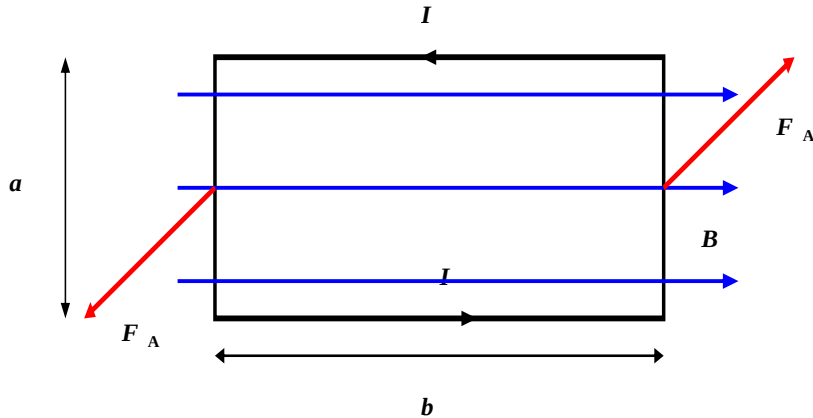


Действие магнитного поля на контур с током

- Прямолинейный контур в магнитном поле



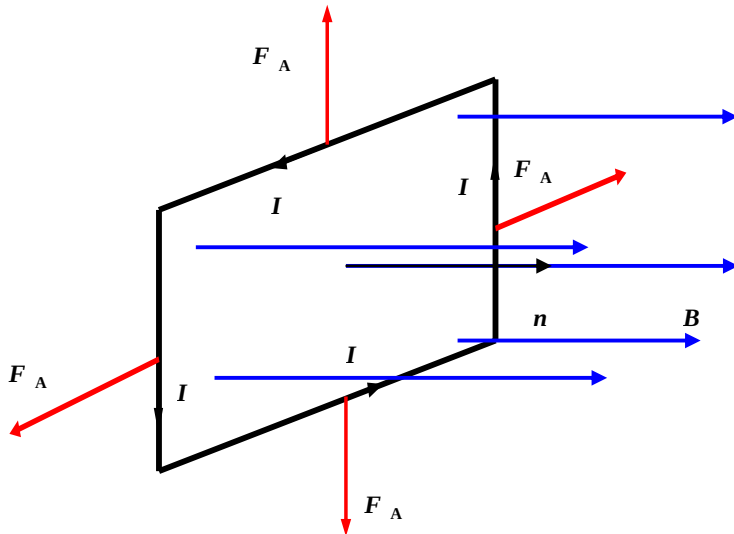
Вектор магнитной индукции B находится в плоскости контура

$$F_A = IabB \sin \alpha, \quad \alpha = 90^\circ$$

$$M = F_A \cdot b = IabB = ISB = p_m B$$

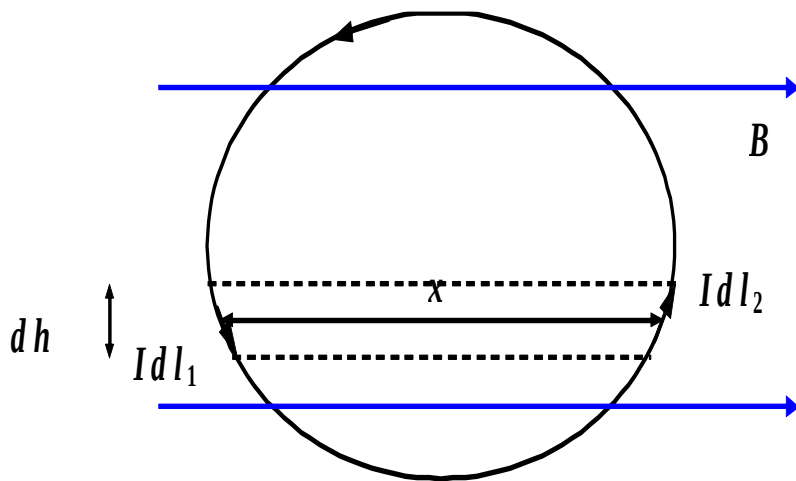
$$\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]$$

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



Действие магнитного поля на контур с током

- Контур произвольной формы



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

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

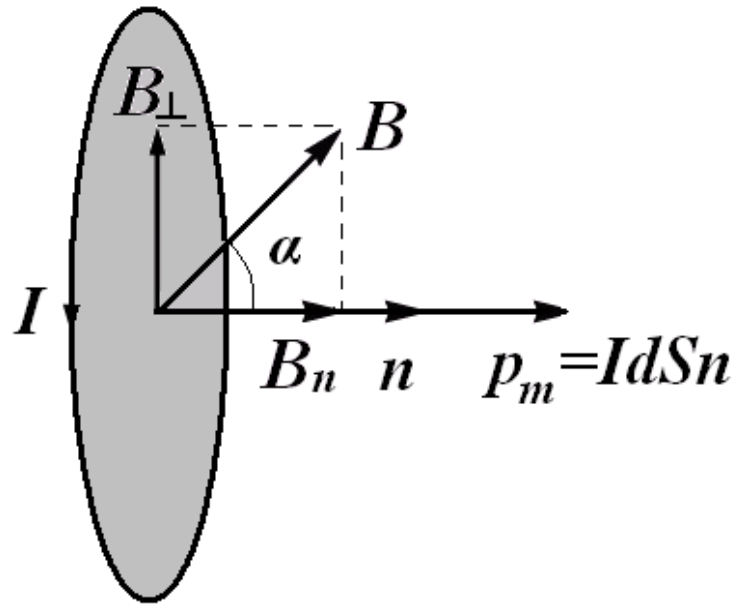
На элемент контура действует пара сил:

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

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

Действие магнитного поля на контур с током

- Между нормалью $\vec{n}$ к контуру и вектором $\vec{B}$ угол α



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

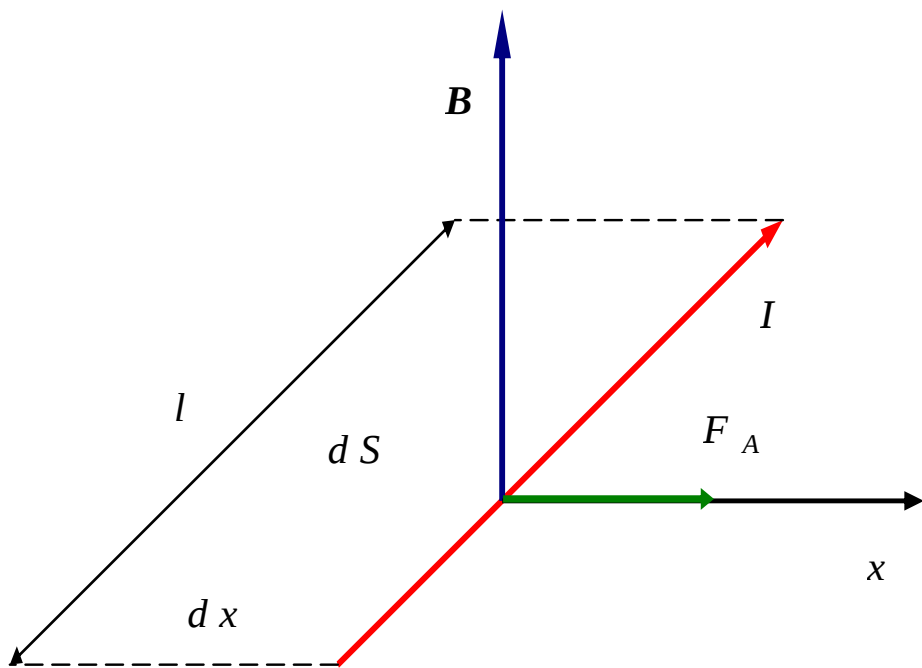
- B_n : $\angle \vec{B}_n, \vec{n} = 0$ $\vec{M}_n = [\vec{p}_m, \vec{B}] = 0$

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

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

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле

Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле



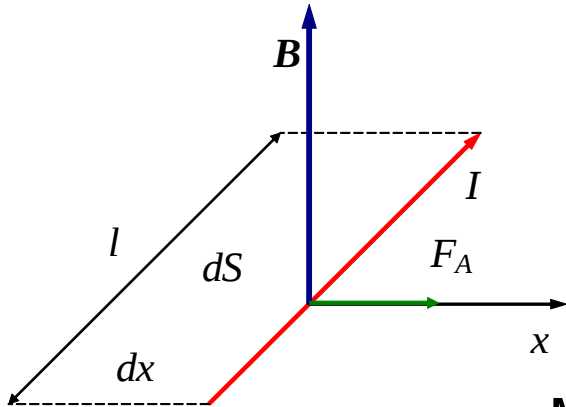
Сила Ампера: $F_A = IBl$

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

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



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

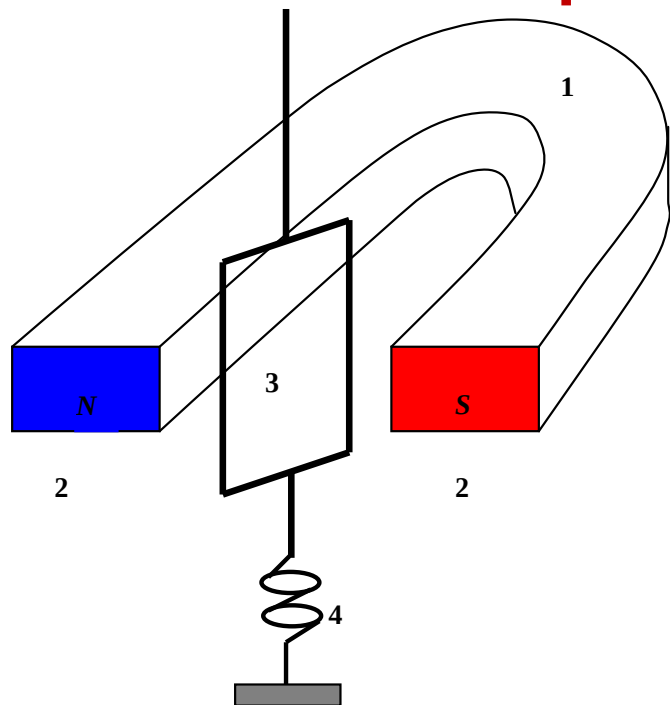
магнитный поток сквозь поверхность dS , которую прочерчивает проводник при своем движении.

- 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 φ .

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

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

β – 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**:

$$F_L = \frac{dF}{dN}$$

где dN – число частиц в объеме проводника длиной dl .

$$dN = ndV = nSdl$$

Сила Лоренца

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

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

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

Сила Лоренца

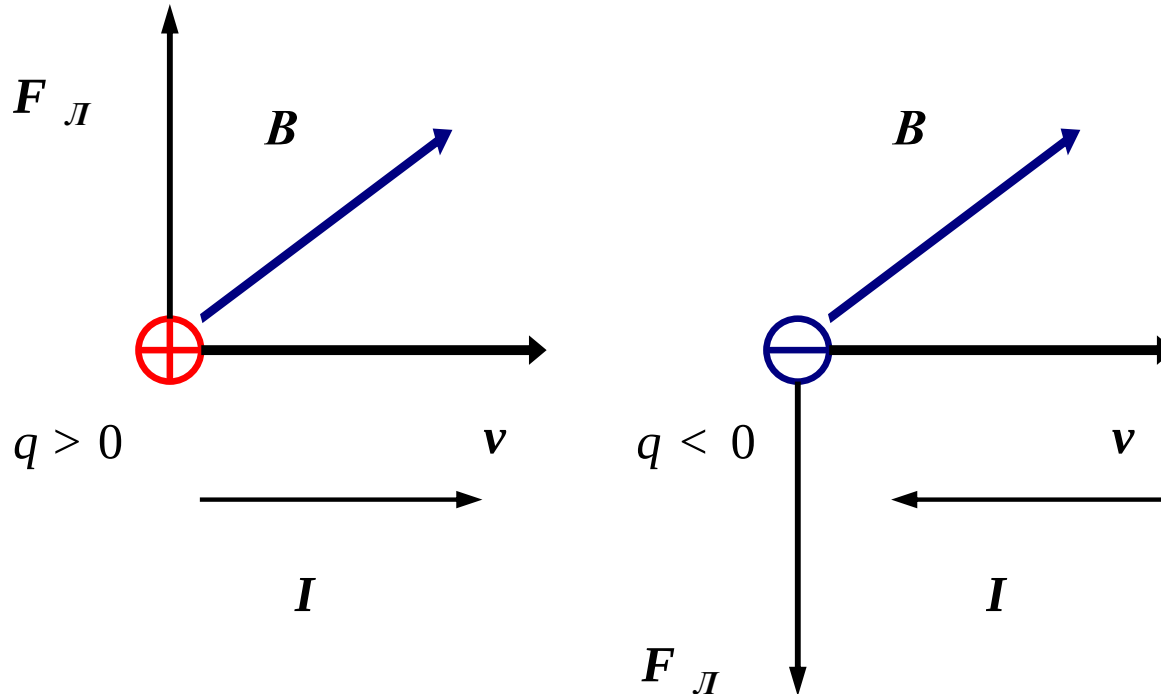
$$\vec{F}_L = q[\vec{v}, \vec{B}]$$

$\vec{F}_L \perp \vec{v} \Rightarrow$ 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

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

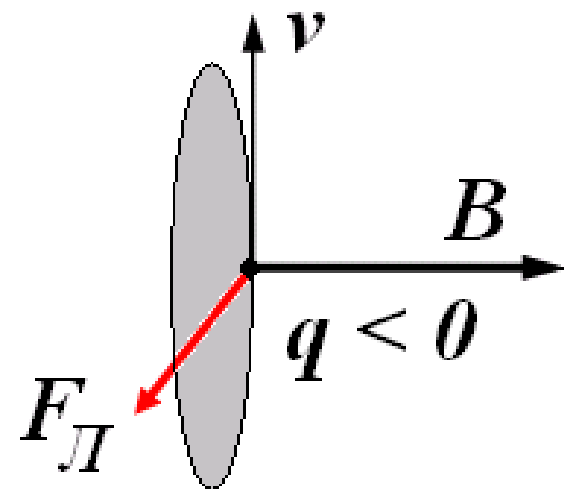
Траектория движения – **прямая** линия.



Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

- $\alpha = 90^\circ$

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



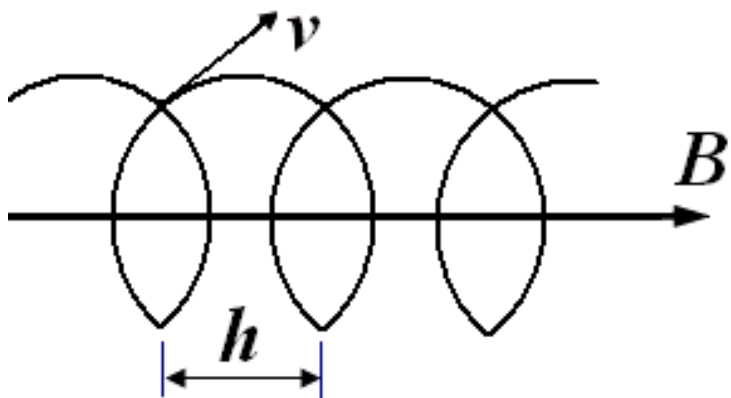
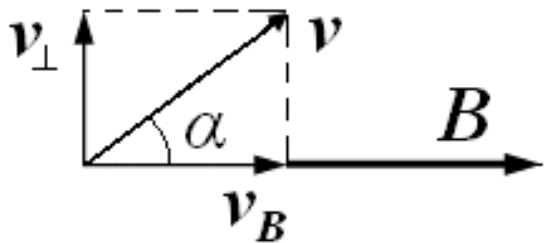
$$T = 2\pi \left| \frac{m}{q} \right| \cdot \frac{1}{B} \quad - \text{ период обращения частицы}$$

не зависит от её скорости v .

Траектория движения – **окружность**.

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

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



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

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

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

Шаг спирали:

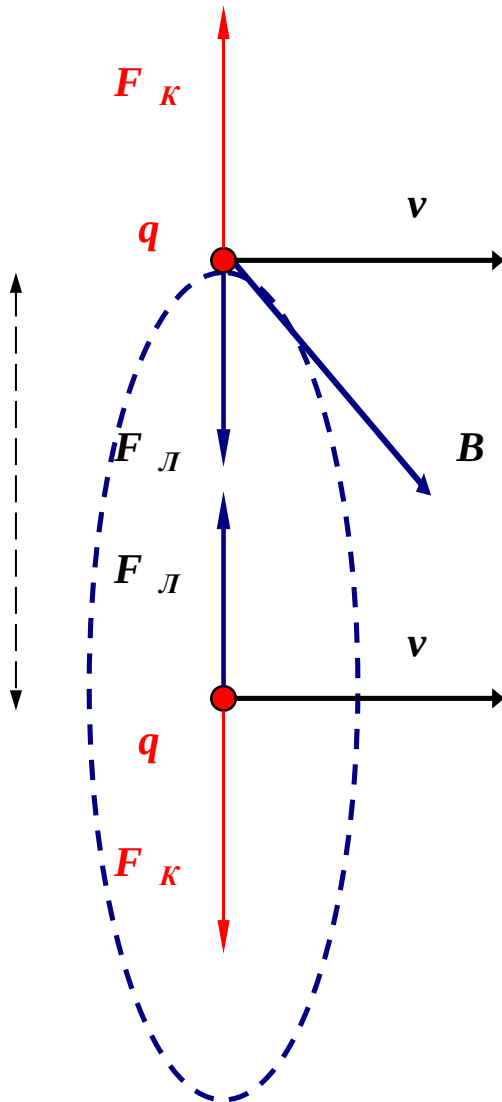
$$h = v_B T = \frac{2\pi}{B} \left| \frac{m}{q} \right| v \cos \alpha$$

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

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

$$F_L = \frac{\mu_0 q^2 v^2}{4\pi a^2} \quad F_K = \frac{1}{4\pi \varepsilon_0} \frac{q^2}{a^2}$$

$$\frac{F_L}{F_K} = \varepsilon_0 \mu_0 v^2 = \frac{v^2}{c^2}$$

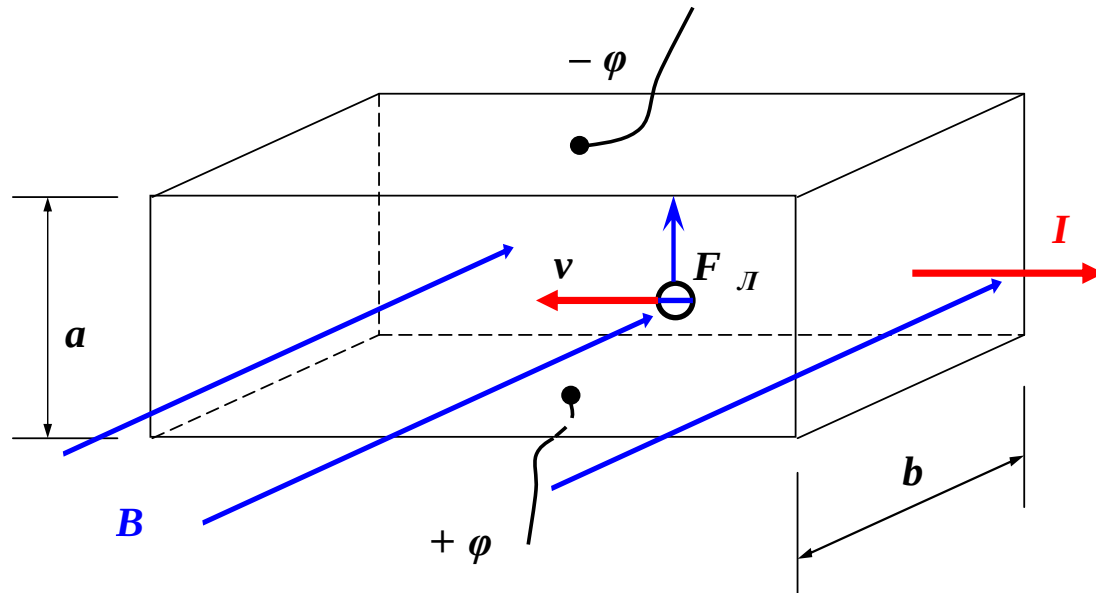
$$\varepsilon_0 \mu_0 = \frac{1}{c^2} = 8,85 \cdot 10^{-12} \cdot 4\pi 10^{-7} \approx \frac{1}{9 \cdot 10^{16}} \frac{\text{с}^2}{\text{м}^2}$$

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.



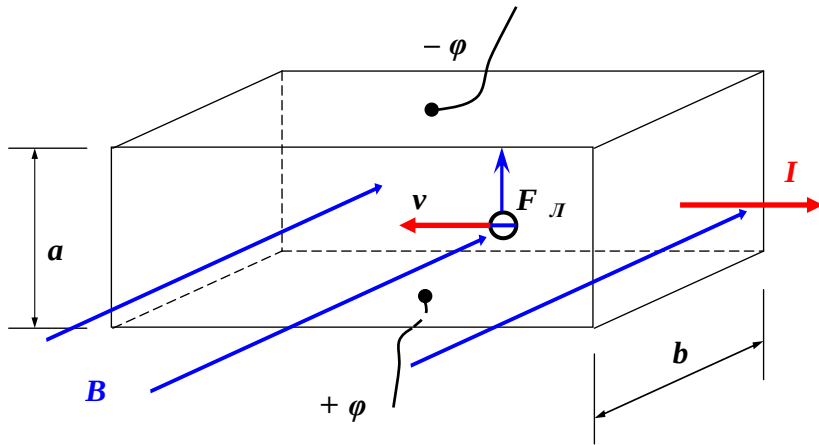
Через золотую пластину пропускается ток I ;
перпендикулярно боковым граням направляется магнитное поле индукцией B ;
между верхними гранями возникает разность потенциалов $\Delta\varphi$, величина которой пропорциональна I, B и обратно пропорциональна ширине пластины b .
Если $B = 0$, то $\Delta\varphi = 0$.

Эффект Холла

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

Причина – сила Лоренца.

Эффект Холла



$$F_L = qvB = qE$$

$$E = vB$$

$$\Delta\varphi = Ea$$

$$\Delta\varphi = vBa$$

$$I = jS = qnvnab$$

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

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

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).