

**ОБЩАЯ ФИЗИКА**  
**ЛЕКЦИИ №15-16**

**ЗАКОНЫ ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМА**  
**ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**  
**НА ПРОВОДНИКИ И**  
**ЗАРЯЖЕННЫЕ ЧАСТИЦЫ**

- Закон Ампера
- Взаимодействие параллельных токов
- Действие магнитного поля на контур с током
- Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле
- Принцип действия электроизмерительных приборов
- Действие магнитного поля на заряженные частицы. Сила Лоренца
- Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле
- Ускорители заряженных частиц
- Законы магнитных цепей. Формула Гопкинсона

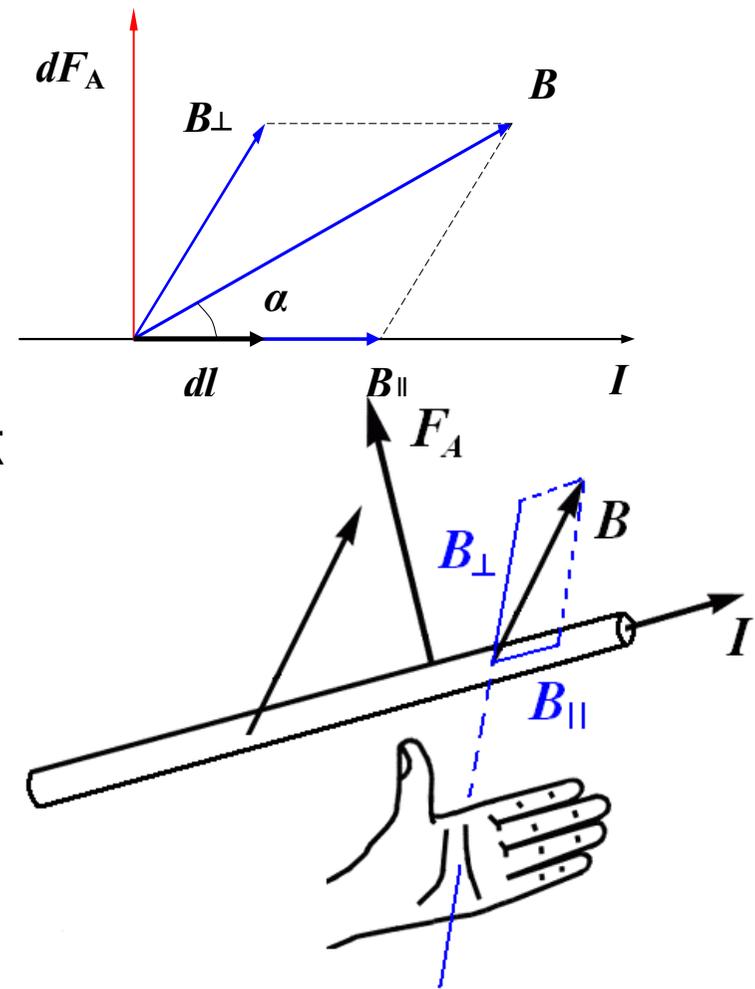
# Закон Ампера

Сила Ампера, действующая в магнитном поле на проводник с током конечной длины:

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

Если поле однородное, а проводник – прямой:

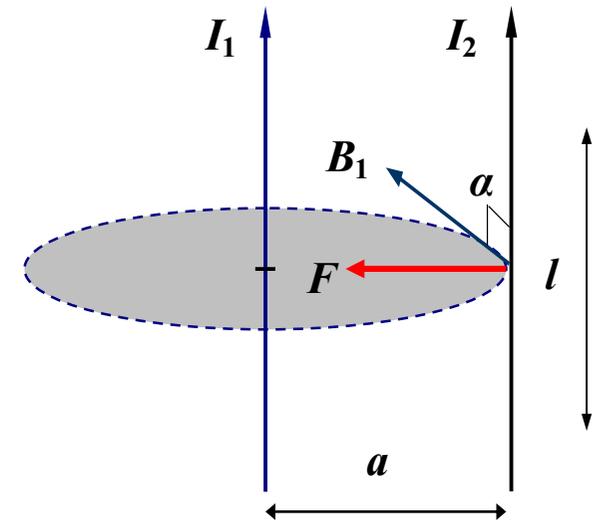
$$F_A = IBl \sin \alpha$$



# Взаимодействие параллельных токов

Параллельные токи одного направления притягиваются, противоположного отталкиваются.

$$\left. \begin{array}{l} B_1 = \frac{\mu\mu_0}{4\pi a} 2I_1 \\ \alpha = 90^\circ, \\ F = I_2 B_1 l \end{array} \right\} \left. \begin{array}{l} F = \frac{\mu\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I_1 I_2}{a} \cdot l, \\ I_1 = I_2 = I, \quad \mu = 1. \end{array} \right\} F = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2I^2}{a} l$$



**Основная электрическая единица СИ – Ампер. 1 Ампер (А) –** это сила такого постоянного тока, при прохождении которого по двум прямолинейным бесконечно длинным проводникам, находящихся в вакууме на расстоянии 1 метр друг от друга, сила их взаимодействия составляет  $2 \cdot 10^{-7}$  Н на каждый метр длины.

# Действие магнитного поля на контур с током

- Прямолинейный контур в магнитном поле

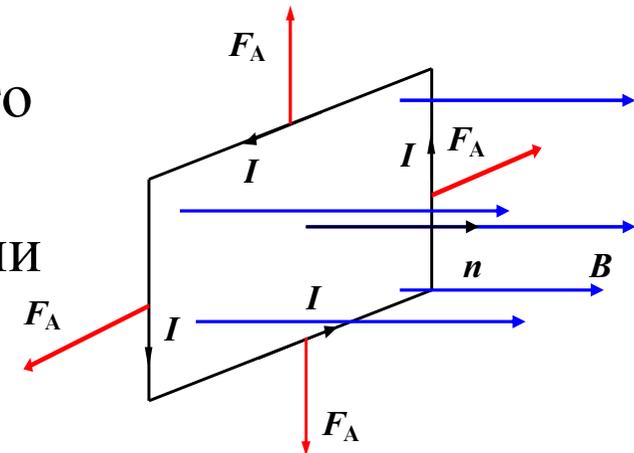
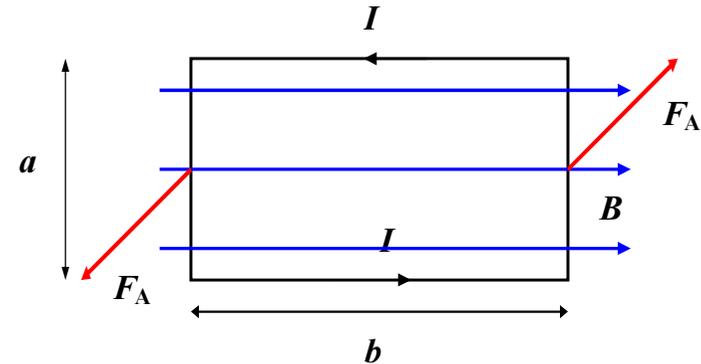
$$F_A = I a B \sin \alpha,$$

$$\alpha = 90^\circ.$$

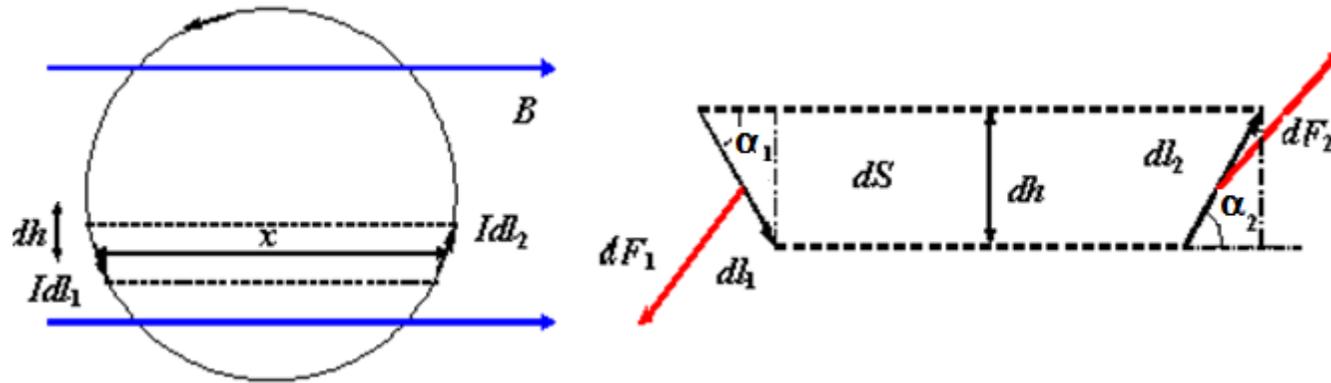
$$M = F_A \cdot b = I a b B = I S B = p_m B.$$

$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}].$$

Контур поворачивается таким образом, что его положительная нормаль  $\mathbf{n}$  совпадает с вектором  $\mathbf{B}$  и останавливается в положении равновесия. Тогда вращающий момент равен нулю.



● **Контур произвольной формы**



$$d\vec{F}_1 = I [d\vec{l}_1, \vec{B}], \quad dF_1 = Idl_1 B \sin \alpha_1 = IBdh.$$

$$d\vec{F}_2 = I [d\vec{l}_2, \vec{B}], \quad dF_2 = Idl_2 B \sin \alpha_2 = IBdh.$$

На элемент контура действует пара сил:

$$dM = dF \cdot x = IBdh \cdot x = IBdS, \quad M = \int_S IBdS = p_m B, \quad \vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}].$$

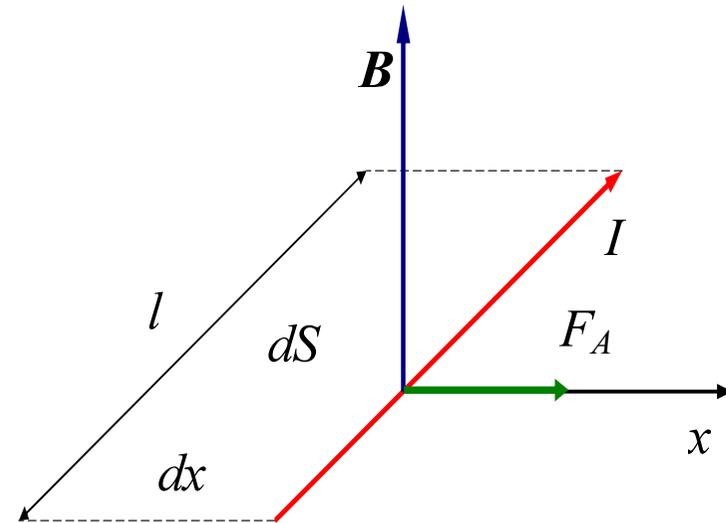
# Работа по перемещению проводника с ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ

На проводник с током  $I$  в магнитном поле с индукцией  $B$  действует сила Ампера. При перемещении проводника под действием этой силы на расстояние  $dx$  совершается работа:

$$dA = F_A dx = IB \underbrace{l dx}_{dS} = I \underbrace{B dS}_{d\Phi} = Id\Phi.$$

- Если  $I = \text{const}$ :  $A = I \cdot \Delta\Phi$ .
- Если  $B = \text{const}$ :

$$A = \int_S Id\Phi.$$

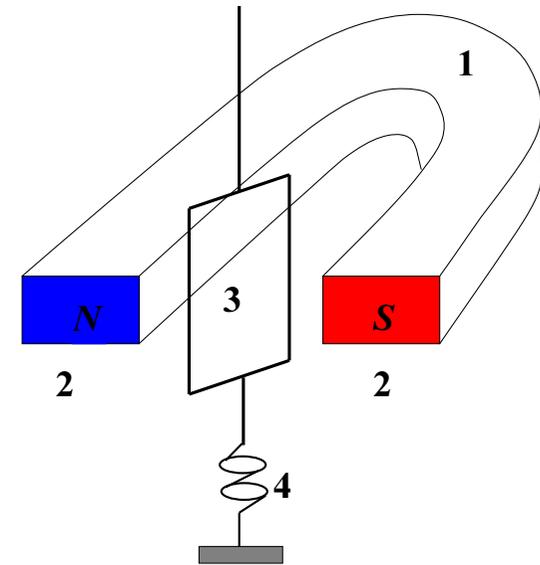


# Принцип действия электроизмерительных приборов

В зависимости от того, каким образом в приборах создается магнитное поле, они делятся на:

- *магнитоэлектрические*
- *электродинамические*

- 1 – магнит,  
2 – полюсные наконечники, магнитная индукция между ними  $B$ ,  
3 – рамка с током  $I$ , содержащая  $N$  витков, площадь рамки  $S$ ,  
4 – возвращающий механизм.



$$\Phi = \underbrace{\alpha SBN}_{\beta} I = \beta I,$$



# Действие магнитного поля на заряженные частицы. Сила Лоренца

$$\left. \begin{array}{l} I = jS \\ j = qn\upsilon \\ \vec{\upsilon} \uparrow \uparrow d\vec{l} \end{array} \right\} Idl = jSdl = qn\upsilon Sdl.$$

$$\Rightarrow d\vec{F} = \left[ \underbrace{Id\vec{l}}_{(6)}, \vec{B} \right] = \left[ qn\upsilon Sdl, \vec{B} \right] = q \underbrace{nsdl}_{\substack{dV \\ dN}} \left[ \vec{\upsilon}, \vec{B} \right]$$

$$\vec{F}_L = \frac{dF}{dN} = q \left[ \vec{\upsilon}, \vec{B} \right].$$

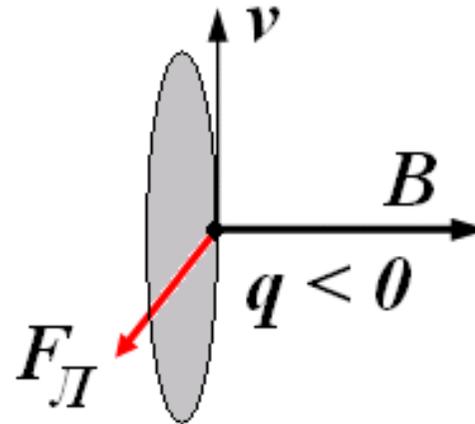
$$F_L = |q| \upsilon B \sin \alpha.$$

# Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

•  $\alpha = 0^\circ$   $\vec{F}_L = q[\vec{v} \cdot \vec{B}] = 0$ . Траектория движения – прямая линия.

•  $\alpha = 90^\circ$   $F_L = qvB = ma_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow qB = \frac{mv}{R}; v = \frac{qBR}{m}$ .

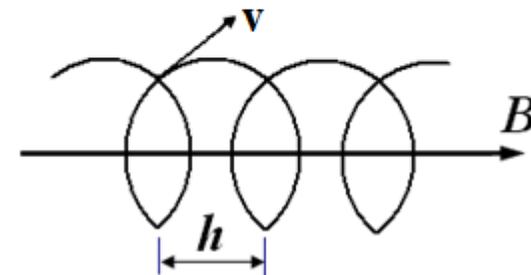
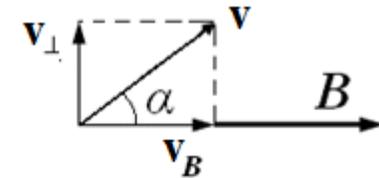
$$T = 2\pi \left| \frac{m}{q} \right| \cdot \frac{1}{B}$$



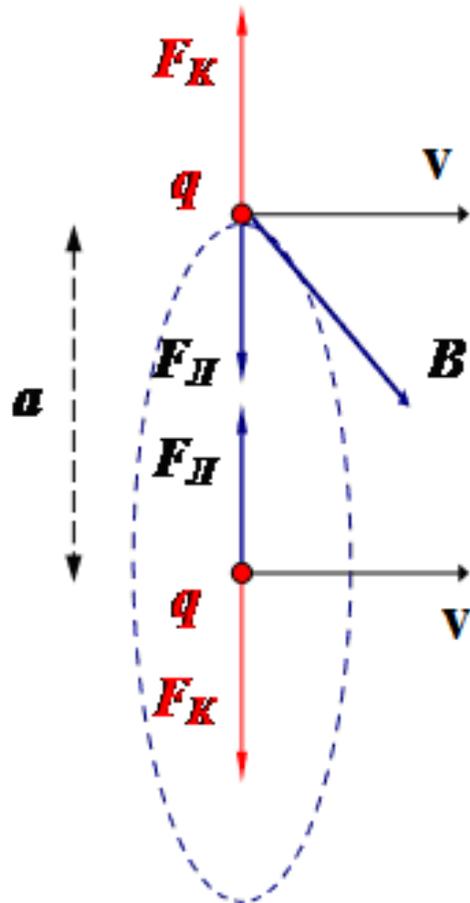
•  $0^\circ < \alpha < 90^\circ$

$$T = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha} = \frac{2\pi R \cdot m}{qBR} = 2\pi \left| \frac{m}{q} \right| \frac{1}{B}$$

$$h = v_B T = \frac{2\pi}{B} \left| \frac{m}{q} \right| v \cos \alpha$$



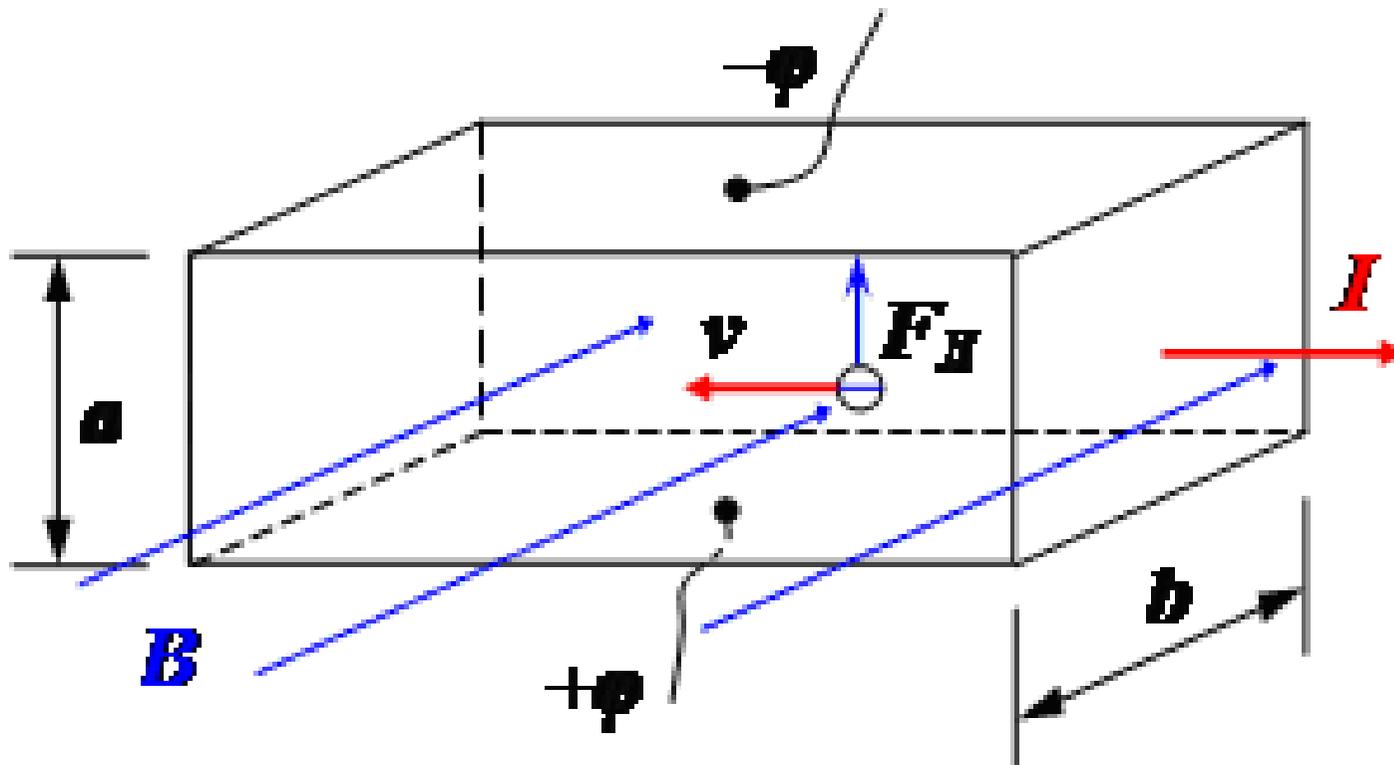
# Магнитные силы – релятивистская добавка к кулоновским силам



$$\frac{F_{II}}{F_K} = \epsilon_0 \mu_0 v^2 = \frac{v^2}{c^2}$$

$$\epsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ vs } \frac{1}{9 \cdot 10^{16} \frac{\text{m}^2}{\text{s}^2}}$$

# Эффект Холла



$$\Delta\phi = R_H \frac{IB}{b}.$$

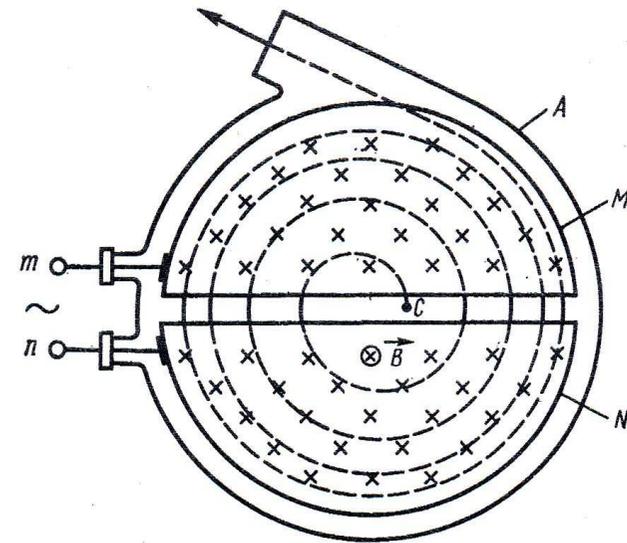
# Ускорители заряженных частиц

Это – устройства, предназначенные для получения заряженных частиц с очень большой кинетической энергией.

Для ускорения протонов, дейтронов и других тяжелых заряженных частиц используются резонансные циклические ускорители, в которых частица многократно проходит через переменное электрическое поле синхронно с его изменением.

Управление движением заряженных частиц и периодическое их возвращение в область, где действует электрическое поле, осуществляется поперечным магнитным полем.

*Принцип автофазировки.* Поскольку периоды несколько отличаются, то добиваются равенства средних значений периодов.

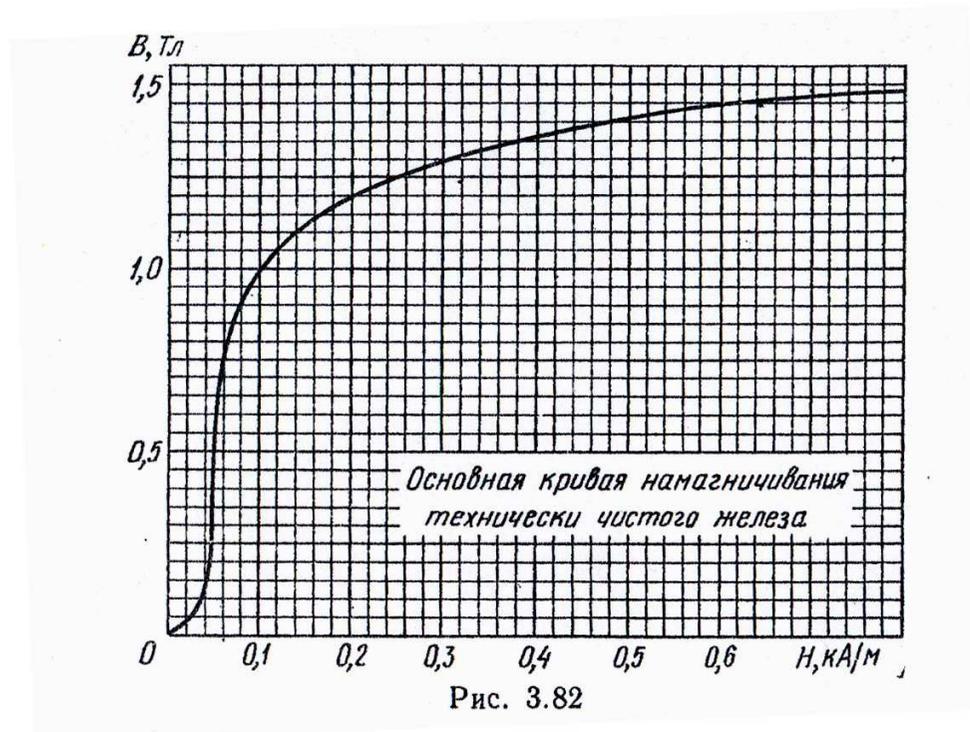


# Виды ускорителей

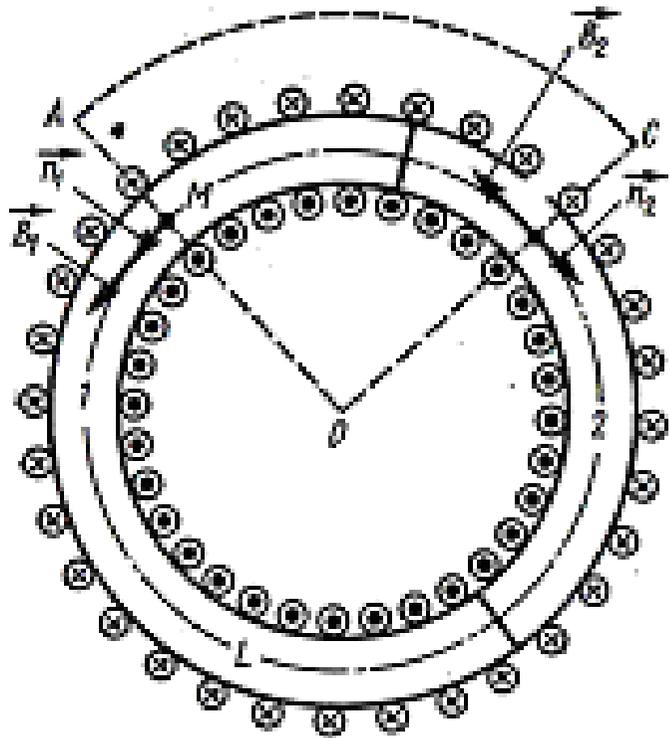
- 1. Микротрон – 30 МэВ
- 2. Линейный ускоритель- 800 МэВ (США)
- 3. Циклотрон- 50 МэВ
- 4. Фазотрон- 1 ГэВ (Петербург)
- 5. Синхротрон-5-10 ГэВ.
- 6. Синхрофазотон - 76 ГэВ (Серпухов); 500 ГэВ (Батавия-США)
- 7. Коллайдеры – БАК (14 ТэВ)

# Законы магнитных цепей. Формула Гопкинсона

Совокупность областей пространства, в которых локализовано магнитное поле, называют магнитной цепью. Для усиления магнитных полей используют материалы с большими значениями магнитной проницаемости. Обычно – железо.



# Магнитное поле тороида



- Сердечник тороида состоит из двух частей с различными магнитными проницаемостями

$$\Phi_1 = \int_{S_1} B_n dS.$$

$$\Phi_1 + \Phi_2 = 0 \quad \Phi_1 = -\Phi_2.$$

$$\Phi_2 = \int_{S_2} B_n dS.$$

$$\Phi_1 = \int_{S_1} B_n dS = \int_{S_1} B_1 dS = B_1 S_1.$$

$$\Phi_2 = \int_{S_2} B_n dS = -\int_{S_2} B_2 dS = -B_2 S_2.$$

$$H_1 = \frac{B}{\mu_1 \mu_0} \quad H_2 = \frac{B}{\mu_2 \mu_0}.$$

$$B_1 = B_2 = B$$

$$\int_L \vec{H} d\vec{l} = H dl \cos(H \cdot dl) = \int_{l_1} H_1 dl + \int_{l_2} H_2 dl = H_1 l_1 + H_2 l_2,$$

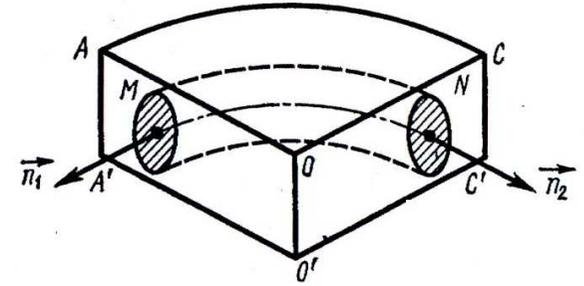
$$H \cos(\vec{H} \cdot d\vec{l}) = H. \quad H_1 l_1 + H_2 l_2 = IN, \quad \frac{Bl_1}{\mu_1 \mu_0} + \frac{Bl_2}{\mu_2 \mu_0} = IN.$$

$$B = \frac{IN}{(l_1 / \mu_1 \mu_0) + (l_2 / \mu_2 \mu_0)}.$$

$$\Phi = \frac{IN}{(l_1 / \mu_1 \mu_0 S) + (l_2 / \mu_2 \mu_0 S)}.$$

$$\epsilon_m = l_1 / \mu_1 \mu_0 S + l_2 / \mu_2 \mu_0 S$$

$$\Phi = \frac{\epsilon_m}{R_m}.$$



- Большой Адронный Коллайдер (БАК)

В БАК (Большом Адронном Коллайдере) два протона ( $m_0c^2 = 1$  ГэВ) движутся навстречу друг другу с одинаковыми кинетическими энергиями  $T = 7$  ТэВ (в  $S$ -системе отсчета). Чему равна кинетическая энергия  $T'$  одного протона, необходимая для достижения такого же эффекта (в плане превращения частиц), в ускорителях с неподвижной мишенью ( $S'$ -системе отсчета, где другой протон покоится)?

Решение. Воспользуемся инвариантностью величины  $E^2 - p^2c^2 = E_0^2$  и формулой  $p = \frac{1}{c} \sqrt{T(T + 2m_0c^2)}$  записав ее в  $S$ -системе (она является одновременно и  $\Sigma$  - системой), а также в  $S'$ -системе.

$$[2(T + m_0c^2)]^2 = (T' + 2m_0c^2)^2 - T'(T' + 2m_0c^2),$$

где  $m_0$  ? масса покоя протона. Отсюда

$$T' = \frac{2T(T + m_0c^2)}{m_0c^2}.$$

Так как  $T \gg m_0c^2$ , имеем  $T' \approx \frac{2T^2}{m_0c^2} \approx \frac{2 \cdot 49 \cdot 10^{24}}{10^9} \approx 10^5$  ТэВ.