Электродинамика

Электрическое поле | **Магнитное поле**

созда
ют

Неподвижные заряды

Элементарный заряд –
$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}$ Кл

1. Закон сохранения электрического заряда:

$$q = \sum_{i=1}^{N} q_i = const$$

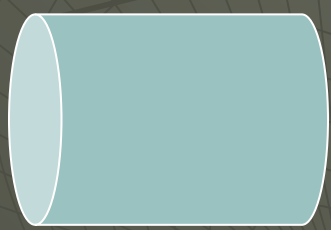
Движущиеся заряды, проводники с током, пост. магниты

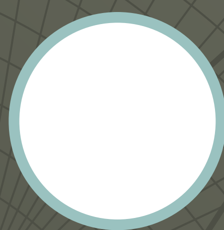
Равномерно распределенный заряд

а) линейное распределение

$$\tau = \frac{dq}{d\ell} \qquad q = \int_{\ell} \tau \cdot d\ell$$

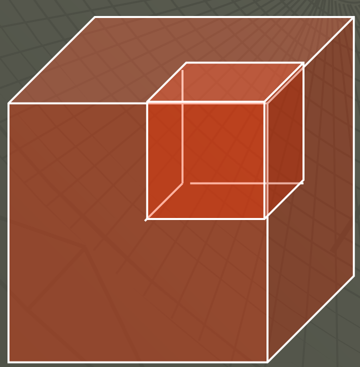
б) распределение по поверхности





$$\sigma = \frac{dq}{dS} \qquad q = \int_{S} \sigma \cdot dS$$

в) распределение по объему



$$\rho = \frac{dq}{dV} \qquad q = \int_{V} \rho \cdot dV$$

обнаруживают по действию на

заряженные тела

Закон Кулона:

В векторной форме :

$$\vec{F} = k\frac{|q_1|\cdot|q_2|}{\varepsilon\, r^3}\cdot\vec{r}$$

В скалярной форме :

$$F = k\frac{|q_1|\cdot|q_2|}{\varepsilon\, r^2}$$

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} = 9\cdot10^9\,\frac{Н\cdot м^2}{Кл^2}$$

$$\varepsilon_0 = 8{,}85\cdot10^{-12}\,\frac{Ф}{м}$$

проводники с током, рамки с током или магнитные стрелки

$$F_{l} = \frac{\mu\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{r}$$

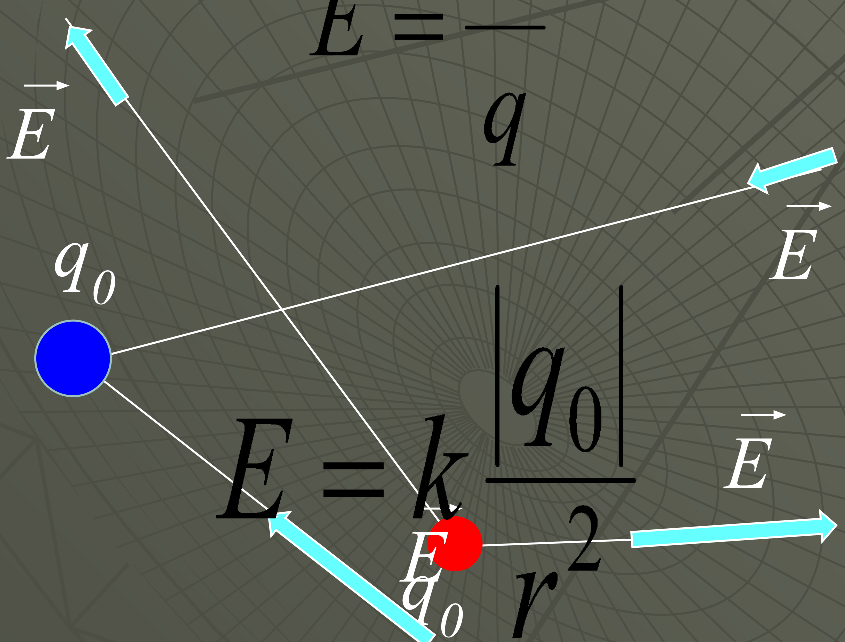
– *сила, действующая на единицу длины двух взаимодействующих параллельных проводников с током*

$$\mu_0 = 4\pi\cdot10^{-7}\,Гн/м$$

Силовые характеристики

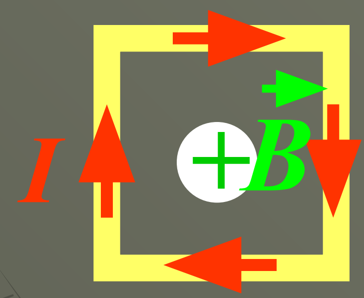
Вектор напряженности

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$



$$E = k\frac{|q_0|}{r^2}$$

Вектор магнитной индукции



$$B \sim \frac{M_{\max}}{I \cdot S}$$

Характеризуют поле в веществе

Вектор электрической индукции

$\vec{D}$

Вектор напряженности

$\vec{H}$

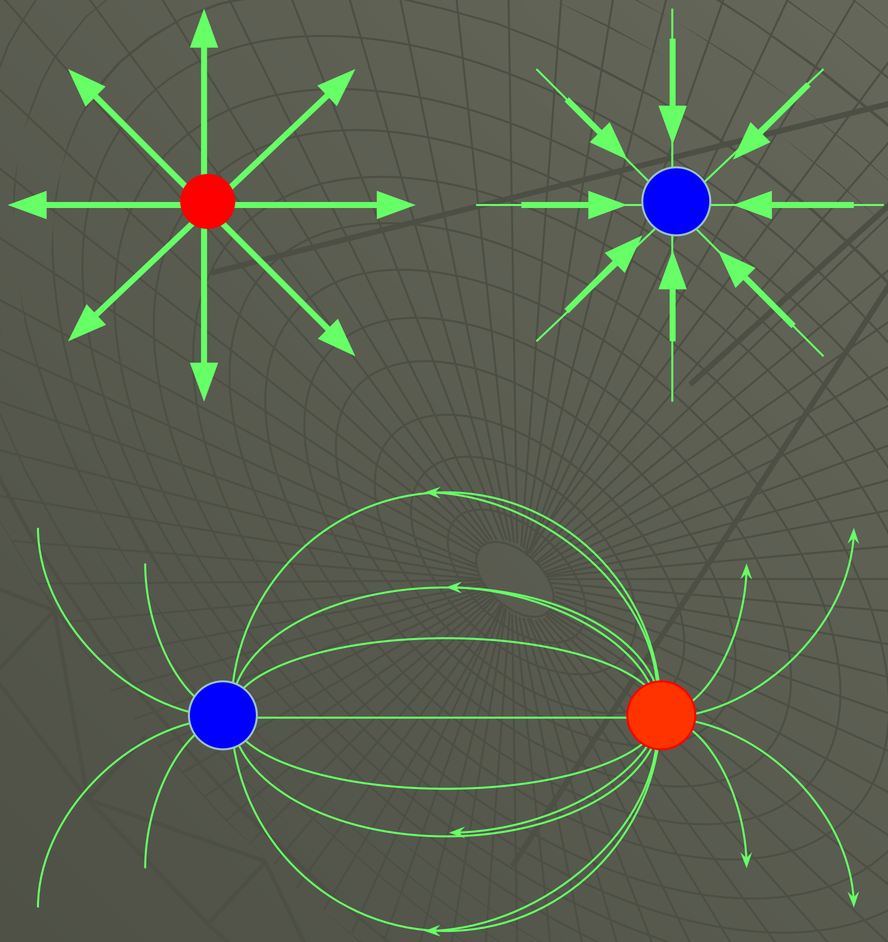
Характеризуют поле в вакууме

$$D = \varepsilon\varepsilon_0 E$$

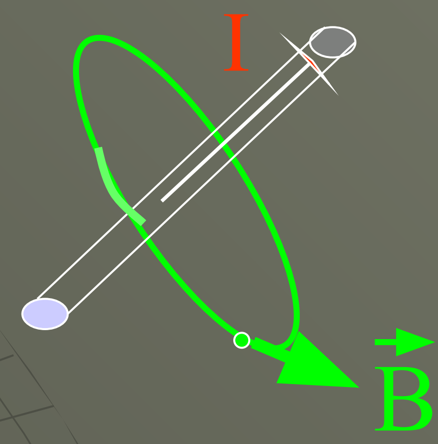
$$B = \mu\mu_0 H$$

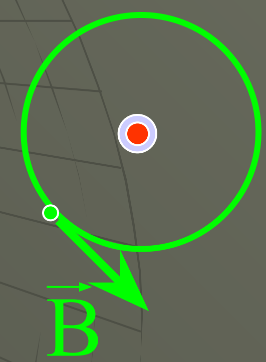
Изображают с помощью

линий напряженности



линий магнитной индукции

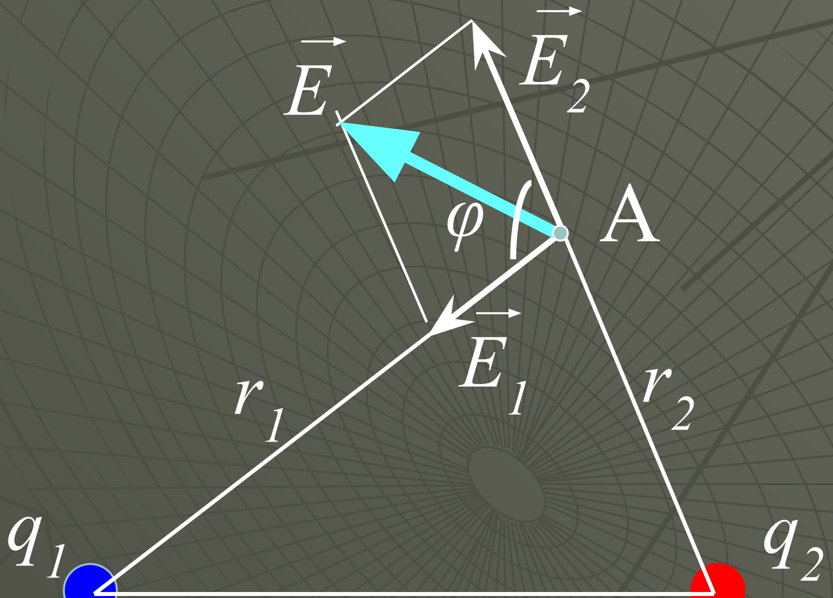




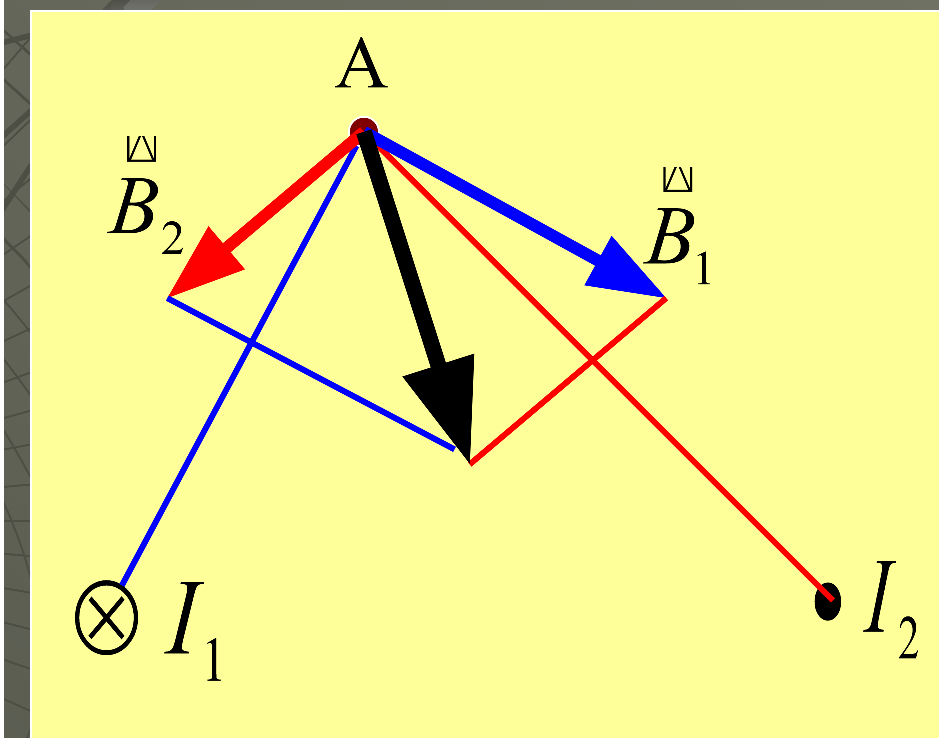
Принцип суперпозиции

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \ldots + \vec{E}_i + \ldots + \vec{E}_n = \sum_{i=1}^{n} \vec{E}_i$$

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \ldots + \vec{B}_i + \ldots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^{i=n} \vec{B}_i$$



$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2;$$



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

$n \to \infty \qquad \Delta \vec{E}_i \to 0$

$$\vec{E} = \lim_{\substack{n \to \infty \\ \Delta E_i \to 0}} \sum \Delta \vec{E}_i$$

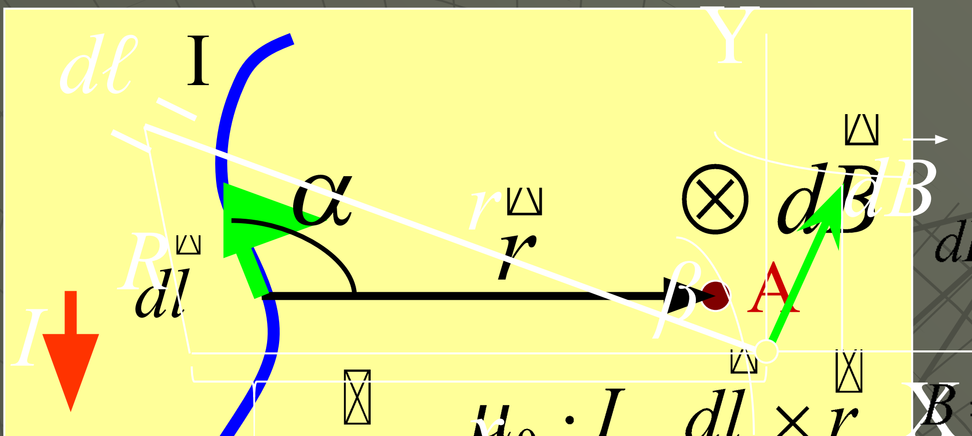
$$\vec{E} = \int d\vec{E}$$

$n \to \infty \qquad \Delta \vec{B}_i \to 0$

$$\vec{B} = \lim_{\substack{n \to \infty \\ \Delta B_i \to 0}} \sum \Delta \vec{B}_i$$

$$\vec{B} = \int d\vec{B}$$

Закон Био-Савара-Лапласа (БСЛ)



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

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

$$\vec{B} = \int d\vec{B}$$

$$\sin\alpha = 1$$

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\, d\vec{\ell}}{r^2}$$

$$dB_x = dB \cdot \sin\beta = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I \cdot d\ell}{r^2} \cdot \sin\beta$$

$$B = \int \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I \cdot d\ell}{r^2} \cdot \sin\beta = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I \cdot \sin\beta}{r^2}\oint_{2\pi R} d\ell =$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\pi R \cdot I \cdot \sin\beta}{r^2} = \frac{\mu_0 I}{2}\frac{R}{(R^2+x^2)}\sin\beta =$$

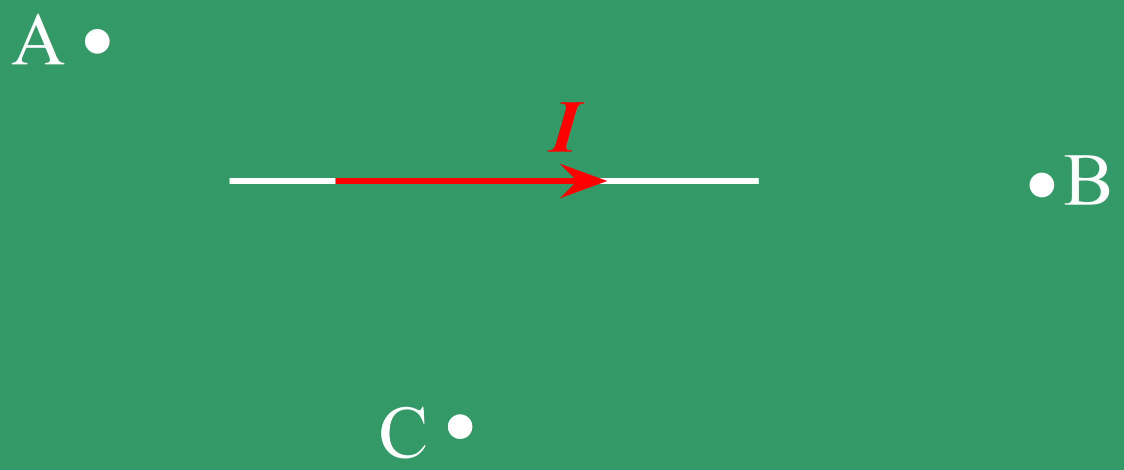
$$\vec{B} = \vec{i}\cdot\int dB_x + \vec{j}\cdot\int dB_y + \vec{k}\cdot\int dB_z$$

$$\int dB_y = 0;\ \int dB_z = 0$$

$$= \frac{\mu_0}{2}\frac{IR^2}{\left(R^2+x^2\right)^{3/2}}$$

Задания

2. Определите направление вектора индукции магнитного поля, созданного током, в указанных на рисунке точках

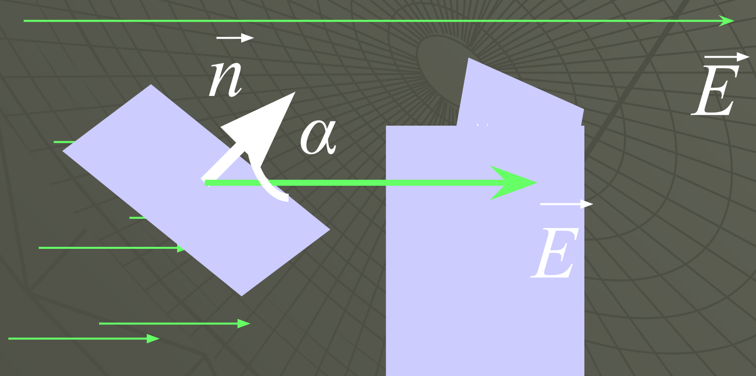


Методы расчета

Теорема Гаусса

$$\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0}\left(\sum q_i\right)_{внутр.}$$

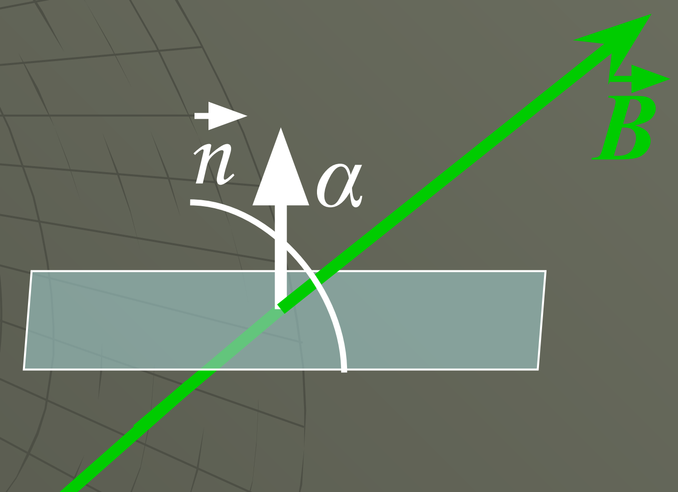
$$\Phi = \int_S \vec{E}\cdot d\vec{S}$$

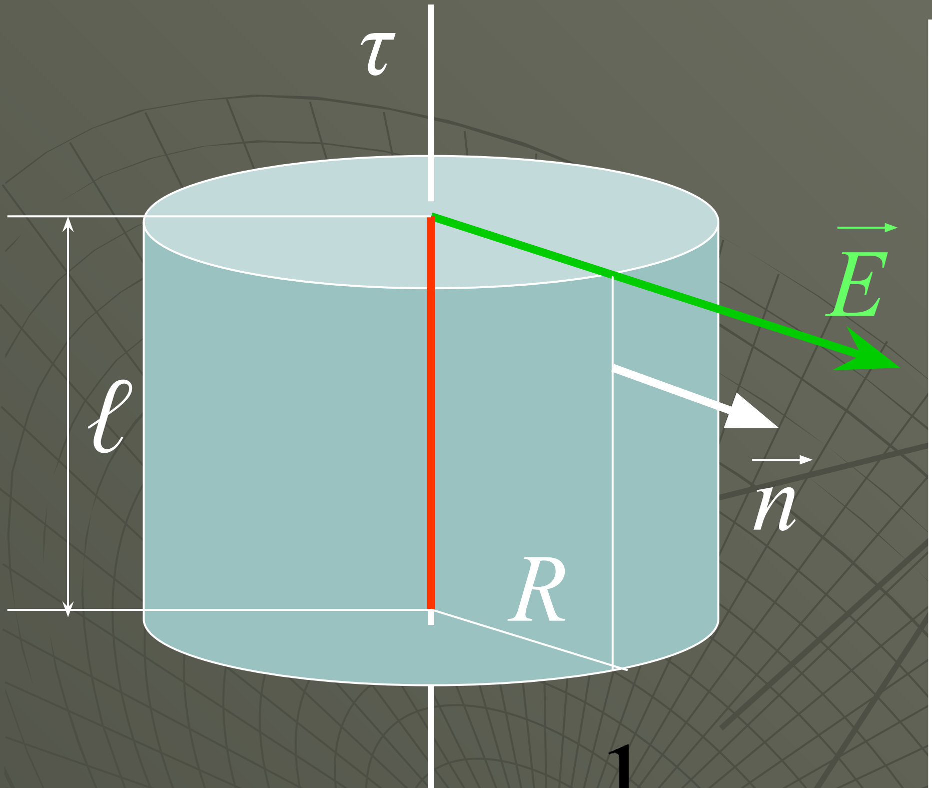


$$d\Phi = \vec{E}\cdot d\vec{S} = E\cdot dS\cdot\cos\alpha$$

$$\oint_s \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0$$

$$\Phi = \int_S \vec{B}\cdot d\vec{S} = \int_s B\cdot dS\cdot\cos\alpha$$





$$\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = \int_{S_{бок}} \vec{E}\cdot d\vec{S} = E S = E\cdot 2\pi R\ell$$

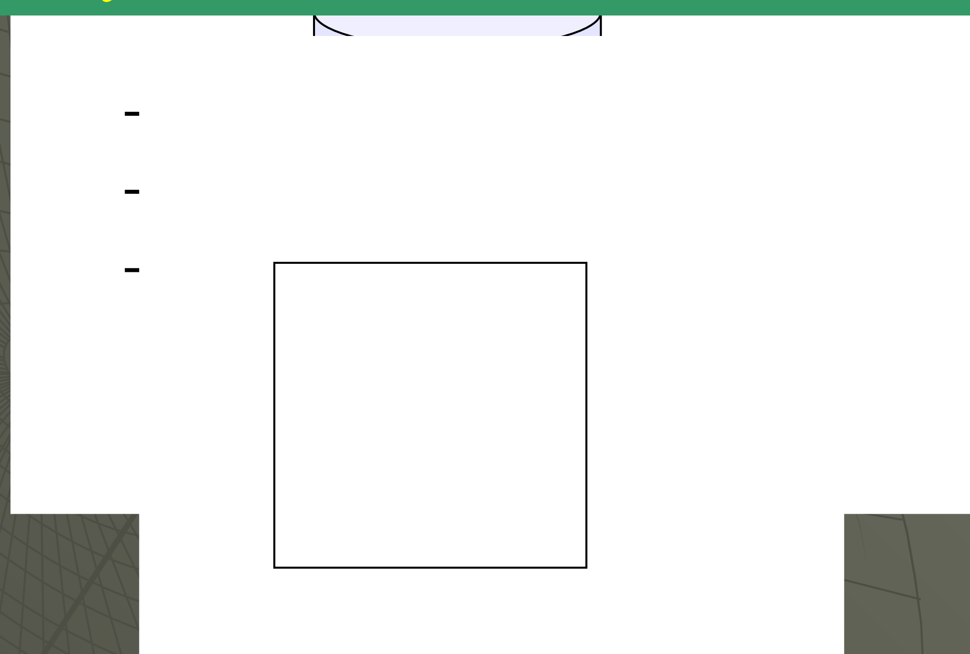
$$2\pi R\ell\, E = \frac{1}{\varepsilon_0}\tau\cdot\ell$$

$$E = \frac{\tau}{2\pi\varepsilon_0 R}$$

1. Определите поток вектора напряженности через замкнутую поверхность для случая, изображенного на

2.

3. В центре куба находится электрический диполь. Определите поток вектора напряженности через поверхность куба.



Теорема о циркуляции

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{r} = 0$$

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{\ell} = \mu_0 \sum I_{внутр}$$

Поле потенциально

Поле непотенциально

$$A = -\Delta W$$

$$W = k\frac{q\cdot q_0}{r}$$

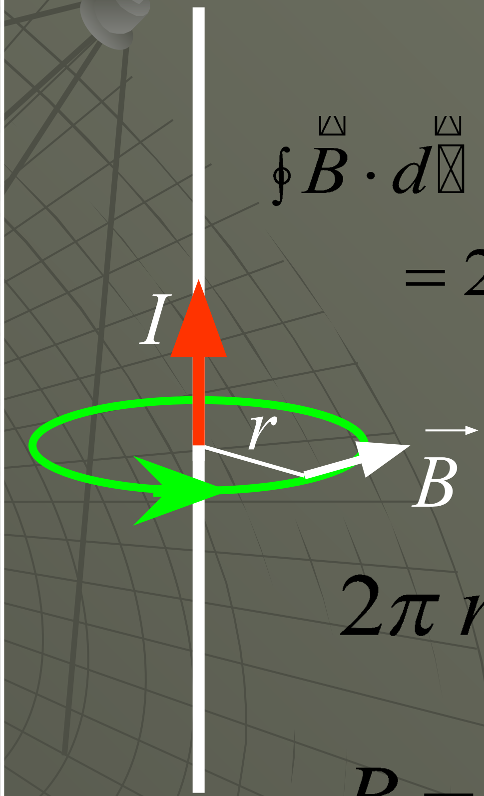
$$\varphi = \frac{W}{q} \quad \frac{Дж}{Кл}$$

$$A = -q\cdot(\varphi_2 - \varphi_1) =$$

$$= -q\cdot\Delta\varphi = -q\cdot U$$

$$\varphi = k\frac{q_0}{r}$$

$$\Delta\varphi = -\int \vec{E}\cdot d\vec{r}$$



$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{\ell} = \oint B\cdot d\ell\cdot\cos 0^\circ$$
$$= 2\pi r B$$

$$2\pi r\cdot B = \mu_0 I$$

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

Поле в веществе

Диэлектрики	Магнетики
Эл. диполи	магн. диполи
поляризация	***намагничивание***
$\varepsilon = \dfrac{E_0}{E}$	$\mu = \dfrac{B}{B_0}$

Энергия поля

$$W=\frac{q\varphi}{2}=\frac{C\varphi^2}{2}=\frac{q^2}{2\varphi}$$

$$W=\frac{qU}{2}=\frac{q^2}{2C}=\frac{CU^2}{2}$$

$$w=\frac{\varepsilon\varepsilon_0E^2}{2}$$

$$W=\int\frac{\varepsilon\varepsilon_0E^2}{2}dV$$

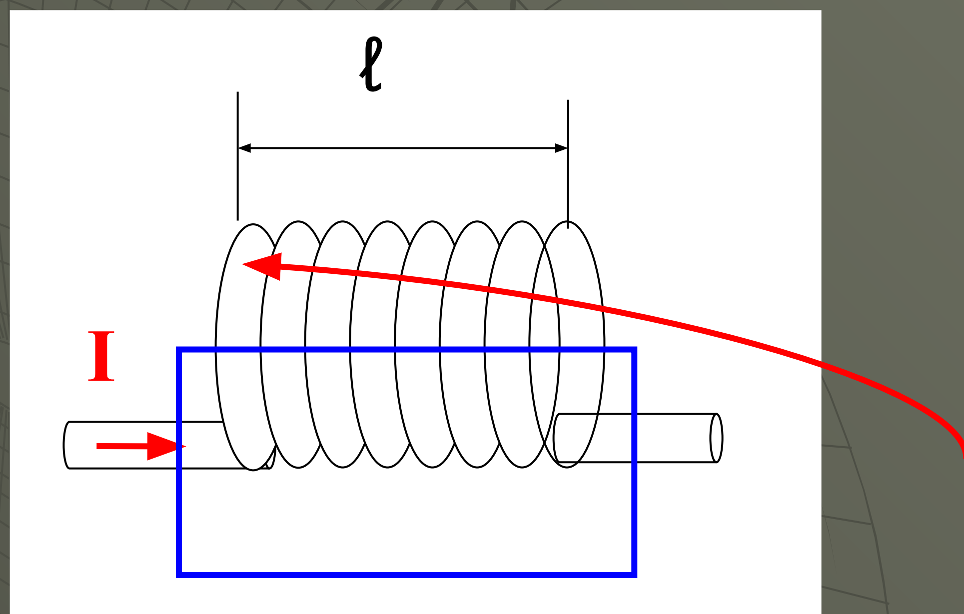
$$W=\frac{LI^2}{2}$$

$$w=\frac{B^2}{2\mu\mu_0}$$

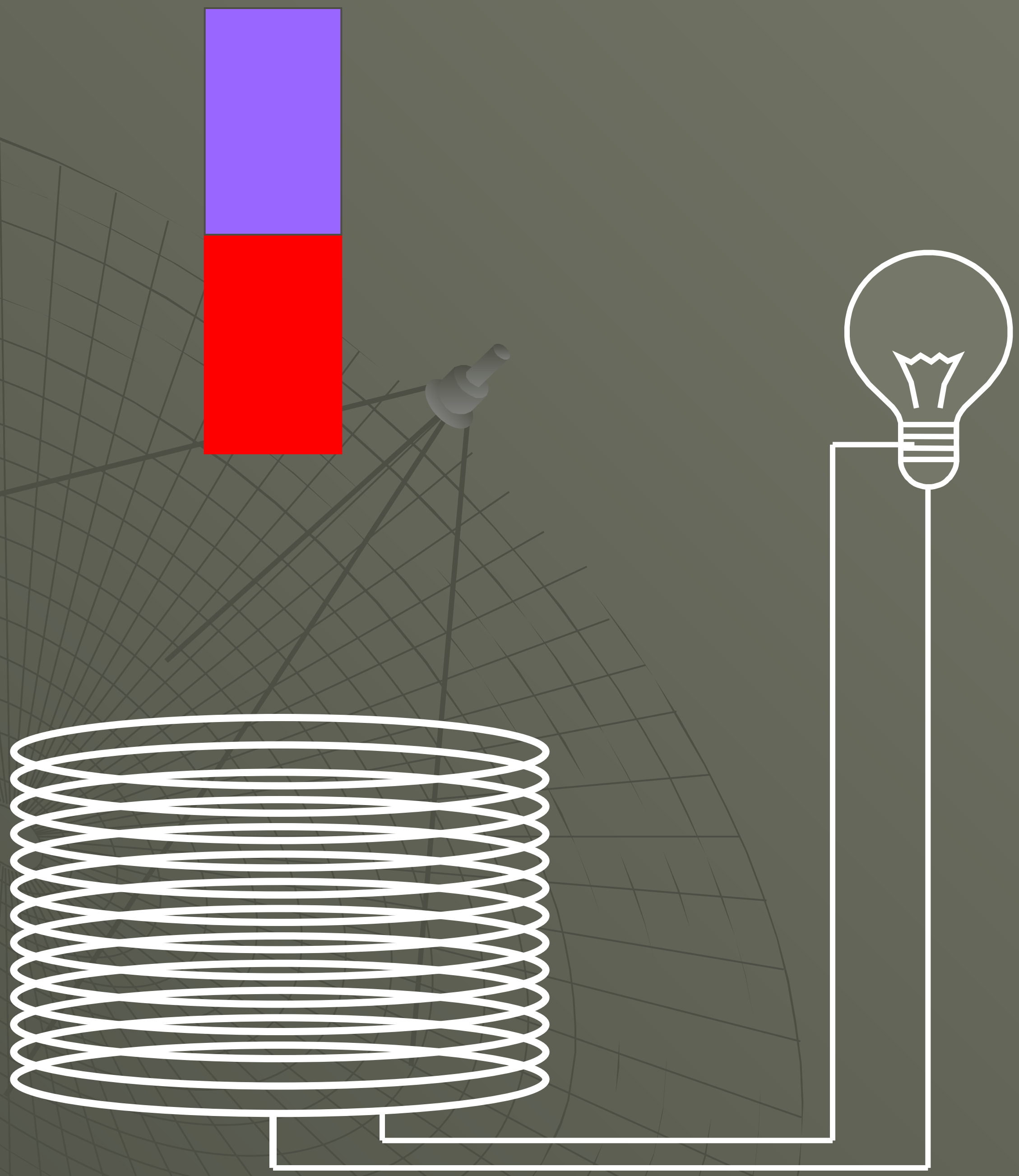
$$W=\int\frac{B^2}{2\mu\mu_0}dV$$

1. Какая из формул позволяет определить циркуляцию В

2. Соленоид длиной ℓ имеет n витков на единице длины. По соленоиду течет ток I. Определите циркуляцию вектора индукции по замкнутому контуру, изображенному на рисунке.



Явление электромагнитной индукции



Закон электромагнитной индукции Фарадея.

Среднее значение э.д.с. в интервале времени $\Delta t = t_2 - t_1$

Для простого контура: $$\langle \varepsilon_i \rangle = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t} = -\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} =$$

$$= -\frac{B_2 \cdot S_2 \cdot \cos\alpha_2 - B_1 \cdot S_1 \cdot \cos\alpha_1}{t_2 - t_1}$$

Для сложного контура: $$\langle \varepsilon_i \rangle = -\frac{\Delta \Psi}{\Delta t} = -\frac{\Psi_2 - \Psi_1}{t_2 - t_1}$$

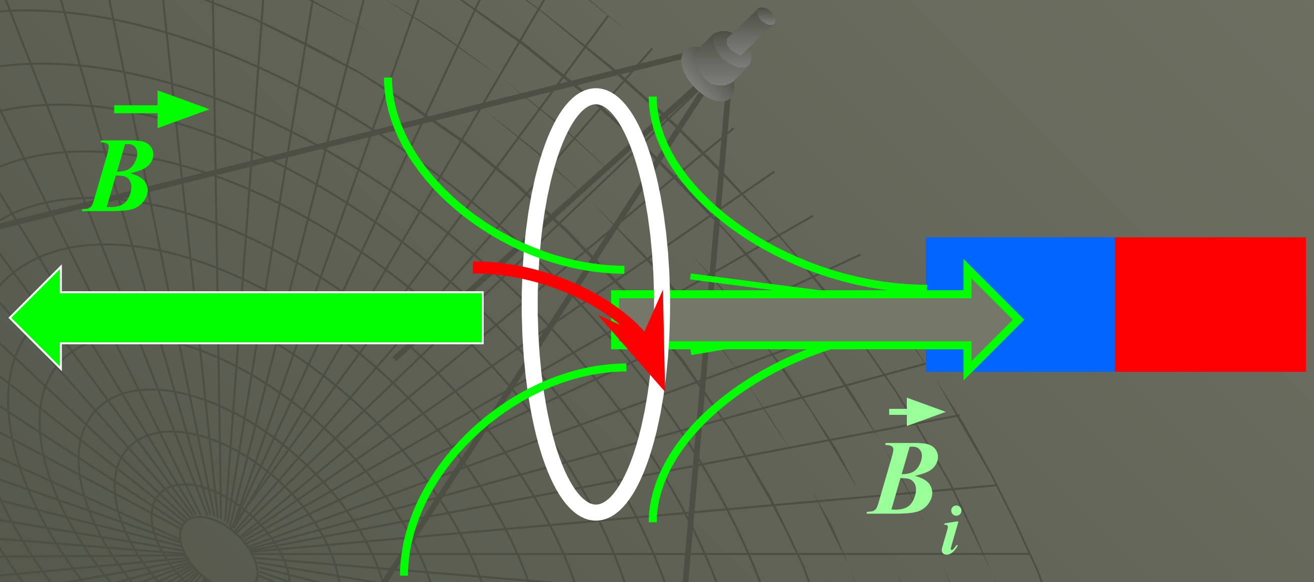
Мгновенное значение э.д.с. индукции в момент времени t:

Для простого контура: $$\varepsilon_i = \lim_{\Delta t \to 0}\left(-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}\right) = -\frac{d\Phi}{dt}$$

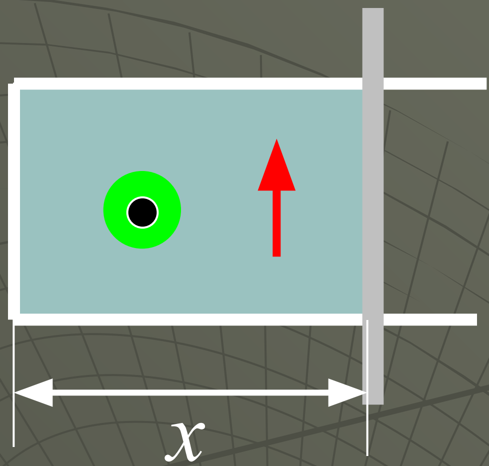
Для сложного контура: $$\varepsilon_i = -\frac{d\Psi}{dt}$$

$$\Psi = \Phi \cdot N$$

$\Phi_1 \sim N_1 \qquad \Phi_2 \sim N_2 \qquad N_2 > N_1$



1.

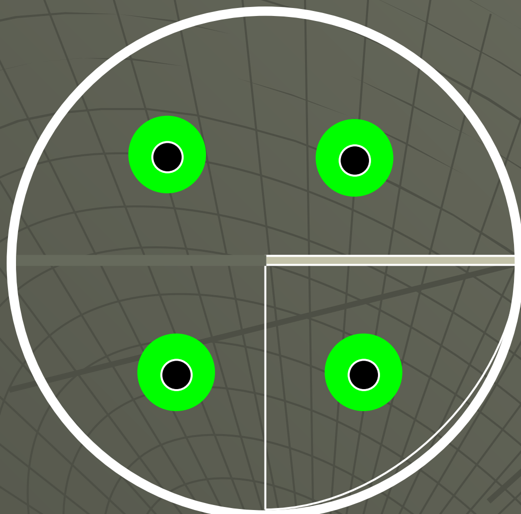


$$\Phi = B \cdot S$$

$$S = \boxtimes \cdot x$$

$$\varepsilon_i = \left| -\frac{d\Phi}{dt} \right| = \frac{d\left(B \cdot \boxtimes \cdot x\right)}{dt} = B \cdot \boxtimes \cdot \frac{dx}{dt} = B \cdot \boxtimes \cdot \upsilon$$

2.

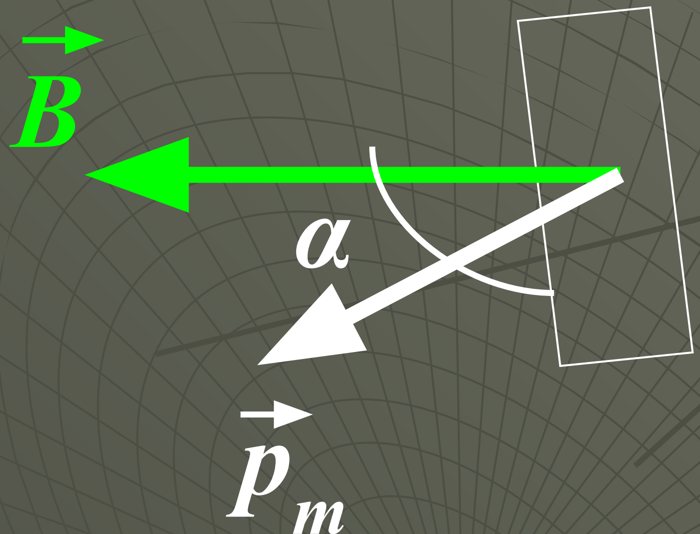


$$S = \frac{\pi \ell^2}{2\pi} \cdot \varphi = \frac{1}{2} \ell^2 \varphi$$

$$\varepsilon_i = \frac{d\left(B \cdot \frac{1}{2} \ell^2 \varphi\right)}{dt} = \frac{1}{2} B \cdot \ell^2 \cdot \frac{d\varphi}{dt} = \frac{1}{2} B \ell^2 \omega$$

3.

$$\Phi = B \cdot S \cdot \cos\alpha$$

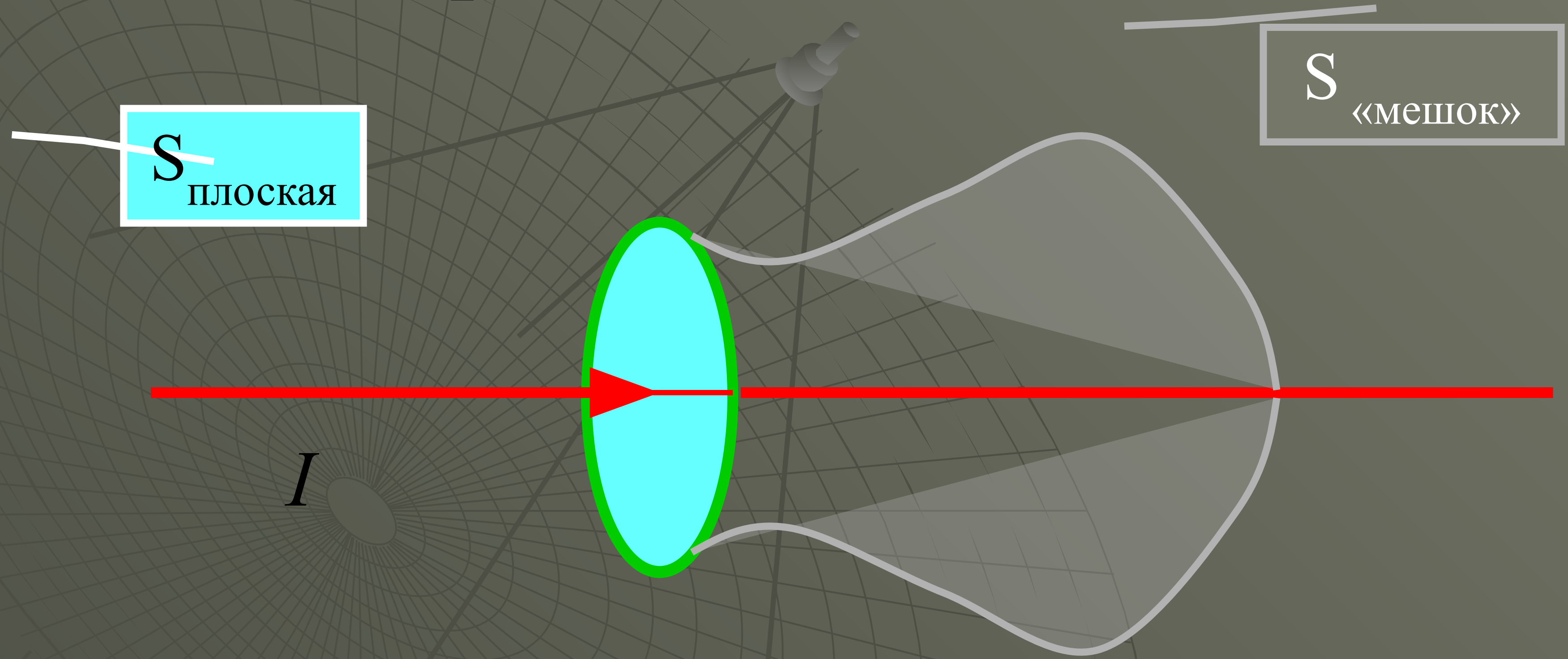


$$S = const$$

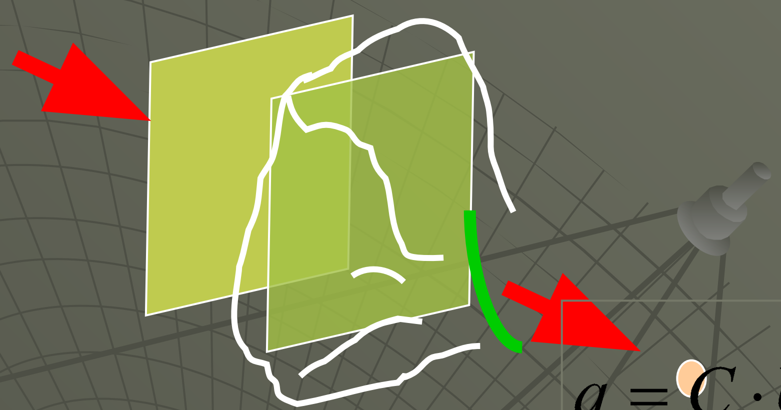
$$\varepsilon_i = -\frac{d(B\,S\cos\alpha)}{dt} = B\,S\sin\alpha \cdot \frac{d\alpha}{dt} = B\,S\omega\sin\alpha$$

Закон Ампера:

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum_1^n I_i$$



Плоская поверхность



Поверхность «мешок»

Заряд конденсатора:

$$q = C \cdot U = \varepsilon_0 \cdot \frac{S}{d} \cdot E \cdot d = \varepsilon_0 \cdot E \cdot S$$

$$\Phi_E = E \cdot S$$

$$q = \varepsilon_0 \cdot \Phi_E$$

Ток смещения:

$$I_C = \frac{dq}{dt} = \varepsilon_0 \cdot \frac{d\Phi_E}{dt}$$

Поле неоднородное:

$$\Phi_E = \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$$

$$\boxed{I_C = \frac{dq}{dt} = \varepsilon_0 \cdot \frac{d\Phi_E}{dt} = \varepsilon_0 \cdot \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}}$$

Закон Ампера с учётом тока смещения:

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot \sum_1^n I_i = \mu_0 \cdot (I + I_C)$$

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{d\Phi_E}{dt}$$

$$\boxed{\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \cdot I + \mu_0 \cdot \varepsilon_0 \cdot \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}}$$

Обобщенный закон Фарадея:

$$\oint_L \vec{E}_i \cdot d\vec{l} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}\int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

Переменное магнитное поле

Магнитное поле

Переменное электрическое поле

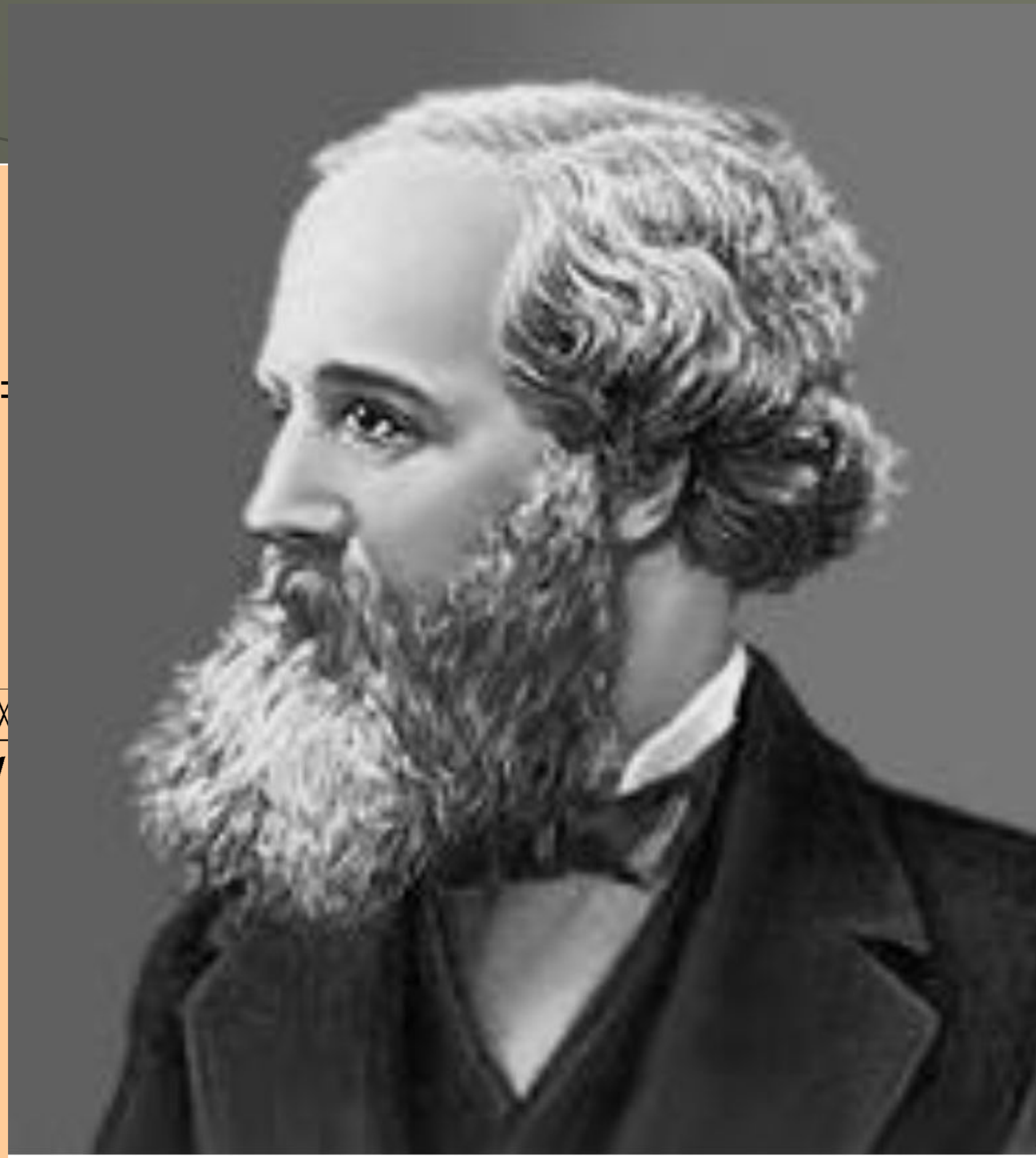
Электрическое поле

$$\oint_S \vec{E}\cdot d\vec{S} = \ldots \quad (1)$$

$$\oint_S \vec{B}\cdot d\vec{S} \ldots \quad (2)$$

$$\oint_L \vec{E}_i\cdot d\vec{l} \ldots \quad (3)$$

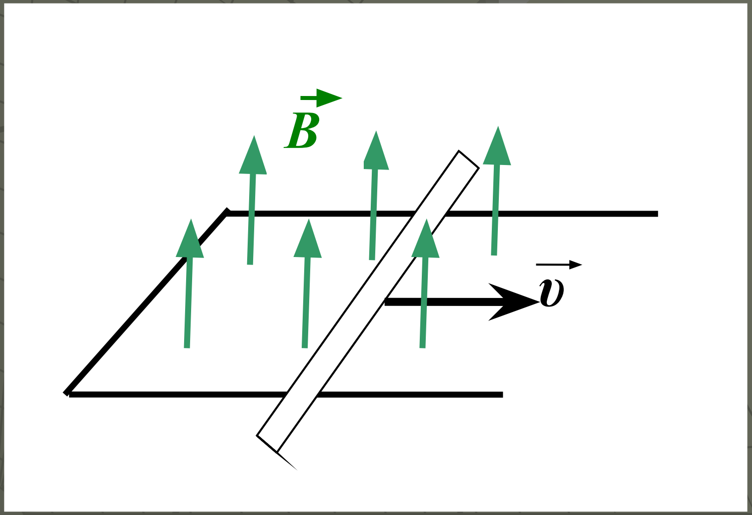
$$\oint_L \vec{B}\cdot d\vec{l} \ldots \quad (4)$$



Дж. Максвелл.

Задания

1.Определите направление индукционного тока в стержне для случая, изображенного на рисунке.



2. Какое из уравнений Максвелла, записанных ниже, является законом электромагнитной индукции

а) $\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum_{i=1}^{N} q_i$

б) $\oint_{\ell} \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$

в) $\oint_S \vec{B} \cdot d\vec{S} = 0$

г) $\oint_{\ell} \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} \cdot d\vec{S}$