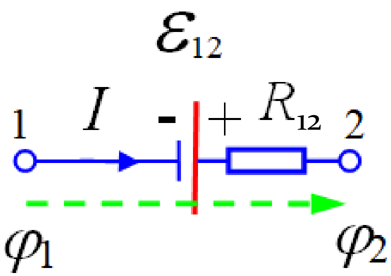
Лекция 12. *Магнитное поле*

13.1. Закон Ома для неоднородного участка цепи

(на котором действует ЭДС)



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

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

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

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

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

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

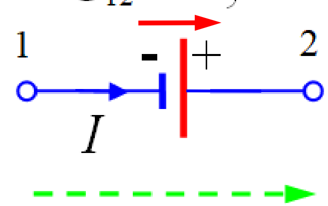
(*А можно и так:* $\varphi_1 + \mathcal{E}_{12} - I\cdot R_{12} = \varphi_2$)

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

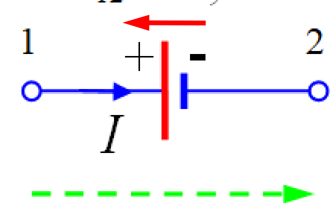
Важные замечания:

1. Знаки: ?!

$\mathcal{E}_{12} > 0, I > 0$



$\mathcal{E}_{12} < 0, I > 0$



«направление обхода»

2. $\mathcal{E} = 0$ $\quad\to\quad I = \dfrac{\varphi_1 - \varphi_2}{R}$

(“однородный участок”)

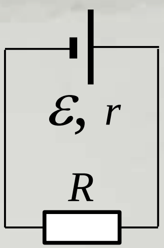
3. $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$**:**

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

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

“Замкнутая цепь”

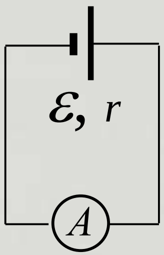
(/ ”Полная цепь”)



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

“Короткое замыкание” – $R = 0$:

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



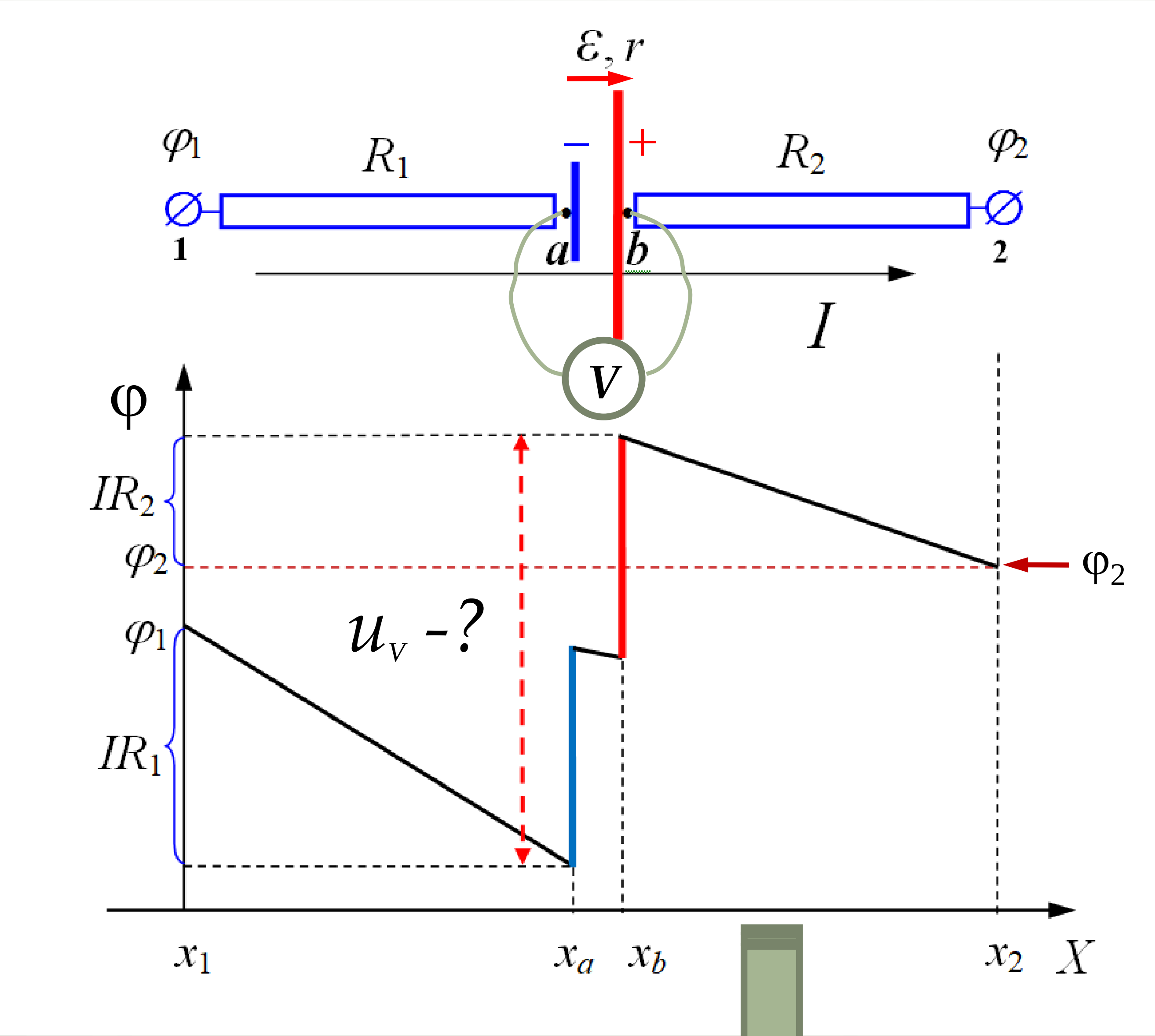
5. u_{12} **– “напряжение”** (IR_{12})**:** $u_{12} = \varphi_1 - \varphi_2 + \mathcal{E}_{12}$

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 $\mathcal{E}$

??

4) А если поменять полярность $\mathcal{E}$

??

13.3. Разветвлённые цепи. Правила Кирхгофа

Правила Кирхгофа

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

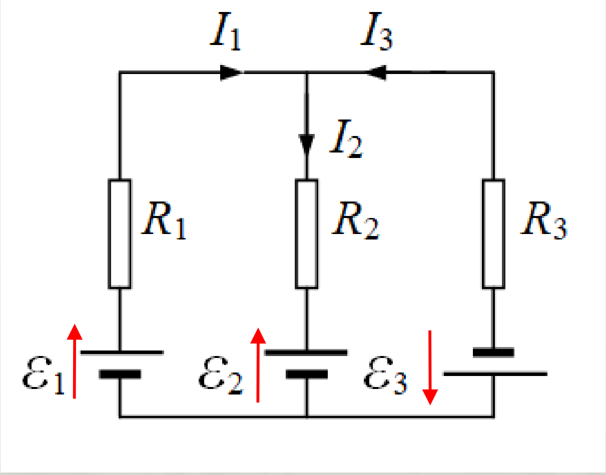
- 1. *Алгебраическая сумма сил токов, сходящихся в узле, равна нулю:*
- 2. *Алгебраическая сумма произведений сил токов на полные сопротивления в неразветвлённых участках контура равна алгебраической сумме ЭДС, действующих в контуре:*

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

- Пример **Задача 9.12.**

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

Знаки !!?



§ 14. Магнитное поле в вакууме

14.1. Взаимодействие токов

Опыт Эрстеда (1820)

Опыты Ампера (1820 – …)

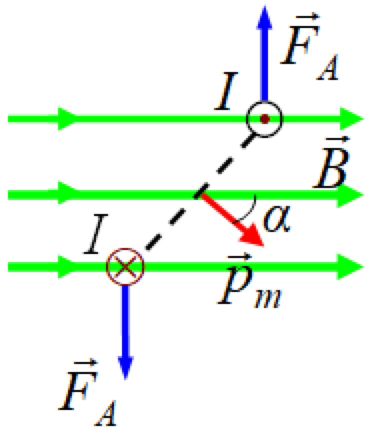
Опыты Био, Савара (1820 – …)

14.2. Магнитное поле. Вектор магнитной индукции

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

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

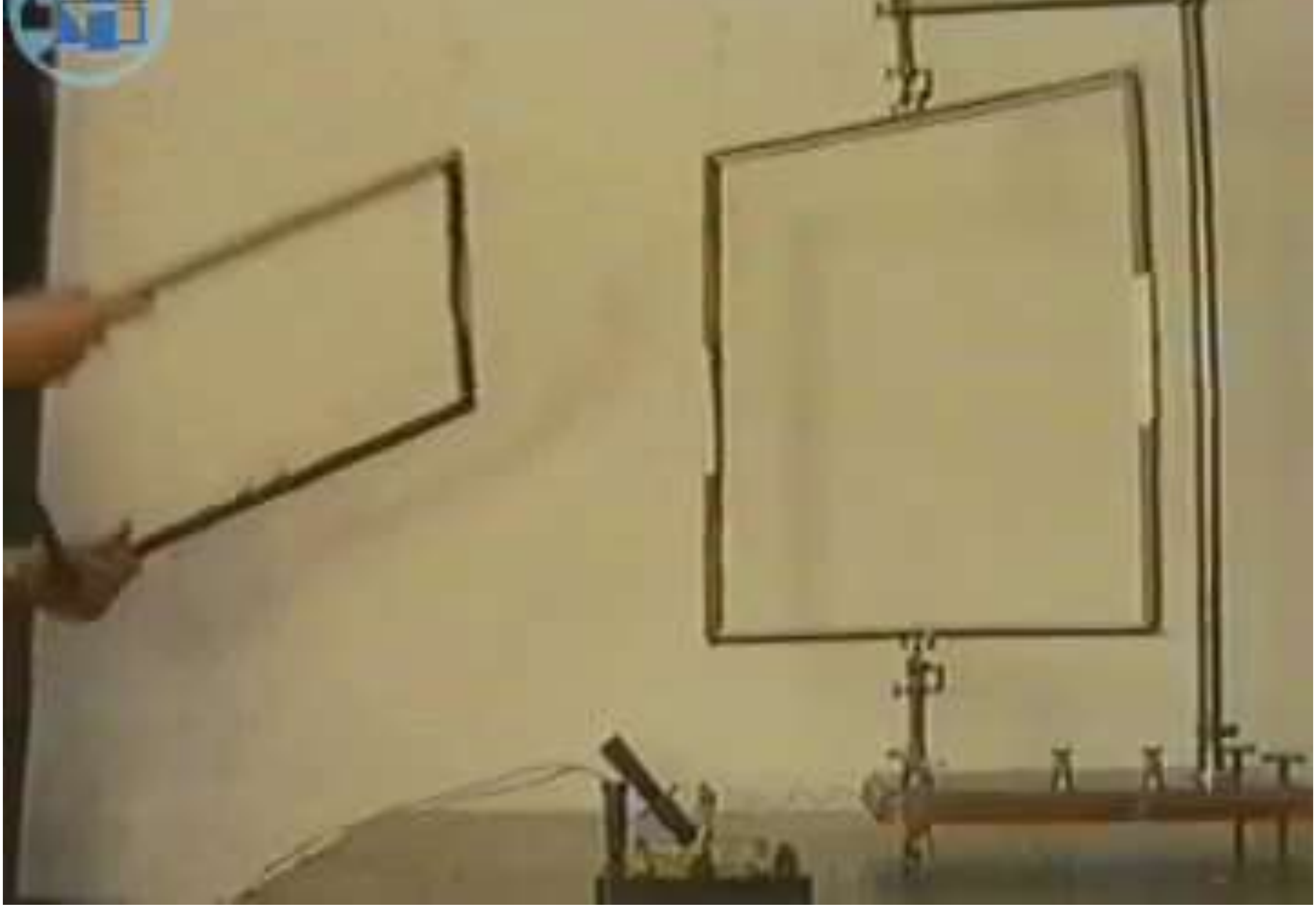
2) $B = \dfrac{N_{\max}}{p_m}$



Опыт Эрстеда (1820) *Опыты Ампера (1820 – …)*

Опыты Ампера (1820 – …)

Опыты Ампера (1820 – …)



§ 14. Магнитное поле в вакууме

14.1. Взаимодействие токов

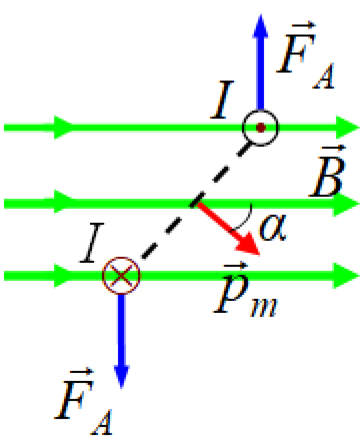
Опыт Эрстеда (1820)

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) $B = \dfrac{N_{\max}}{p_m}$

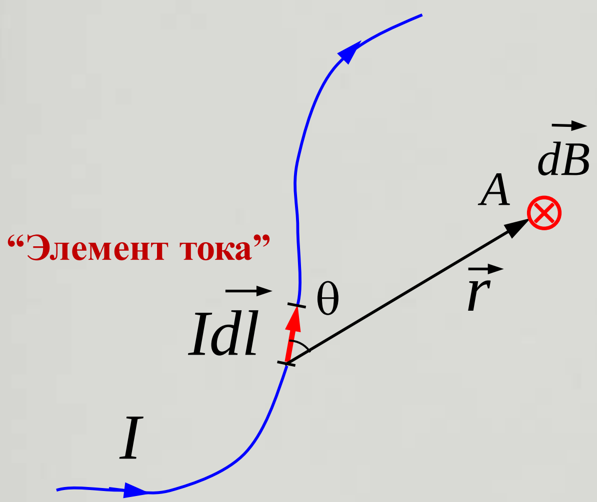
Рамка с током в магнитном поле

14.3. Принцип суперпозиции для магнитного поля

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

Поля от разных источников складываются!

14.4. Закон Био – Савара - Лапласа

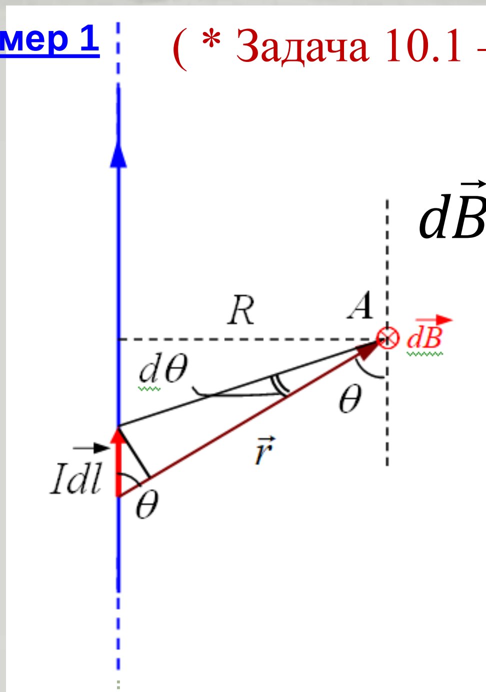


$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I[d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}$$

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

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

- **Пример 1** (* Задача 10.1 – решение разобрано в книжке для семинарских занятий)



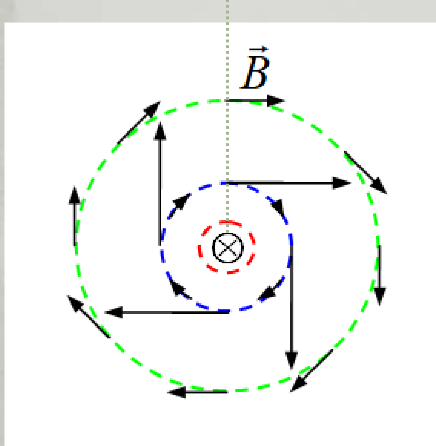
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{I[\vec{dl}, \vec{r}]}{r^3} \qquad r = \frac{R}{\sin\theta}, \qquad dl = \frac{r d\theta}{\sin\theta} = \frac{R d\theta}{\sin^2\theta}$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I \sin\theta}{R} d\theta$$

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

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

Магнитное поле прямолинейного проводника



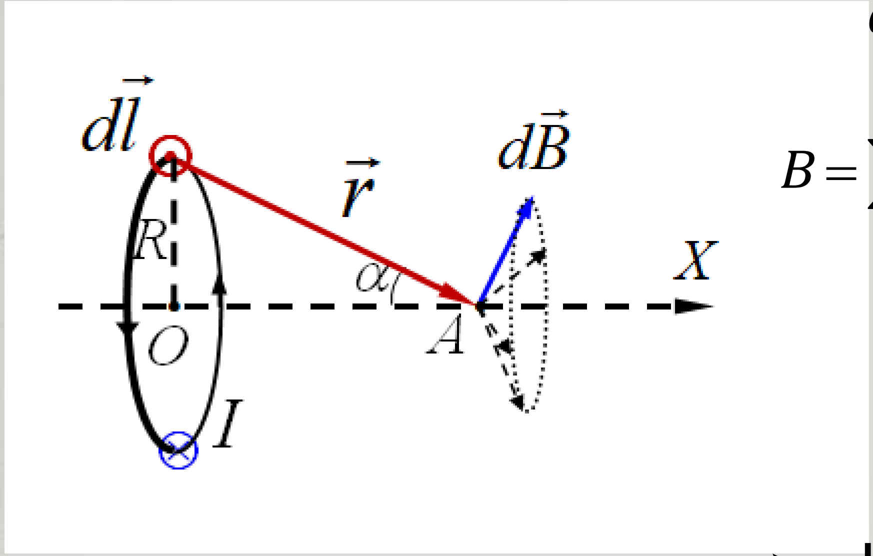
14.5. Линии магнитной индукции

1) Линии индукции магнитного поля всегда замкнуты – такие поля называют «вихревыми» ; $\Rightarrow$ $\oint_{\Sigma} (\vec{B}, d\vec{S}) = 0$

2) не пересекаются;

3) Густота пропорциональна модулю вектора $\vec{B}$ **.**

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



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

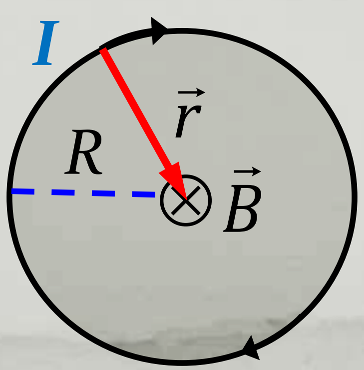
θ = … ?

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

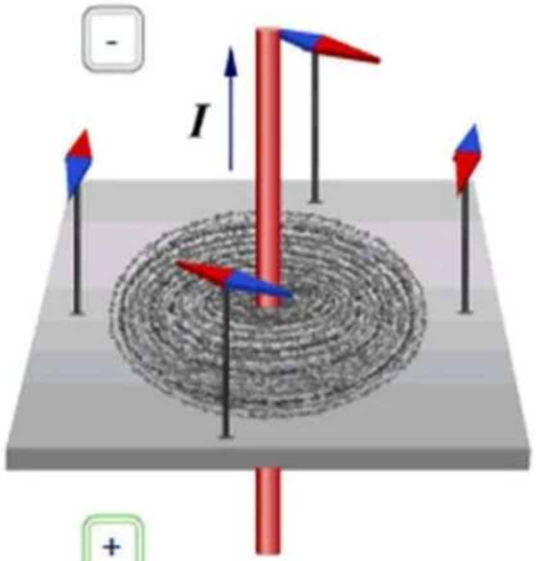
$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\pi R^2 I}{(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

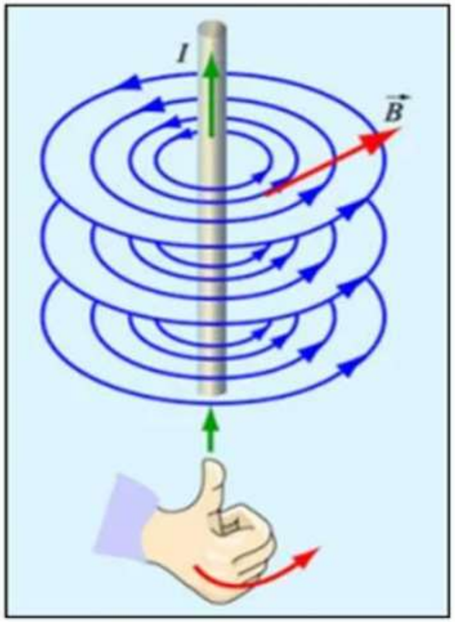
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\vec{p}_m}{(R^2 + x^2)^{3/2}} \quad \rightarrow \quad \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\vec{p}_m}{x^3}$$

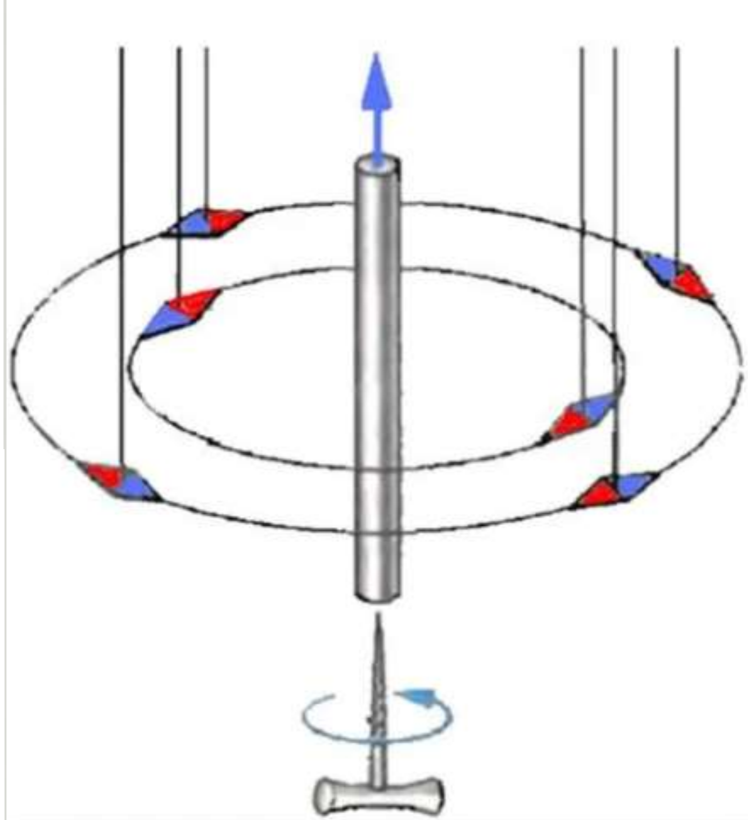
А в центре кольца ?

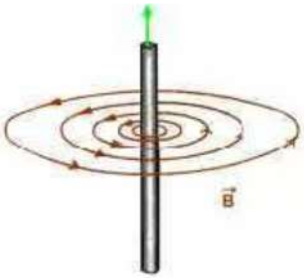


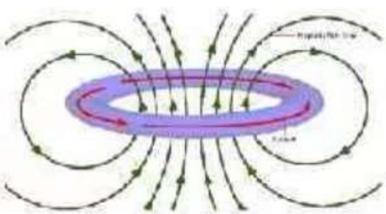
Линии магнитной индукции

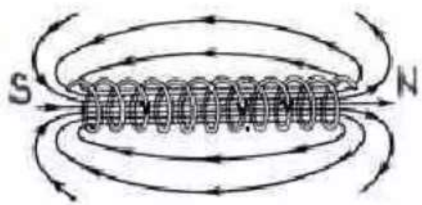


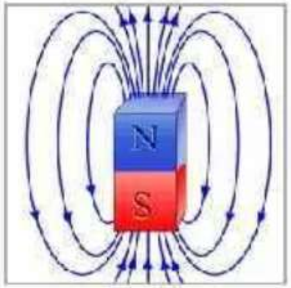


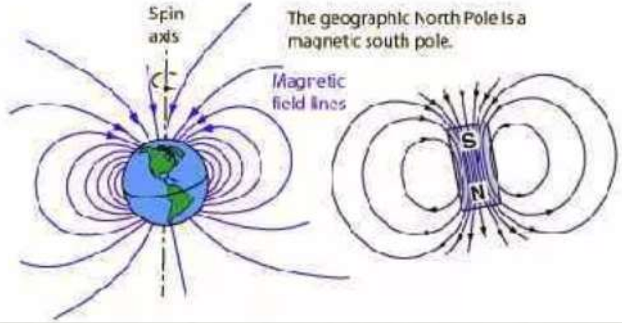






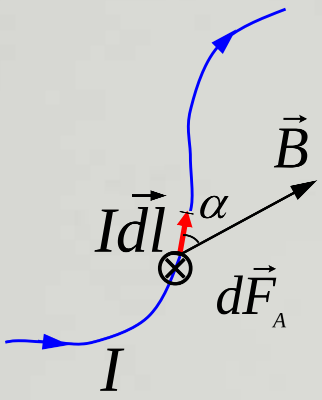






14.6. Сила Ампера

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



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

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

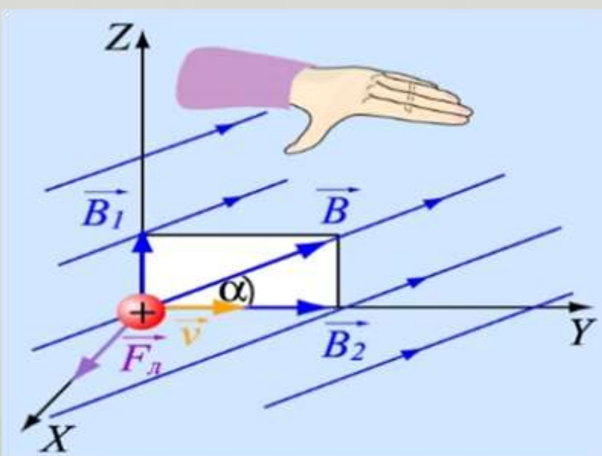
Пример. *Два параллельных проводника с током*:

Д.З.

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

14.7. Сила Лоренца (1895 г.)

Сила, действующая на заряженную частицу, движущуюся в магнитном поле

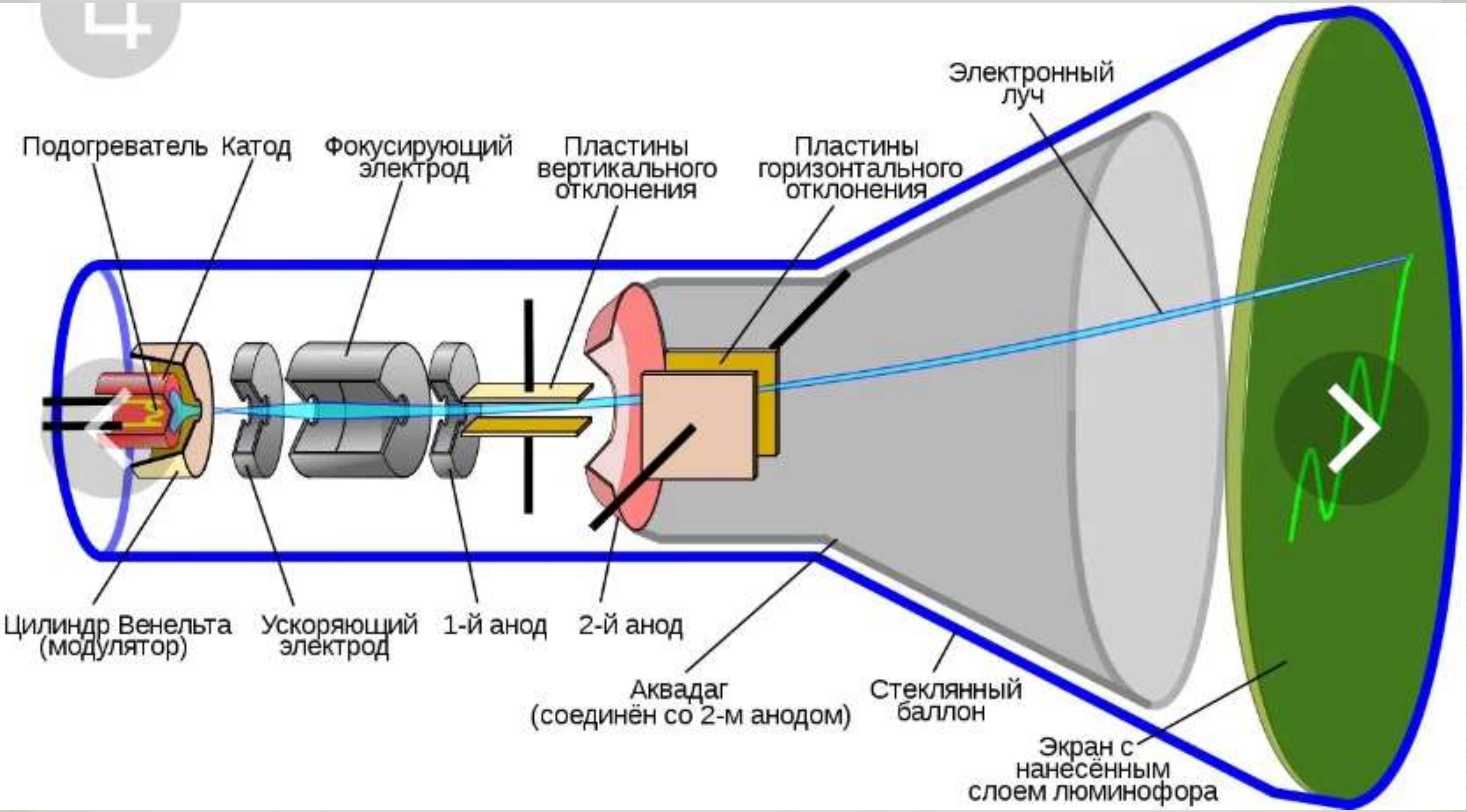


$$\vec{F}_Л = q\cdot[\vec{\upsilon},\vec{B}]$$

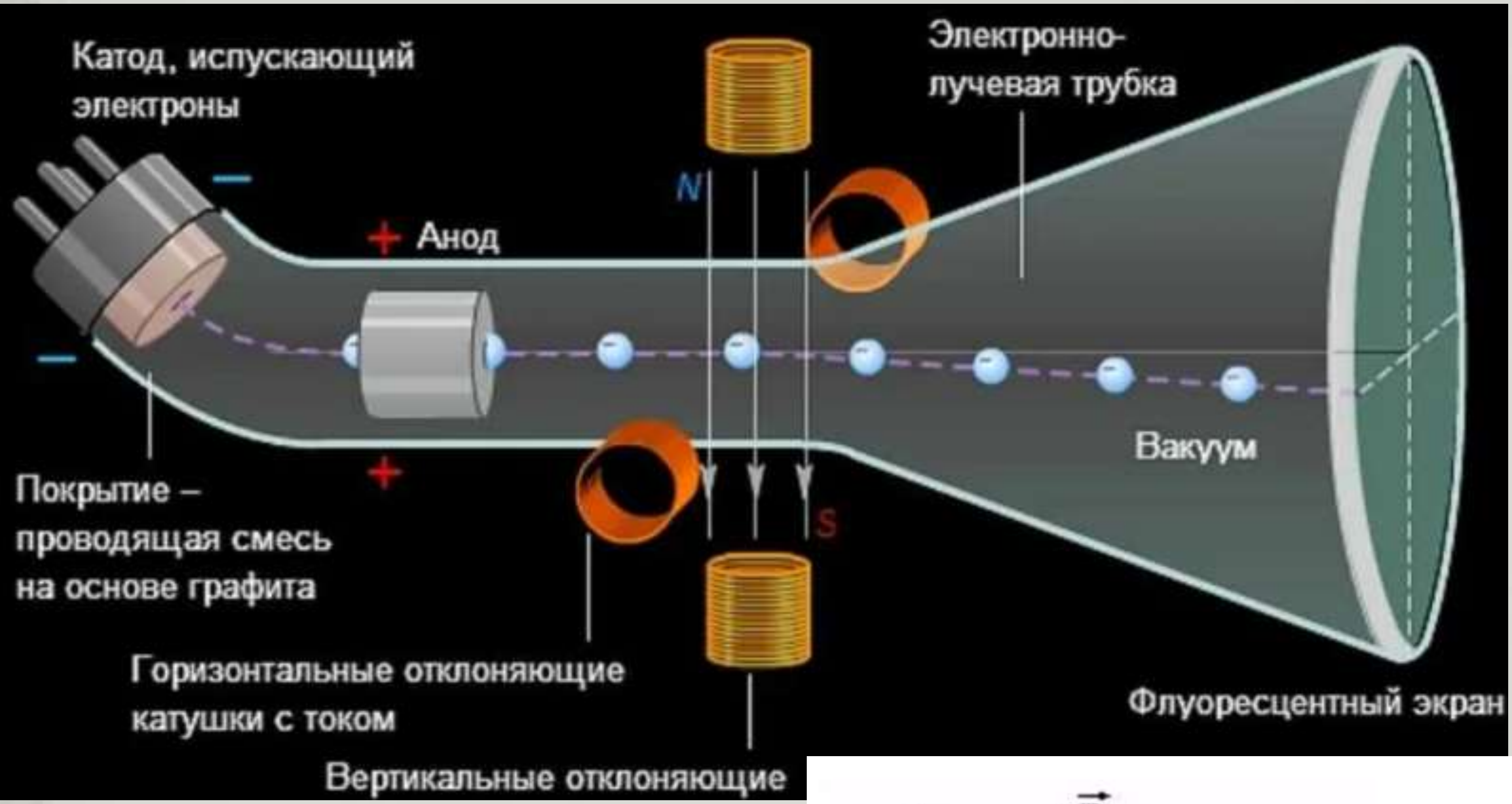
$$F_Л = |q|\cdot\upsilon\cdot B\cdot\sin\alpha$$

Эксперимент **!!**

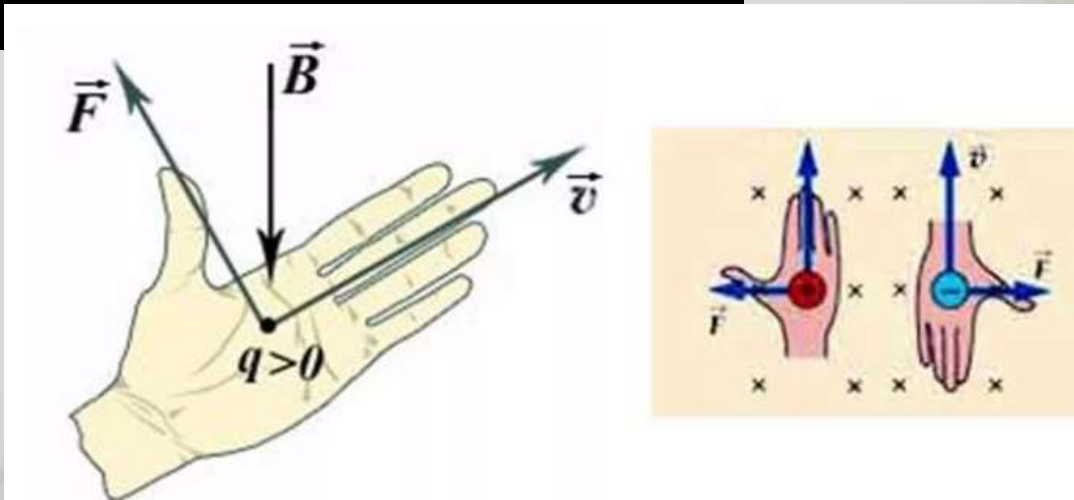
Электронно-лучевая трубка



Электронно-лучевая трубка



Сила Лорентца



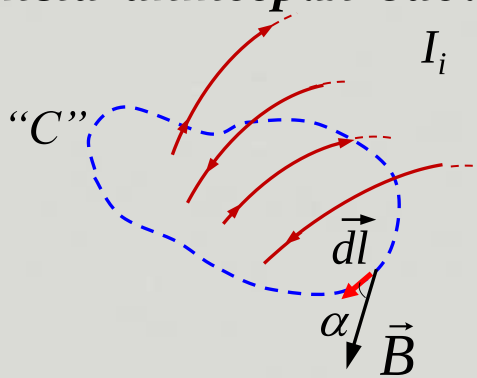
Электронно-лучевая трубка

Сила Лорентца

§ 15. Теорема о циркуляции вектора магнитной индукции

15.1. Формулировка теоремы

(*Опр.*) ***Циркуляцией вектора (например,*** $\vec{B}$ ***) по замкнутому контуру "C" называется криволинейный интеграл вида:*** $\oint\limits_C (\vec{B}, d\vec{l}\,)$



Циркуляция вектора индукции магнитостатического поля по любому замкнутому контуру "C" в вакууме пропорциональна алгебраической сумме сил токов, пронизывающих поверхность, ограниченную этим контуром:

$$\oint\limits_C (\vec{B}, d\vec{l}\,) = \mu_0 \sum_i I_i$$

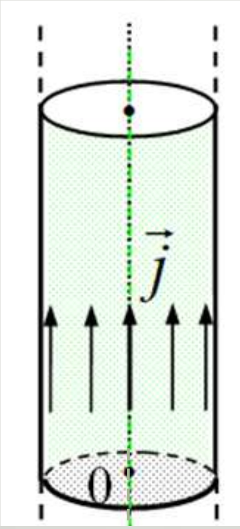
или

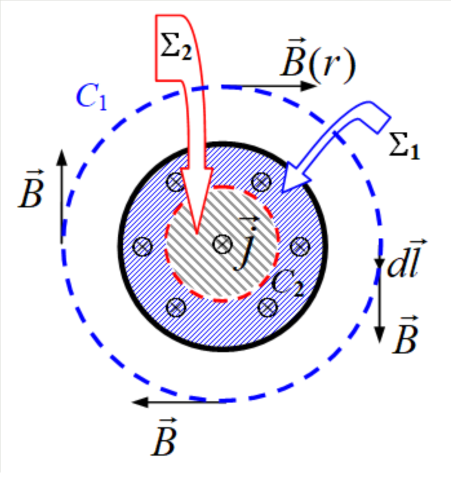
$$\mu_0 \int\limits_\Sigma (\vec{j}, d\vec{S}\,)$$

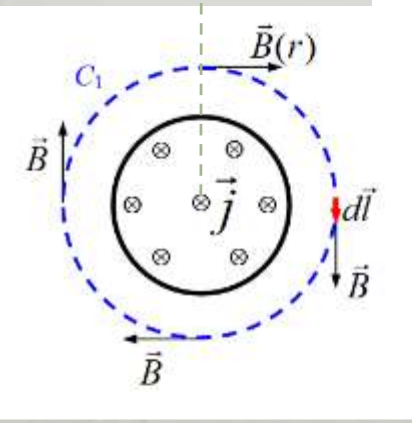
15.2. Применение теоремы о циркуляции вектора магнитной индукции

Пример. **(Задача 10.4)** По длинному прямолинейному проводнику радиуса R течёт ток. Плотность тока распределена равномерно по сечению проводника и равна j. Найти зависимость индукции магнитного поля тока как **внутри, так и вне** этого проводника.

1. Рисунок ! *2. “Структура поля”* *3. Выбор контура*







4. “Вычислим” циркуляцию:

$$\oint\limits_{"C"}(\vec{B},d\vec{l}\,)=\oint\limits_{"C"}B(r)dl=B(r)\oint\limits_{"C"}dl=B(r)\cdot 2\pi r$$

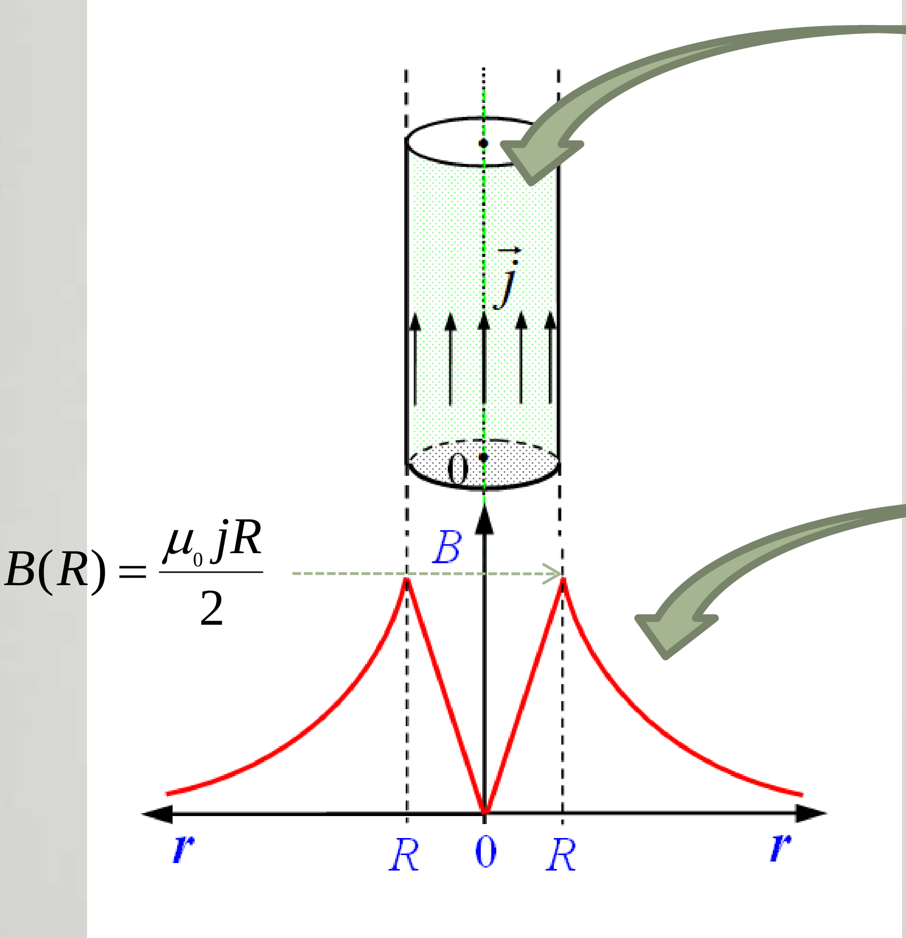
5. “Вычислим” силу тока:

$$\int\limits_{\Sigma} j_n dS=\begin{cases} j\cdot\pi R^2 - \text{для поля вне проводника, } C_1 \\ j\cdot\pi r^2 - \text{для поля внутри проводника, } C_2 \end{cases}$$

6. Применим теорему:

$$B(r)\cdot 2\pi r = \mu_0 \cdot \begin{cases} j\cdot \pi R^2, & r > R \\ j\cdot \pi r^2, & r \le R \end{cases}$$

Результаты :



"Внутри"

$$B(r) = \frac{\mu_0 j}{2} r$$

"Вне"

$$B^{(вне)}(r) = \frac{\mu_0 jR^2}{2}\frac{1}{r}$$

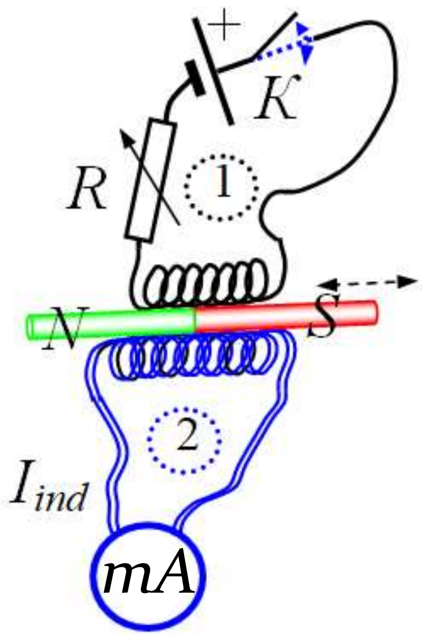
§ 16. Электромагнитная индукция

16.1. Открытие Фарадеем явления электромагнитной индукции («опыты Фарадея»)

“Экономический эффект от открытия Майкла Фарадея превышает таковой от Лондонской товарной биржи за все годы её существования!”

- М. Тэтчер

Опыты Фарадея (1831):



1) …

2) …
3) …
4) …
5) …
6) …
…
⇒

$$\Delta\Phi_B \Rightarrow I_{ind}$$

Электрический ток индуцируется («наводится») **при любом изменении магнитного потока** !!

Фарадей:

$$I_{ind} \sim \left|\frac{d\Phi_B}{dt}\right|$$

♣ *Явление электромагнитной индукции состоит в возникновении электрического тока в проводящем контуре* ***при изменении магнитного потока*** *через поверхность, ограниченную этим контуром*