# Электричество и магнетизм

## Лекция 10

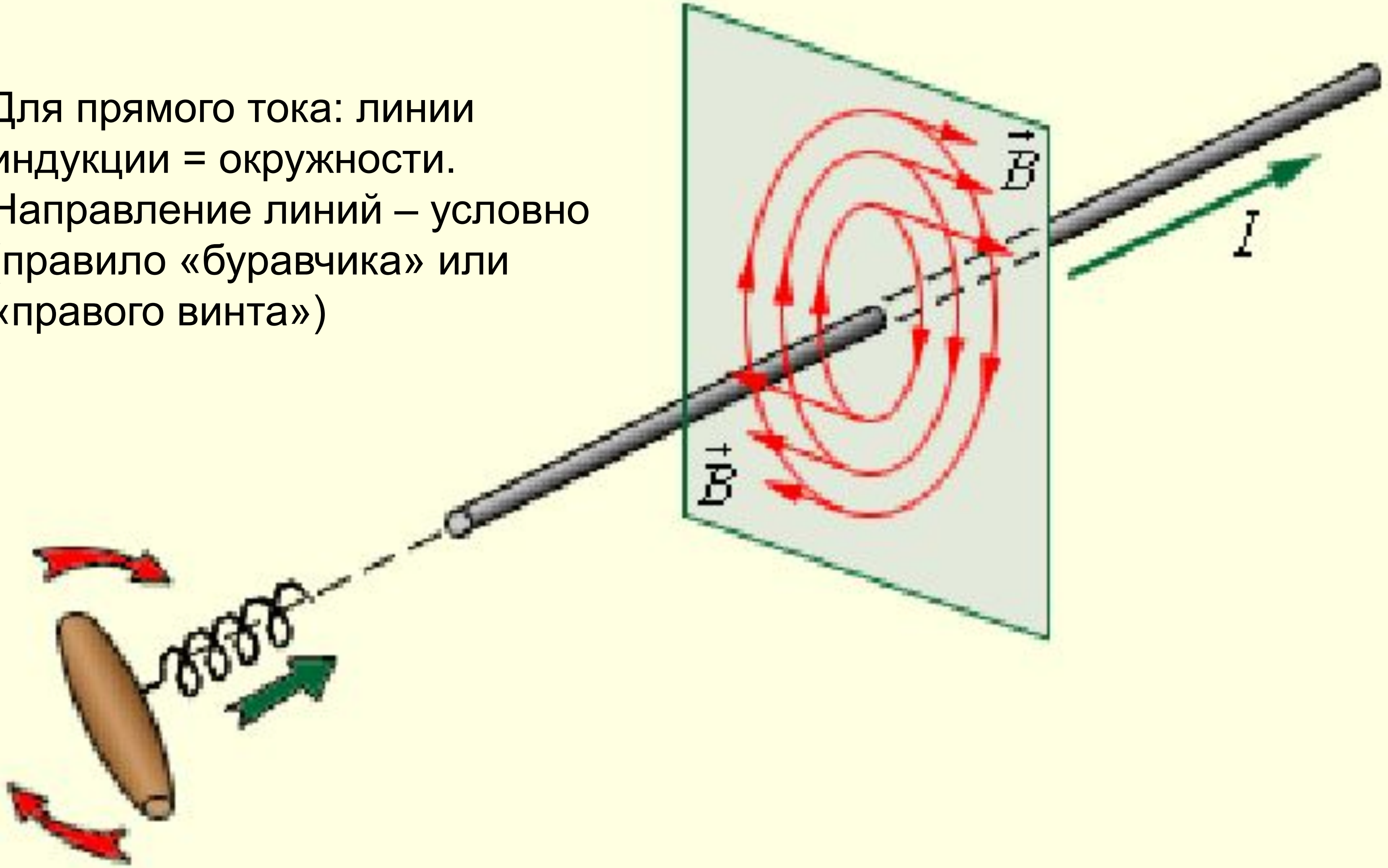
## Магнитное поле (2)

03 ноября 2021 года

Лектор: доцент НИЯУ МИФИ,
Ольчак Андрей Станиславович

# Правило буравчика (иллюстрация)

Для прямого тока: линии индукции = окружности. Направление линий – условно (правило «буравчика» или «правого винта»)

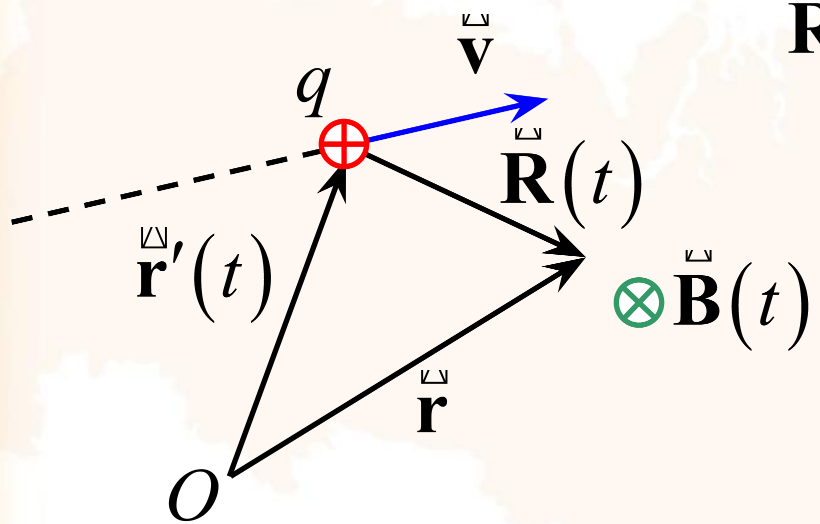


(1) Магнитное поле создаётся движущимися электрическими зарядами:

Закон Био – Савара –Лапласа

# Закон Био – Савара - Лапласа

## Магнитное поле равномерно движущегося заряда




$$\vec{\mathbf{R}}(t) = \vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'(t)$$

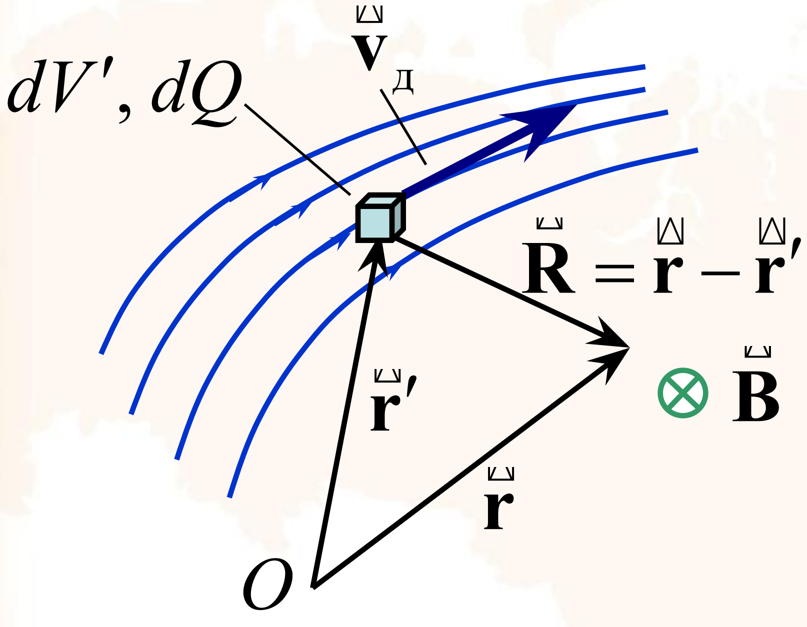
Опыт: $$\boxed{\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q\left[\vec{\mathbf{v}}, \vec{\mathbf{R}}\right]}{R^3}}$$

$$(\mathrm{v} \ll c)$$

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

Гн = Н·м/А$^2$

# Магнитное поле элемента тока




$$dQ = qndV' \qquad \vec{\mathbf{j}} = qn\vec{\mathbf{v}}_д$$

$$\mathrm{d}\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{dQ\left[\vec{\mathbf{v}}_д, \vec{\mathbf{R}}\right]}{R^3} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{qn\left[\vec{\mathbf{v}}_д, \vec{\mathbf{R}}\right]dV'}{R^3} =$$

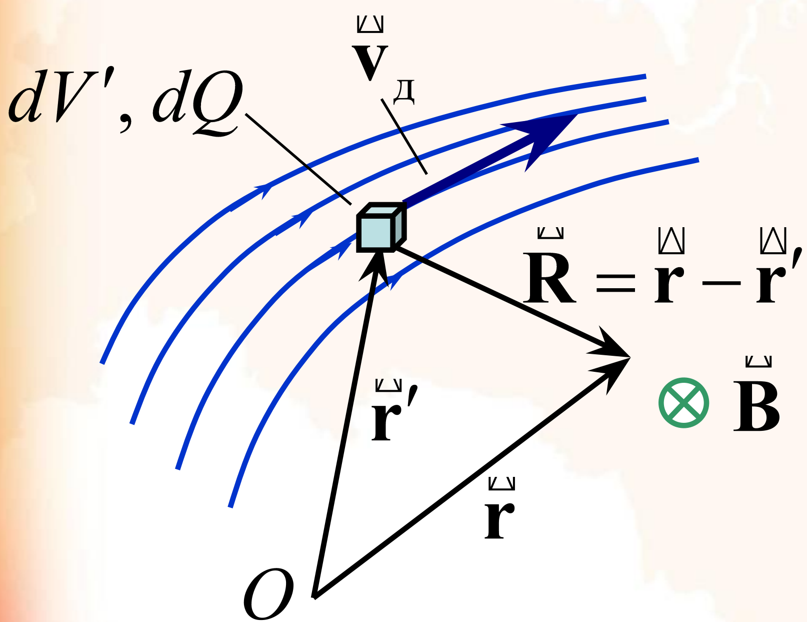
$$\boxed{\mathrm{d}\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\left[\vec{\mathbf{j}}, \vec{\mathbf{R}}\right]dV'}{R^3}}$$

# Закон Био – Савара - Лапласа

**Магнитное поле объемного тока**

$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{\left[\mathbf{j}, \mathbf{R}\right] dV'}{R^3}$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{r} - \mathbf{r}'$$

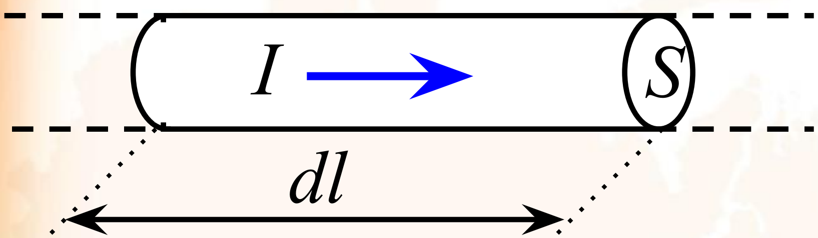



Био – Савар (1820, эксперимент)
Лаплас (1826, теория)

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \frac{\mu_0}{4\pi}\int\limits_{V_{пров}} \frac{\left[\mathbf{j}(\mathbf{r}'), \mathbf{r} - \mathbf{r}'\right] dV'}{\left|\mathbf{r} - \mathbf{r}'\right|^3}$$

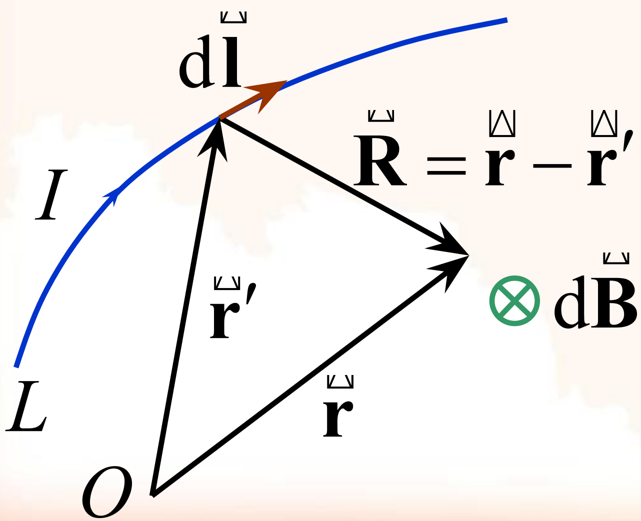
# Закон Био – Савара - Лапласа

## Магнитное поле линейного проводника с током




$$d\vec{\mathbf{l}} \uparrow\uparrow \vec{\mathbf{j}}, \quad \left|d\vec{\mathbf{l}}\right| = dl, \quad \vec{\mathbf{j}}dV' = \vec{\mathbf{j}}Sdl =$$

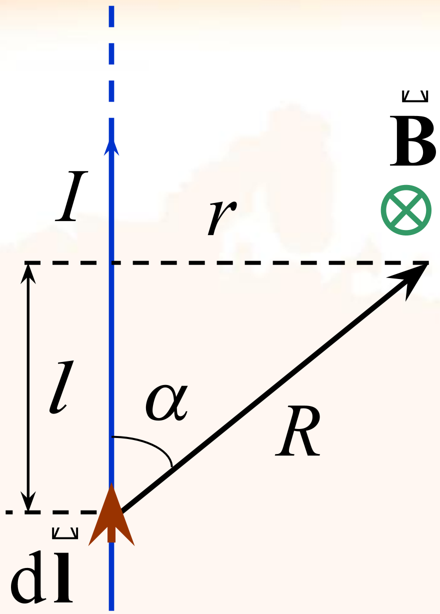
$$= jSd\vec{\mathbf{l}} = Id\vec{\mathbf{l}} \qquad \boxed{\vec{\mathbf{j}}dV' = Id\vec{\mathbf{l}}}$$




$$\boxed{d\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\left[d\vec{\mathbf{l}}, \vec{\mathbf{R}}\right]}{R^3}}$$

$$\boxed{\vec{\mathbf{B}}(\vec{\mathbf{r}}) = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\int_L \frac{\left[d\vec{\mathbf{r}}', \vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'\right]}{\left|\vec{\mathbf{r}} - \vec{\mathbf{r}}'\right|^3}}$$

# Магнитное поле прямого тока

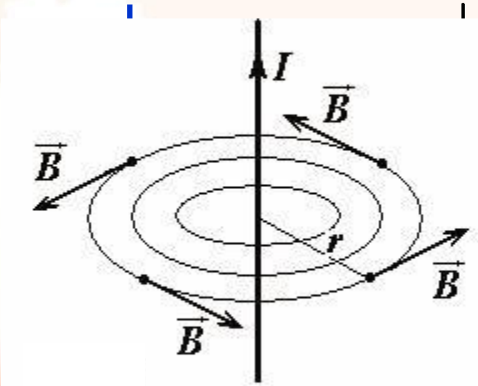



$$d\mathbf{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\left[d\mathbf{l},\mathbf{R}\right]}{R^3} \quad \Rightarrow \quad \otimes$$

$$\left|d\mathbf{B}\right| = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\frac{dl\sin\alpha}{R^2}, \qquad \sin\alpha = \frac{r}{R}$$

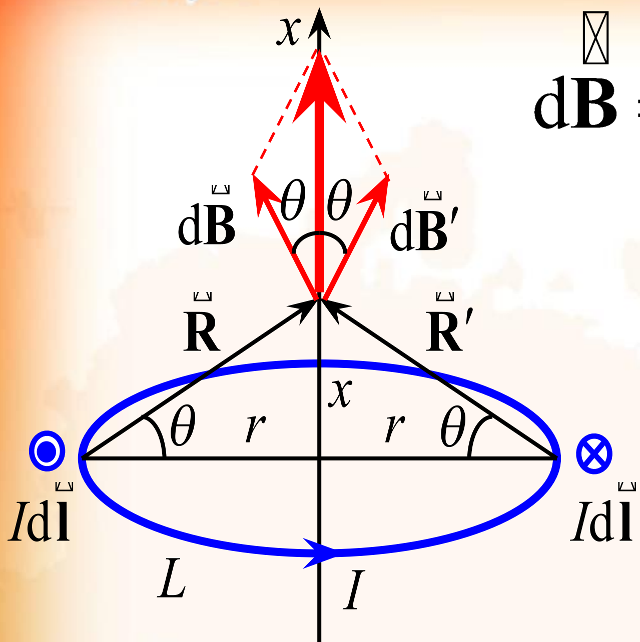
$$R = \frac{r}{\sin\alpha}, \qquad l = r\,\mathrm{ctg}\,\alpha, \qquad dl = \frac{r\,d\alpha}{\sin^2\alpha}$$

$$\left|d\mathbf{B}\right| = \frac{\mu_0 I\sin\alpha}{4\pi}\frac{\sin^2\alpha}{r^2}\frac{r\,d\alpha}{\sin^2\alpha} = \frac{\mu_0 I}{4\pi}\sin\alpha\,d\alpha$$




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

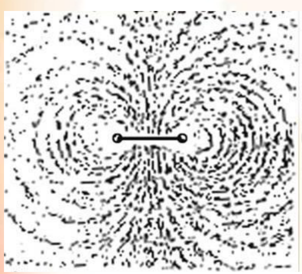
# Магнитное поле кругового тока

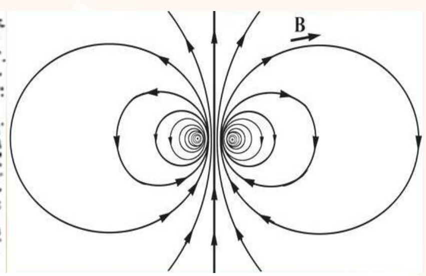



$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\left[d\vec{l},\vec{R}\right]}{R^3} \qquad d\vec{l} \perp \vec{R} \quad \Rightarrow \quad \left|d\vec{B}\right| = \frac{\mu_0 Idl}{4\pi R^2}$$

$$dB_x = \frac{\mu_0 Idl\cos\theta}{4\pi R^2}, \qquad \cos\theta = \frac{r}{R}$$

$$B_x = \oint_L dB_x = \frac{\mu_0 Ir}{4\pi R^3}\oint_L dl = \frac{\mu_0 Ir}{4\pi R^3}2\pi r = \frac{\mu_0 Ir^2}{2R^3}$$



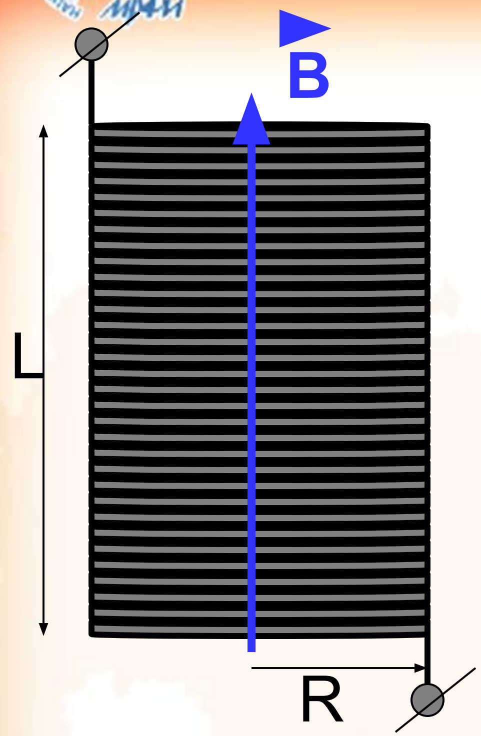



$$\boxed{B_x(x) = \frac{\mu_0 Ir^2}{2\left(r^2+x^2\right)^{3/2}}}$$

$$B_x \sim \frac{1}{x^3}$$

$$x \gg r$$

# Магнитное поле соленоида (катушки с током)




Каждый виток катушки создает в центре соленоида магнитное поле с индукцией:

$$B = (\mu_0/2)I/R$$

Направление вектора магнитной индукции определяется по правилу буравчика.

Вся катушка с числом витков N создаст в сердечнике соленоида однородное магнитное поле с индукцией, вычисляемой методом сложения (интегрирования) полей, создаваемых отдельными витками. Если катушка достаточно длинна (L >> R) то результат интегрирования не зависит от R:

$$B = \mu_0 IN/L$$

(2) Магнитное поле действует на движущиеся заряды

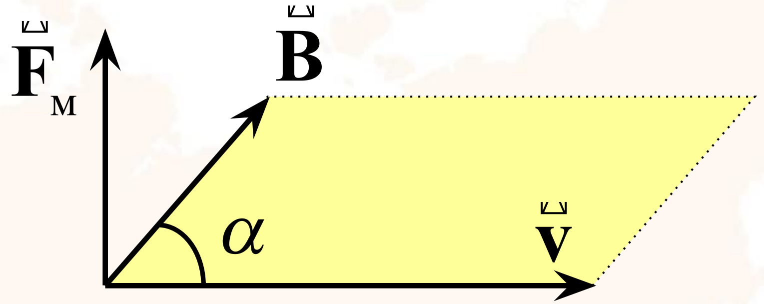
Сила Лоренца
Закон Ампера

# Сила Лоренца

## Магнитная сила

$$\boxed{\vec{\mathbf{F}}_{\text{м}} = q\left[\vec{\mathbf{v}}, \vec{\mathbf{B}}\right]}$$

$$\left|\vec{\mathbf{F}}_{\text{м}}\right| = |q|\,\mathrm{v}B\sin\alpha$$



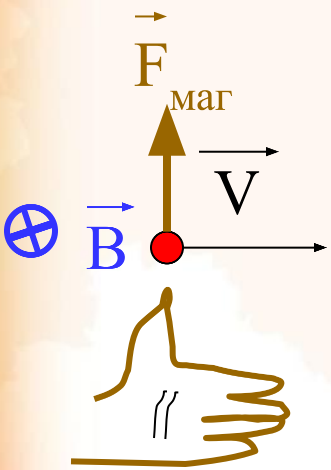

**Сила Лоренца**

$$\boxed{\vec{\mathbf{F}}_{\text{м}} = q\vec{\mathbf{E}} + q\left[\vec{\mathbf{v}}, \vec{\mathbf{B}}\right]}$$

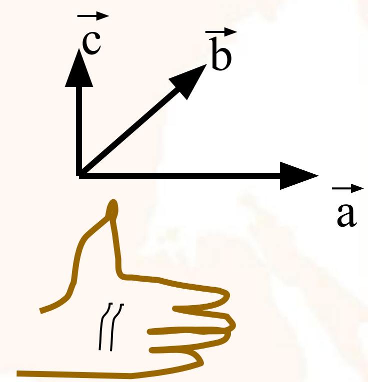
1. Магнитная сила НЕ совершает работы
2. Величина и направление векторов напряженности электрического поля и магнитной индукции зависят от выбора системы отсчета.

# Векторное произведение

$$\vec{F}_{маг} = q[\vec{V},\vec{B}]$$



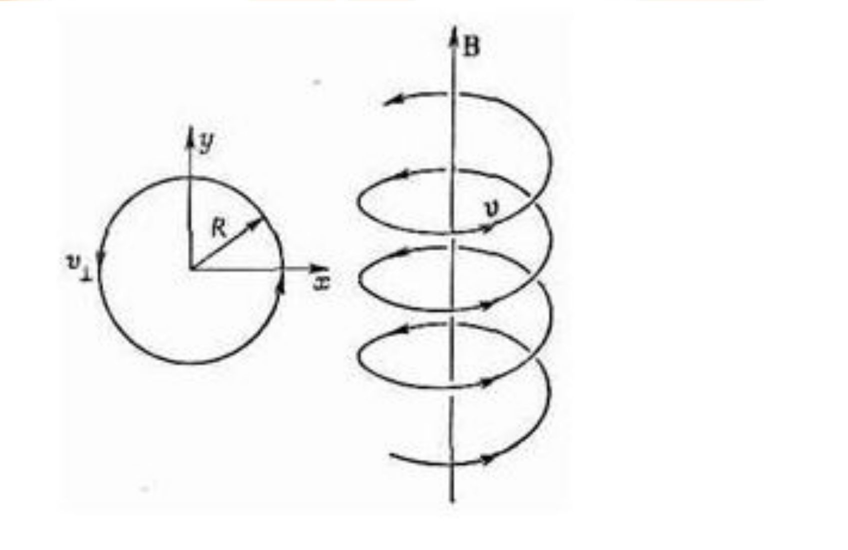

**Немного математики:**
Векторное произведение $\vec{c} = [\,\vec{a},\ \vec{b}\,]$ направлено перпендикулярно обоим векторам $\vec{a}$ и $\vec{b}$ и равно по величине $c = a\,b\,\sin(\alpha)$, где α - угол между векторами $\vec{a}$ и $\vec{b}$. Направление вектора c определяется *правилом левой руки*.




Величина силы действия магнитного поля, соответственно, равна **Fмаг = qVBsin(α),** где α - угол между векторами скорости и магнитной индукции.

# Примеры задач

ПРИМЕР. Заряд q влетает в область однородного магнитного поля B. Определить его траекторию движения.




Если частица имела начальную скорость V не перпендикулярную направлению вектора магнитной индукции B:

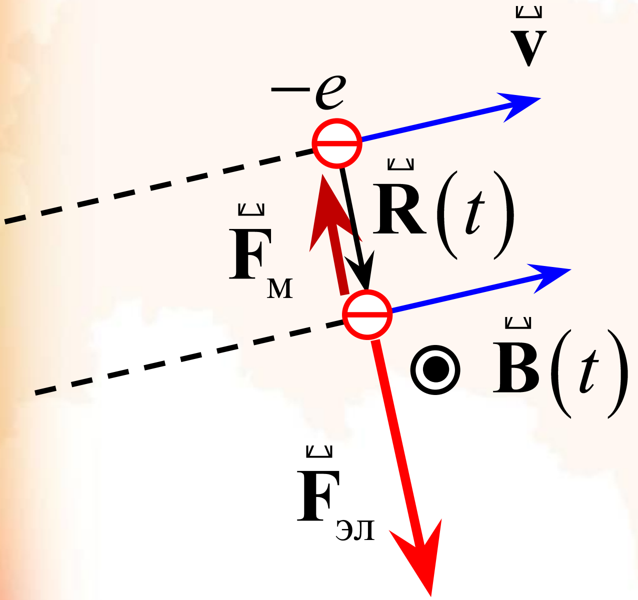
Под действием магнитной силы заряд будет двигаться по дуге окружности радиуса

$$\mathbf{R = mV_{перп}/qB}$$

Где $\mathbf{V_{перп}}$ **-** компонента вектора скорости, перпендикулярная направлению вектора магнитной индукции.
Кроме этого, частица будет смещаться вдоль направления вектора магнитной индукции с постоянной скоростью $V_{парал}$. В результате частица будет двигаться по спирали.

# Примеры решения задач

**Пример 2.** Скорости $\vec{\mathrm{v}}$ двух нерелятивистских электронов одинаковы и перпендикулярны прямой, которая их соединяет. Найти отношение сил магнитного и электрического взаимодействия электронов.



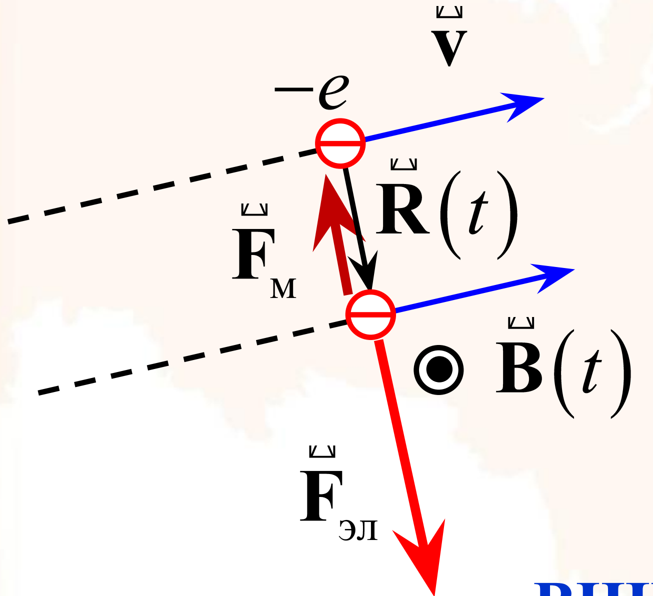

$$\vec{\mathbf{B}} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{(-e)\left[\vec{\mathrm{v}},\vec{\mathbf{R}}\right]}{R^3} \Rightarrow B = \frac{\mu_0 e \mathrm{v}}{4\pi R^2}$$

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{м}} = (-e)\left[\vec{\mathrm{v}},\vec{\mathbf{B}}\right] \Rightarrow F_{\text{м}} = \frac{\mu_0 e^2 \mathrm{v}^2}{4\pi R^2}$$

$$\vec{\mathbf{F}}_{\text{эл}} = \frac{(-e)^2\vec{\mathbf{R}}}{4\pi\varepsilon_0 R^3} \Rightarrow F_{\text{эл}} = \frac{e^2}{4\pi\varepsilon_0 R^2}$$

# Примеры решения задач

**Пример 2.** Скорости $\vec{\mathbf{v}}$ двух нерелятивистских электронов одинаковы и перпендикулярны прямой, которая их соединяет. Найти отношение сил магнитного и электрического взаимодействия электронов.




$$\Rightarrow \quad \frac{F_{м}}{F_{эл}} = \frac{\mu_0 e^2 \mathrm{v}^2}{4\pi R^2}\frac{4\pi\varepsilon_0 R^2}{e^2} =$$

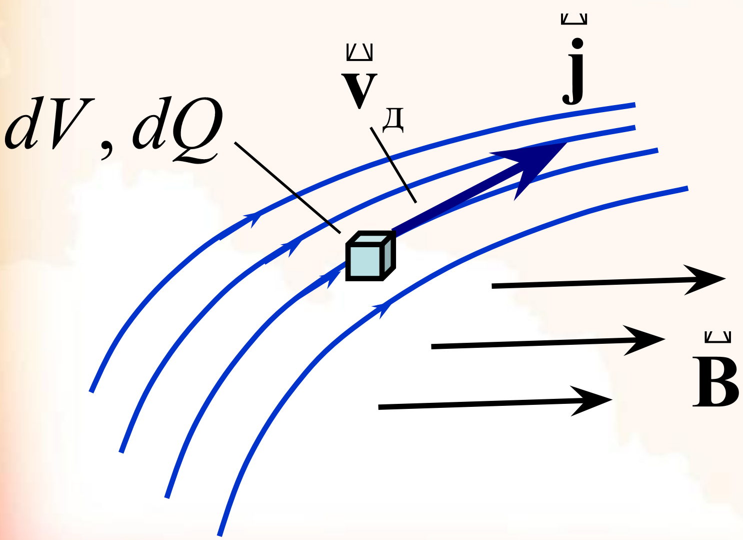
$$= \mu_0\varepsilon_0 \mathrm{v}^2 = \frac{\mathrm{v}^2}{c^2} \ll 1$$

**ВНИМАНИЕ.** $\mu_0\varepsilon_0 = 1/c^2$; $c = 3*10^8$ м/с – скорость света в вакууме (!)

# Закон Ампера

## Магнитная сила, действующая на элемент тока

$$d\vec{\mathbf{F}}_{\text{м}} = dQ\left[\vec{\mathbf{v}}_{\text{др}} \times \vec{\mathbf{B}}\right] \qquad dQ = qn\,dV$$




$$d\vec{\mathbf{F}}_{\text{м}} = qn\left[\vec{\mathbf{v}}_{\text{др}} \times \vec{\mathbf{B}}\right]dV = \left[\vec{\mathbf{j}} \times \vec{\mathbf{B}}\right]dV$$

$$\boxed{d\vec{\mathbf{F}}_{\text{A}} = \left[\vec{\mathbf{j}} \times \vec{\mathbf{B}}\right]dV}$$

$$\boxed{\vec{\mathbf{F}}_{\text{A}} = \int\limits_{V_{\text{пров}}} \left[\vec{\mathbf{j}} \times \vec{\mathbf{B}}\right]dV}$$

## Закон Ампера для элемента линейного проводника

$$\mathbf{j}dV = I\mathrm{d}\mathbf{l} \quad \Rightarrow$$

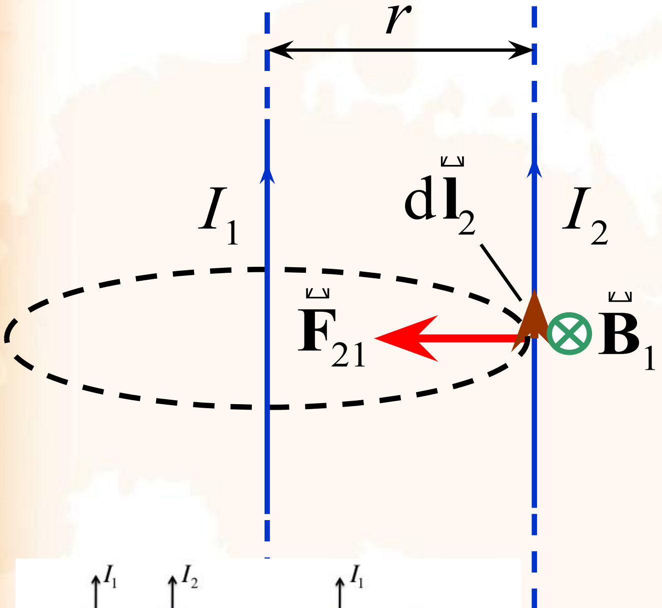
$$\boxed{\mathrm{d}\mathbf{F}_{\mathrm{A}} = I\left[\mathrm{d}\mathbf{l} \times \mathbf{B}\right]}$$

$$\boxed{\mathbf{F}_{\mathrm{A}} = I\int_L \left[\mathrm{d}\mathbf{l} \times \mathbf{B}\right]}$$

Андре́-Мари́ Ампе́р
1775-1836

# Закон Ампера

## Сила взаимодействия двух параллельных линейных бесконечных токов в вакууме

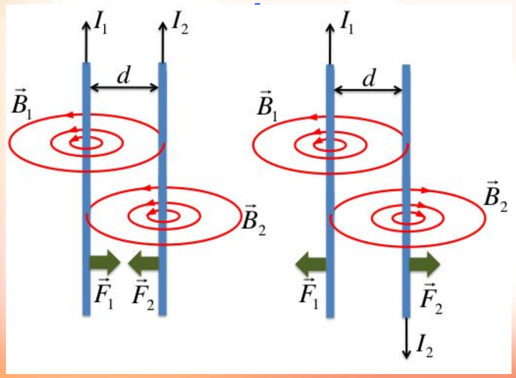



$$d\vec{\mathbf{F}}_{21} = I_2\left[d\vec{\mathbf{l}}_2 \times \vec{\mathbf{B}}_1\right]$$

$$dF_{21} = I_2 dl_2 B_1 \quad \Rightarrow$$

$$\frac{dF_{21}}{dl_2} = I_2 B_1, \quad B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

$$\Rightarrow \boxed{\frac{dF_{21}}{dl_2} = \frac{dF_{12}}{dl_1} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r},} \quad \frac{\text{Н}}{}$$



# Закон Ампера

## Единица силы тока в системе СИ

Прохождение тока силой в 1 Ампер по двум очень длинным тонким параллельным проводникам, находящимся в вакууме на расстоянии 1 метр друг от друга, вызывает силу взаимодействия F = **2 •10$^{-7}$ Н** на каждом участке проводника, длиной в 1 метр.

$$\frac{dF_{21}}{dl_2} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} \quad \Rightarrow \quad 2\cdot 10^{-7} = \frac{4\pi\cdot 10^{-7}\cdot 1\cdot 1}{2\pi\cdot 1}$$

1 Кулон – это заряд, проходящий за 1 с через поперечное сечение проводника, по которому течёт постоянный ток силой $I$ = 1 А.

# Спасибо за внимание!

# Вспоминаем: теорема Гаусса.

Поток вектора напряженности электрического поля через замкнутую поверхность равен алгебраической сумме заключенных внутри этой поверхности зарядов, деленной на электрическую постоянную $\varepsilon_0 = 4\pi k$

$$\boxed{\oint_S \mathbf{E}d\mathbf{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\sum_{i=1}^{N} q_i}$$

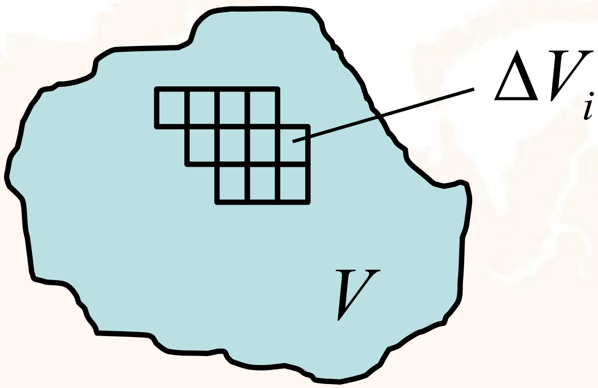
$$\mathrm{div}\boldsymbol{E} = d\Phi/dV = \\ = (\Sigma\, q_i/\varepsilon_0)dV = \\ = \rho/\varepsilon_0$$

$$\boxed{\mathrm{div}\,\mathbf{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}}$$

Дивергенция вектора напряженности электрического поля в точке равна плотности электрического заряда в данной точке, деленной на электрическую постоянную $\varepsilon_0$.

# Теорема Остроградского-Гаусса

Факт: поток через внешнюю поверхность группы микро-кубиков = сумме потоков через поверхности всех микро-кубиков




Га́усс И. К. Ф. (1777-1855)

Острогра́дский М. В. (1801-1861)

$$\Phi = \oint_S \vec{\mathbf{u}} \cdot d\vec{\mathbf{S}} = \sum_{i=1}^{N} \Delta\Phi_i \approx$$

$$\approx \sum_{i=1}^{N} \operatorname{div} \vec{\mathbf{u}}_i \, \Delta V_i \to \int_V \operatorname{div} \vec{\mathbf{u}} \, dV$$

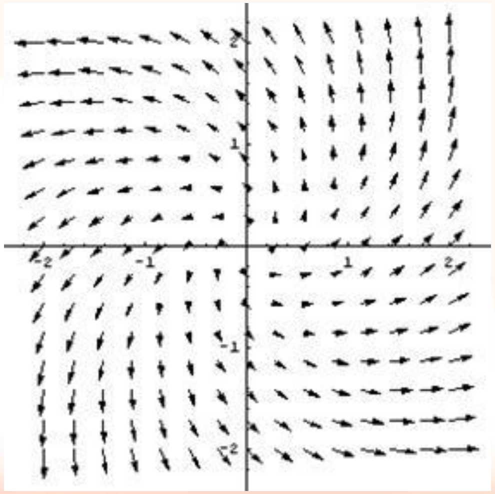
$$\begin{pmatrix} \Delta V_i \to 0 \\ N \to \infty \end{pmatrix}$$

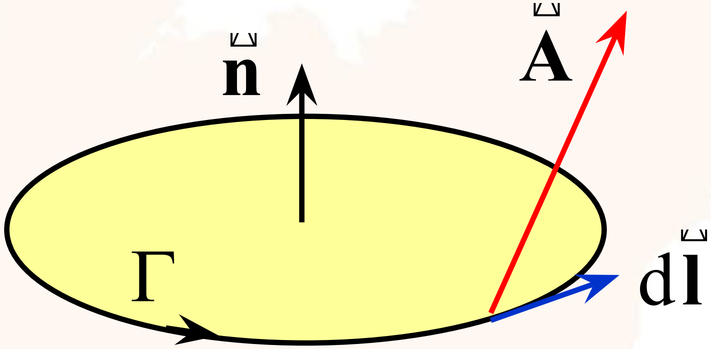
$$\boxed{\oint_S \vec{\mathbf{u}} \cdot d\vec{\mathbf{S}} = \int_V \operatorname{div} \vec{\mathbf{u}} \, dV}$$

# Циркуляция и ротор векторного поля

## Циркуляция векторного поля

$$C_{\vec{\mathbf{A}}} = \oint_{\Gamma} \left( \vec{\mathbf{A}}, d\vec{\mathbf{l}} \right)$$

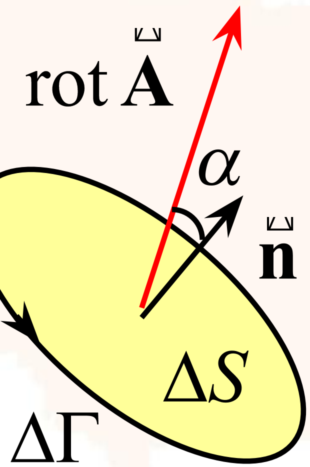





Если $\vec{\mathbf{A}} = \mathrm{const} \Rightarrow \oint_{\Gamma} \left( \vec{\mathbf{A}}, d\vec{\mathbf{l}} \right) = 0$

# Циркуляция и ротор векторного поля

## Ротор векторного поля



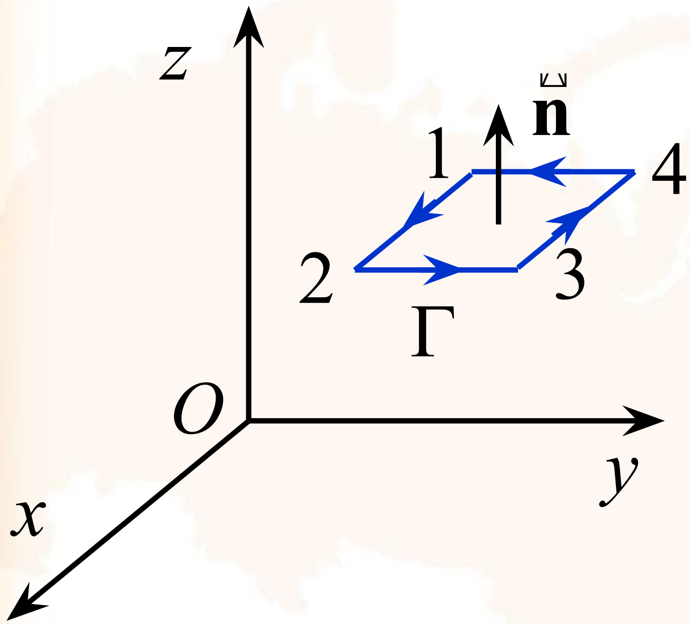

$$\lim_{\Delta S \to 0} \frac{\oint_{\Delta\Gamma} \left(\mathbf{A}, d\mathbf{l}\right)}{\Delta S} = f(\alpha)$$

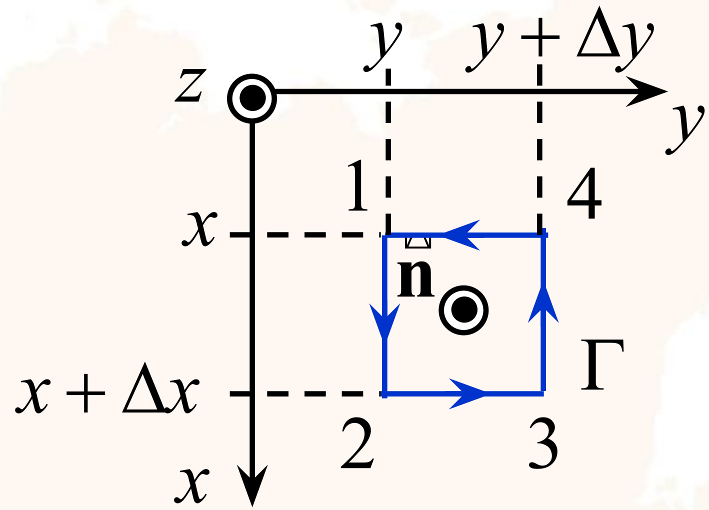
Можно доказать, что этот предел ведёт себя как проекция некоторого вектора, называемого ротором, на нормаль $\mathbf{n}$ к площадке.

$$\boxed{\left(\operatorname{rot}\mathbf{A}, \mathbf{n}\right) = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\oint_{\Delta\Gamma} \left(\mathbf{A}, d\mathbf{l}\right)}{\Delta S}}$$

# Циркуляция и ротор векторного поля

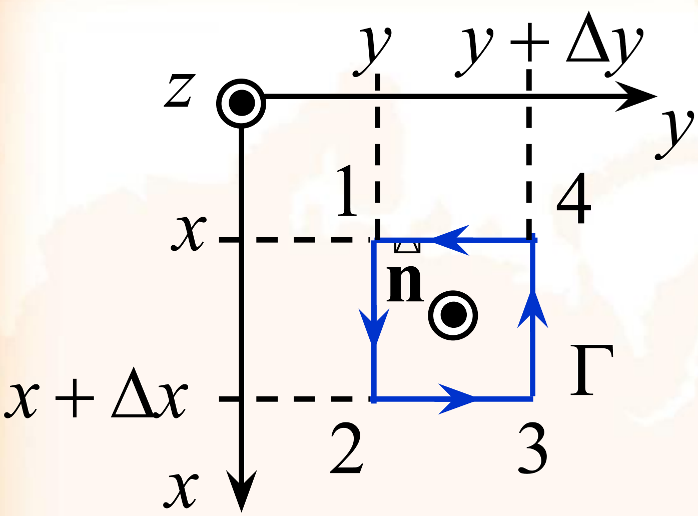
## Компоненты ротора в декартовых координатах




$$\left(\operatorname{rot}\mathbf{A}\right)_z = ?\qquad \mathbf{n} \parallel z \qquad \oint_{\Gamma}\left(\mathbf{A}, d\mathbf{l}\right) = ?$$

# Циркуляция и ротор векторного поля




$$\int_1^2 \left(\vec{\mathbf{A}}, d\vec{\mathbf{l}}\right) = \int_x^{x+\Delta x} A_x dx \approx A_x(x, y)\Delta x$$

$$\int_3^4 \left(\vec{\mathbf{A}}, d\vec{\mathbf{l}}\right) = \int_{x+\Delta x}^{x} A_x dx \approx$$

$$\approx -A_x(x, y+\Delta y)\Delta x$$

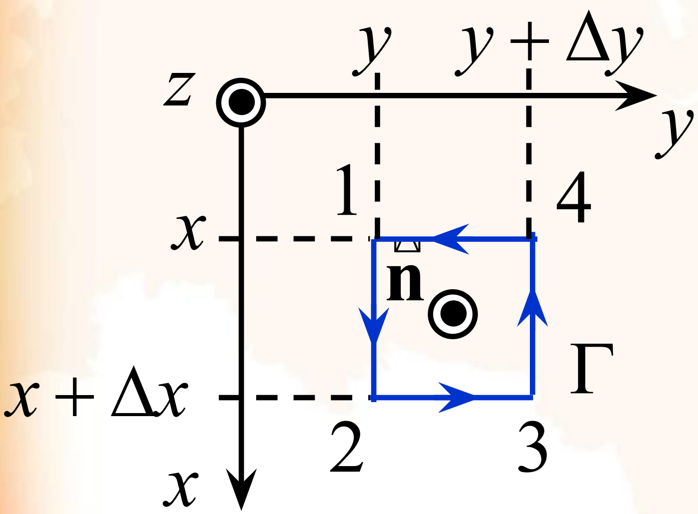
$$\int_4^1 \left(\vec{\mathbf{A}}, d\vec{\mathbf{l}}\right) = \int_{y+\Delta y}^{y} A_y dy \approx -A_y(x, y)\Delta y$$

$$\int_2^3 \left(\vec{\mathbf{A}}, d\vec{\mathbf{l}}\right) = \int_y^{y+\Delta y} A_y dy \approx A_y(x+\Delta x, y)\Delta y$$

# Циркуляция и ротор векторного поля

$$\oint\limits_{\Gamma}\left(\vec{\mathbf{A}},d\vec{\mathbf{l}}\right)\approx\left\{A_x(x,y)-A_x(x,y+\Delta y)\right\}\Delta x+$$

$$+\left\{A_y(x+\Delta x,y)-A_y(x,y)\right\}\Delta y\approx$$

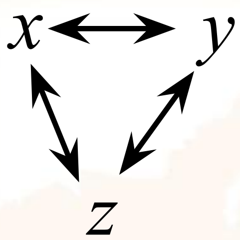



$$\approx-\frac{\partial A_x}{\partial y}\Delta x\Delta y+\frac{\partial A_y}{\partial x}\Delta x\Delta y=$$

$$=\left(\frac{\partial A_y}{\partial x}-\frac{\partial A_x}{\partial y}\right)\Delta S \qquad \Delta S=\Delta x\Delta y$$

$$\Delta S\to 0 \quad\Rightarrow\quad \frac{1}{\Delta S}\oint\limits_{\Gamma}\left(\vec{\mathbf{A}},d\vec{\mathbf{l}}\right)\to\frac{\partial A_y}{\partial x}-\frac{\partial A_x}{\partial y}=\left(\operatorname{rot}\vec{\mathbf{A}}\right)_z$$

# Циркуляция и ротор векторного поля



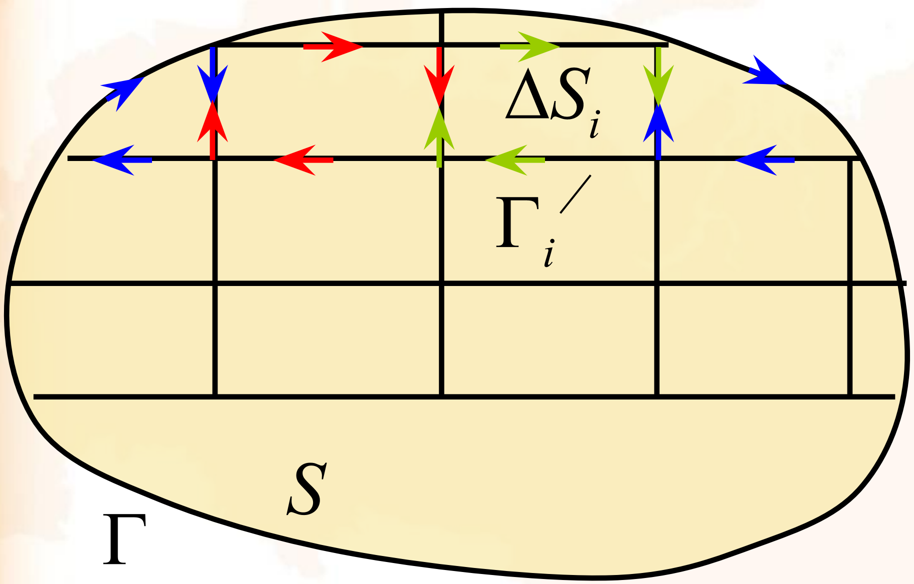

$$\frac{\partial A_z}{\partial y}-\frac{\partial A_y}{\partial z}=\left(\operatorname{rot}\vec{\mathbf{A}}\right)_x \qquad \frac{\partial A_x}{\partial z}-\frac{\partial A_z}{\partial x}=\left(\operatorname{rot}\vec{\mathbf{A}}\right)_y$$

$$\operatorname{rot}\vec{\mathbf{A}}=\left(\frac{\partial A_z}{\partial y}-\frac{\partial A_y}{\partial z}\right)\vec{\mathbf{e}}_x-\left(\frac{\partial A_z}{\partial x}-\frac{\partial A_x}{\partial z}\right)\vec{\mathbf{e}}_y+\left(\frac{\partial A_y}{\partial x}-\frac{\partial A_x}{\partial y}\right)\vec{\mathbf{e}}_z$$

$$\operatorname{rot}\vec{\mathbf{A}}=\left[\nabla,\vec{\mathbf{A}}\right]=\begin{vmatrix}\vec{\mathbf{e}}_x & \vec{\mathbf{e}}_y & \vec{\mathbf{e}}_z\\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z}\\ A_x & A_y & A_z\end{vmatrix}$$

Векторное поле называется вихревым, если ротор этого поля НЕ равен нулю тождественно.

## Теорема Стокса




$$\oint_{\Gamma}(\mathbf{A}, d\mathbf{l}) = \sum_{i=1}^{N} \oint_{\Gamma_i}(\mathbf{A}, d\mathbf{l}) \approx$$

$$\approx \sum_{i=1}^{N}(\mathrm{rot}\,\mathbf{A}_i, \mathbf{n}\Delta S_i) \rightarrow$$

$$\rightarrow \int_S (\mathrm{rot}\,\mathbf{A}, \mathbf{dS})$$

$$N \rightarrow \infty$$

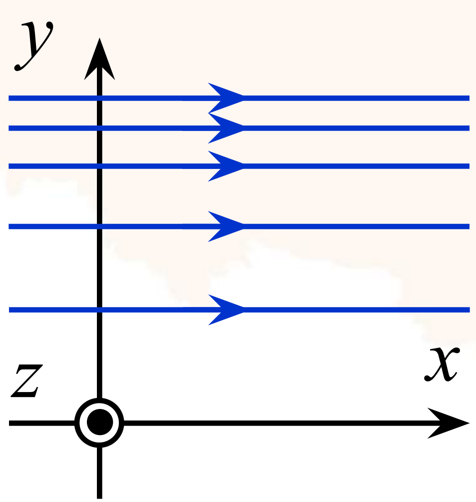
$$\Delta S_i \rightarrow 0$$

$$\Rightarrow \boxed{\oint_{\Gamma}(\mathbf{A}, d\mathbf{l}) = \int_S (\mathrm{rot}\,\mathbf{A}, \mathbf{dS})}$$

# Пример вихревого поля

$$\vec{\mathbf{A}} = A_x(y)\,\vec{\mathbf{e}}_x$$

Является ли это поле вихревым?

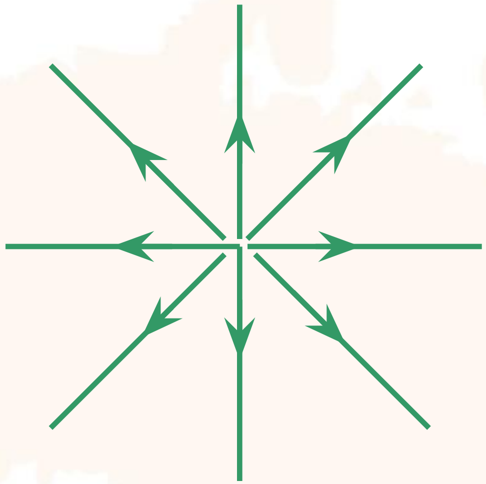



$$\operatorname{rot}\vec{\mathbf{A}} = \left[\nabla, \vec{\mathbf{A}}\right] = \begin{vmatrix} \vec{\mathbf{e}}_x & \vec{\mathbf{e}}_y & \vec{\mathbf{e}}_z \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix}$$

$$\Rightarrow \quad \operatorname{rot}\vec{\mathbf{A}} = -\frac{\partial A_x}{\partial y}\vec{\mathbf{e}}_z$$

# Пример не вихревого поля

**Пример.** $\mathbf{A} = A(r)\mathbf{e}_r$ Является ли это поле вихревым?



$$\oint_\Gamma (\mathbf{A}, d\mathbf{l}) = \oint_\Gamma (A(r)\mathbf{e}_r, d\mathbf{l}) = 0$$

$$\Rightarrow \quad \mathrm{rot}\,\mathbf{A} = 0$$

Из физики: $\oint_\Gamma (\mathbf{E}, d\mathbf{l}) = 0$

***rot E*** = 0 => Электростатическое поле НЕ является вихревым

# Основные законы магнитостатики

## Теорема Гаусса для вектора магнитной индукции

Опыт показывает, что в природе нет магнитных зарядов, которые могли бы послужить источниками магнитного поля.

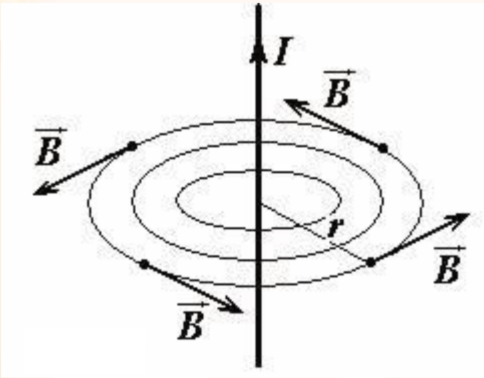
$$\Rightarrow \boxed{\oint_S \vec{\mathbf{B}} d\vec{\mathbf{S}} = 0} \qquad \Rightarrow \boxed{\operatorname{div} \vec{\mathbf{B}} = 0}$$

**Замечание.** Опыт показывает, что данные уравнения справедливы не только для постоянных, но и для переменных магнитных полей.

## Циркуляция и ротор вектора магнитной индукции

Циркуляция по контуру вокруг прямого проводника с током:

*dl = rda => rda/r = da =>.*




$$\oint_{\Gamma} \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \oint_{\Gamma} d\alpha =$$

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

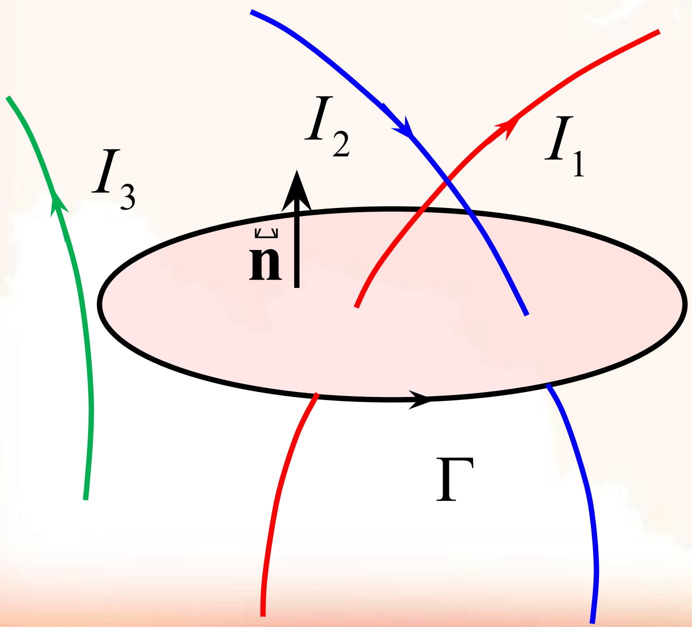
$$\boldsymbol{rot\ B} = \mu_0 I/\pi r^2 = \boldsymbol{j}.$$

Знак плюс, если ток направлен вверх (как и нормаль к контуру интегрирования)

# Основные законы магнитостатики

Случай нескольких токов $\vec{\mathbf{B}} = \sum_{i=1}^{N} \vec{\mathbf{B}}_i$

$$\oint_\Gamma \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \oint_\Gamma \sum_{i=1}^{N} \vec{\mathbf{B}}_i \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \sum_{i=1}^{N} \oint_\Gamma \vec{\mathbf{B}}_i \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \mu_0 \sum_{i=1}^{N} I_i$$

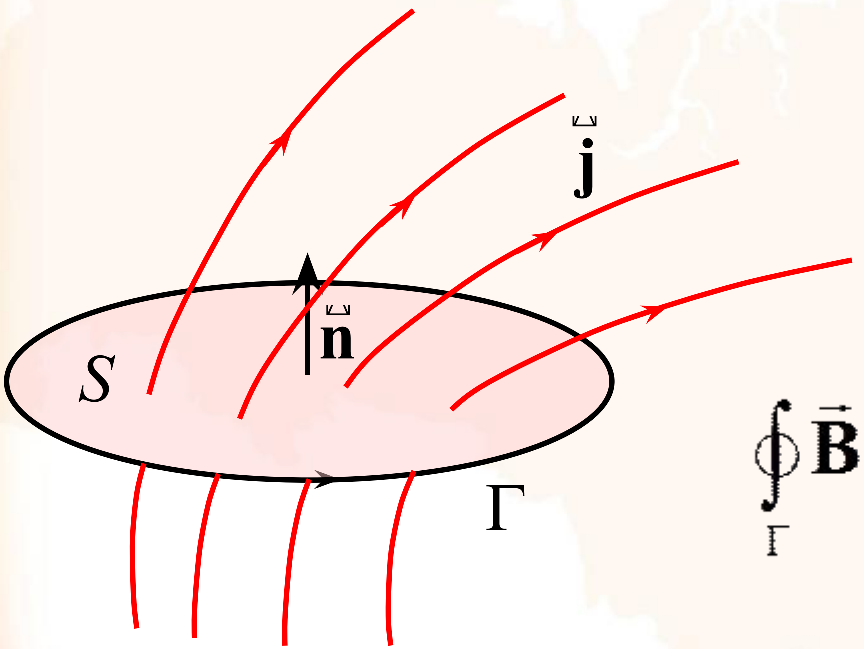



Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции

$$\boxed{\oint_\Gamma \vec{\mathbf{B}} \cdot d\vec{\mathbf{l}} = \mu_0 \sum_{i=1}^{N} I_i}$$

## Ротор магнитного поля

Непрерывное распределение токов $$I = \sum_{i=1}^{N} I_i = \int_S \mathbf{j} \cdot \mathbf{dS}$$




$$\boxed{\oint_\Gamma \vec{\mathbf{B}} \cdot \mathrm{d}\vec{\mathbf{l}} = \mu_0 \int_S \mathbf{j} \cdot \mathbf{dS}}$$

$$\oint_\Gamma \vec{\mathbf{B}} \cdot \mathrm{d}\vec{\mathbf{l}} = \int_S \left(\mathrm{rot}\,\mathbf{B} \cdot \mathbf{dS}\right) = \mu_0 \int_S \mathbf{j} \cdot \mathbf{dS}$$

$$\Rightarrow \boxed{\mathrm{rot}\,\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{j}}$$

# Основные законы магнитостатики

**Замечание 1.** Магнитное поле является вихревым, поскольку его ротор НЕ равен нулю тождественно.
**Замечание 2.** Любое векторное вихревое поле (в частности – магнитное ***B***) можно представить в виде ротора другой векторной функции: $\vec{\mathbf{B}} = \operatorname{rot} \vec{\mathbf{A}}$

Где вектор ***A*** называют *векторным потенциалом* магнитного поля. Для магнитного поля, создаваемого точечным равномерно движущимся зарядом $\boldsymbol{B} = (\mu_0/4\pi)q[\boldsymbol{v},\boldsymbol{r}]/r^3$

$$\boldsymbol{A} = (\mu_0/4\pi)q\boldsymbol{v}/r = \mu_0\varepsilon_0\varphi\boldsymbol{v} = \varphi\boldsymbol{v}/c^2$$

ДЗ: проверить формулу!

# Магнитная постоянная и скорость света.

$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Н/А$^2$ = $12{,}56 \cdot 10^{-7}$ Н/А$^2$ - *магнитная постоянная*

$\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Кл$^2$/Нм$^2$ - *электрическая постоянная (из закона Кулона)*

$\mu_0 \varepsilon_0 = 1{,}256 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}885 \cdot 10^{-11}$ [Н/А$^2$ • Кл$^2$/Нм$^2$] = $1{,}1 \cdot 10^{-17}$[с$^2$/м$^2$]

$(\mu_0 \varepsilon_0)^{-1/2} = (0{,}11 \cdot 10^{-16})^{-1/2}$[м/с] = $3 \cdot 10^8$ м/с = с (скорость света)

## Основные законы электростатики и магнитостатики

$$\oint_S \vec{\mathbf{E}} \cdot \overrightarrow{\mathbf{dS}} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{N} q_i$$

$$\oint_S \vec{\mathbf{B}} \overrightarrow{\mathbf{dS}} = 0$$

$$\left(\nabla \cdot \vec{\mathbf{E}}\right) = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\left(\nabla \cdot \mathbf{B}\right) = 0$$

$$\oint_\Gamma \vec{\mathbf{E}} \cdot \mathrm{d}\vec{\mathbf{l}} = 0$$

$$\oint_\Gamma \vec{\mathbf{B}} \cdot \mathrm{d}\vec{\mathbf{l}} = \mu_0 \sum_{i=1}^{N} I_i$$

$$\left[\nabla \times \vec{\mathbf{E}}\right] = 0$$

$$\left[\nabla \times \vec{\mathbf{B}}\right] = \mu_0 \vec{\mathbf{j}}$$

**Спасибо за внимание!**

Следующая лекция
10 ноября