

Лекция 11.
ЭДС. Правила Кирхгофа.
Магнитное поле



§ 13. Электродвижущая сила

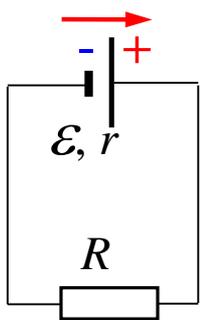
13.1. Источники тока. ЭДС

$$\mathcal{E} = \frac{A^{ст.}}{q}$$

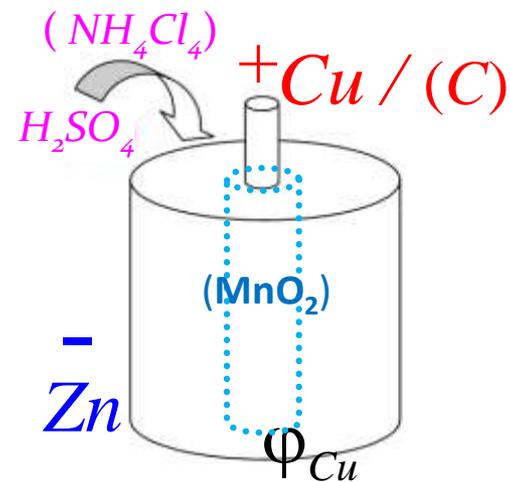
??

Вольты

➔ (Опр.) ЭДС равна отношению работы сторонних сил по перемещению заряда в источнике тока к величине этого заряда



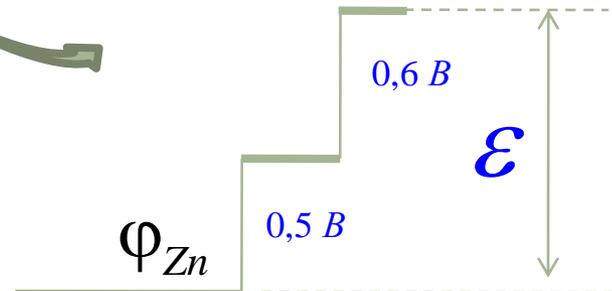
“Химический” источник тока
«Элемент Вольта»:



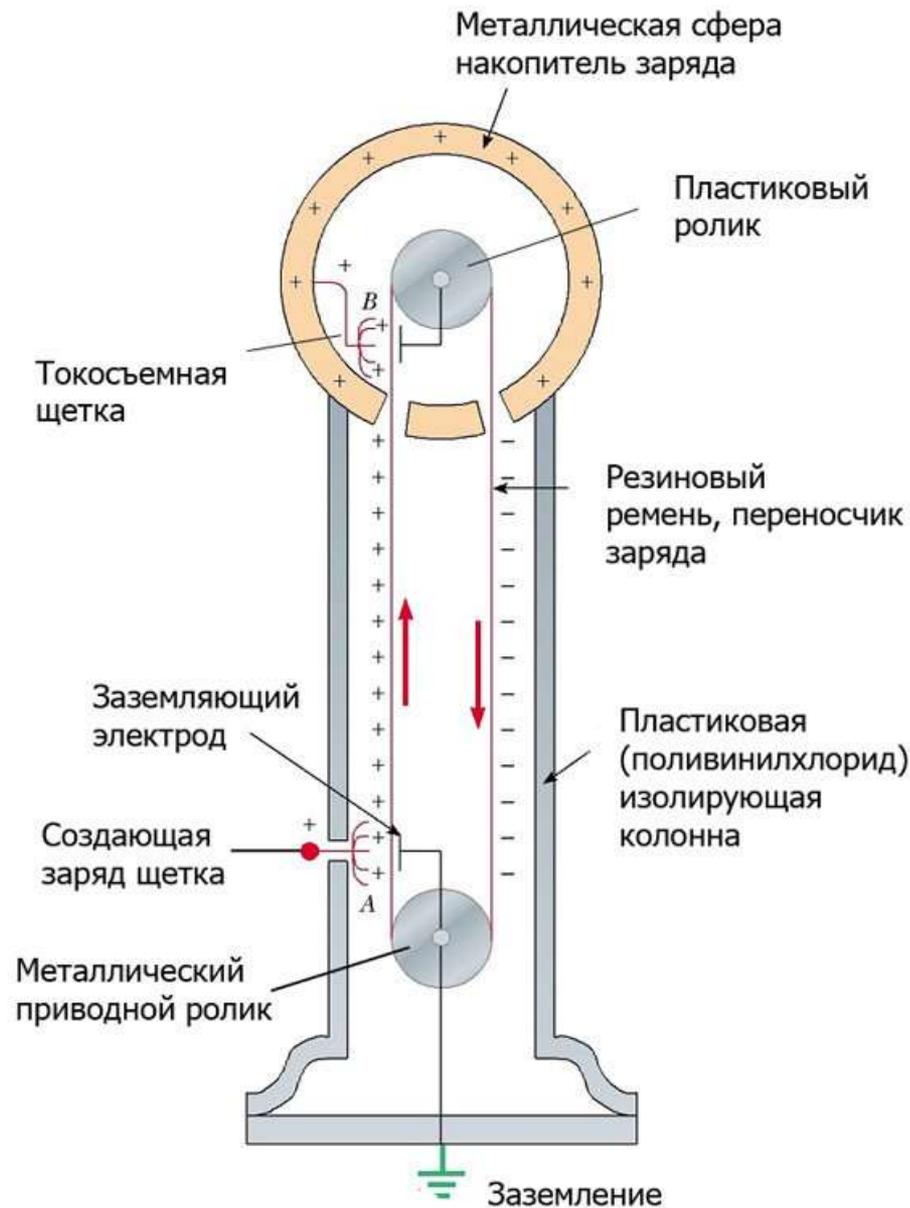
сульфат цинка



$A^{ст.}$: $7 \cdot 10^6$ Дж/кг !!

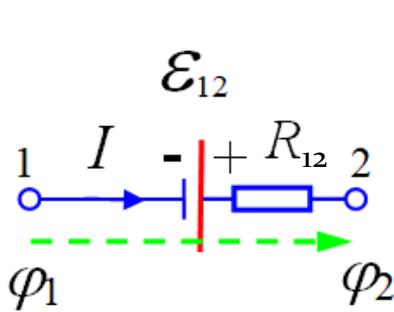


Генератор Ван-де-Граафа



13.1. Закон Ома для неоднородного участка цепи

(на котором **действует ЭДС**)



$$A_{1 \rightarrow 2} = \underbrace{q \cdot (\varphi_1 - \varphi_2)}_{\text{работа поля}} + \underbrace{q \cdot \mathcal{E}_{12}}_{\text{работа сторонних сил}}$$

$$Q = I^2 R_{12} \cdot \Delta t \quad \text{заряд}$$

$$I^2 R_{12} \cdot \Delta t = \underline{\underline{(I \Delta t) \cdot I \cdot R_{12} = q \cdot IR_{12}}}$$

Сохранение энергии: $A_{1 \rightarrow 2} \rightarrow Q$:

$$I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}}{R_{12}}$$

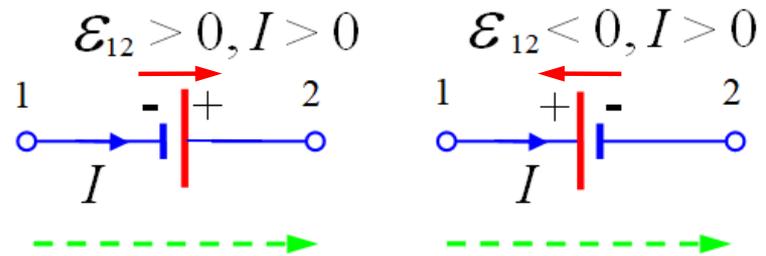
$$I \cdot R_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$$

(А можно и так: $\varphi_1 + \mathcal{E}_{12} - I \cdot R_{12} = \varphi_2$)

Здесь I и \mathcal{E}_{12} – величины «алгебраические»! (\pm)

Важные замечания:

1. Знаки: ?!



«направление обхода»

2. $\mathcal{E} = 0$ $\rightarrow I = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}$

(“однородный участок”)

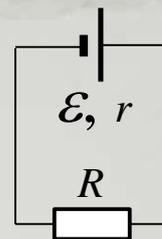
3. $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$:

соединим точки «1» и «2» - замкнём цепь



$$I = \frac{\mathcal{E}}{R + r}$$

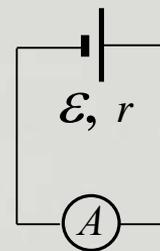
“Замкнутая цепь”
(/ “Полная цепь”)



4. “Внутреннее сопротивление источника”: $R_{12} - R = r$

“Короткое замыкание” – $R = 0$:

$$r = \frac{\mathcal{E}}{I_{\text{к.з.}}}$$



5. u_{12} – “напряжение” (IR_{12}): $u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$

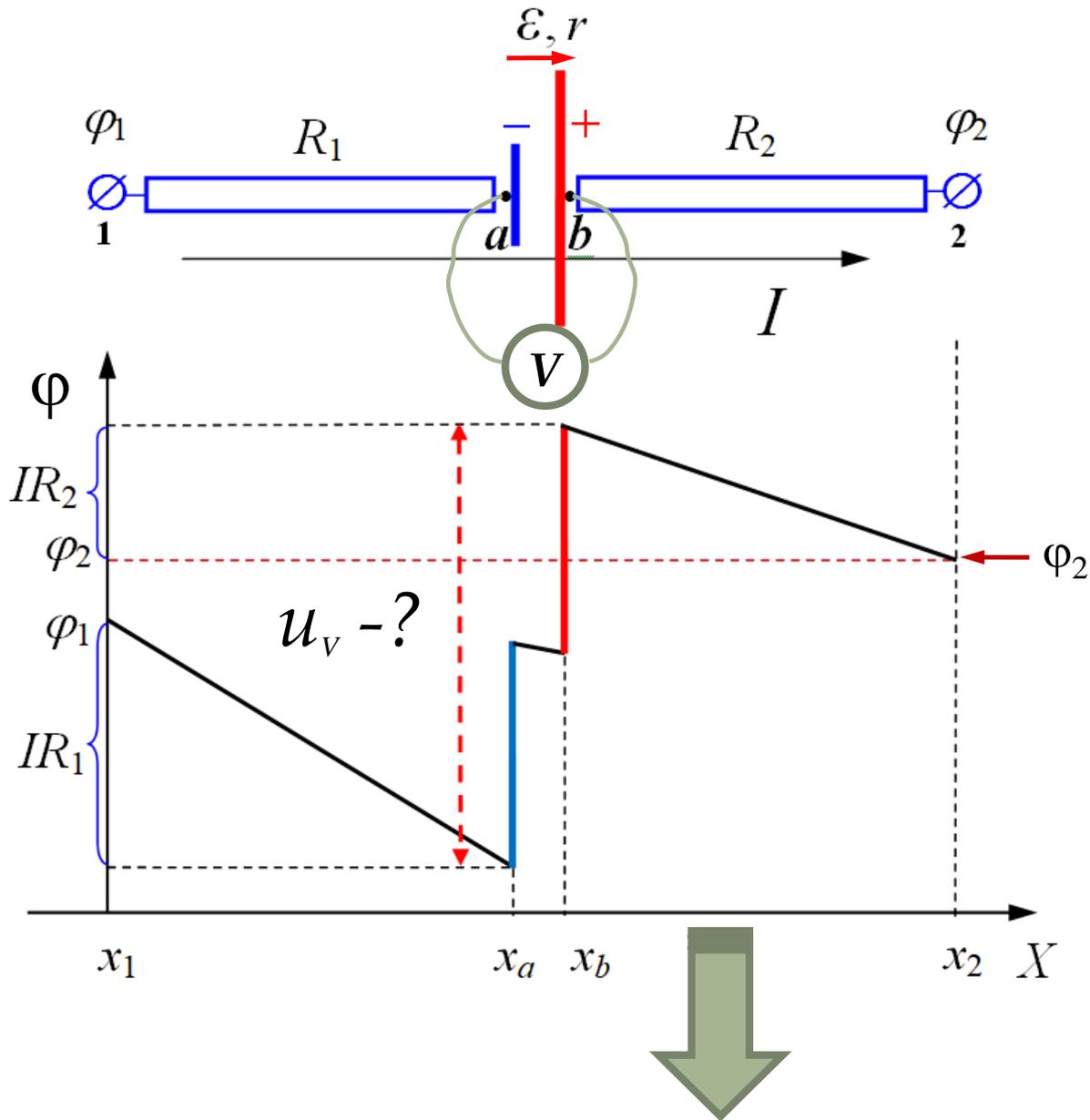
Удельная работа электрических **И** сторонних сил на участке цепи **!!**

$u_{12} \neq \varphi_1 - \varphi_2$ в общем случае

Полезное дополнение :



“Эволюция” потенциала:



1) Может ли φ_2 быть больше φ_1

??

2) Что покажет вольтметр U_V

??

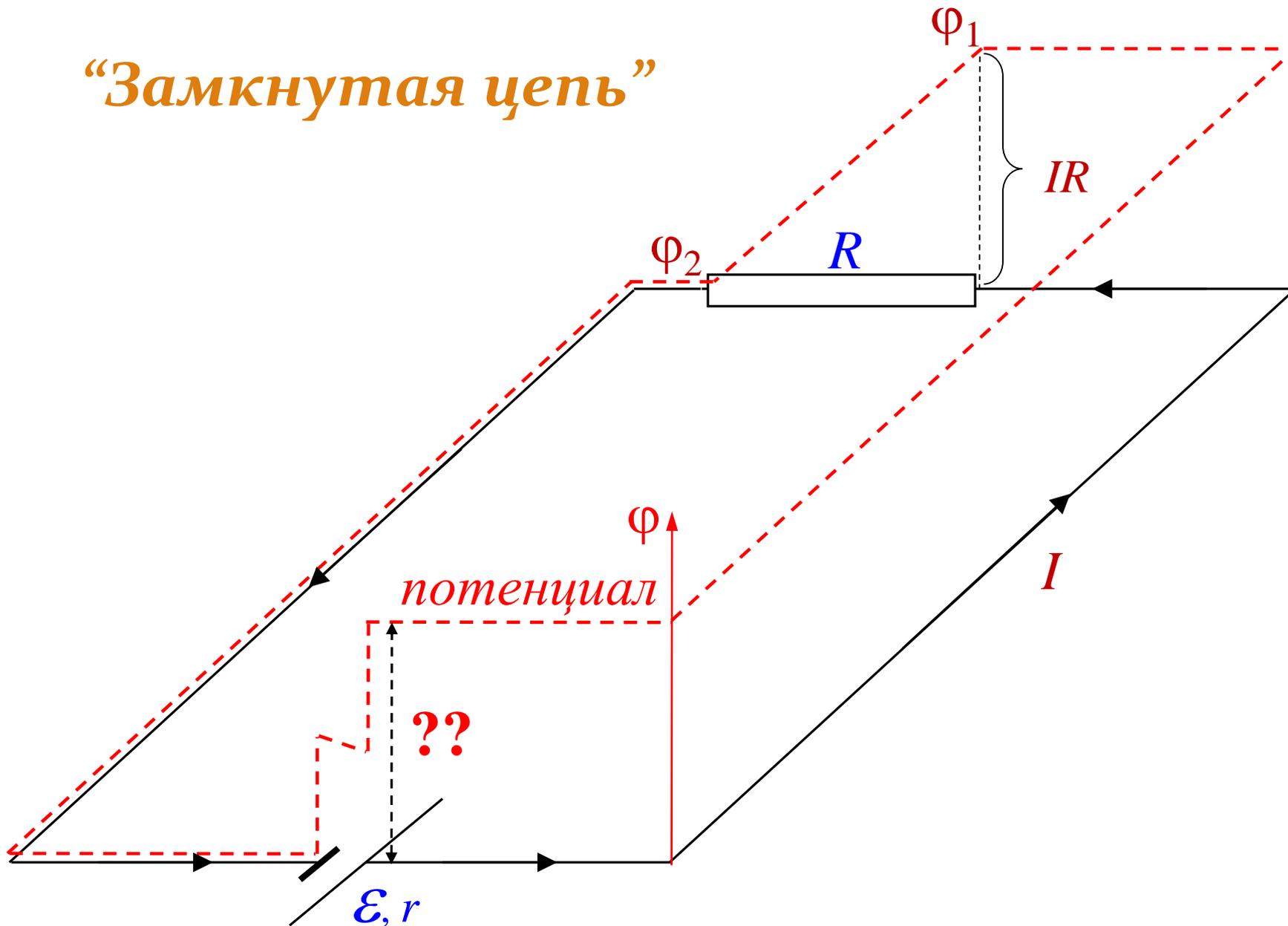
3) Как измерить ε

??

4) А если поменять полярность ε

??

“Замкнутая цепь”



13.3. Разветвлённые цепи. Правила Кирхгофа

Правила Кирхгофа

- 1. Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю:
- 2. Алгебраическая сумма произведений сил токов на полные сопротивления в неразветвлённых участках контура равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в контуре:

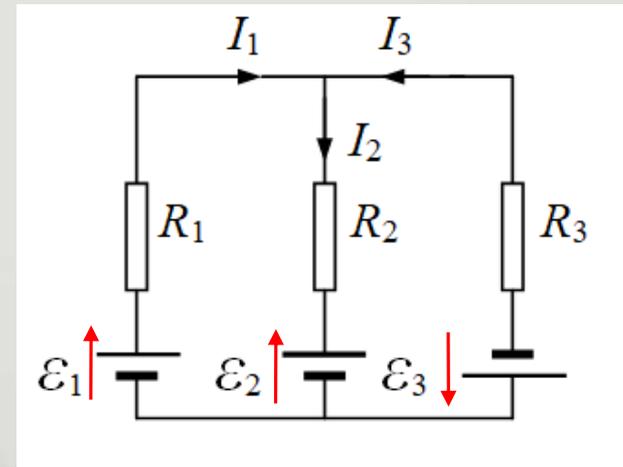
$$\sum_{i=1}^N I_i = 0$$

$$\sum_i I_i (R_i + r_i) = \sum_i \mathcal{E}_i$$

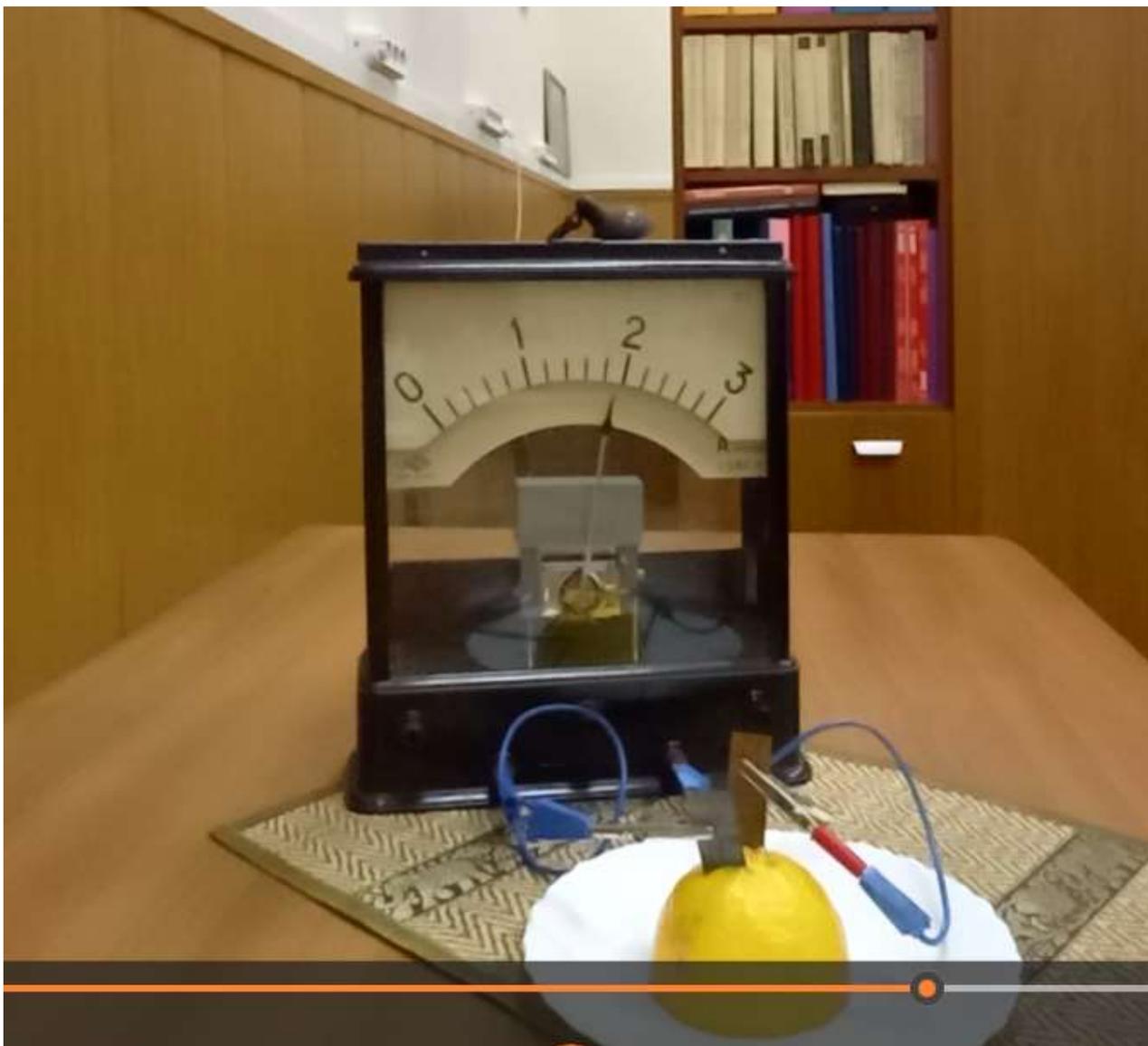
• Пример Задача 9.12.

В схеме, изображенной на рисунке $\mathcal{E}_1 = 10 \text{ В}$, $\mathcal{E}_2 = 20 \text{ В}$, $\mathcal{E}_3 = 30 \text{ В}$, $R_1 = 9 \text{ Ом}$, $R_2 = 7 \text{ Ом}$, $R_3 = 12 \text{ Ом}$. Найти силы токов I_1, I_2, I_3 . Внутренними сопротивлениями источников тока пренебречь.

Знаки !!!



“Химический” источник тока – “элемент Вольта”



§ 14. Магнитное поле в вакууме

14.1. Взаимодействие токов

Опыт Эрстеда (1820)

Опыты Ампера (1820 – ...)

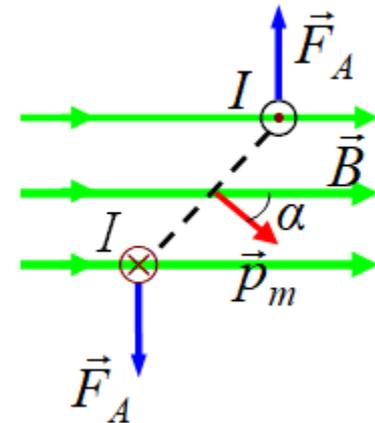
Опыты Био, Савара (1820 – ...)

14.2. Магнитное поле. Вектор магнитной индукции

Пробный виток: $\vec{p}_m = IS\vec{n}$

Вектор магнитной индукции: 1) $\vec{B} \uparrow\uparrow \vec{p}_m^{(op.)}$;

2)
$$B = \frac{N_{\max}}{p_m}$$

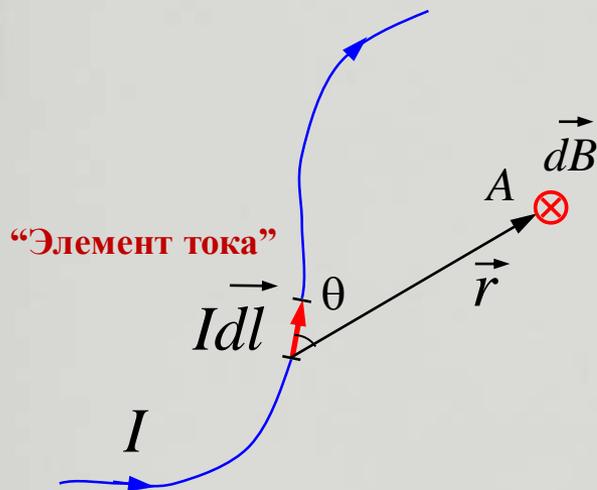


14.3. Принцип суперпозиции для магнитного поля

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \vec{B}_3 + \dots$$

Поля от разных источников складываются!

14.4. Закон Био – Савара - Лапласа

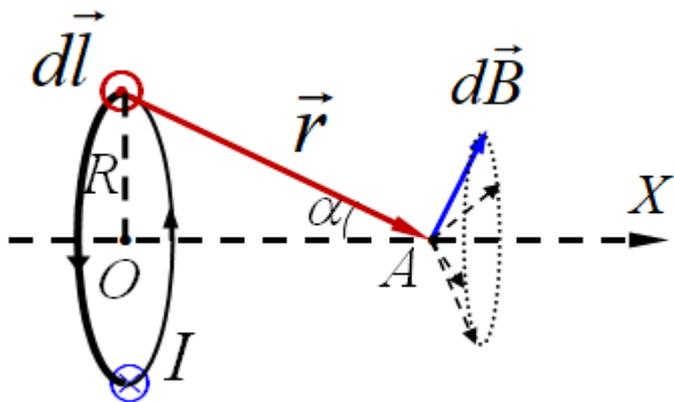


$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}$$

Модуль: $dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin\theta}{r^2}$

Пример 1. Найти индукцию магнитного поля прямолинейного длинного проводника с током

... **ещё** Пример 2: Найти индукцию магнитного поля на оси кольцевого витка с током (**Задача 10.3**)



$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin\theta}{r^2}$$

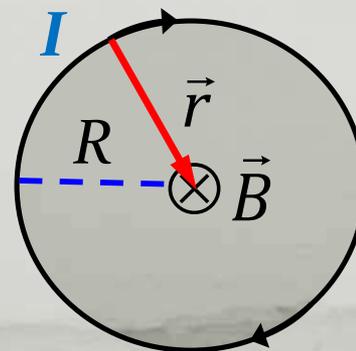
$\theta = \dots ?$

$$B = \sum dB_x = \sum (dB \cdot \sin\alpha)$$

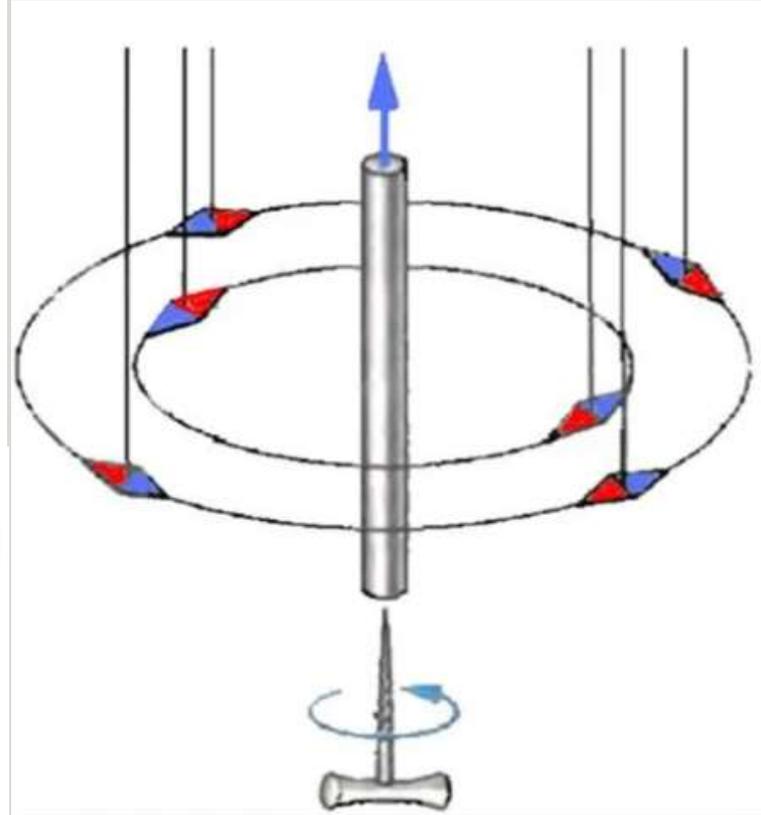
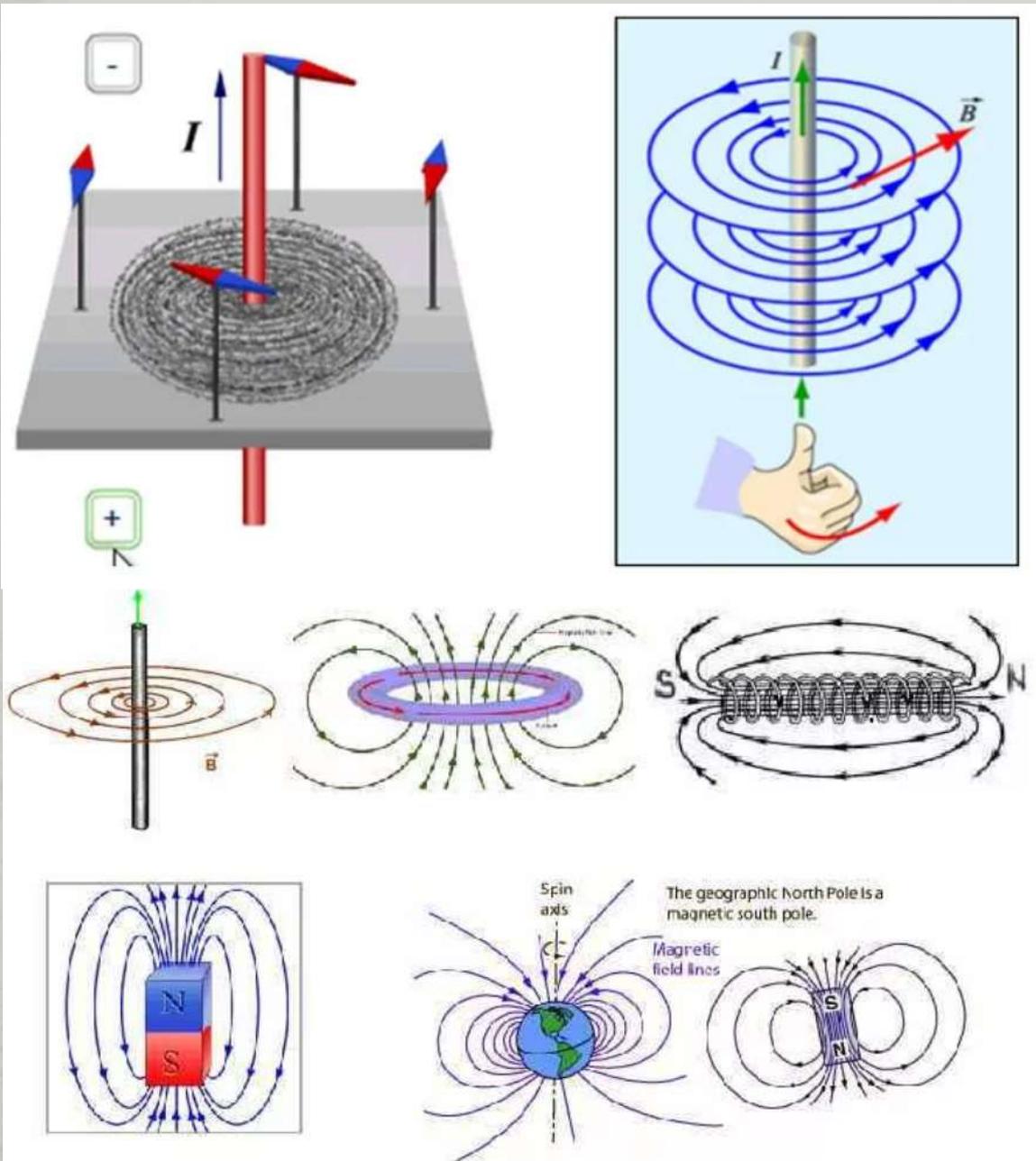
$$B = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\vec{p}_m}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \rightarrow \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{2\vec{p}_m}{x^3}$$

А в центре кольца ?

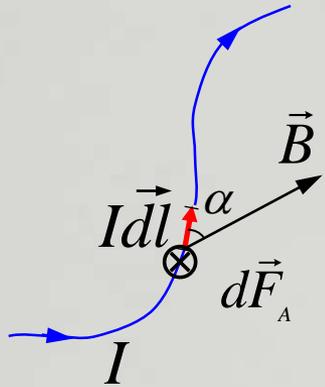


Линии магнитной индукции



14.6. Сила Ампера

– сила, действующая на элемент проводника с током в магнитном поле:



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

$$dF_A = Idl \cdot B \cdot \sin \alpha$$

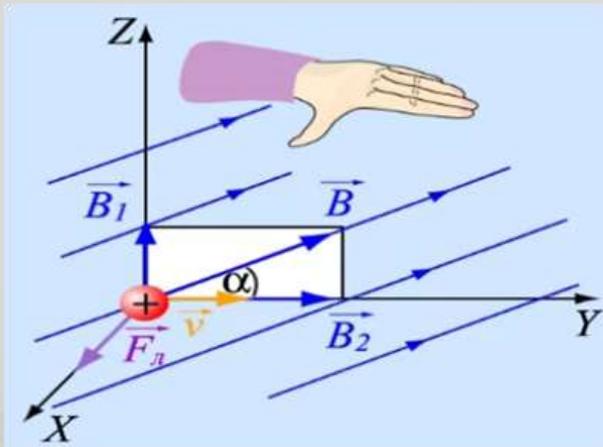
Пример. Два параллельных проводника с током:

Д.3.

$$F_A = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$$

14.7. Сила Лоренца (1895 г.)

Сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле

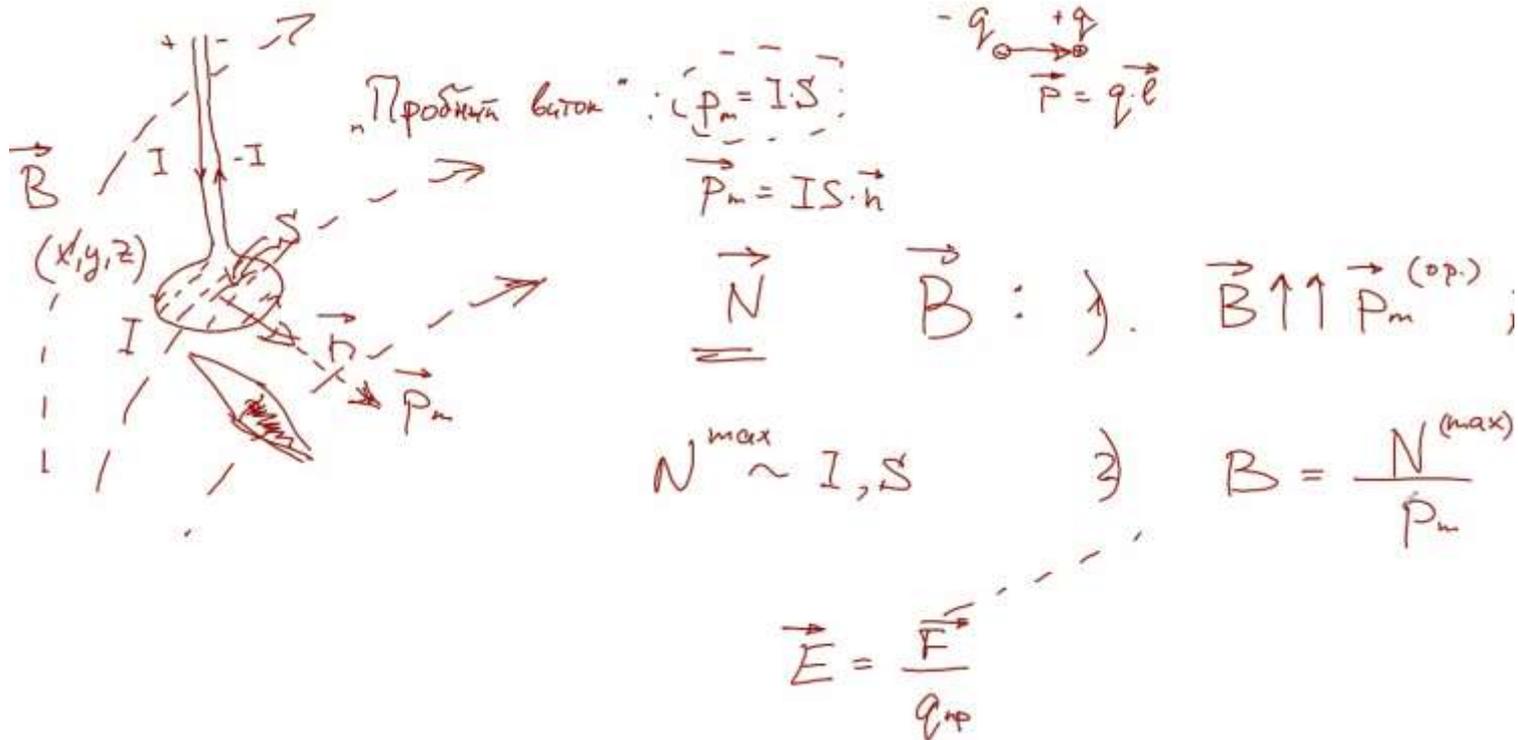


$$\vec{F}_L = q \cdot [\vec{v}, \vec{B}]$$

$$F_L = |q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Эксперимент !!

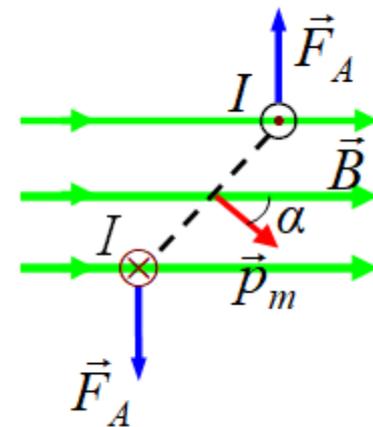
Доска



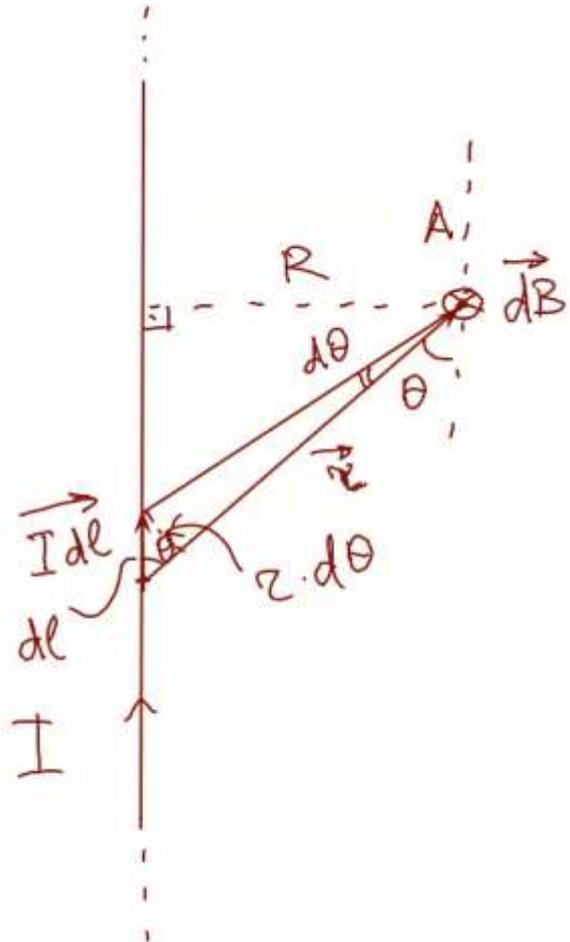
Пробный виток: $\vec{p}_m = IS\vec{n}$

Вектор магнитной индукции: 1) $\vec{B} \uparrow \uparrow \vec{p}_m^{(op.)}$;

2) $B = \frac{N_{max}}{p_m}$



доска



1) Разбьем на

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{Idl \sin\theta}{r^2}$$

$$dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{R \sin\theta \cdot \sin\theta}{\sin^2\theta \cdot R^2}$$

2) $B = \sum dB$

$$B = \sum dB$$

3) $\theta, d\theta$ $r = \frac{R}{\sin\theta}$

$$dl = \frac{r d\theta}{\sin\theta} = \frac{R}{\sin^2\theta} d\theta$$

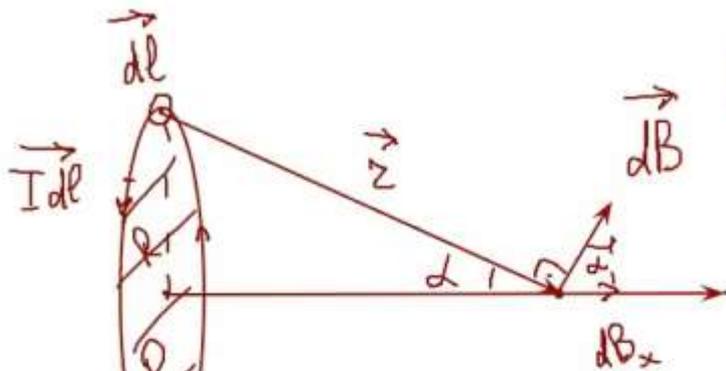
4) $B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} \int_0^\pi \sin\theta d\theta = \frac{\mu_0}{4\pi R} (-\cos\theta) \Big|_0^\pi = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$

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

доска

$$\vec{dB} \perp \vec{z}, \perp \vec{Idl}$$

$$\vec{z} \perp \vec{Idl} \quad \theta = \frac{\pi}{2}$$



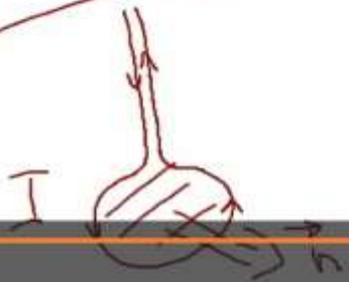
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl}{r^2}$$

$$dB_x = dB \cdot \sin \alpha = dB \cdot \frac{R}{\sqrt{R^2 + x^2}}$$

$$B(x) = \frac{\mu_0 I \cdot R}{4\pi (R^2 + x^2)^{3/2}} \int dl =$$

$$B(x) = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \cdot \frac{2\pi R^2}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

$$\vec{P}_m = I \vec{s} \cdot \vec{n}$$



a) $x \gg R$

$$B(x) = \frac{\mu}{4\pi} \frac{2\vec{P}_m}{x^3}$$

