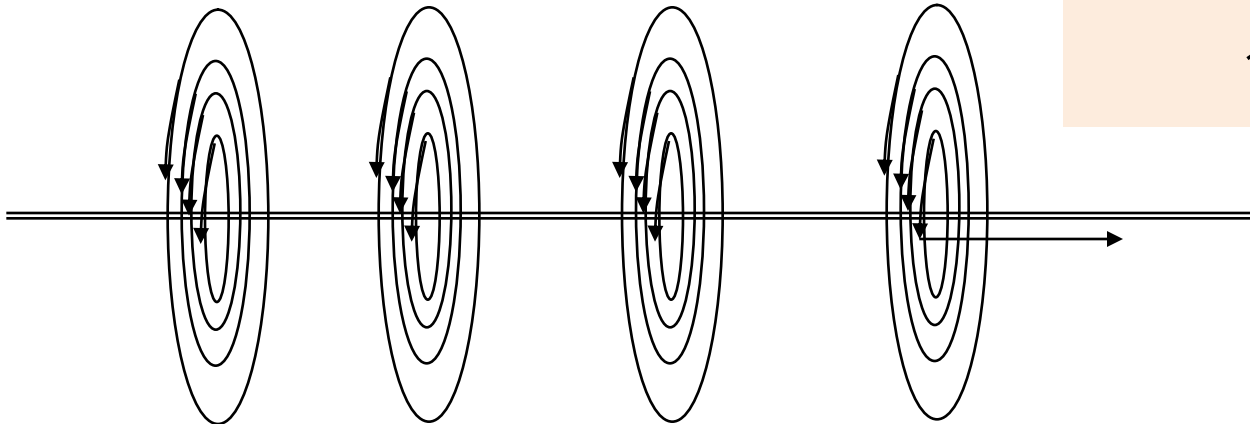
# Следствия:

- 1. Поле прямого провода

$$B = \frac{vE_{\perp}}{c^2} = \frac{v\pi}{2\pi\epsilon_0 c^2 r} = \frac{I}{2\pi\epsilon_0 c^2 r}$$

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

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

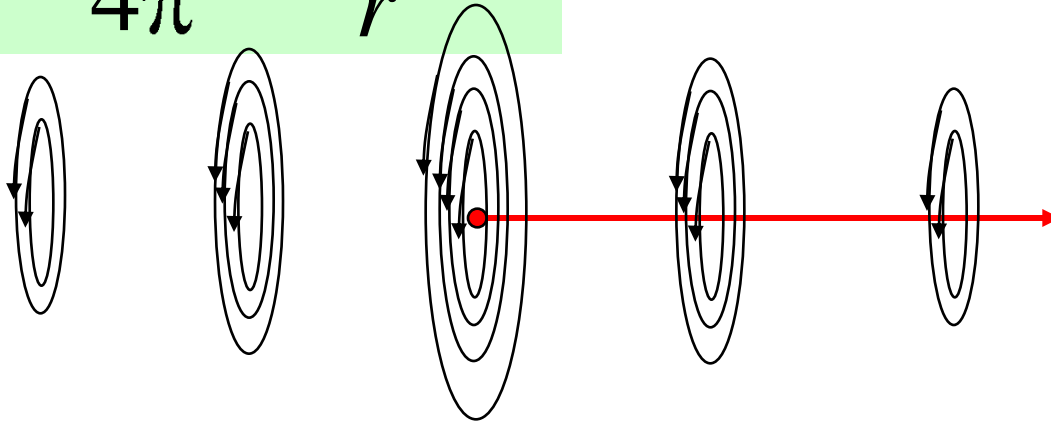


# Следствия:

- 2. Поле точечного заряда

$$\vec{B} = \frac{\vec{v} \times \vec{E}_{\perp}}{c^2} = \frac{q\vec{v} \times \vec{e}_r}{4\pi\epsilon_0 c^2 r^2} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\vec{v} \times \vec{e}_r}{r^2}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{q\vec{v} \times \vec{e}_r}{r^2}$$

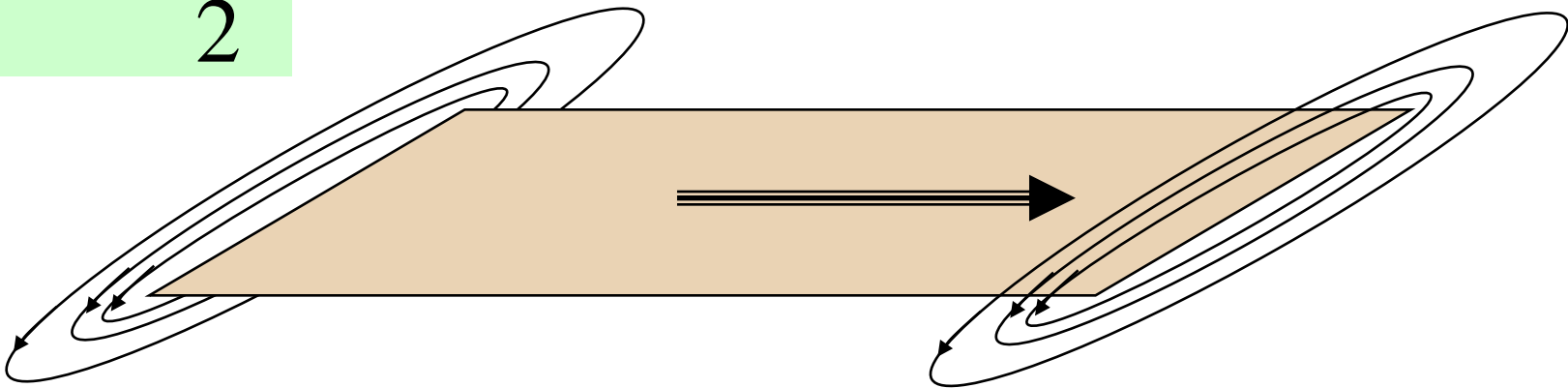


# Следствия:

- 3. Поле пластины с током

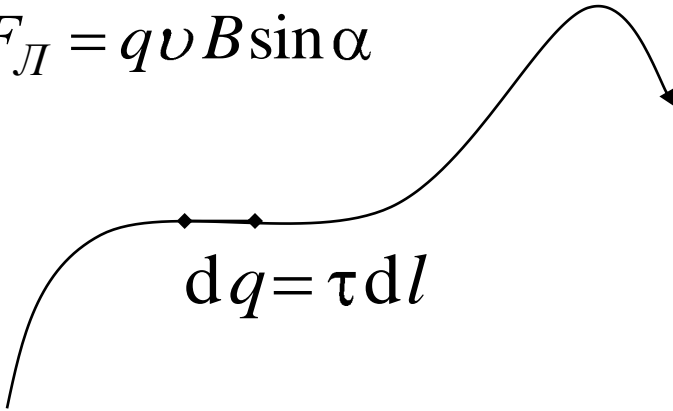
$$B = \frac{vE_{\perp}}{c^2} = \frac{v\sigma}{2\varepsilon_0 c^2}$$

$$B = \frac{\mu_0 i}{2}$$



# Сила Ампера

$$F_{Л} = qvB \sin \alpha$$



В общем случае:

$$d\vec{F}_A = I d\vec{l} \times \vec{B}$$



# Тема 5. Магнитное поле движущихся зарядов

- 5.4. Магнетизм как релятивистский эффект
- 5.5. Электромагнитное поле



Лоренц Хендрик  
(18.VII.1853–4.II.1898)

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

- 1. Операционное определение полей
- 2. Критерий различия полей
- 3. При смене ИСО формула инвариантна

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

$$E_x = E'_x$$

$$E_y = \gamma \left( E'_y + V \cdot B'_z \right)$$

$$E_z = \gamma \left( E'_z + V \cdot (-B'_y) \right)$$

$$B_x = B'_x$$

$$(-B_y) = \gamma \left( (-B'_y) + \frac{1}{c^2} V E'_z \right)$$

$$B_z = \gamma \left( B'_z + \frac{1}{c^2} V E'_y \right)$$

# Инварианты ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

$$I_1 = E^2 - c^2 B^2$$

$$I_2 = \vec{E} \cdot \vec{B}$$

# Следствия:

- 1. Если  $I_2 = 0$ , то

Во всех ИСО поля  $E$  и  $B$

взаимноперпендикулярны

- 2. Если  $I_1 = 0$ , то

Во всех ИСО  $E = cB$

- 3. Если  $I_1 = 0$  и  $I_2 = 0$ , то

Поля  $E$  и  $B$  равноправны