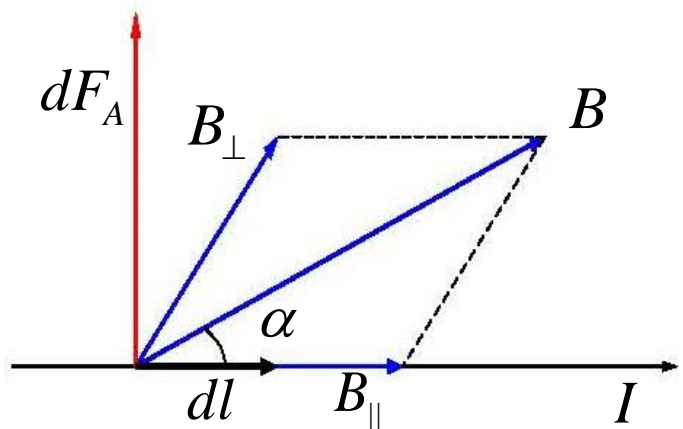


**Действие магнитного поля на проводники с  
током в магнитном поле.  
Сила Ампера**

## Действие магнитного поля на проводники.



Сила с которой магнитное поле действует на бесконечно малый проводник с током  $I$ .

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

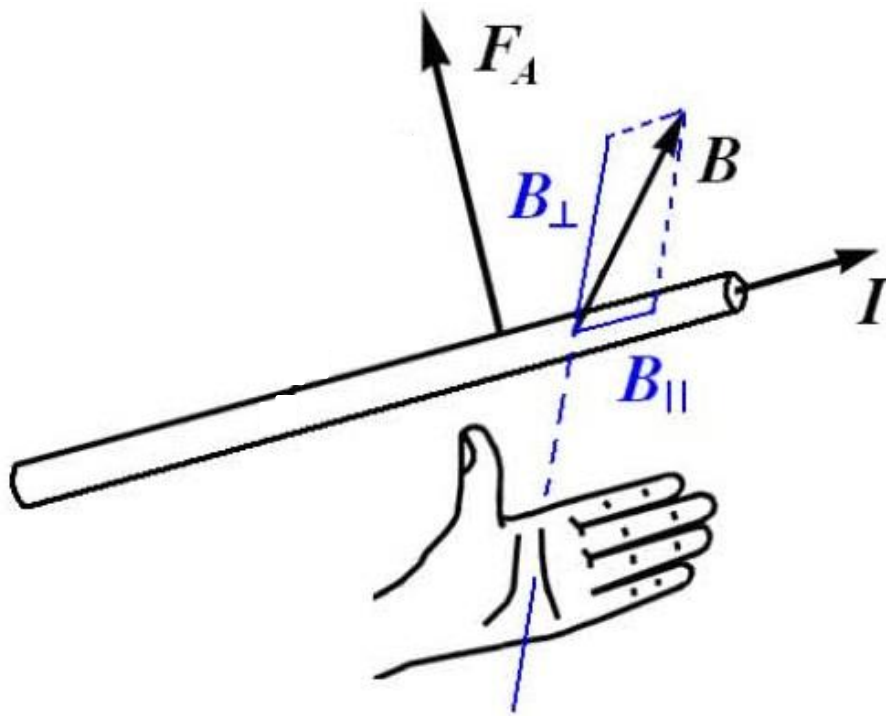
- Закон Ампера

Сила Ампера действующая на проводник с током конечной длины:

$$\vec{F}_A = \int_l I [d\vec{l}, \vec{B}] \quad \text{если поле однородное } (B = \text{const}),$$

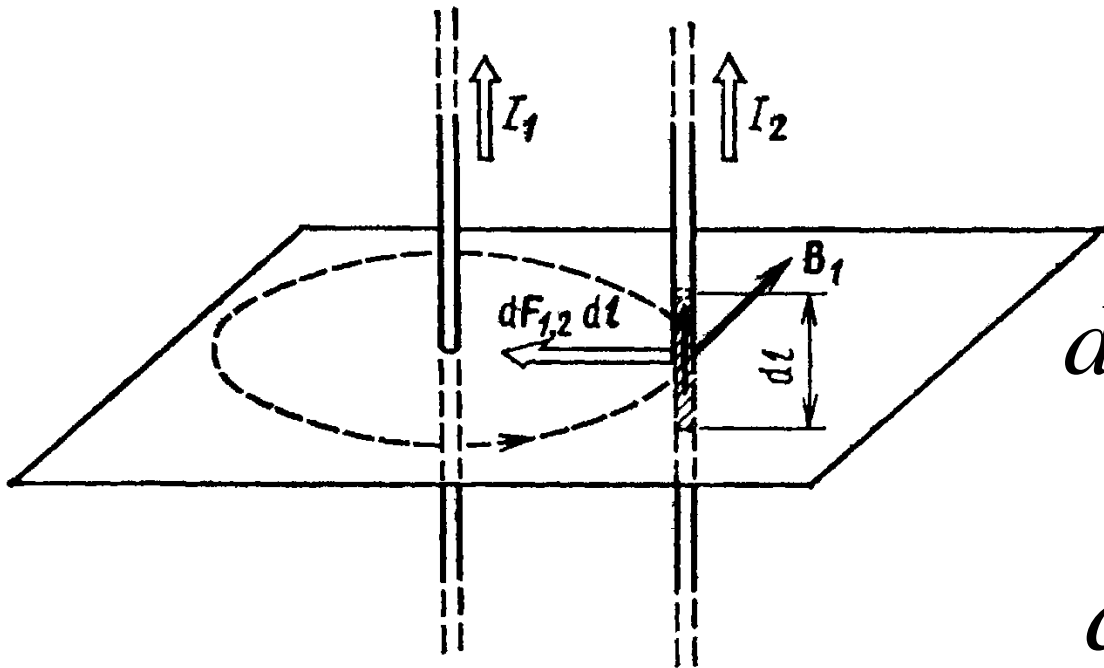
$$\vec{F}_A = IBl \sin(\angle d\vec{l}, \vec{B})$$

## Действие магнитного поля на проводники.



Направление силы Ампера определяется **правилом левой руки**: если ладонь левой руки расположить таким образом, что  $B_{\perp}$  входит в ладонь, четыре выпрямленных пальца направлены по току, то большой палец, отогнутый на  $90^{\circ}$ , указывает направление силы.

## Действие магнитного поля на проводники с током в магнитном поле.



$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d}$$

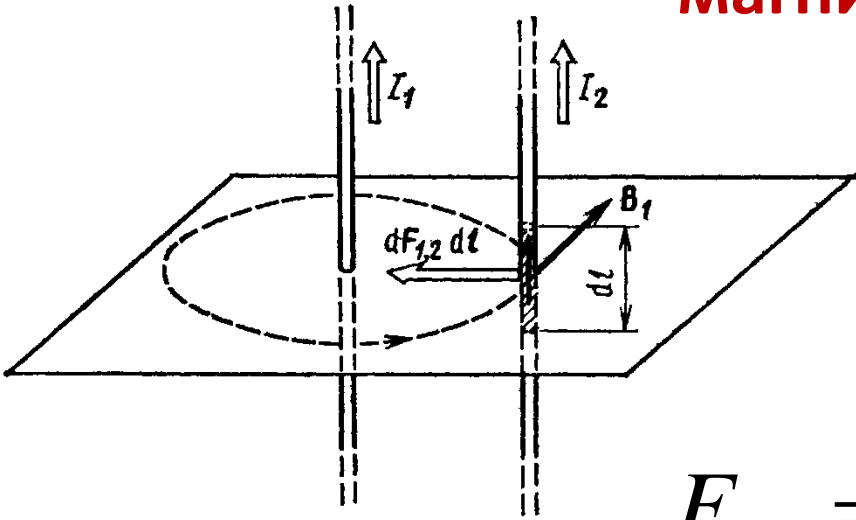
$$dF_{1,2} = I_2 B_1 dl_2 \sin \alpha$$

$$\sin \alpha = 1$$

$$dF_{1,2} = I_2 B_1 dl_2$$

$$dF_{1,2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} dl_2$$

## Действие магнитного поля на проводники с током в магнитном поле.



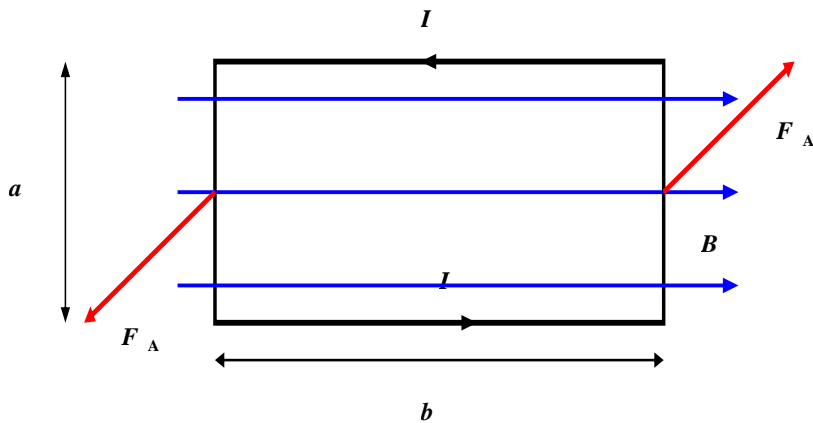
$$F_{1,2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} \int_0^{l_2} dl_2 = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi d} l_2$$

$$I_1 = I_2 = I \text{ и } l_2 = l$$

$$F_{1,2} = \frac{\mu_0 I^2 l}{2\pi d}$$

# Действие магнитного поля на контур с током

- Прямолинейный контур в магнитном поле



Вектор магнитной индукции  $B$  находится в плоскости контура

$$F_A = I a B \sin \alpha, \quad \alpha = 90^\circ$$

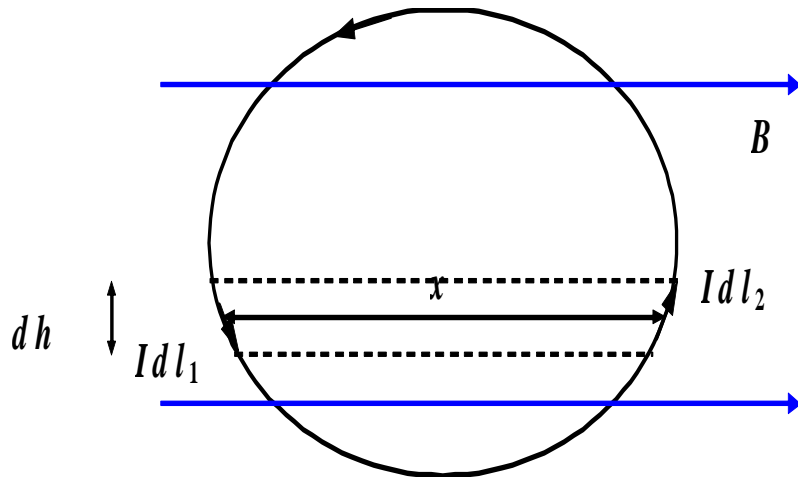
$$M = F_A \cdot b = I a b B = I S B = p_m B$$

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

Контур поворачивается таким образом, что его положительная нормаль  $n$  совпадает с вектором  $B$

# Действие магнитного поля на контур с током

- Контур произвольной формы



$$d\vec{F}_1 = I[d\vec{l}_1, \vec{B}], \quad dF_1 = Idl_1 B \sin \alpha_1 = IBdh$$
$$d\vec{F}_2 = I[d\vec{l}_2, \vec{B}], \quad dF_2 = Idl_2 B \sin \alpha_2 = IBdh$$

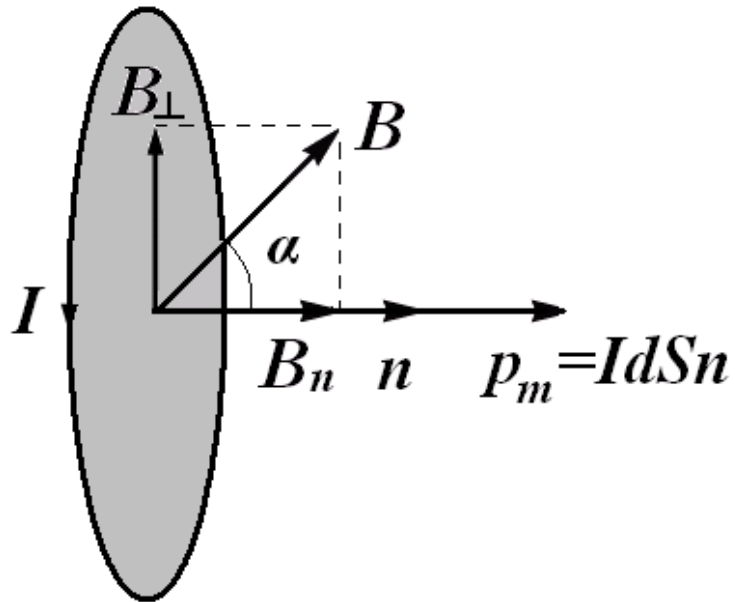
На элемент контура действует пара сил:

$$dM = dF \cdot x = IBdh \cdot x = IBdS$$

$$M = \int_S IBdS = p_m B, \quad \vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$$

# Действие магнитного поля на контур с током

- Между нормалью  $\mathbf{n}$  к контуру и вектором  $\mathbf{B}$  угол  $\alpha$



Вектор  $\mathbf{B}$  разложим на два вектора

- $B_n$  :  $\angle \vec{B}_n, \vec{n} = 0$      $\vec{M}_n = [\vec{p}_m, \vec{B}] = 0$

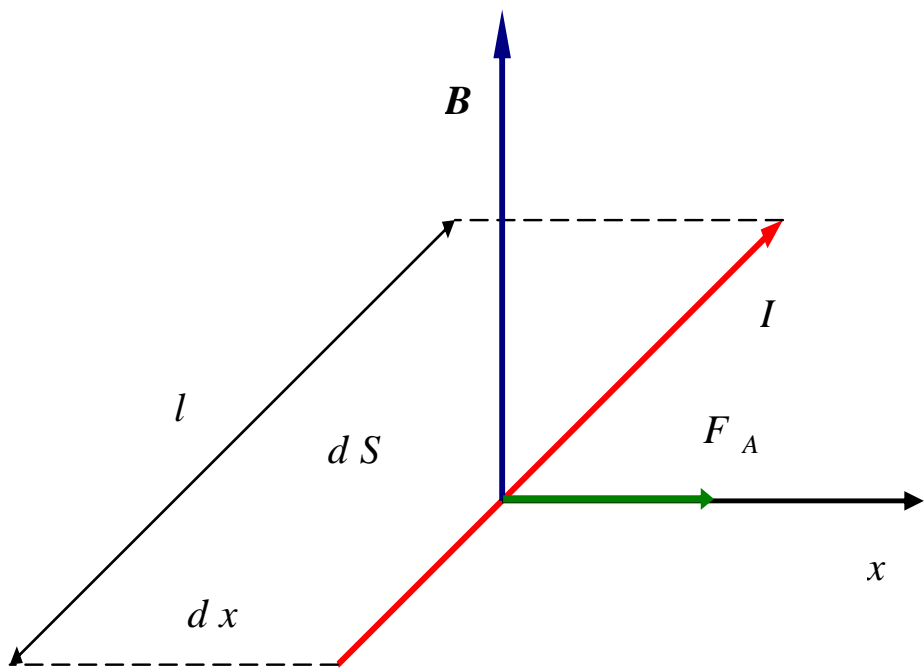
- $B_\perp$  :     $B_\perp = B \sin \alpha,$   
 $M_\perp = p_m B \sin \alpha$

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



# **Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле**

## Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле



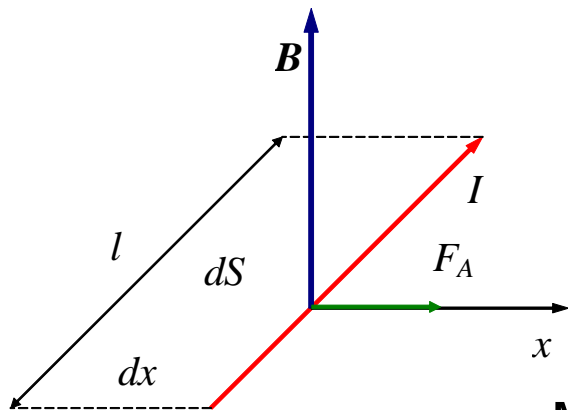
Сила Ампера:  $F_A = IBl$

$$\angle \vec{B}, \vec{I} = 90^\circ$$

При перемещении проводника под действием  $F_A$  на расстояние  $dx$  совершается работа:

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

## Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле



$$d\Phi = \vec{B}d\vec{S}$$

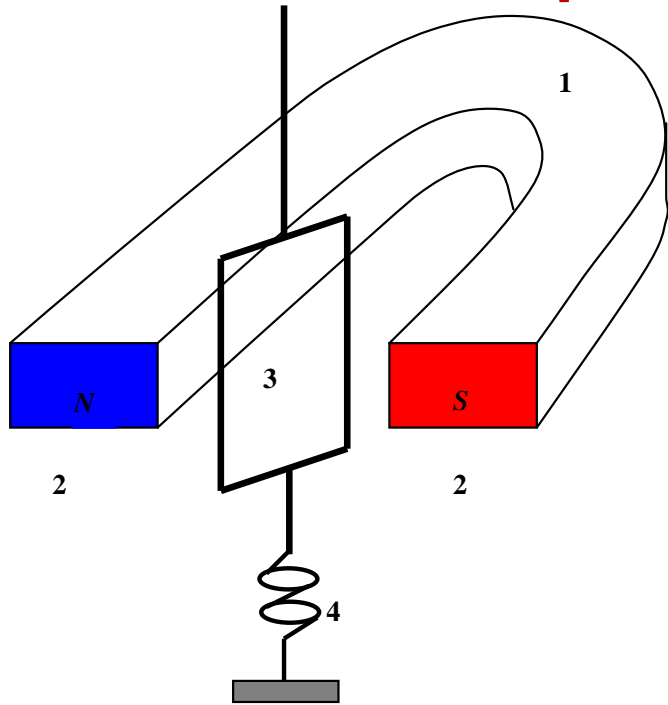
магнитный поток сквозь поверхность  $dS$ , которую прочерчивает проводник при своем движении.

- Если  $I = const$ :  $A = I \cdot \Delta\Phi$
- Если  $B = const$ :  $A = \int_S I d\Phi$

# Принцип действия электроизмерительных приборов

- **магнитоэлектрические** (рамка с током помещена в магнитное поле сильного подковообразного магнита, применяются для измерения постоянного тока),
- **электродинамические** (магнитное поле создается соленоидом, применяются для измерения постоянного и переменного токов).

# Принципиальная схема магнитоэлектрического электроизмерительного прибора



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

На рамку действует вращающий момент

$$M = ISNB$$

Под действием  $M$  рамка поворачивается на угол  $\varphi$ .

В пределах упругой деформации:  $\varphi = \alpha M$

$$\varphi = \underbrace{\alpha SBN}_{\beta} I = \beta I$$

$\beta$  – постоянная прибора

**Действие магнитного поля на заряженные  
частицы.  
Сила Лоренца**

# Действие магнитного поля на заряженные частицы.

## Сила Лоренца

Закон Ампера: на элемент  $dl$  проводника с током  $I$  действует сила

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

На одну заряженную частицу в элементе тока  $Idl$  действует сила Лоренца:

$$F_{Л} = \frac{dF}{dN}$$

где  $dN$  – число частиц в объеме проводника длиной  $dl$ .

$$dN = ndV = nSdl$$

## Сила Лоренца

$$\left. \begin{array}{l} I = jS \\ j = qnv \\ \vec{v} \uparrow \uparrow d\vec{l} \end{array} \right\} \begin{array}{l} Idl = jSdl = qnvSdl \\ d\vec{F} = \left[ \underbrace{Id\vec{l}}, \vec{B} \right] = [qnvSdl, \vec{B}] = qn \underbrace{Sdl}_{\substack{dV \\ dN}} [\vec{v}, \vec{B}] \end{array}$$

$$\vec{F}_L = \frac{dF}{dN} = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

$$F_L = |q|vB \sin \alpha$$



## Сила Лоренца

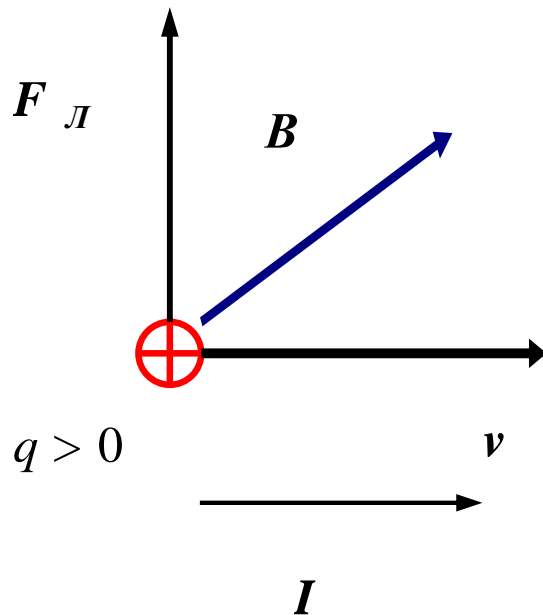
$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

$\vec{F}_L \perp \vec{v} \Rightarrow$  Сила Лоренца работу не совершает, не изменяет кинетическую энергию, а изменяет только направление движения

Если есть и электрическое поле, то на заряд действуют две силы:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}] \text{ формула Лоренца}$$

## Сила Лоренца



Сила Лоренца, действующая в магнитном поле на движущиеся в одном направлении положительные и отрицательные заряды, имеет противоположное направление.

## Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

- $\alpha = 0^0$        $\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}] = 0$

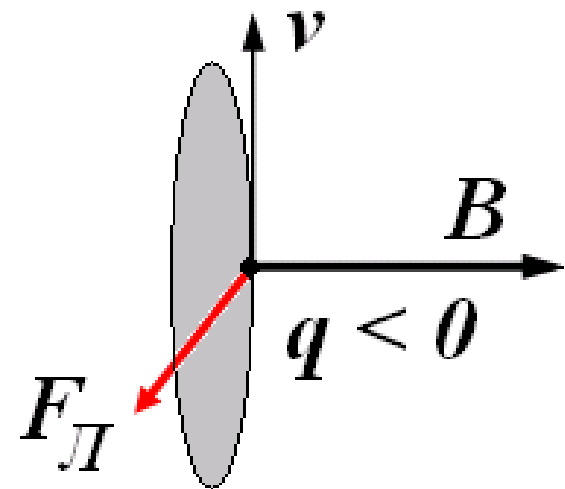
Траектория движения – прямая линия.



## Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

- $\alpha = 90^\circ$

$$F_{\text{Л}} = qvB = ma_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{R} \quad \Rightarrow \quad qB = \frac{mv}{R} \quad v = \frac{qBR}{m} \quad T = \frac{2\pi R}{v}$$



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

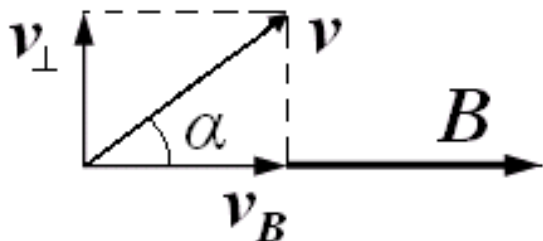
частицы

не зависит от её скорости  $v$ .

Траектория движения – **окружность**.

## Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

- $0^\circ < \alpha < 90^\circ$



$$F_{Л} = qv_{\perp}B = \frac{mv_{\perp}^2}{R}$$

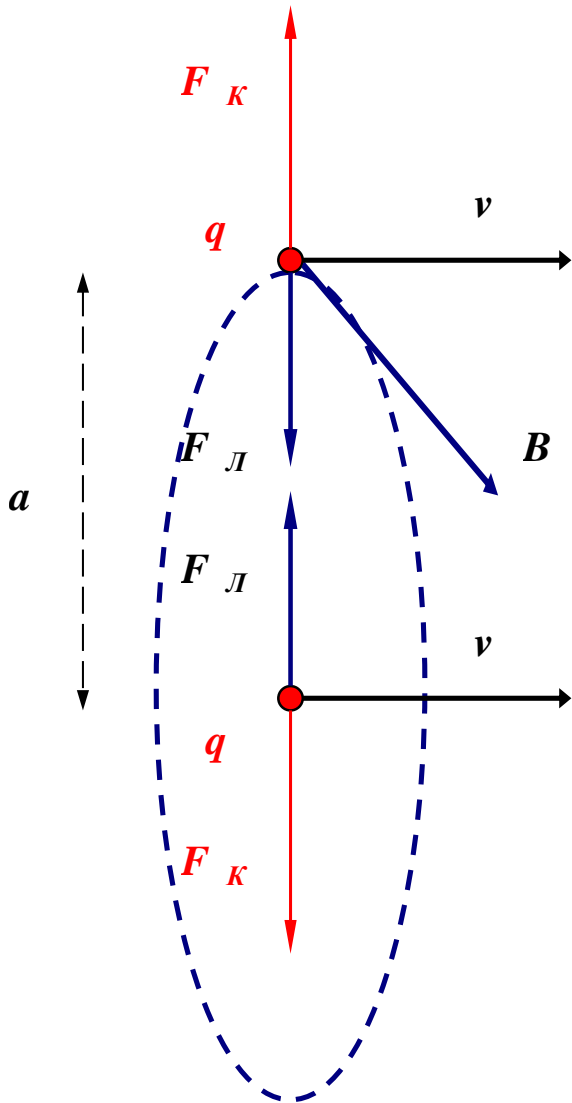
$$qB = \frac{mv \sin \alpha}{R}; \quad v \sin \alpha = \frac{qBR}{m}$$

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

Шаг спирали:

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

# Магнитные силы – релятивистская добавка к кулоновским силам



$$F_K = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q^2}{a^2}$$

$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]; \quad F_L = qvB$$

$v$  – скорость заряженной частицы  $q$ ;

$B$  – магнитное поле, создаваемое в точке расположения первой заряженной частицы, другой движущейся заряженной частицей.

**Магнитные силы – релятивистская добавка к кулоновским силам**

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 q [\vec{v}, \vec{r}]}{4\pi r^3} \quad |\vec{r}| = a \quad \angle \vec{v}, \vec{r} = 90^\circ \quad B = \frac{\mu_0 q v}{4\pi a^2}$$

$$F_L = \frac{\mu_0 q^2 v^2}{4\pi a^2} \quad F_K = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{q^2}{a^2}$$

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

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

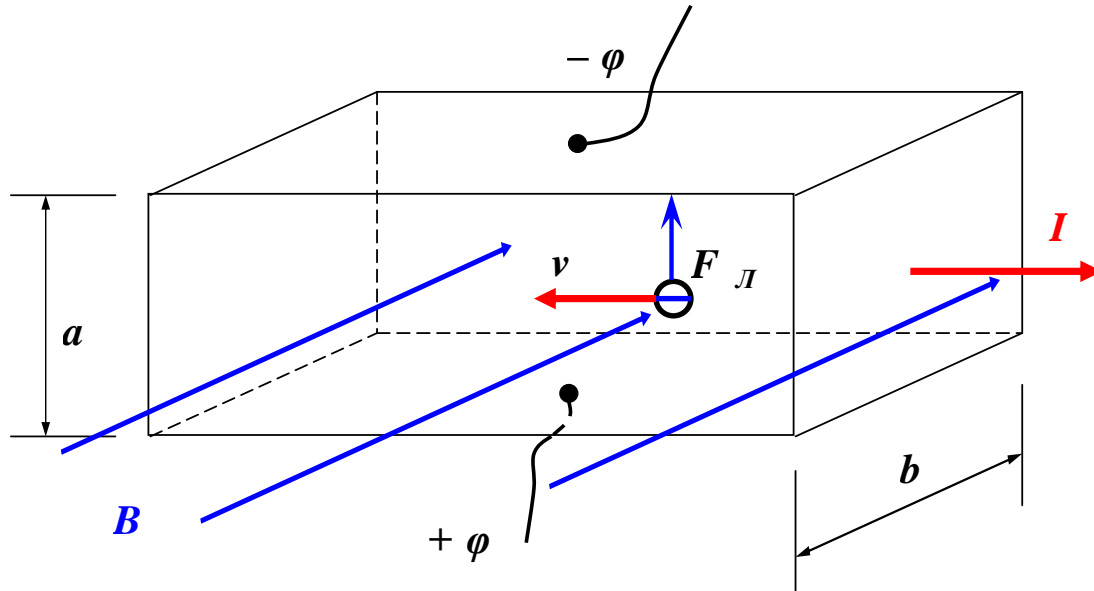
## Магнитные силы – релятивистская добавка к кулоновским силам

$$\frac{F_L}{F_K} \approx \frac{1}{9 \cdot 10^{16}} \frac{c^2}{M^2}$$

- Модуль силы Лоренца  $F_L$  всегда меньше модуля кулоновской силы  $F_K$ .
- $F_L$  стремится к  $F_K$  при  $v \rightarrow c$ , поэтому магнитные силы называют релятивистской добавкой к кулоновским силам.



## Эффект Холла 1880 г.



Через золотую пластину пропускается ток  $I$ ;  
перпендикулярно боковым граням направляется магнитное поле индукцией  $B$ ;

между верхними гранями возникает разность потенциалов  $\Delta\varphi$ ,

величина которой пропорциональна  $I, B$   
и обратно пропорциональна ширине пластины  $b$ .

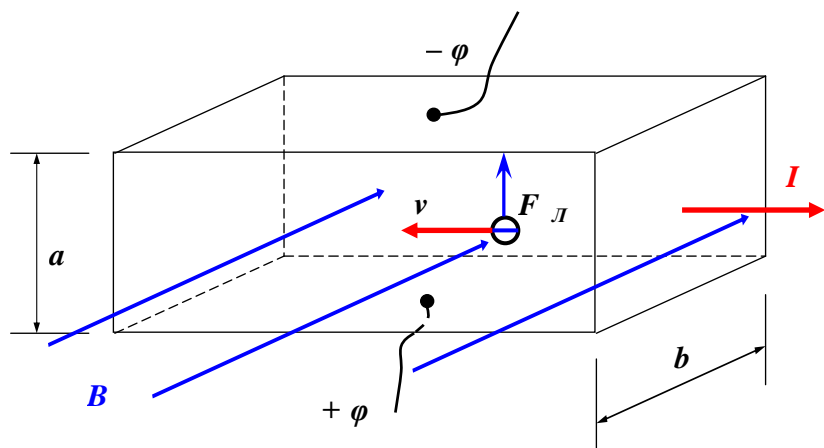
Если  $B = 0$  то  $\Delta\varphi = 0$

## Эффект Холла

– в металле или полупроводнике с током, помещенном в магнитное поле, перпендикулярное к вектору плотности тока  $j$ , возникает поперечное электрическое поле и разность потенциалов  $\Delta\varphi$ .

**Причина – сила Лоренца.**

# Эффект Холла



$$F_{Л} = qvB = qE$$

$$E = vB$$

$$\Delta\varphi = Ea$$

$$\Delta\varphi = vBa$$

$$I = jS = qnvnab$$

$$v = \frac{I}{q nab}$$

$$\Delta\varphi = \frac{IB}{qnb} = \underbrace{\frac{1}{qn}}_{R_H} \cdot \frac{IB}{b}$$

$R_H$  – постоянная  
Холла

$$\Delta\varphi = R_H \frac{IB}{b}$$

## Эффект Холла

$$\Delta\varphi = R_H \frac{IB}{b}$$

С помощью эффекта Холла можно определить тип проводимости полупроводника и концентрацию носителей тока в проводнике (если известен заряд носителей).

- $R_H < 0$ , проводимость ***n*-типа** (электронный полупроводник).
- $R_H > 0$ , проводимость ***p*-типа** (дырочный полупроводник).