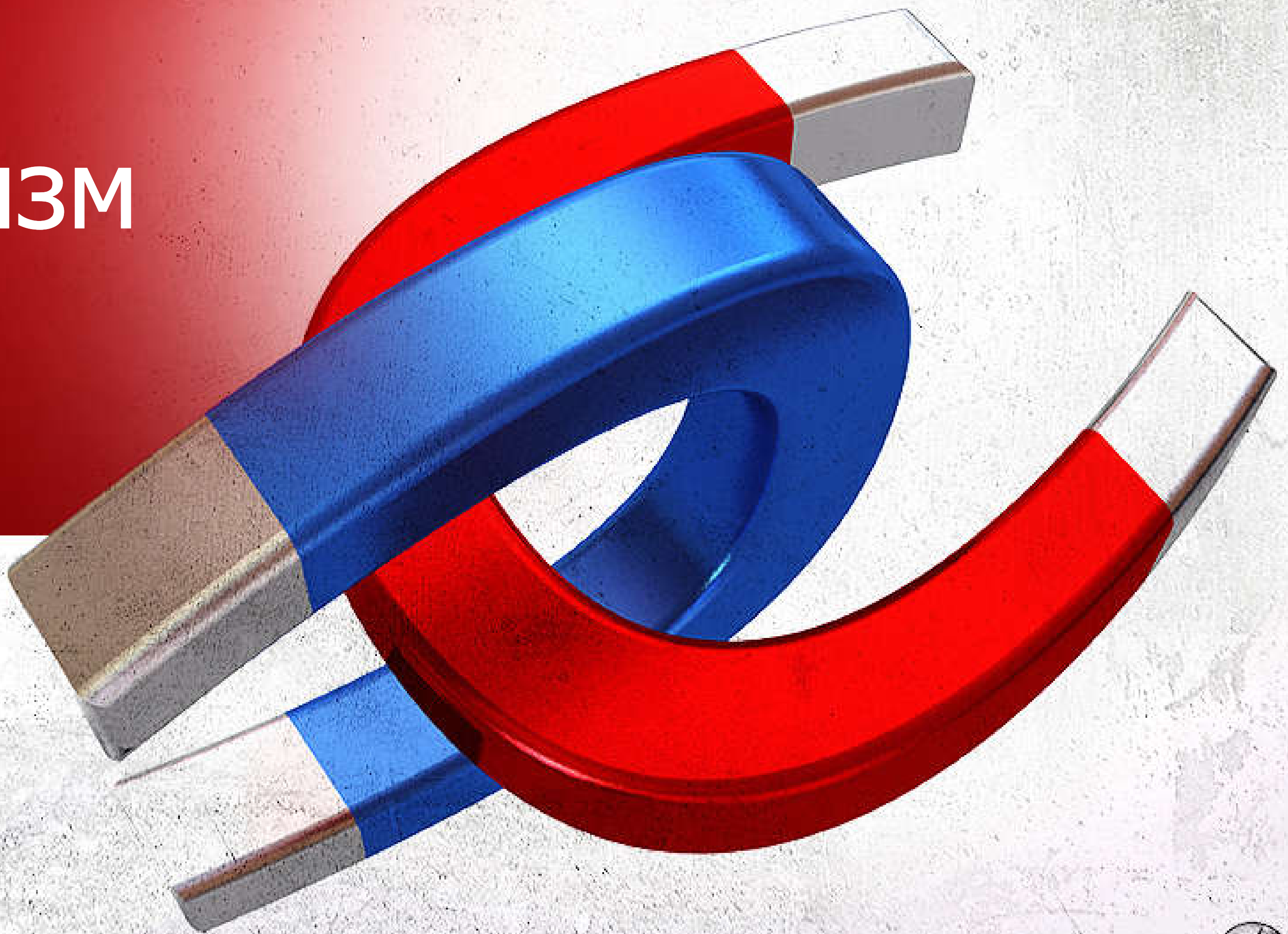
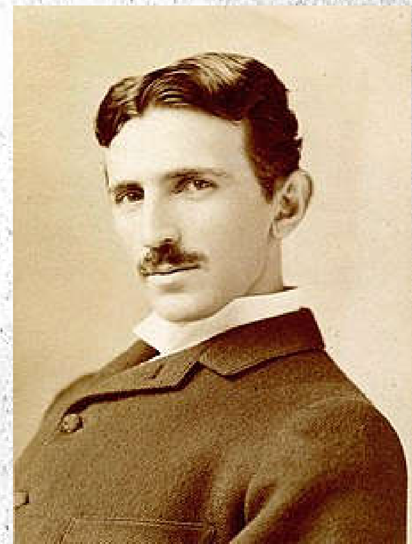
Магнетизм



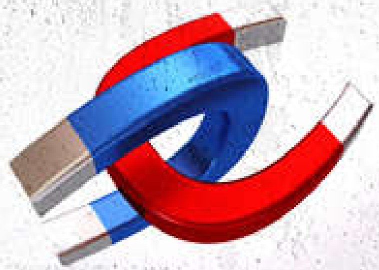
Магнітне поле у вакуумі. Вектор магнітної індукції. Сила Лоренця. Сила Ампера.

Андре-Марі Ампер

Гендрік Антон Лоренц



Нікола Тесла



електрична

$\neq f(\text{руху } q)$

магнітна

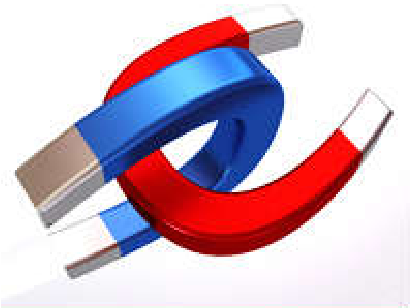
$= f(\vec{v})$

$\Uparrow$

магнітне поле

1) діє на рухомі заряди (струми)

2) рухомі заряди (струми) створюють магн. поле



сила на рухомий заряд в магнітному полі

а) властивості поля

б) величини заряду

в) величини швидкості заряду

г) напрямок швидкості

$\varnothing \div F_{max}$

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

Н·м = Дж.

кг·м/с^2

індукція ($\vec{B}$)

$|\vec{B}| = \frac{F_{max}}{q\,\upsilon}$

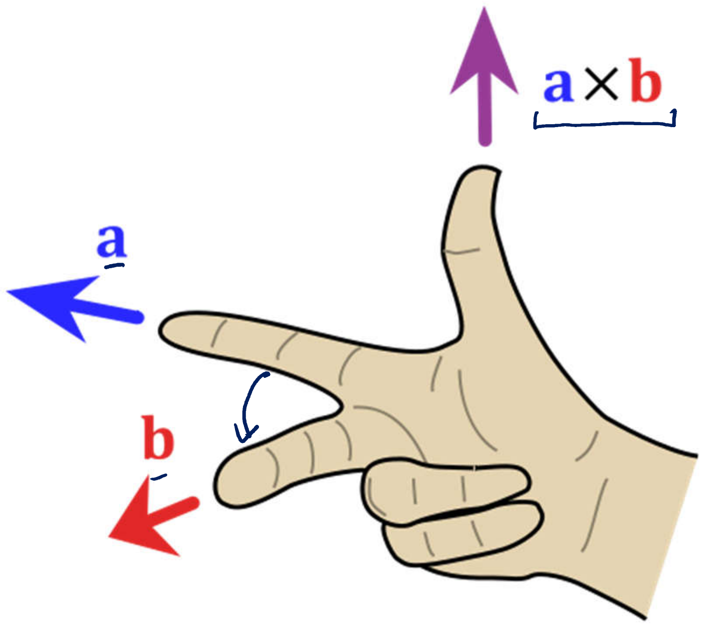
[B] = Тл

тесла

$1\ \text{Тл} = \frac{1\,\text{Н} \cdot 1\,\text{с}}{1\,\text{Кл} \cdot 1\,\text{м}} = \frac{1\,\text{Н}}{1\,\text{А} \cdot 1\,\text{м}}$

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

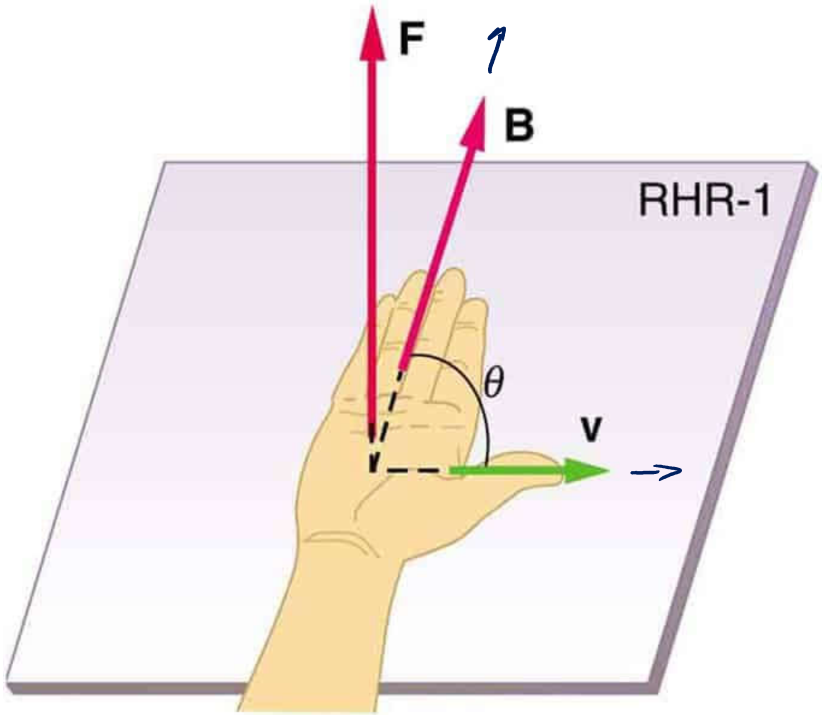
$|\vec{F}_м| = q \cdot \upsilon \cdot B \cdot \sin\alpha$



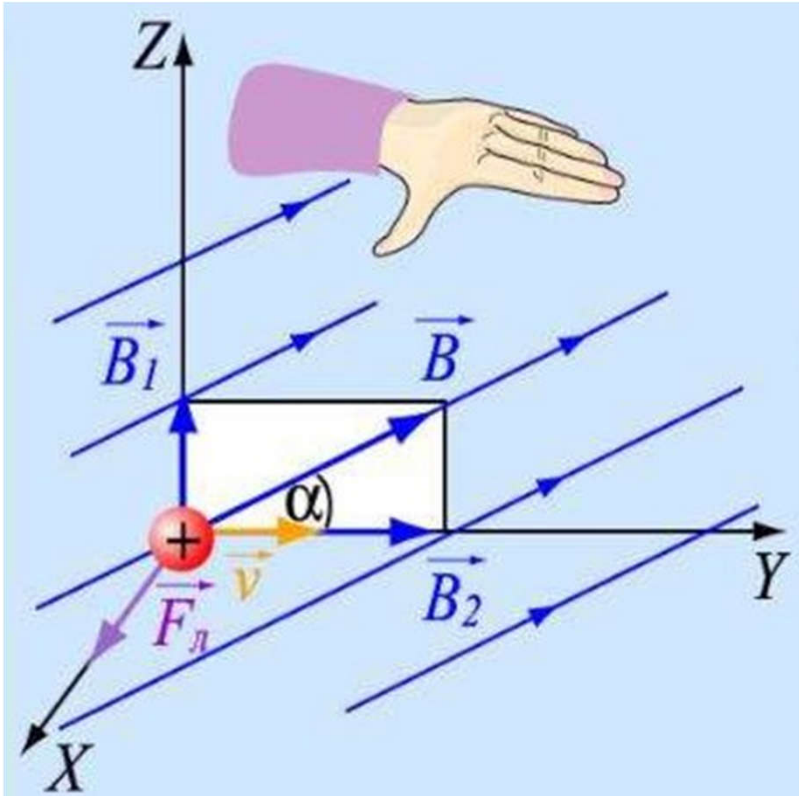
Сила Лоренца

$$\vec{F}_{л} = q\,\vec{v}\times\vec{B}$$

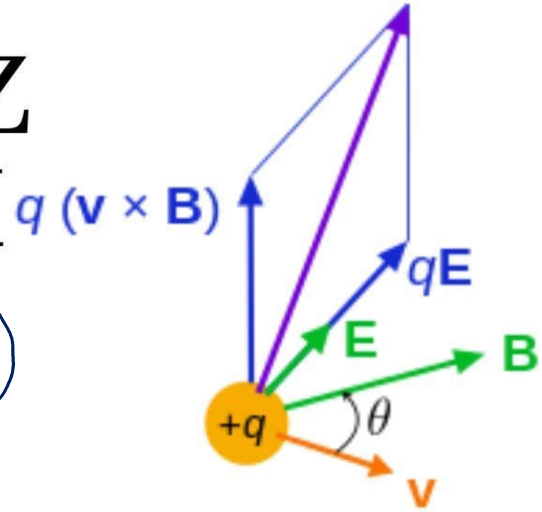
x



$F = qvB \sin\theta$


Z
B1
B
α
v
Fл
B2
Y
X

LORENTZ KUVVETİ



$$\vec F = q\vec E + q\vec v \times \vec B$$

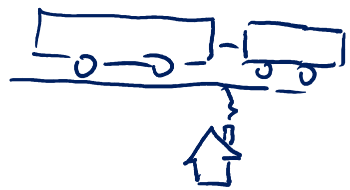
Elektrik Kuvveti — Manyetik Kuvvet

Електр. поле — магн. поле

$v \ll c$

$\vec F$ - не залежить від інерц. С.В

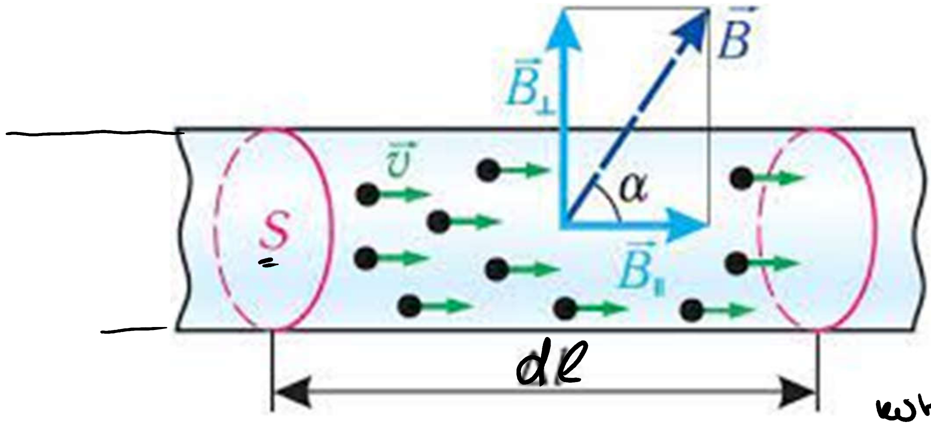
$\underbrace{\vec v, \quad [\vec v, \vec B]}_{\text{залежать від І.С.В.}}$



$q\vec E$

електро-магнітне поле

сила Ампера



кількість, концентрація

$$d\vec F = \sum_i d\vec F_i = d\vec F_i \cdot N_q = \underbrace{q\,[\vec v, \vec B]}\cdot n\cdot dV =$$

$d\vec F_i \perp \vec v$

потужність $P = d\vec F_i \cdot \vec v$

$P = 0$

$$= q\,[\vec v, \vec B]\cdot n\, S\cdot dl$$

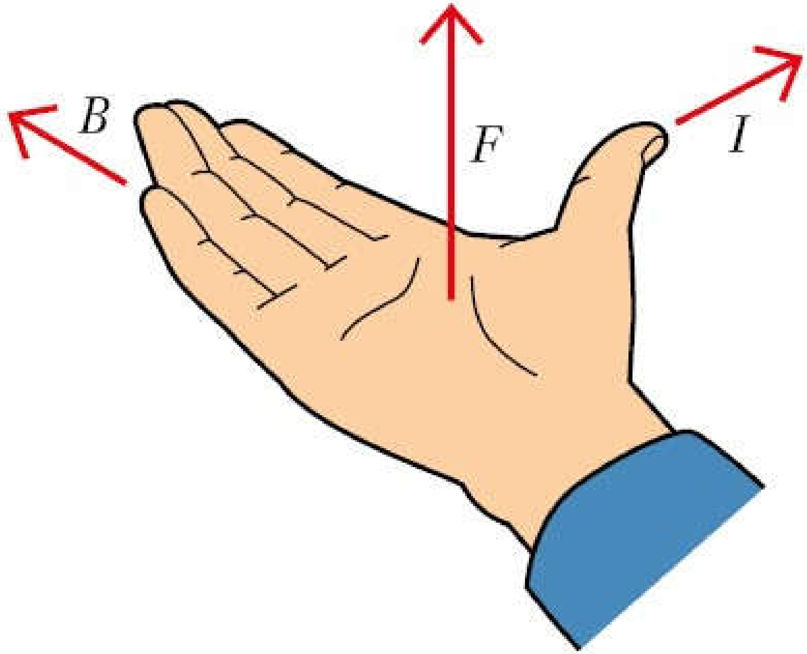
$$\vec j = q\cdot n\cdot \vec v$$

$$d\vec F = [\vec j, \vec B]\cdot S\cdot dl = \underbrace{I\,[d\vec l, \vec B]}_{\text{сила Ампера}} -$$

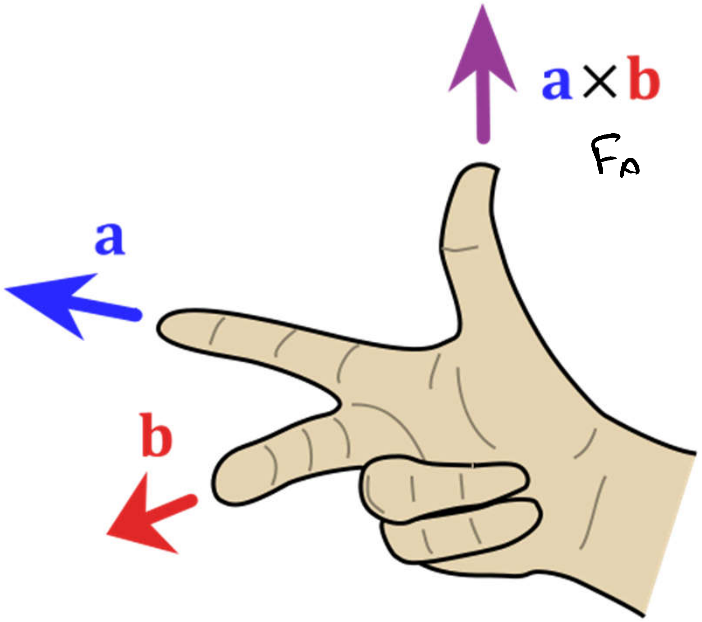
$$\vec F_A = I\int_L [d\vec l, \vec B]$$

(провідник прямий
поле однорідне ($\vec B = const$)

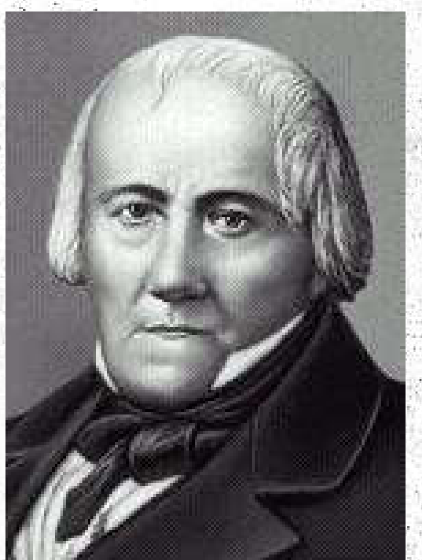
$\vec F_A = I\,[\vec L, \vec B]$ $F_A = I\cdot L\cdot B\cdot \sin\alpha$



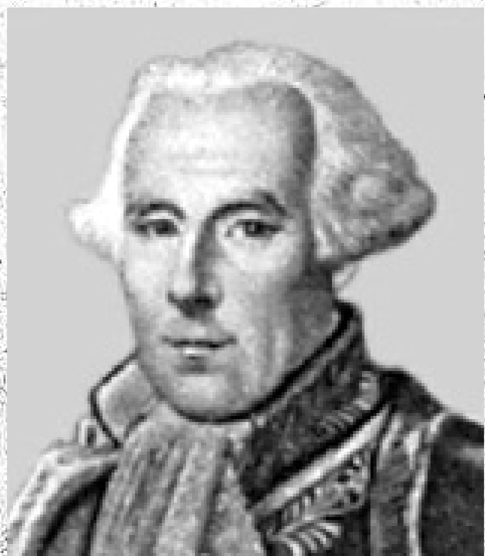
$$\overrightarrow{dF}_A = I\,[\underset{\vec{a}}{\overrightarrow{dl}}\ \underset{\vec{b}}{\overrightarrow{B}}],$$



Магнітне поле рухомого заряду. Принцип суперпозиції магнітних полів. Магнітне поле елементарного струму.

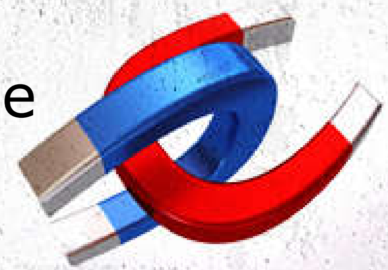


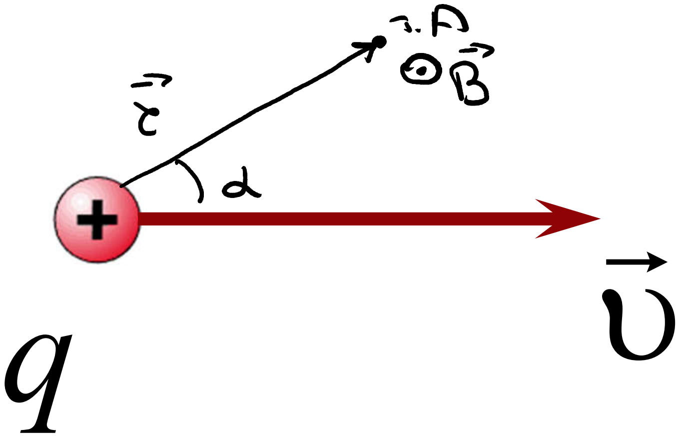
Жан-Батіст Біо



Фелікс Савар

П’єр-Сімон де Лаплас





$$\vec{B}_q = k\,\frac{q[\vec{v},\vec{r}\,]}{r^3}$$

$k \approx 10^{-7}$ Гн/м

$$\vec{B}_q = \frac{\mu_0}{4\pi}\,\frac{q[\vec{v},\vec{r}\,]}{r^3}$$

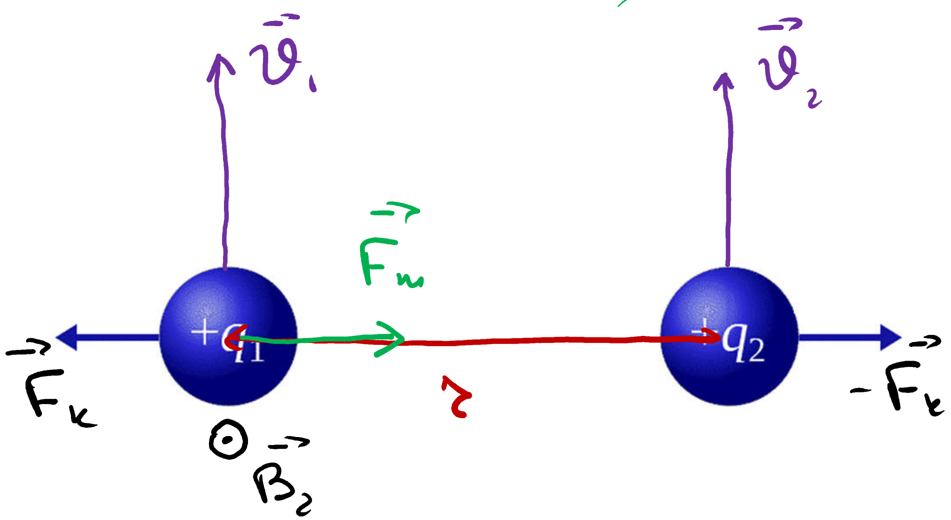
$$|\vec{B}_q| = \frac{\mu_0}{4\pi}\,\frac{qv}{r^2}\sin\alpha$$

СИ $\quad k = \frac{\mu_0}{4\pi}$

μ_0 – магнитна стойна

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

$$F_e = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}$$



$$\vec{v}_1 = \vec{v}_2 = \vec{v}$$

$$\vec{F}_m = q_1 [\vec{v}_1, \vec{B}_2]$$

$$F_m = q_1 \cdot v_1 B_2 = q_1 v_1 \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{q_2 v_2}{r^2}$$

$$F_e / F_m = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2} \Big/ \frac{q_1 q_2 v_1 v_2 \mu_0}{4\pi r^2} = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0} \frac{1}{v_1 v_2} = \frac{1}{\varepsilon_0 \mu_0 v^2} = \frac{c^2}{v^2}$$

$$\frac{F_e}{F_m} = \left(\frac{3 \cdot 10^8}{10^{-3}}\right)^2 \approx 10^{23}$$

Біо-Савара-Лапласа

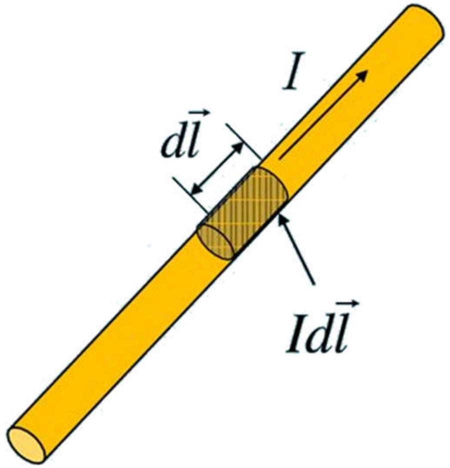
$\underbrace{\text{Біо-Савара}}_{1820}$

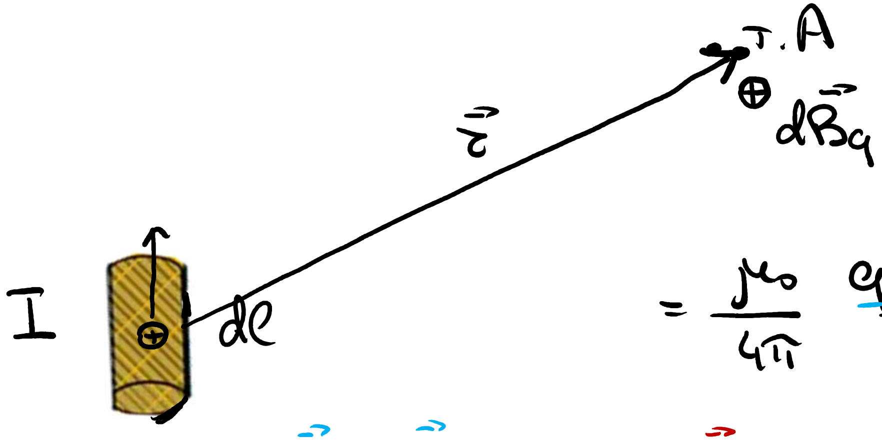
$B \sim I$

$B = f(r)$

$\vec{B} = \sum_i \vec{B}_i$

принцип суперпозиції





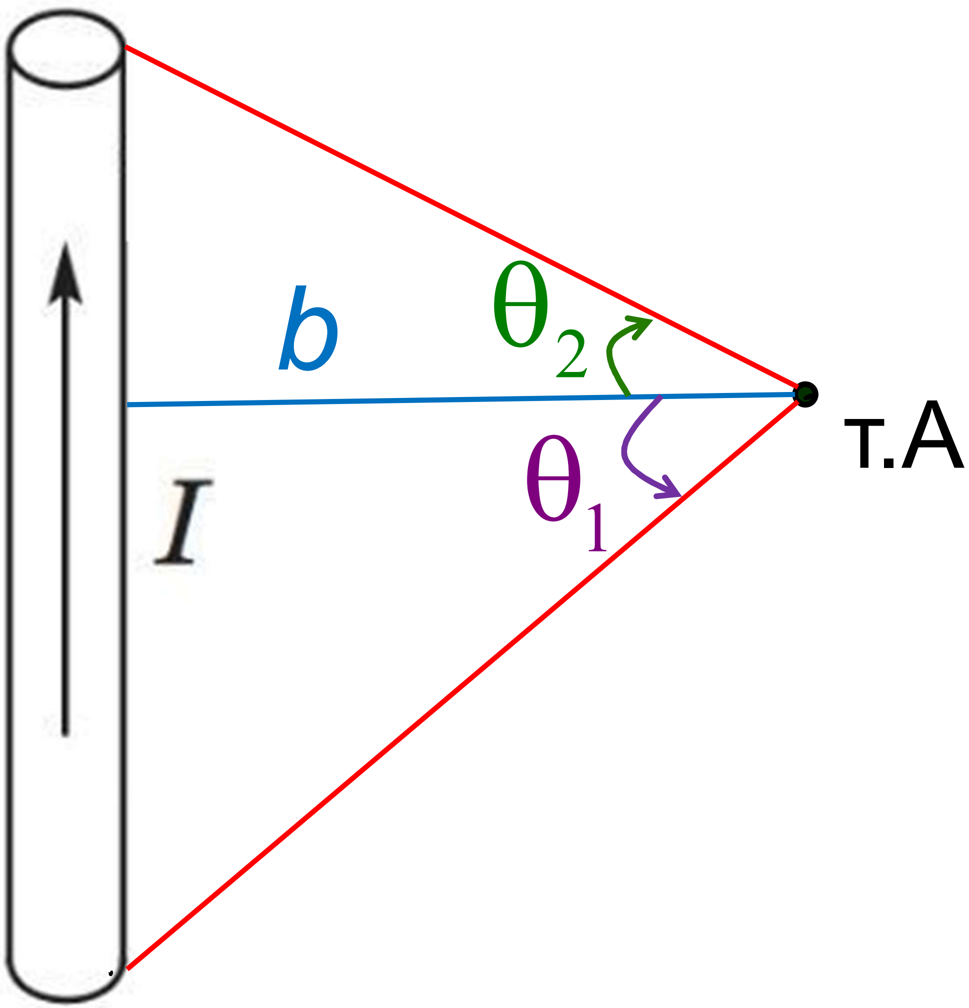
$$d\vec{B} = \sum \vec{B}_q = \vec{B}_q \cdot N_q = \vec{B}_q \cdot n \cdot S \cdot dl = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q[\vec{v},\vec{r}]}{r^3} \cdot n S dl$$

$\vec{j} = q\vec{v} \cdot n$ $\quad I = |\vec{j}| S$

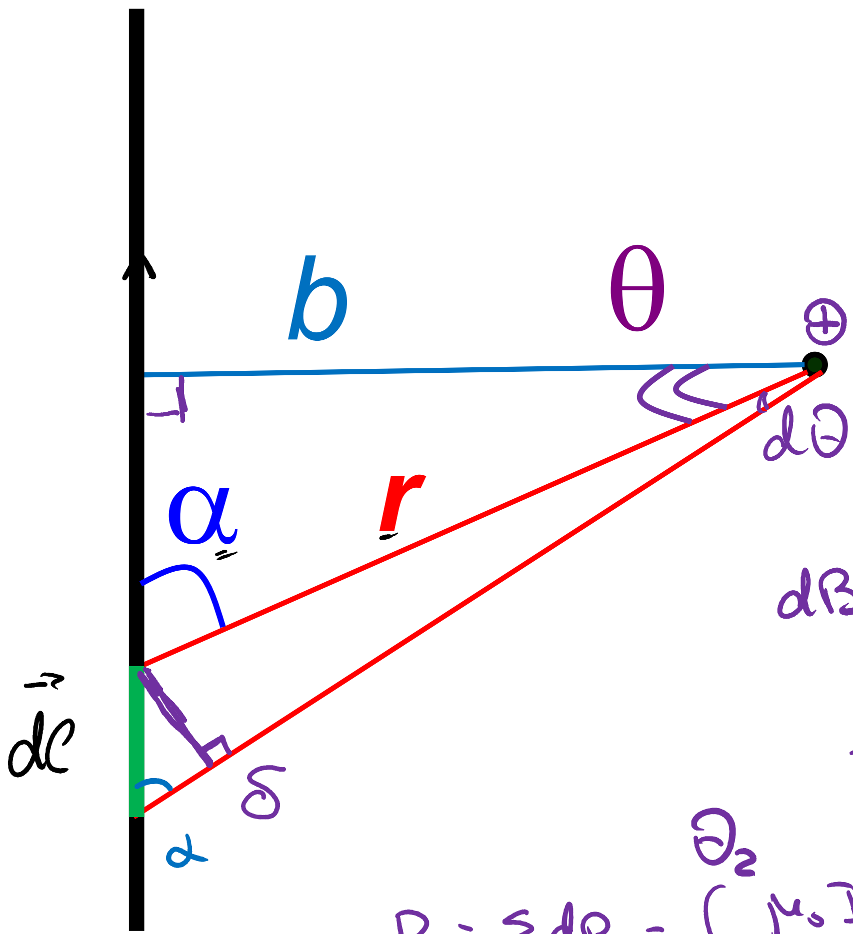
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I[d\vec{l},\vec{r}]}{r^3}$$ – з. Біо-Савара-Лапласа

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

Магнітне поле скінченного прямолінійного провідника



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



$$\delta = r \cdot d\theta = dl \cdot \sin\alpha$$

$$\frac{b}{r} = \cos\theta$$

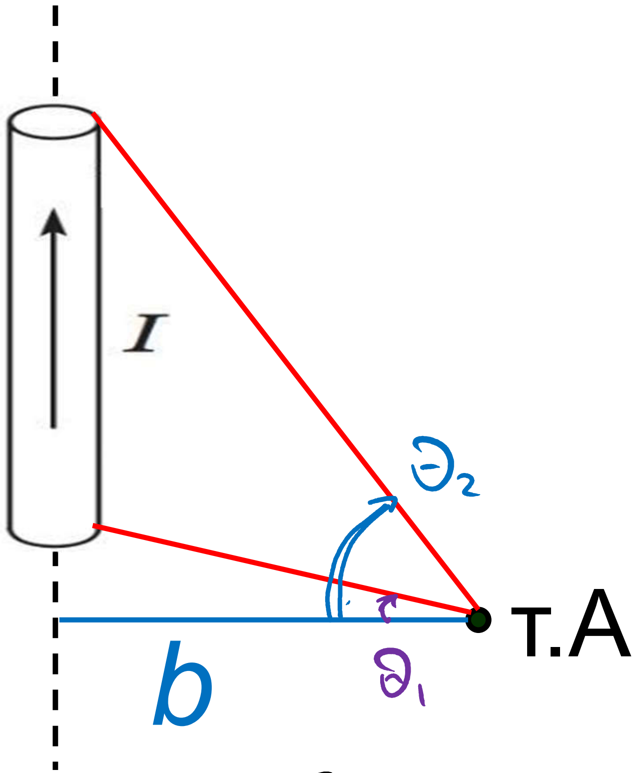
$$r = \frac{b}{\cos\theta}$$

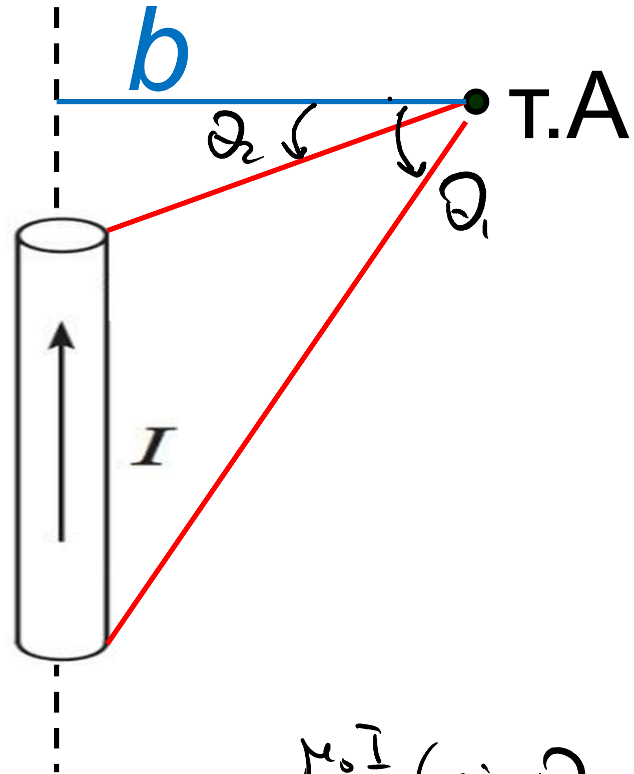
$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{\cancel{r} \cdot d\theta}{r^{\cancel{2}}} =$$

$$= \frac{\mu_0}{4\pi} I \frac{\cos\theta\, d\theta}{b}$$

$$B = \Sigma dB = \int_{-\theta_1}^{\theta_2} \frac{\mu_0 I}{4\pi b} \cos\theta\, d\theta =$$

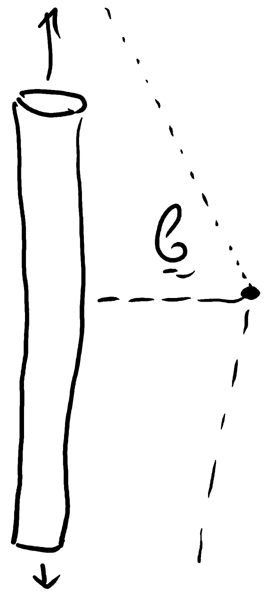
$$= \frac{\mu_0 I}{4\pi b}(\sin\theta_2 + \sin\theta_1)$$





$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi b}(\sin\theta_2 - \sin\theta_1)$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi b}(\sin\theta_1 - \sin\theta_2)$$

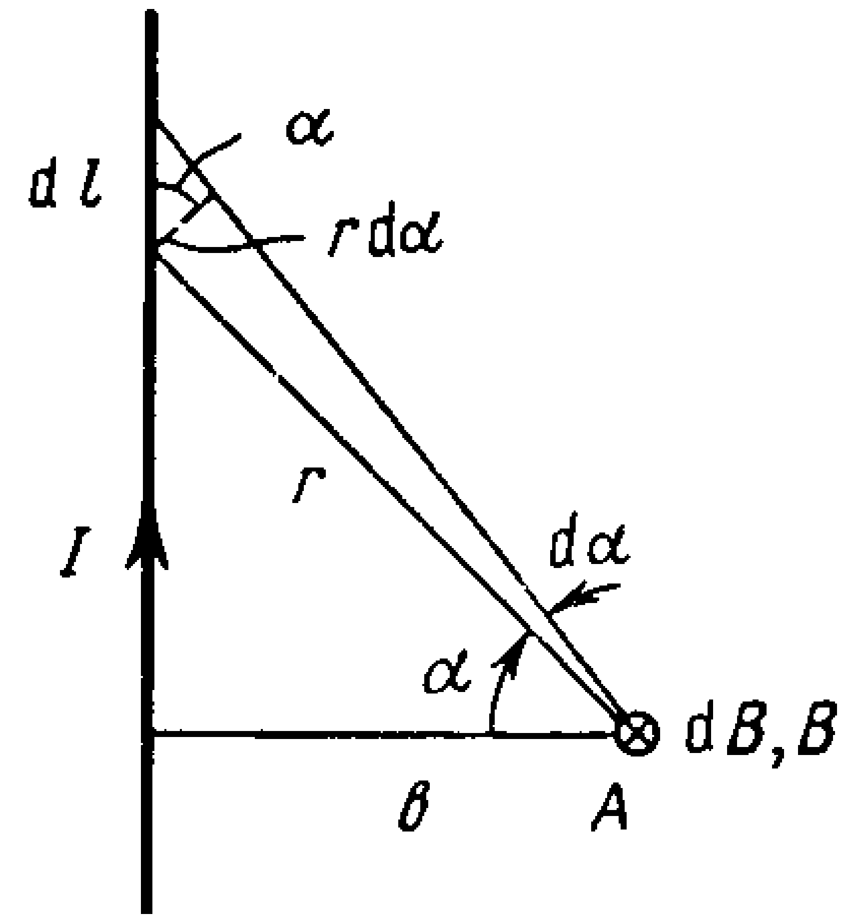


$\theta_1 = \frac{\pi}{2}$

$\theta_2 = \frac{\pi}{2}$

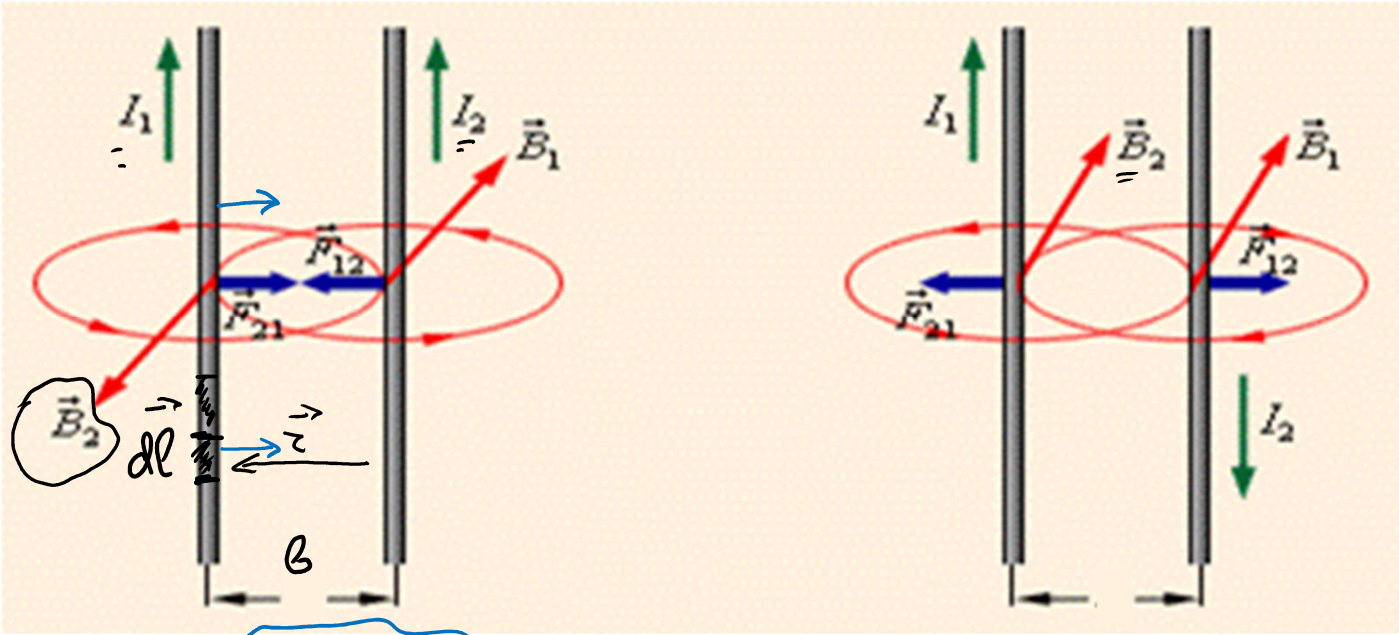
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi b}$$

Магнітне поле скінченного прямолінійного провідника



https://youtu.be/qfsQbOX0tYY

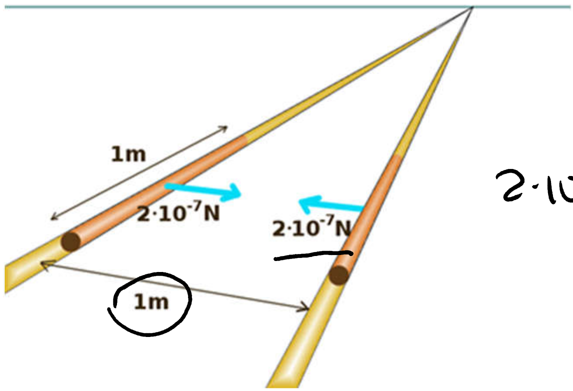
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi b}$$



$$d\vec{F}_A = I_1 \boxed{[d\vec{l}, \vec{B}_2]} \qquad d\vec{l} \perp \vec{B}_2 \qquad B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi b}$$

$$dF_A = I_1\, dl\, B_2 = dl\, \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b}$$

$$dl \to \infty \qquad f_A = \frac{dF_A}{dl} \qquad f_A = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi b} \qquad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}\ \text{Гн/м}$$

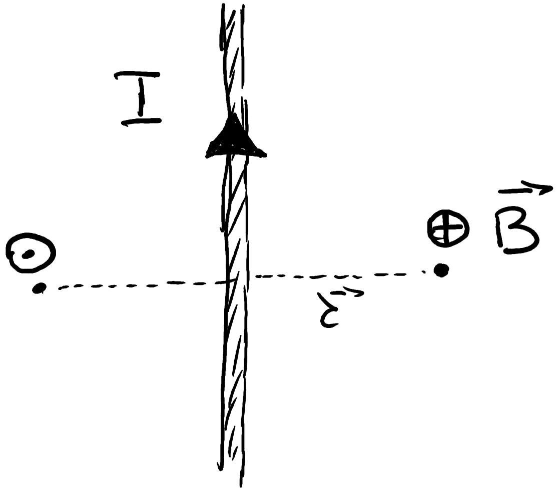


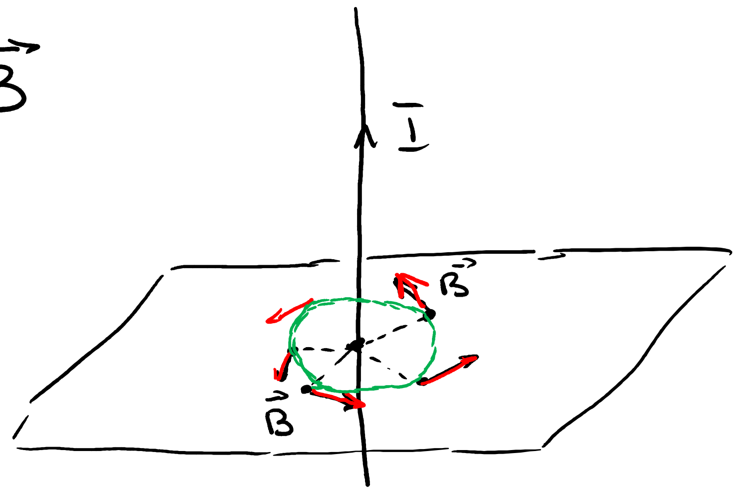
1 A

$2 \cdot 10^{-7}$ Н

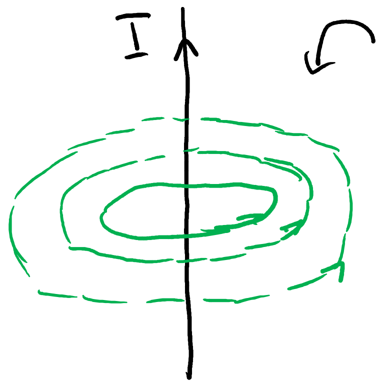
лінії магнітної індукції

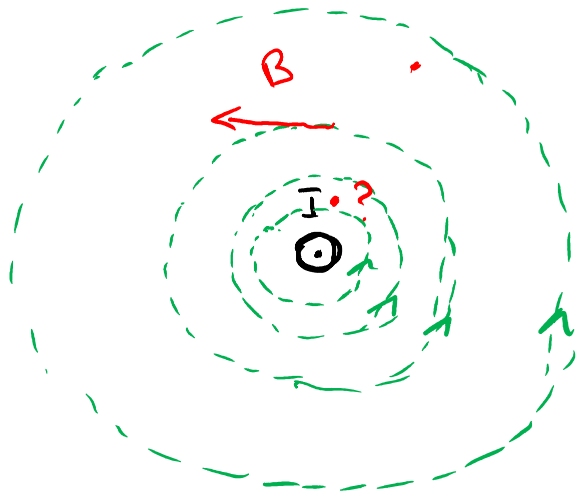
$\vec{B}$

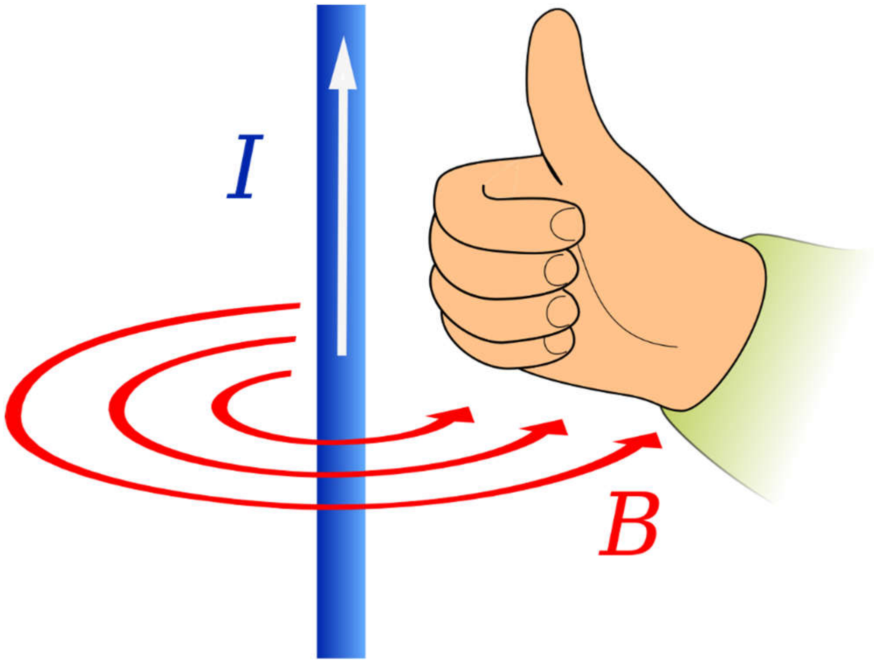


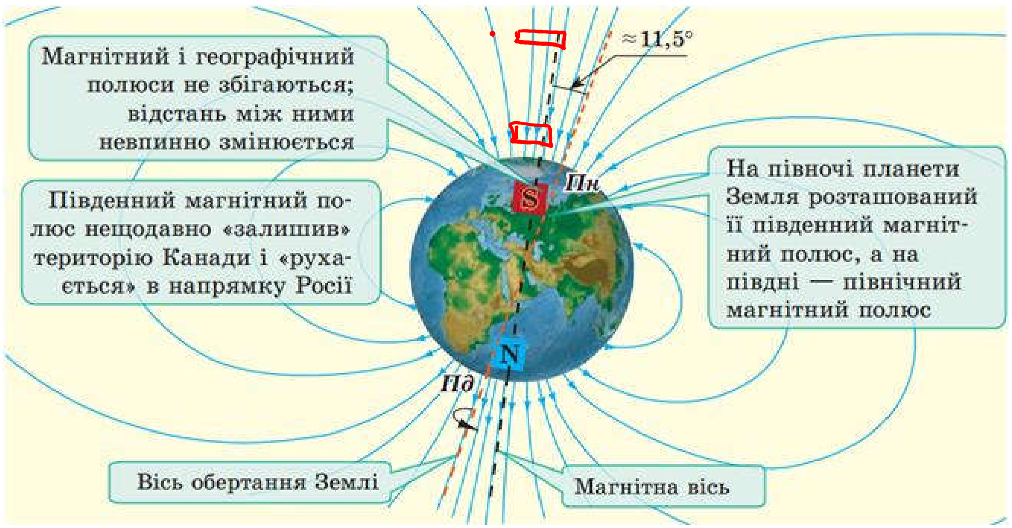


$|\vec{B}|$

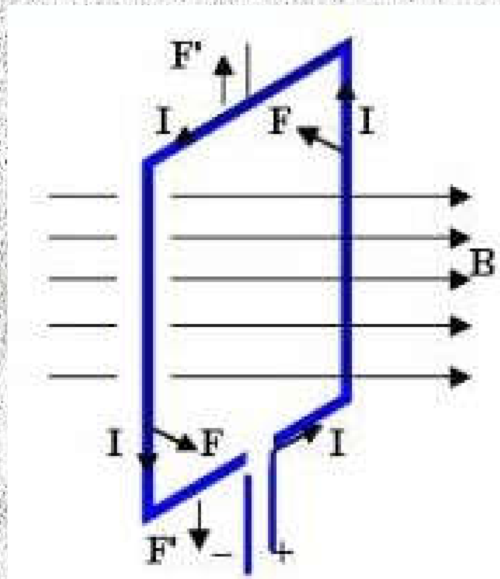


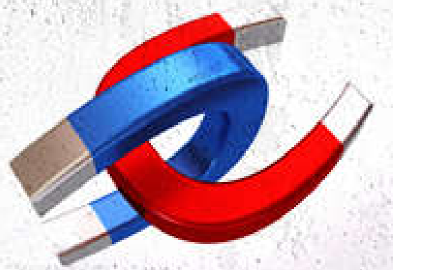



I
B


≈11,5°
Магнітний і географічний полюси не збігаються; відстань між ними невпинно змінюється
Південний магнітний полюс нещодавно «залишив» територію Канади і «рухається» в напрямку Росії
S
Пн
N
Пд
На півночі планети Земля розташований її південний магнітний полюс, а на півдні — північний магнітний полюс
Вісь обертання Землі
Магнітна вісь

Магнітний момент витка зі струмом. Момент сил, які діють на виток у однорідному магнітному полі. Енергія взаємодії витка з магнітним полем.

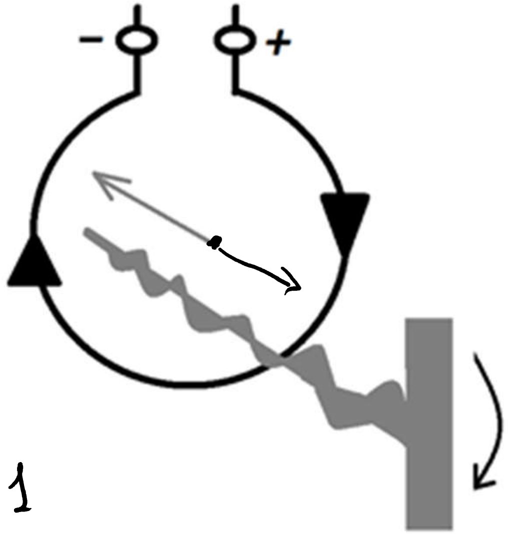




Магнітний момент

$-q \xrightarrow{\vec{e}} q$

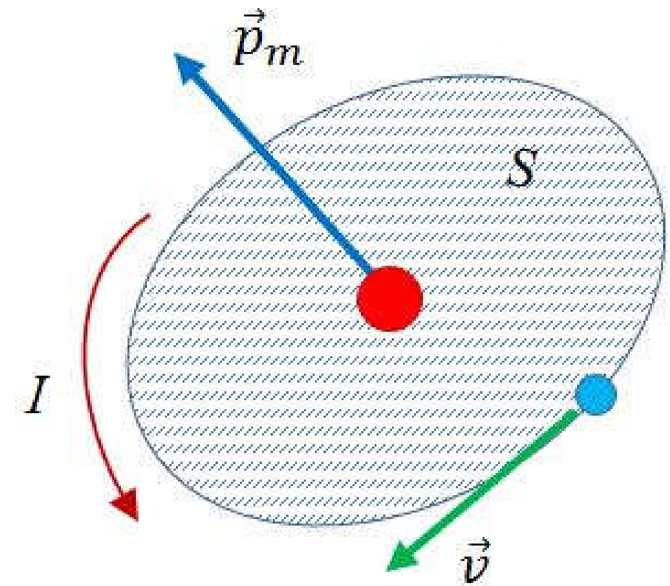
$\vec{p} = q\vec{e}$



$|\vec{n}| = 1$

$$\vec{P}_m = \vec{\mu} = I \cdot \underbrace{S \cdot \vec{n}}_{\vec{S}} = I \cdot \vec{S}$$

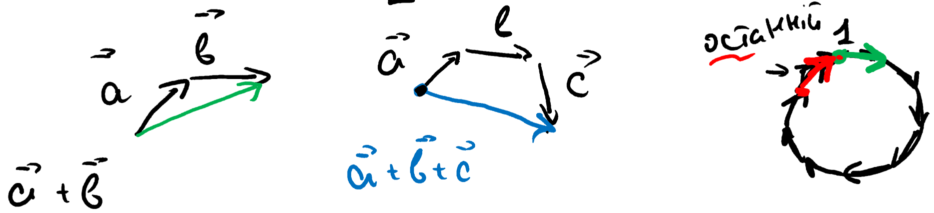
$$[\vec{p}_m] = A \cdot м^2$$



Виток у однорідному магнітному полі

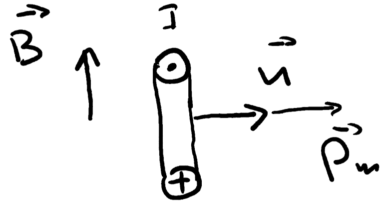
сила?

$$\vec F_A = I \oint_L [d\vec l, \vec B] = \{\vec B = const\} = I\,[\underbrace{(\oint_L d\vec l)}_{=0}, \vec B]$$



$$\vec F_A = 0$$

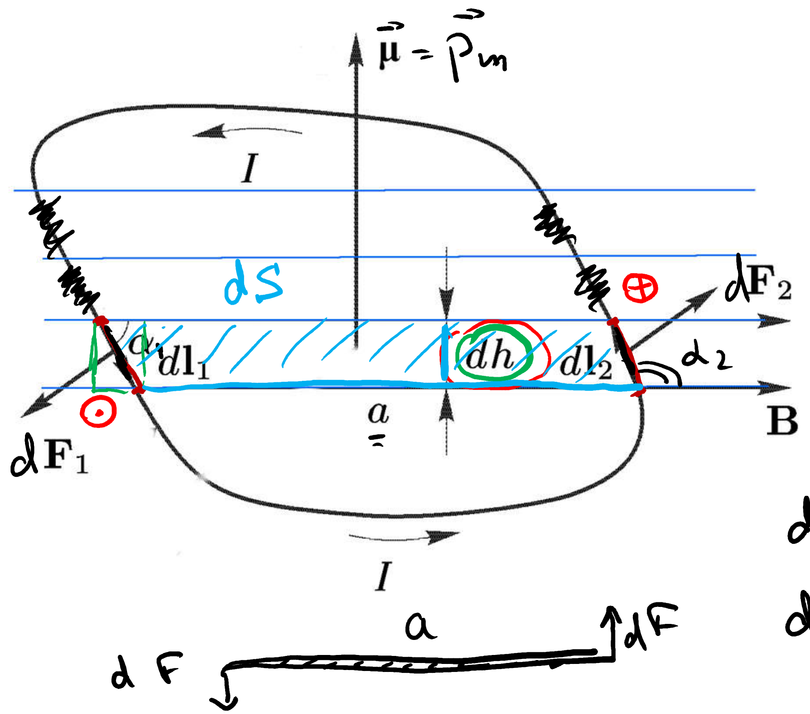
момент сили



$\vec B \perp \vec p_m$

$$M = p_m \cdot B$$

$$M = I \cdot B \int dS = I \cdot B \cdot S$$



$I\,d\vec l_1$ $\quad$ $I\,d\vec l_2$

$$dF_1 = I\,dl_1 \cdot B \cdot \sin\alpha_1 = IB\,dh$$

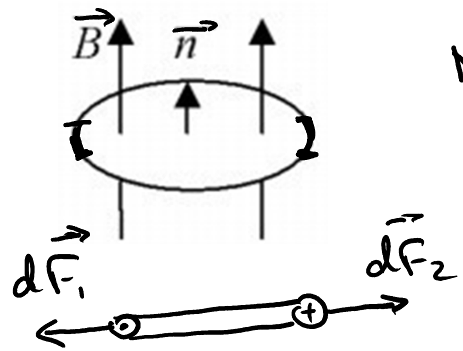
$$dF_2 = I\,dl_2 \cdot B \cdot \sin\alpha_2 = IB\,dh$$

$$dF_1 = dF_2$$

$$dM = dF \cdot a = I \cdot B\, dh \cdot a = I \cdot B \cdot dS$$

$$M = \int dM = \int I \cdot B \cdot dS$$

Виток у однорідному магнітному полі

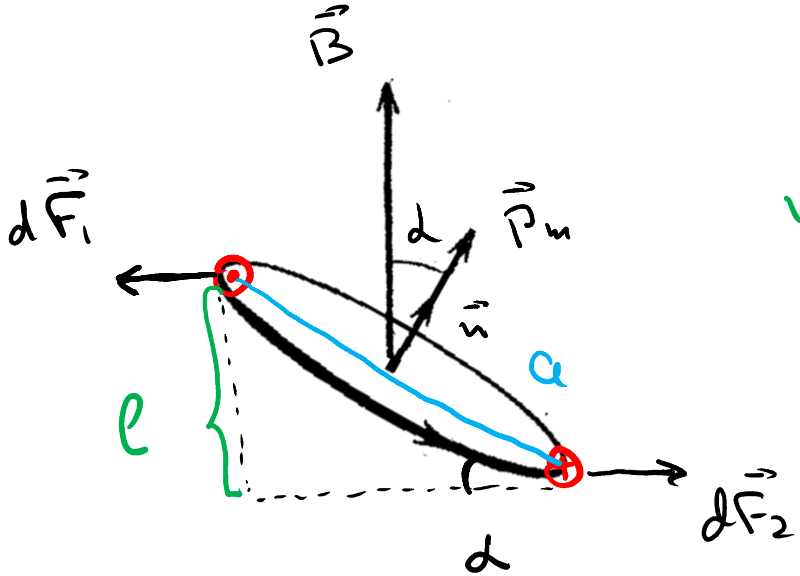


$M = 0$

$\vec{B} \uparrow\uparrow \vec{n}$

$\vec{B} \uparrow\uparrow \vec{p}_m$

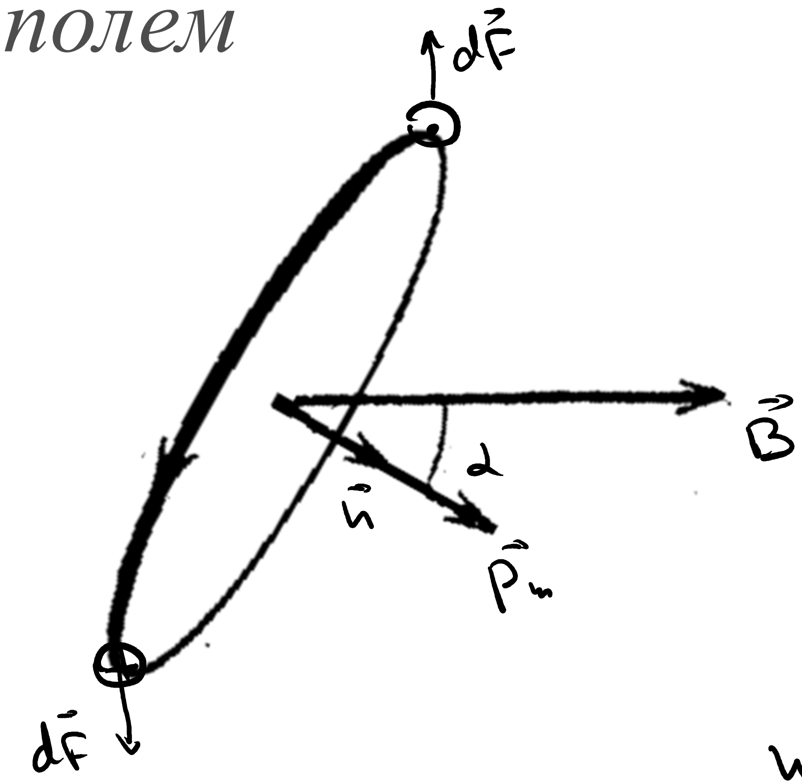
$$\boxed{\vec{M} = [\vec{p}_m, \vec{B}]}$$



where $l = a \cdot \sin\alpha$

$M = p_m \cdot B \cdot \sin\alpha$

Енергія взаємодії витка з магнітним полем



$$\delta A = M\,d\alpha = p_m B \sin\alpha\, d\alpha$$

$$\delta A = -dW$$

$$dW = p_m B \sin\alpha\, d\alpha$$

↑збільш. пот. енергії

$$W = -p_m \cdot B \cdot \cos\alpha + C$$

$$C = 0$$

$$W = -p_m \cdot B \cdot \cos\alpha$$

$$W = -(\vec{p}_m \cdot \vec{B})$$

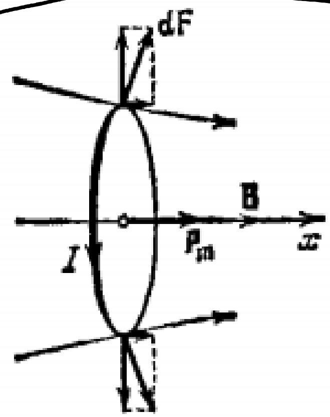
$\vec{p}_m \uparrow\uparrow \vec{B}$ $\qquad$ $\vec{p}_m \uparrow\downarrow \vec{B}$

неоднорідне поле

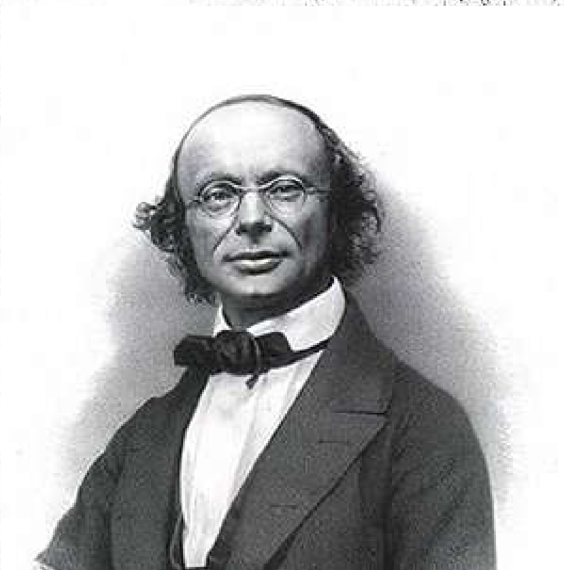
$$\vec{F} = (\vec{p}_m \cdot \mathrm{grad}) \cdot \vec{B}$$

$$F_x = p_{m_x} \cdot \frac{\partial B}{\partial x}$$

$$F_y = p_{m_y} \cdot \frac{\partial B}{\partial y}$$



Потік вектора магнітної індукції.
Теорема Остроградського-Гаусса для магнітних полів.



Вільгельм Єдуард Вебер

Йоганн Карл Фрідріх Гаусс

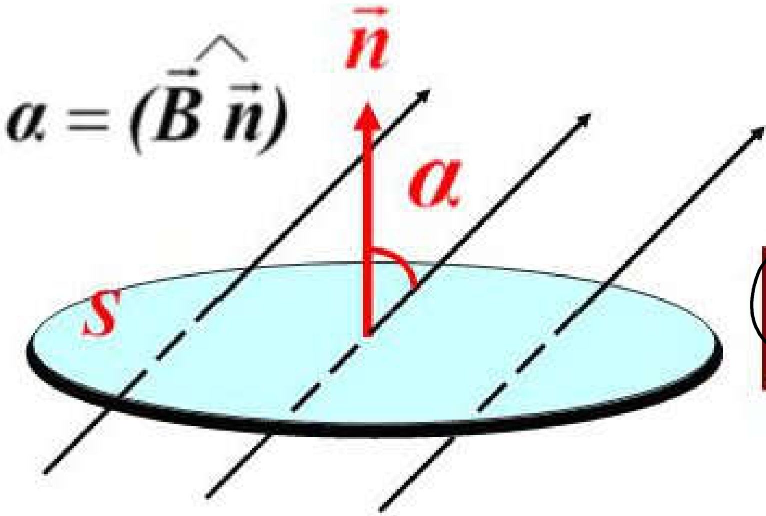
потік

$$d\Phi = \vec{B}\cdot d\vec{S} = \vec{B}\cdot\vec{n}\,dS = B\cdot dS\cdot\cos\alpha =$$
$$= B_n\,dS =$$
$$= B\cdot dS_{\perp}$$

$$d\vec{S} = \vec{n}\,dS$$

$$|\vec{n}| = 1$$

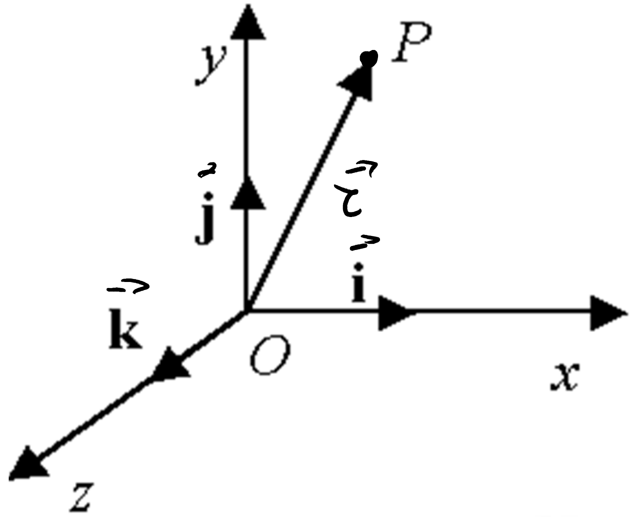
$$\Phi = \int_S d\Phi = \int_S \vec{B}\,d\vec{S} = \int_S B_n\,dS$$



$$\boxed{\Phi = B\cdot S\cdot\cos\alpha}$$

вебер

$$1\,Тл\cdot 1\,м^2 = 1\,Тл\cdot 1\,м^2 = 1\,Вб$$



$|\vec{i}| = |\vec{j}| = |\vec{k}| = 1$

$$\vec{r} = r_x \cdot \vec{i} + r_y \cdot \vec{j} + r_z \cdot \vec{k} =$$

$$= x \cdot \vec{i} + y \cdot \vec{j} + z \cdot \vec{k}$$

Оператор набла

$$\vec{\nabla} = \vec{i}\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\frac{\partial}{\partial z},$$

$$\nabla = \vec{i}\,\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\,\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\,\frac{\partial}{\partial z},$$

$\vec{E} = -\vec{\nabla}\varphi$

$\vec{a} = (a_x, a_y, a_z)$

$2\cdot\vec{a} = (2a_x, 2\cdot a_y, 2\cdot a_z)$

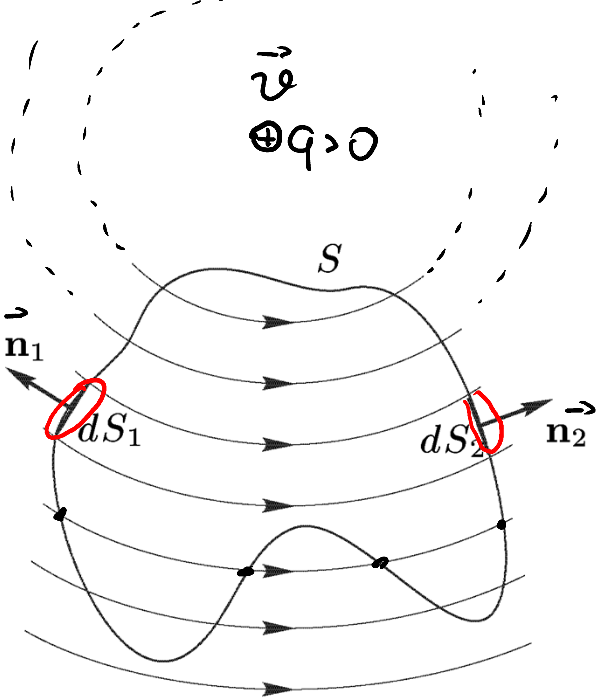
$$\vec{\nabla}\cdot u = \operatorname{grad} u = \frac{\partial u}{\partial x}\vec{i} + \frac{\partial u}{\partial y}\vec{j} + \frac{\partial u}{\partial z}\vec{k}.$$

$\vec{a}\cdot\vec{b} = a_x\cdot b_x + a_y\cdot b_y + a_z b_z$

$$\vec{\nabla}\cdot\vec{A} = div\vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

дивергенція – зміна вектора за модулем

Теорема Гауса



$$d\Phi = d\Phi_1 + d\Phi_2 =$$

$$= \vec{B}\,\vec{n}_1 dS_1 + \vec{B}\cdot\vec{n}_2\cdot dS_2 =$$

$$= -B\,dS_\perp + B\,dS_\perp = 0$$

$$\Phi = \int d\Phi = \underbrace{0 = \oint \vec{B}\,d\vec{S}}$$

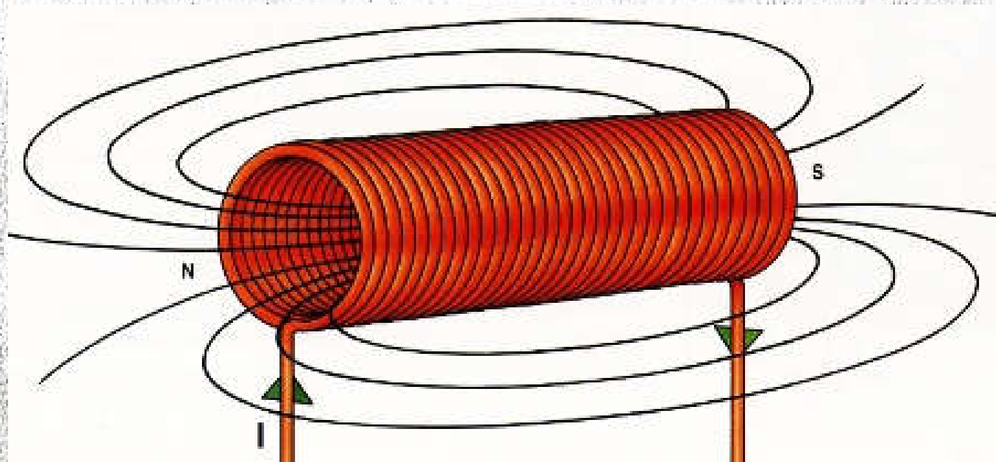
$$\oint_S \vec{B}\,d\vec{S} = \int_V (\mathrm{div}\,\vec{B})\,dV = 0 \qquad \boxed{\mathrm{div}\,\vec{B} = 0}$$

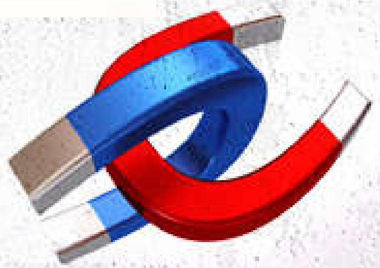
соленоїдальне

$$\mathrm{div}\,\vec{E} = \frac{1}{\varepsilon_0}\rho \qquad \mathrm{div}\,\vec{D} = \rho_в$$

Теорема про циркуляцію вектора магнітної індукції. Магнітне поле нескінченного прямолінійного струму та соленоїда.

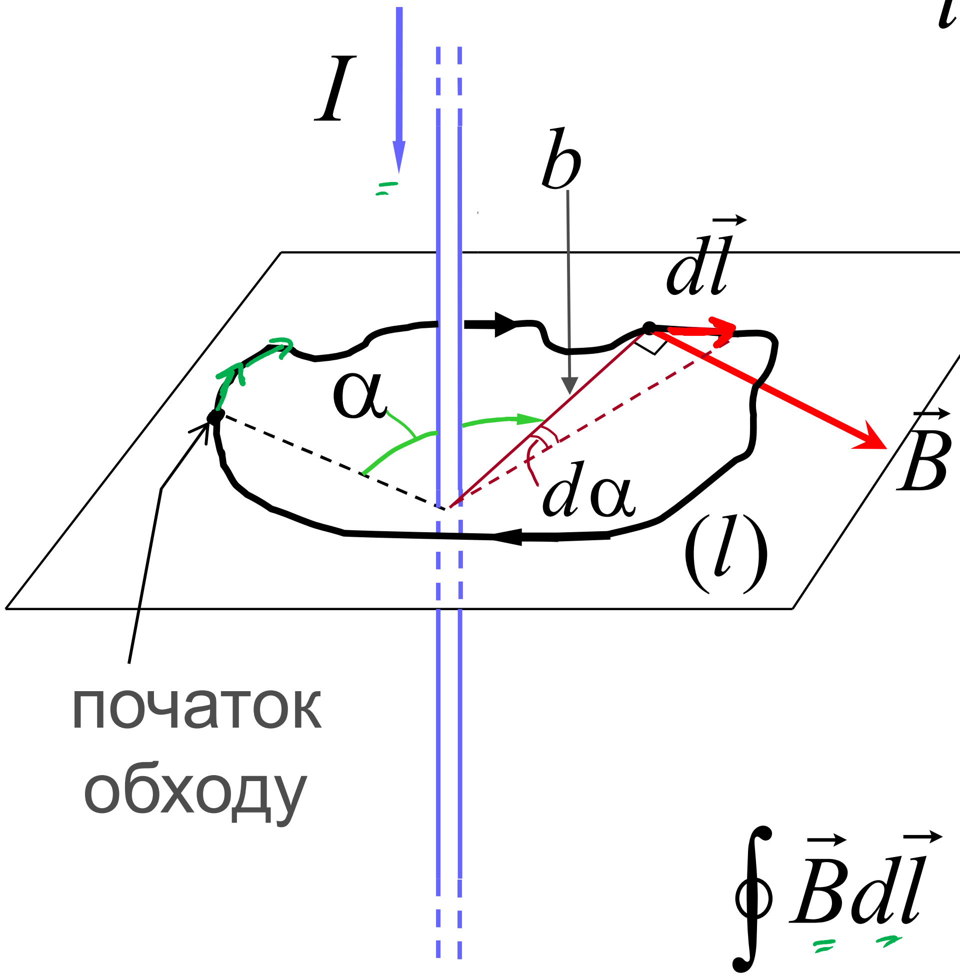
Джорж Габрієль Стокс





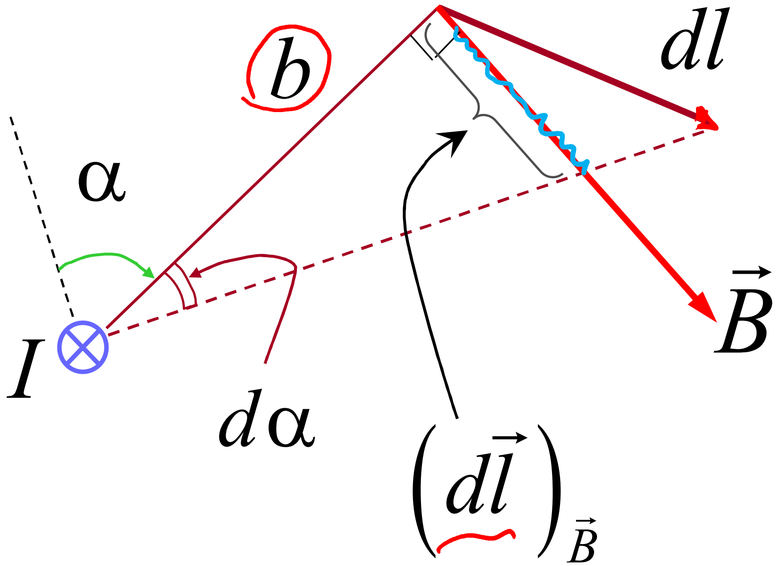
циркуляція

$$\oint_l \vec{B}\,d\vec{l}$$



$$\oint_l \vec{B}\,d\vec{l} = \oint_l B\left(d\vec{l}\right)_{\vec{B}}$$

$$\oint_l \vec{B}\,d\vec{l} = \oint_l B\left(d\vec{l}\,\right)_{\vec{B}}$$

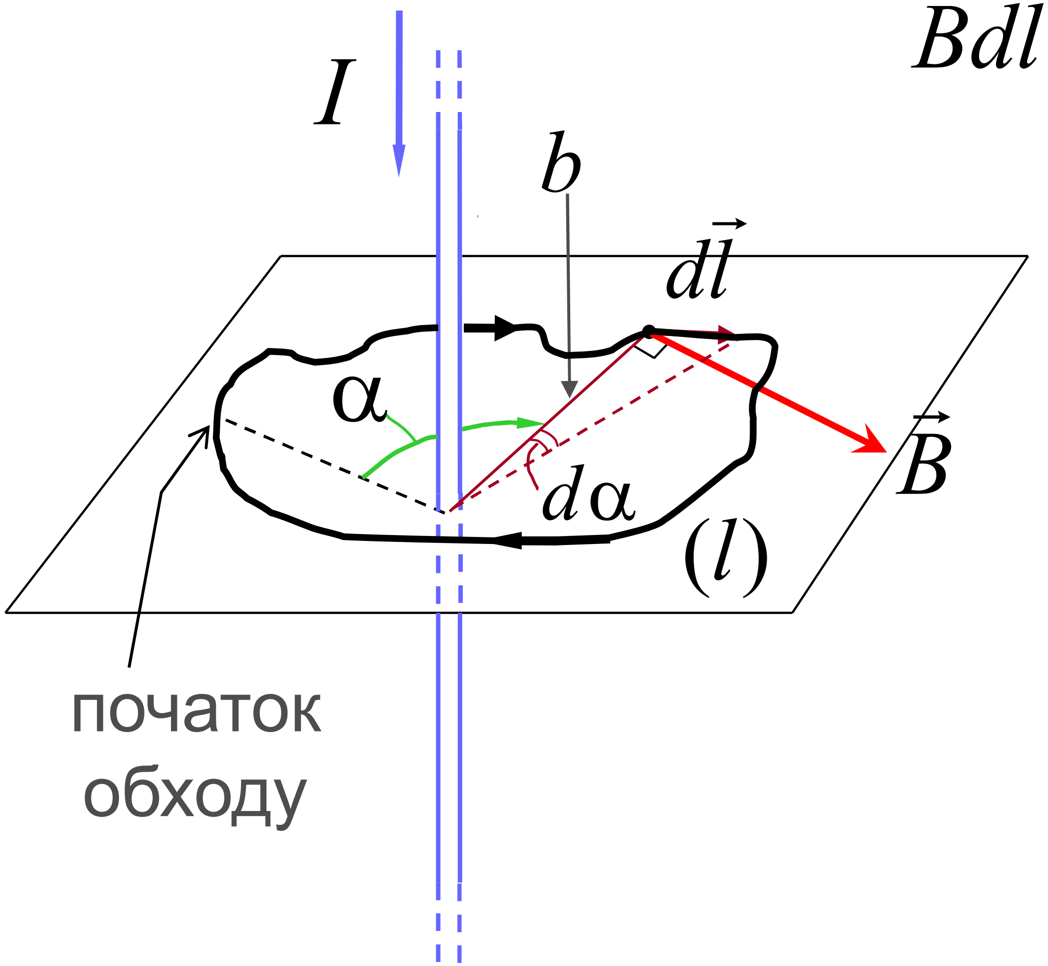


$$\left|\left(d\vec{l}\,\right)_{\vec{B}}\right| = b \cdot d\alpha$$

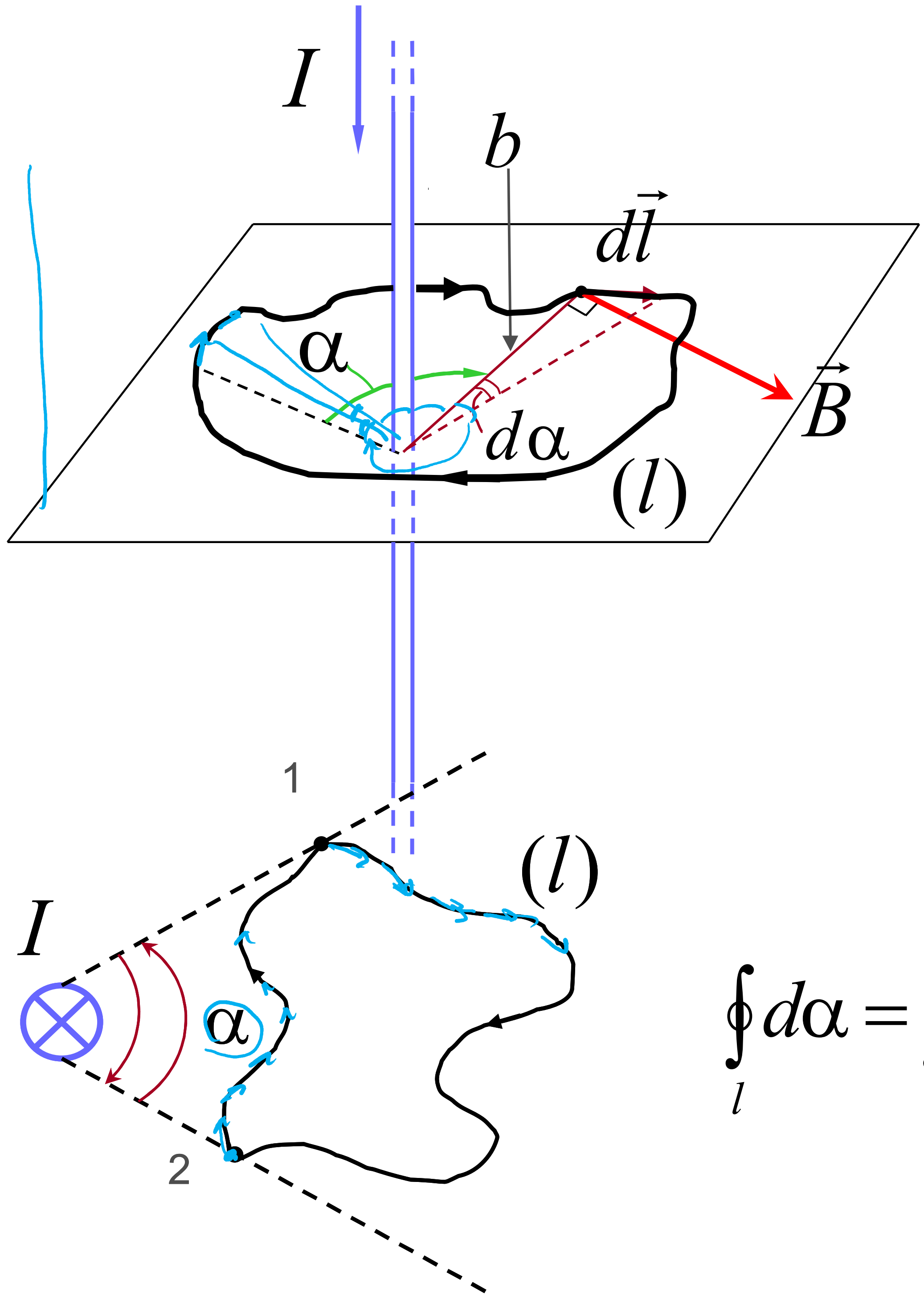
$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi b}$$

$$\vec{B}\,d\vec{l} = \frac{\mu_0 I}{2\pi b}\,\underbrace{b\,d\alpha}_{(d\vec{l})_B}$$

$$\vec{B}d\vec{l} = \frac{\mu_0 I}{2\pi b} b\, d\alpha$$



$$\oint_l \vec{B}d\vec{l} = \oint_l \frac{\mu_0 I}{2\pi \cancel{b}} \cancel{b}\, d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \times \underbrace{\oint_l d\alpha}_{}$$



$$\oint_l d\alpha = 2\pi$$

$$\oint_l d\alpha = \int_1^2 d\alpha + \int_2^1 d\alpha = 0$$

$$\oint_l \vec{B}d\vec{l} = \oint_l \frac{\mu_0 I}{2\pi b} b d\alpha = \frac{\mu_0 I}{2\pi} \times \underbrace{\oint_l d\alpha}_{\left\{\begin{matrix}2\pi\\0\end{matrix}\right.}$$

$$\oint_l \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 I$$

$$\boxed{\oint_l \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 \sum_i I_i}$$

$$\nabla = \vec{i}\,\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\,\frac{\partial}{\partial y} + \vec{k}\,\frac{\partial}{\partial z},$$

$$\vec{\nabla} \times \vec{a} = \operatorname{rot} \bar{a} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \dfrac{\partial}{\partial x} & \dfrac{\partial}{\partial y} & \dfrac{\partial}{\partial z} \\ a_x & a_y & a_z \end{vmatrix}$$

ротор – зміна вектора за напрямом

теорема Стокса

$$\oint_l \vec{B} d\vec{l} = \int_S \left(rot\, \vec{B} \right) d\vec{S}$$

$$I = \int_S \vec{j}\, d\vec{S}$$

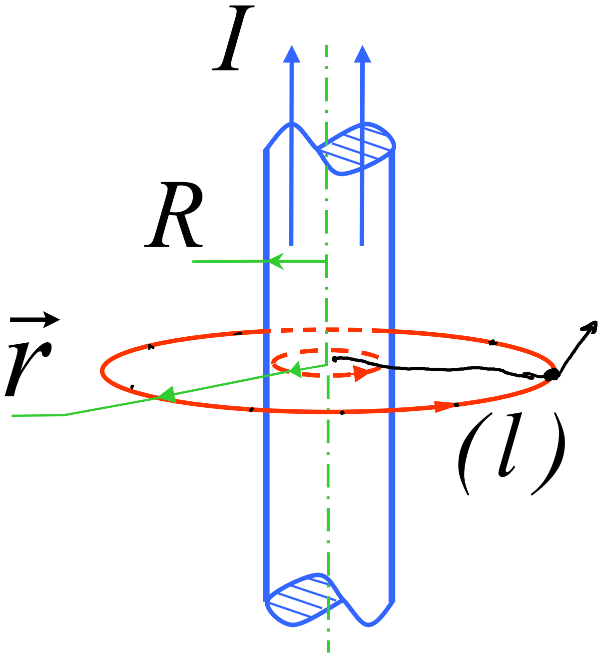
$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \int_S (rot\, \vec{B}) \cdot d\vec{S} = \mu_0 \int \vec{j}\, d\vec{S}$$

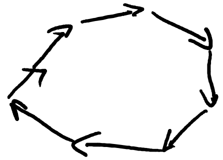
$$\boxed{rot\, \vec{B} = \mu_0 \vec{j}}$$

електростатичне

$$rot\, \vec{E} = 0$$

прямий провідник





Симетрія: у рівновіддалених від осі точках поле однакове

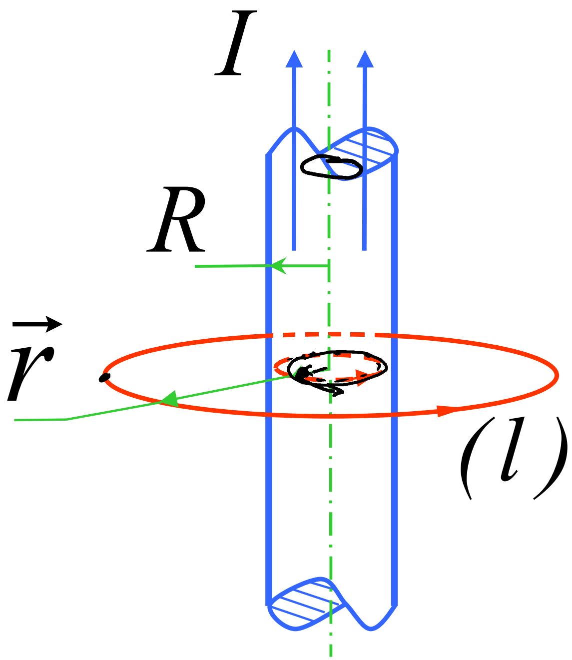
$$\oint_l d\vec{l} = 0$$

$$\oint_l \vec{B}d\vec{l} = \oint_l B_l dl = \oint_l B dl = B\oint_l dl = B\times 2\pi r$$

$$\oint_l \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 I$$

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

прямий порожнистий провідник



Симетрія: у рівновіддалених від осі точках поле однакове

$$\oint_l \vec{B}d\vec{l} = B\,2\pi r$$

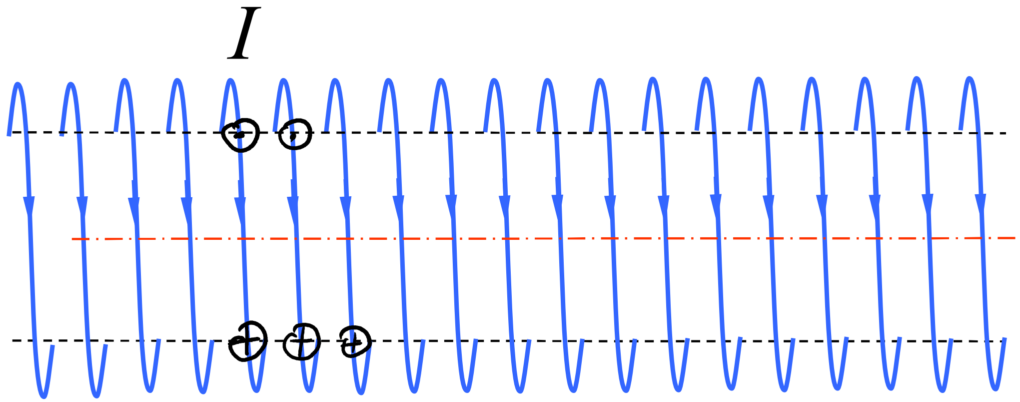
$r > R$

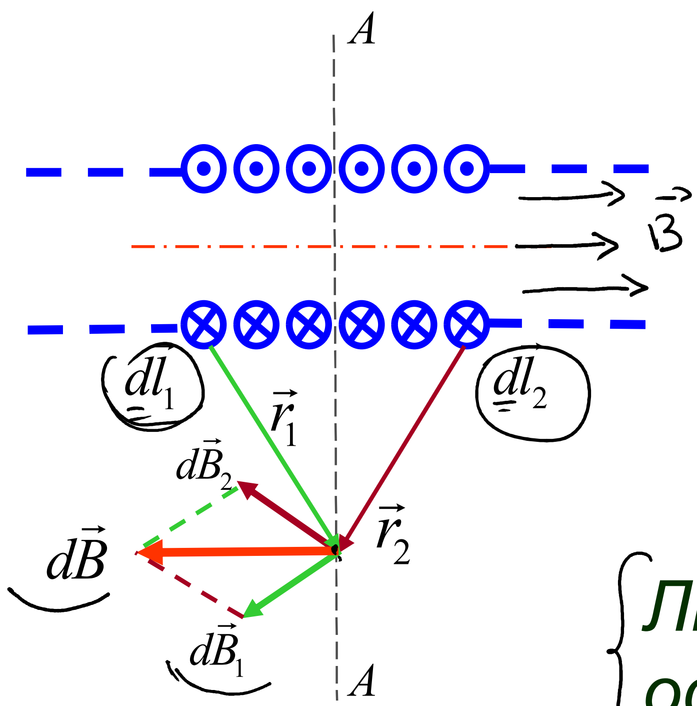
$$\oint_l \vec{B}d\vec{l} = \mu_0 I \qquad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

$r < R$

$$\oint_l \vec{B}d\vec{l} = 0 \qquad B = 0$$

соленоїд





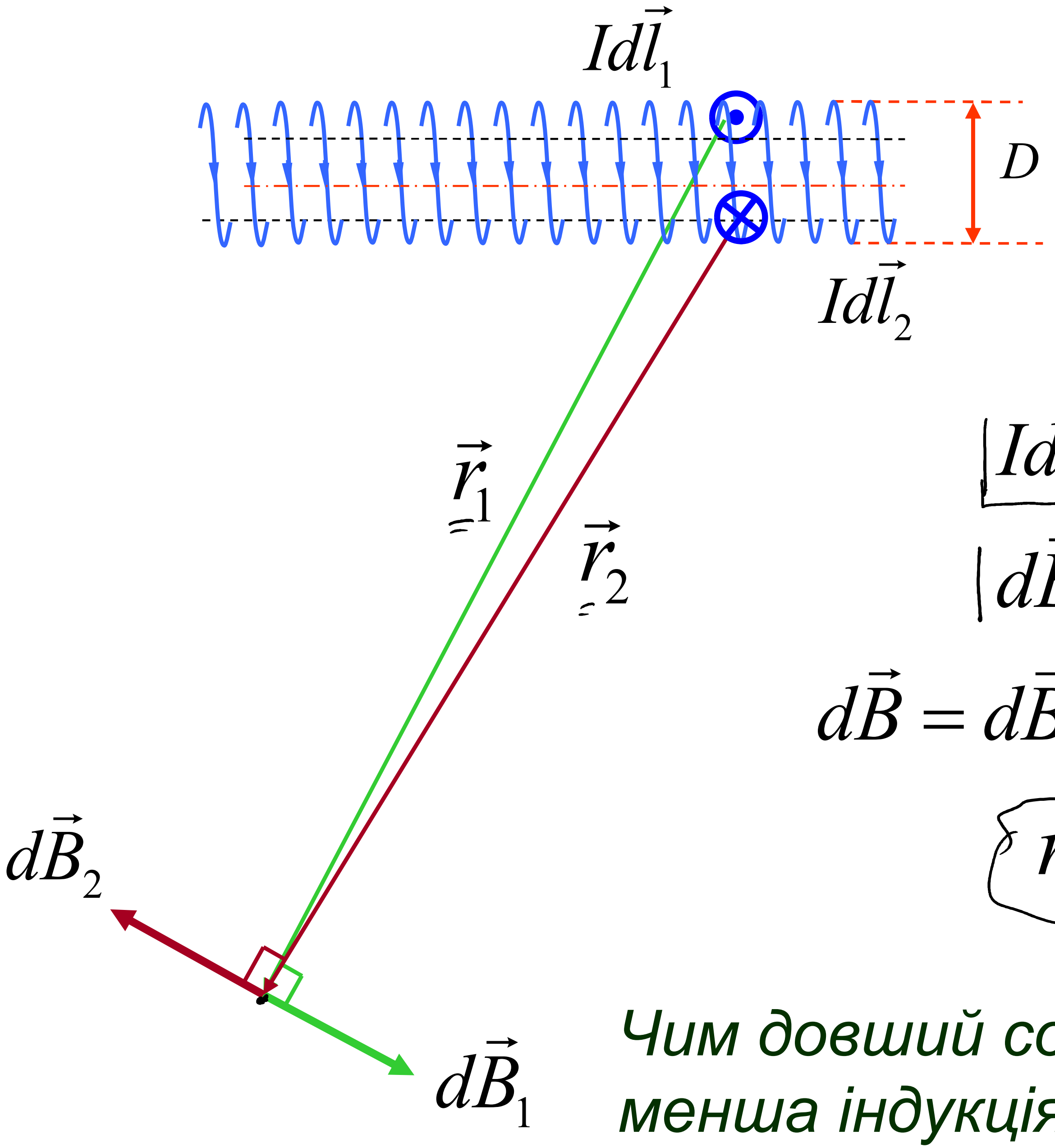
$$Id\vec{l}_1 = Id\vec{l}_2$$

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

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

Лінії індукції паралельні осі соленоїда

соленоїд



$$\underbrace{|Id\vec{l}_1|} = \underbrace{|Id\vec{l}_2|}$$

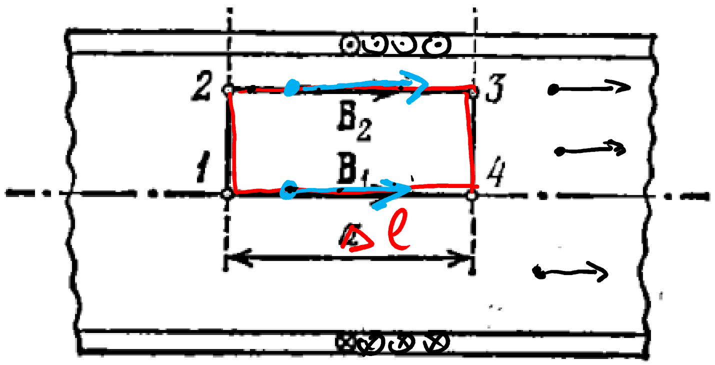
$$|d\vec{B}_1| \approx |d\vec{B}_2|$$

$$d\vec{B} = d\vec{B}_1 + d\vec{B}_2 = 0$$

$$r_1 \approx r_2 >> D$$

Чим довший соленоїд, тим менша індукція магнітного поля зовні

соленоїд



$\vec B \perp d\vec l$ $\qquad$ $\vec B \perp d\vec l$

$$\oint_{12341} \vec B d\vec l = \int_{12} \vec B d\vec l + \int_{23} \vec B d\vec l + \int_{34} \vec B d\vec l +$$

$\vec B \uparrow\uparrow d\vec l$

$$+ \int_{41} \vec B d\vec l = 0 + B_2 \Delta l + 0 + (-B_1)\Delta l =$$

$\vec B \uparrow\downarrow d\vec l$

$$= \Delta l \cdot (B_2 - B_1) = 0$$

$B_1 = B_2$

однорідне $\vec B = const$

$$\oint_{1'2'3'4'} \vec B d\vec l = B \cdot \Delta l = \mu_0 I_\Sigma$$

N – витків

l – довжина соленоїда

$$n = \frac{N}{l}$$

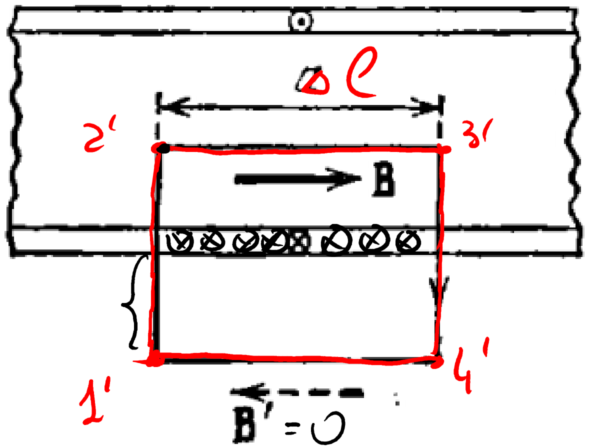
$$I_\Sigma = n \cdot \Delta l \cdot I = \frac{N}{l} \cdot \Delta l \cdot I$$

$$B \cancel{\Delta l} = \mu_0 \frac{N}{l} \cancel{\Delta l} I$$

$$\int_{1'2'} \vec B d\vec l = 0$$

$$\int_{3'4'} = 0$$

$$\int_{4'1'} = 0$$

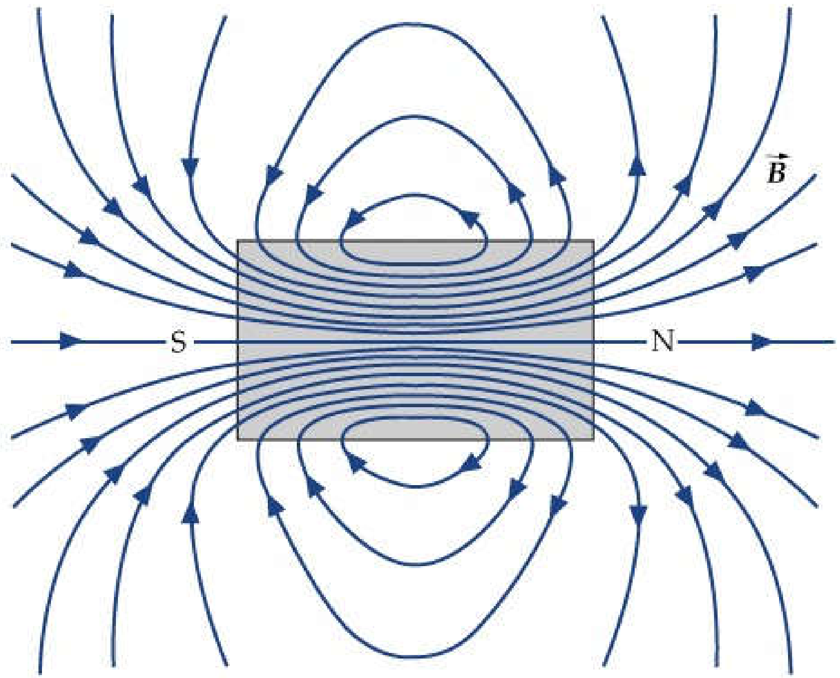


$$B = \mu_0 \frac{N}{l} \cdot I$$

для нескінченно довгого соленоїда:

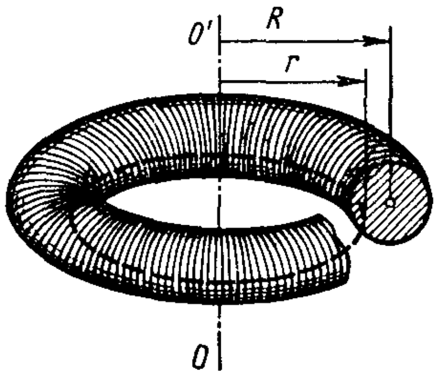
- ➢всередені магнітне поле однорідне
- ➢зовні магнітне поле відсутнє

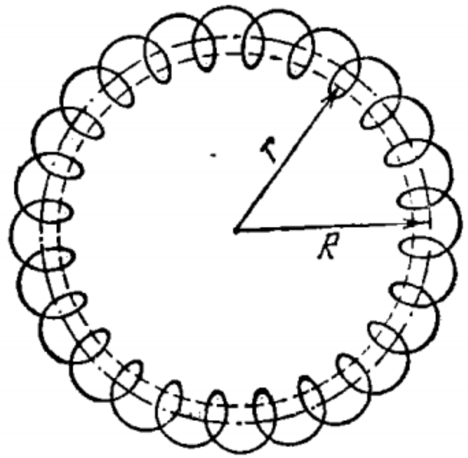
для реального соленоїда:

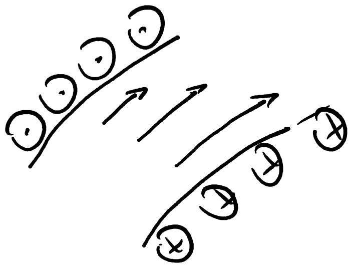


(a)

тороїд







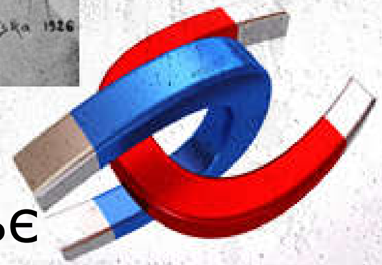
B - ?

Явище електромагнітної індукції. Закон електромагнітної індукції. Правило Ленца. Вихрове електричне поле

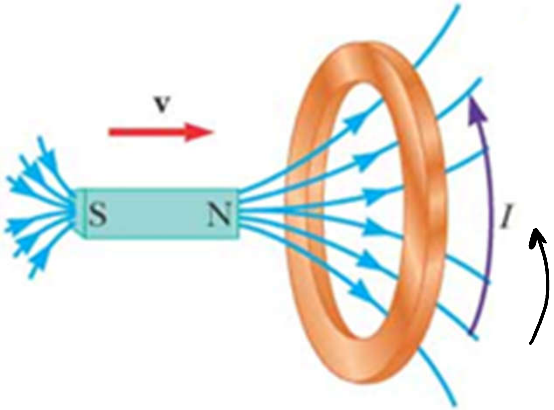
Майкл Фарадей

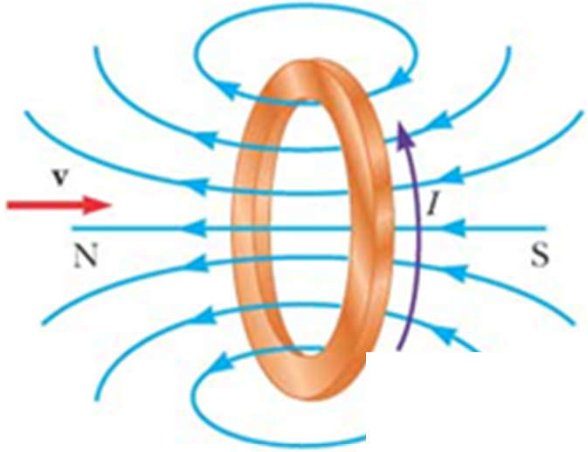
Еміль Ленц

Анрі Луї Ле Шательє

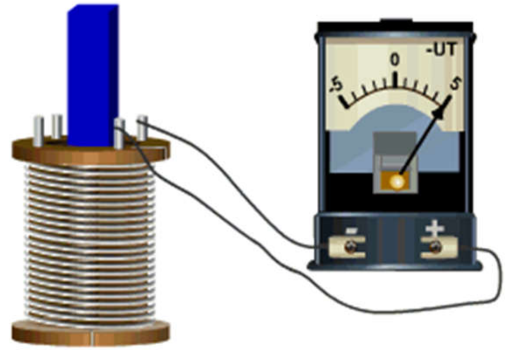


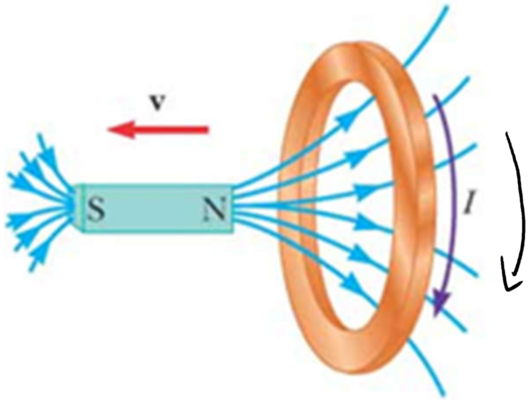
1831.

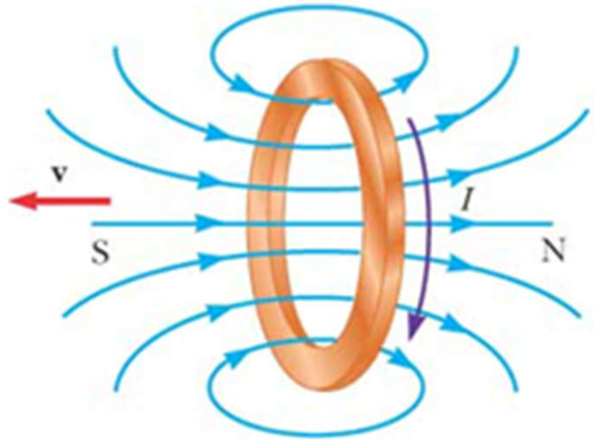




$$\boxed{\varepsilon_i = -\frac{d\Phi}{dt}}$$







Закон електромагнітної індукції

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

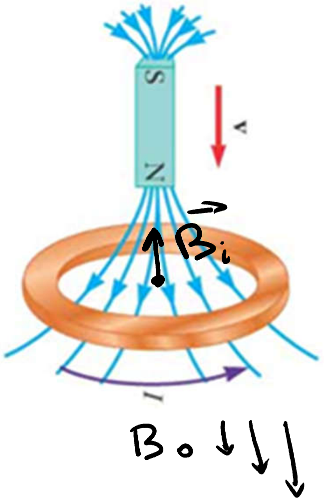
1) $B \neq const$
2) $S \neq const$
3) $\alpha \neq const$

$\bigcirc \Rightarrow \square$

$$[\Phi] = Вб = Тл \cdot м^2$$

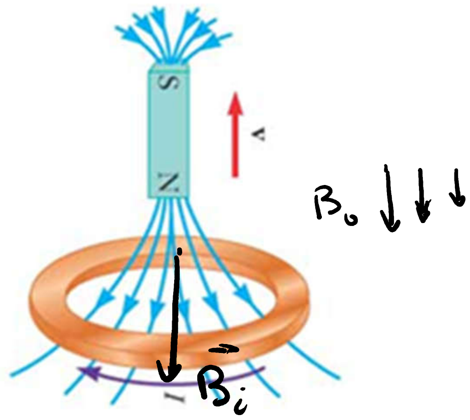
правило Ленця

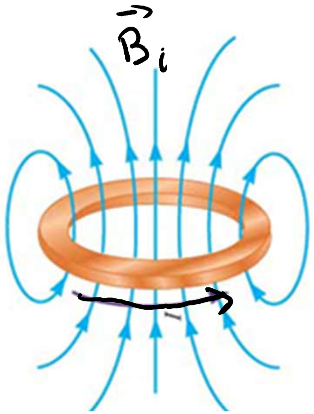
$$\varepsilon_i = - \frac{d\Phi}{dt}$$

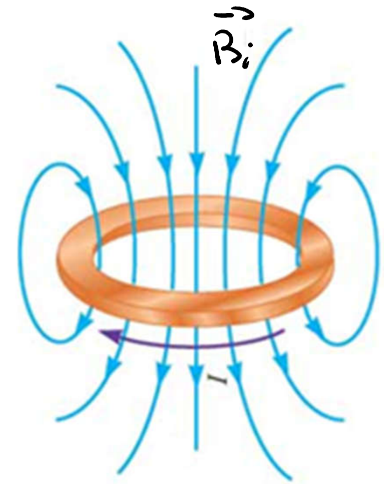


$B \neq const \qquad S = const$

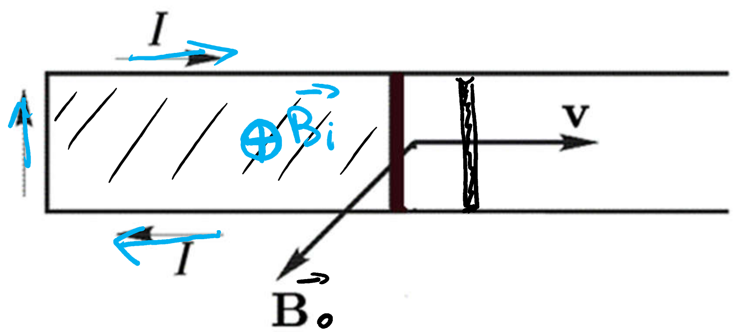
$$\varepsilon_{інд} = - \frac{d(B \cdot S)}{dt} = - S \cdot \frac{dB}{dt}$$

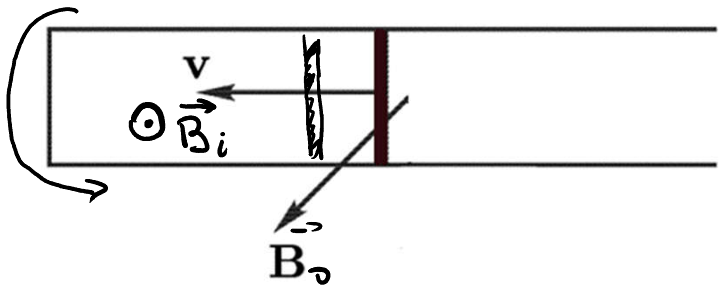




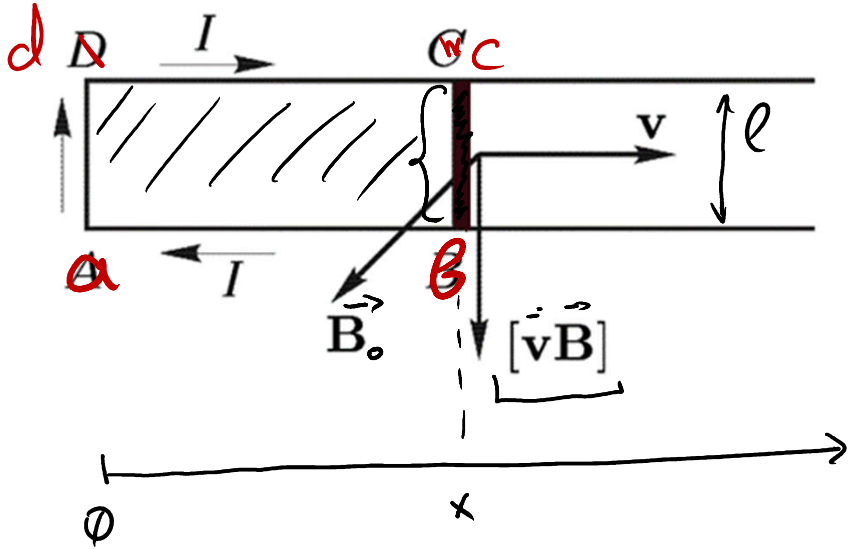


правило Ленця, вихрове поле





$$\mathcal{E}_i = -\frac{d(B\cdot S)}{dt} = -B\frac{dS}{dt}$$



$$\vec F_л = -e[\vec \upsilon, \vec B] = \vec F_{стор}$$

$$\vec E_{стор} = \frac{\vec F_{стор}}{-e} = [\vec \upsilon, \vec B]$$

$$\mathcal{E}_{інд} = \oint_{aBcd} \vec E_{стор}\, d\vec l = -\upsilon \cdot B \cdot l$$

$$\upsilon = \frac{dx}{dt} \qquad S = l\cdot x \qquad \upsilon l = \frac{dx}{dt}\cdot l = \frac{d(l\cdot x)}{dt} = \frac{dS}{dt}$$

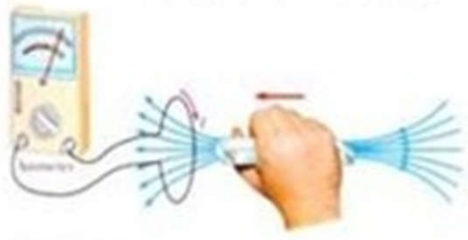
$$\mathcal{E}_{інд} = -B\frac{dS}{dt} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

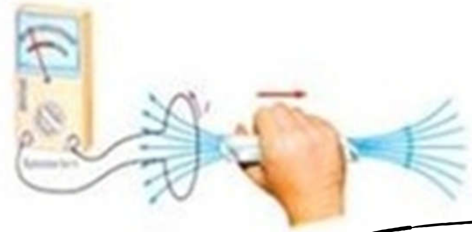
вихрове поле

$q\vec{E}$ $\quad$ $q[\vec{v},\vec{B}]$

↑

змінне магн. поле => поява електр. поля.





$$\mathcal{E}_{ind} = \oint_L \vec{E}_{стор} d\vec{l} \qquad \Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}$$

$$\oint_L \vec{E}_{стор} d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\int \vec{B} d\vec{S} = \int_S (\mathrm{rot}\,\vec{E}_{стор})\, d\vec{S}$$

$$\| \quad -\int \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} dS$$

$$\boxed{\mathrm{rot}\,\vec{E}_{стор} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}}$$

$$\mathrm{rot}\,\vec{E}_{ел} = 0$$

Ел. поле ↗ потенціальне

↘ вихрове.

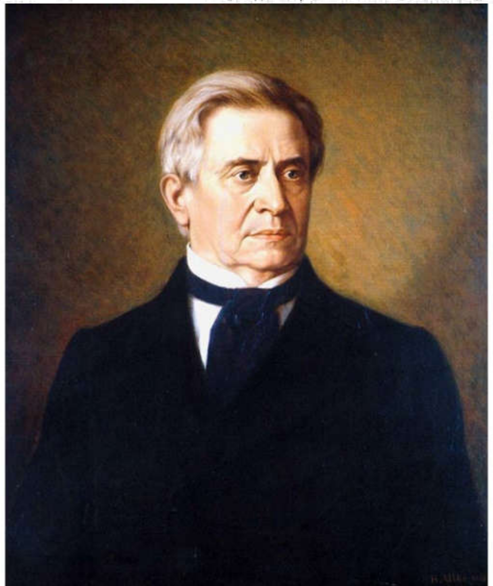
$$\vec{E} = \vec{E}_q + \vec{E}_{вихр.}$$

$$\mathrm{rot}\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

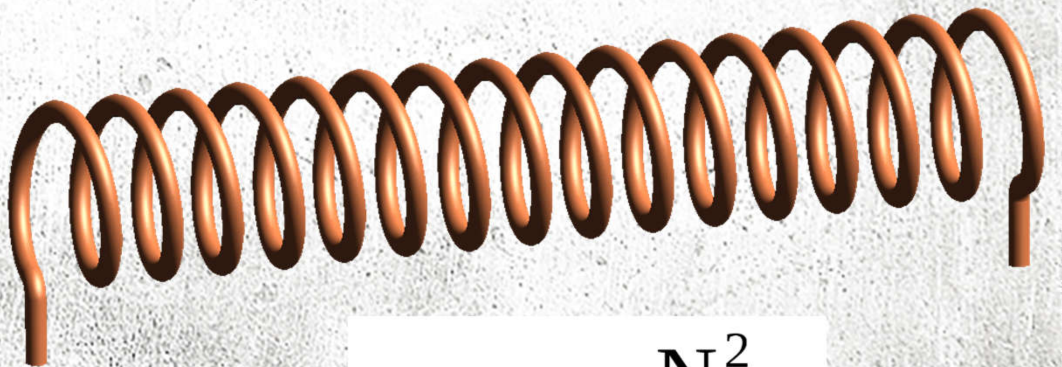
вихрові струми (струми Фуко)

$\vec{j}_{вихр} = \sigma \vec{E}_{вихр}$

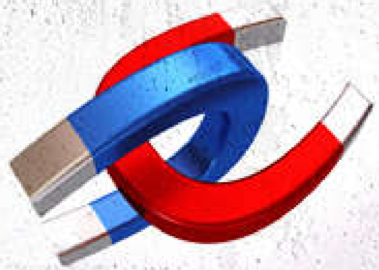
Індуктивність контуру зі струмом. Індуктивність соленоїда. Явище самоіндукції. Е.р.с. самоіндукції.

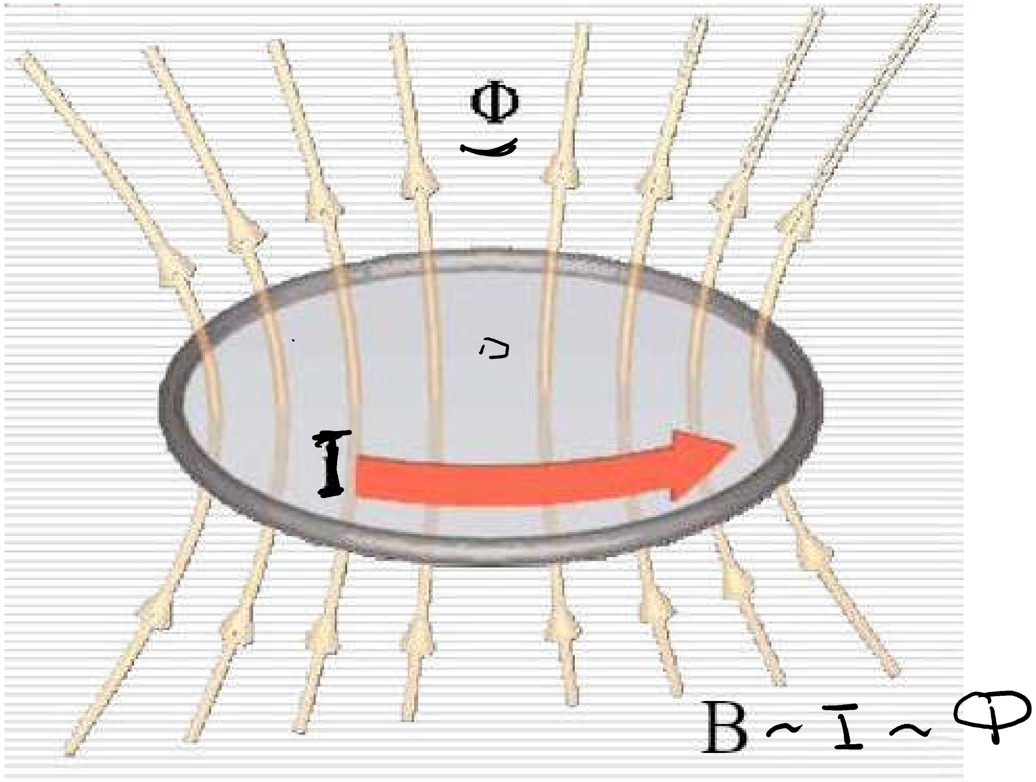


Джозеф Генрі



$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S$$





індуктивність: $$L = \frac{\Phi}{I}$$

$[L] = Гн$ (генрі)

$$1\,Гн = \frac{1\,Вб}{1\,А}$$

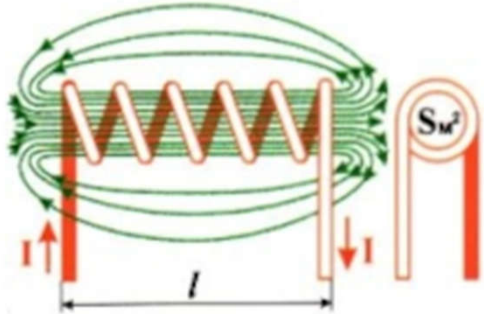
L

геометрія контуру

середовище (μ)

індуктивність соленоїда

$$B = \mu\mu_0 \frac{N}{l} I$$



$$\Phi_0 = BS = \mu\mu_0 \frac{N}{l} IS$$

потокосцепление

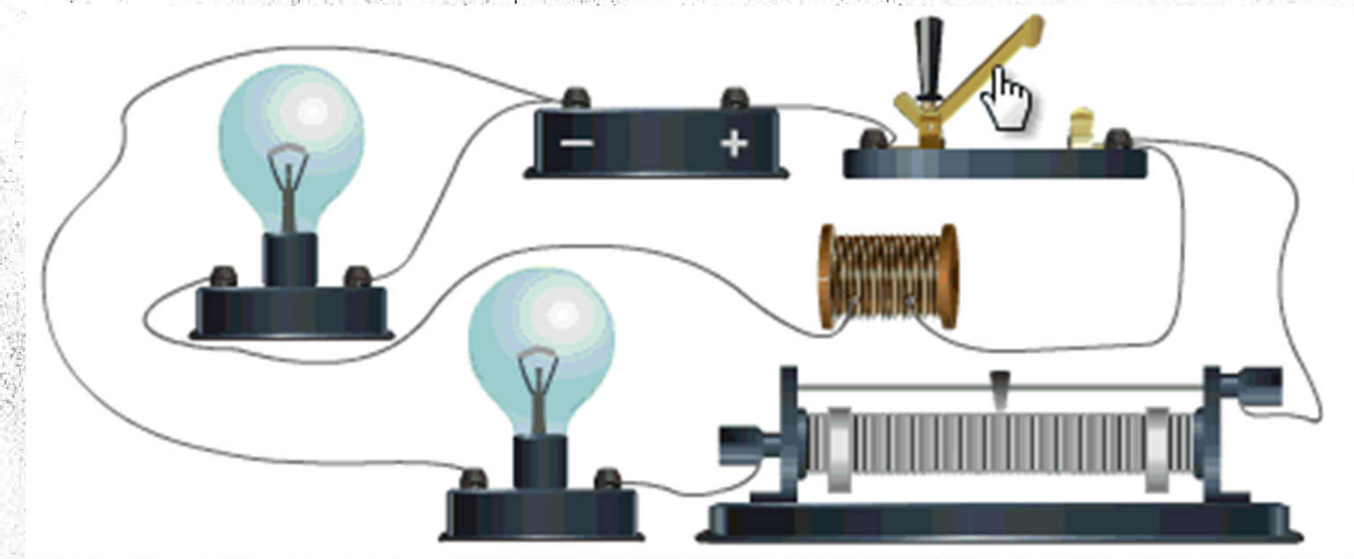
$$\Phi = N\Phi_0 = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S\, I$$

$$L = \mu\mu_0 \frac{N^2}{l} S$$

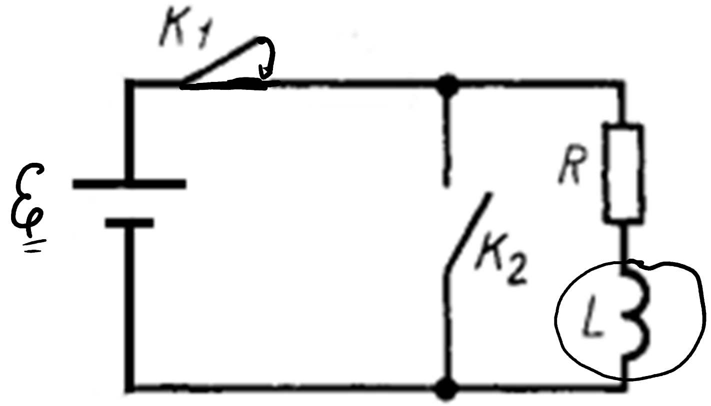
явище самоіндукції

$$\boxed{\mathcal{E}_{c.i.} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(L \cdot I) = -L\frac{dI}{dt}}$$

Процеси встановлення струму при розмиканні та замиканні кола з індуктивністю.



замикання кола



$$\underbrace{IR} = \xi + \xi_{c.i.}$$

$$IR = \xi - L\frac{dI}{dt}$$

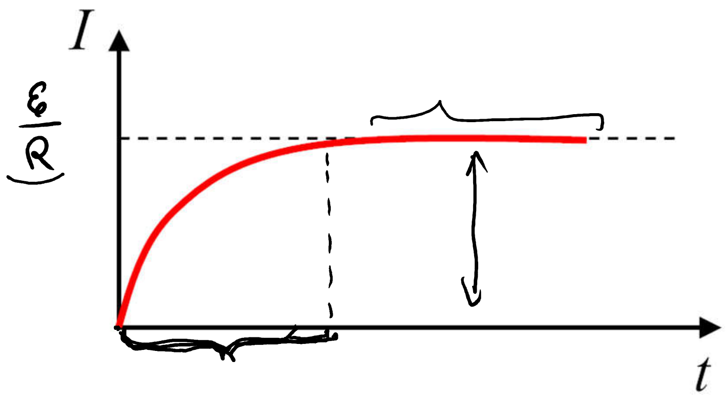
нова змінна $\quad x = IR - \xi \qquad I = \dfrac{x+\xi}{R} \qquad dI = \dfrac{dx}{R}$

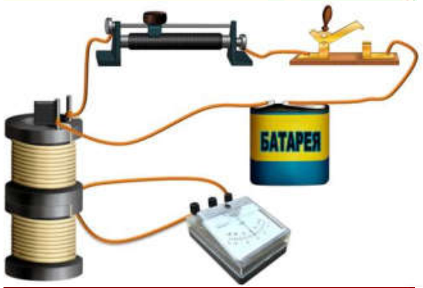
$$x = -\frac{L}{R}\frac{dx}{dt} \qquad \int\frac{dx}{x} = \int -\frac{R}{L}dt \qquad \ln x = -\frac{R}{L}t + C$$

$$t = 0 \quad I = 0 \quad x = -\xi \quad \ln(-\xi) = C$$

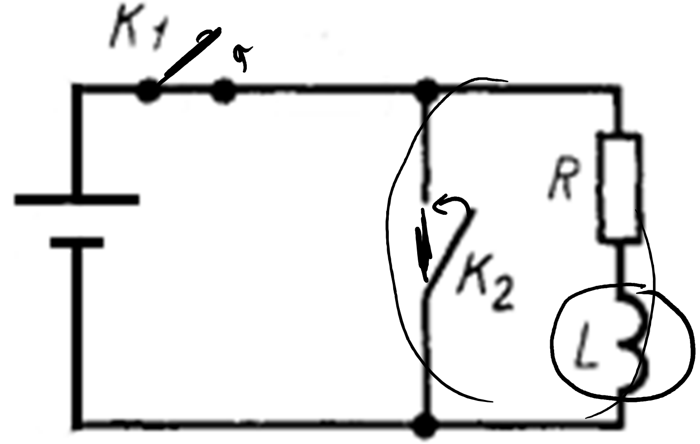
$$\ln\frac{IR-\xi}{-\xi} = -\frac{R}{L}t$$

$$I(t) = \frac{\xi}{R}\left[1 - \exp\left(-\frac{R}{L}t\right)\right]$$





розмикання кола



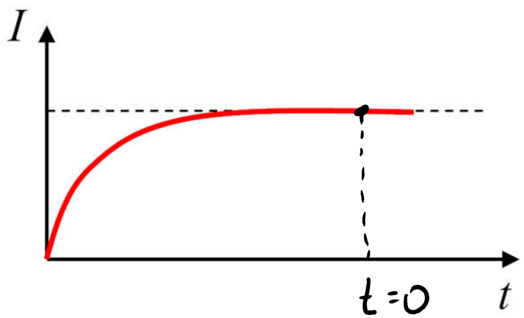
$$IR = \xi_{c.i.} = -L\frac{dI}{dt}$$

$$\int\frac{dI}{I} = \int -\frac{R}{L}dt \qquad \ln I = -\frac{R}{L}t + C^*$$

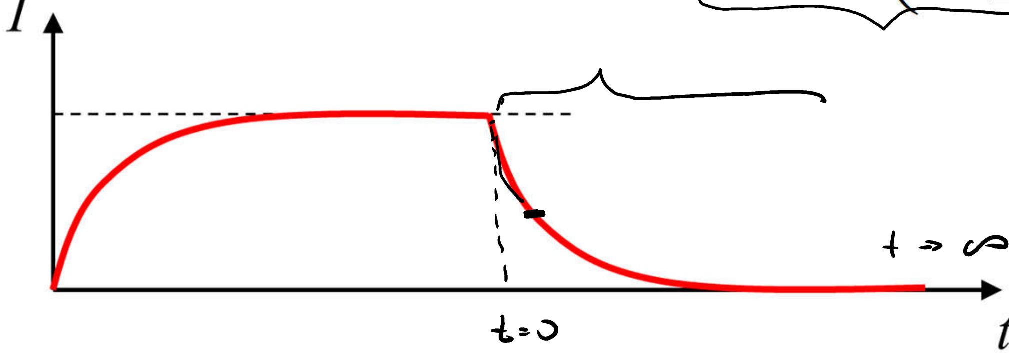
$$t = 0 \qquad I = I_0 = \frac{\xi}{R}$$

$$C^* = \ln I_0$$

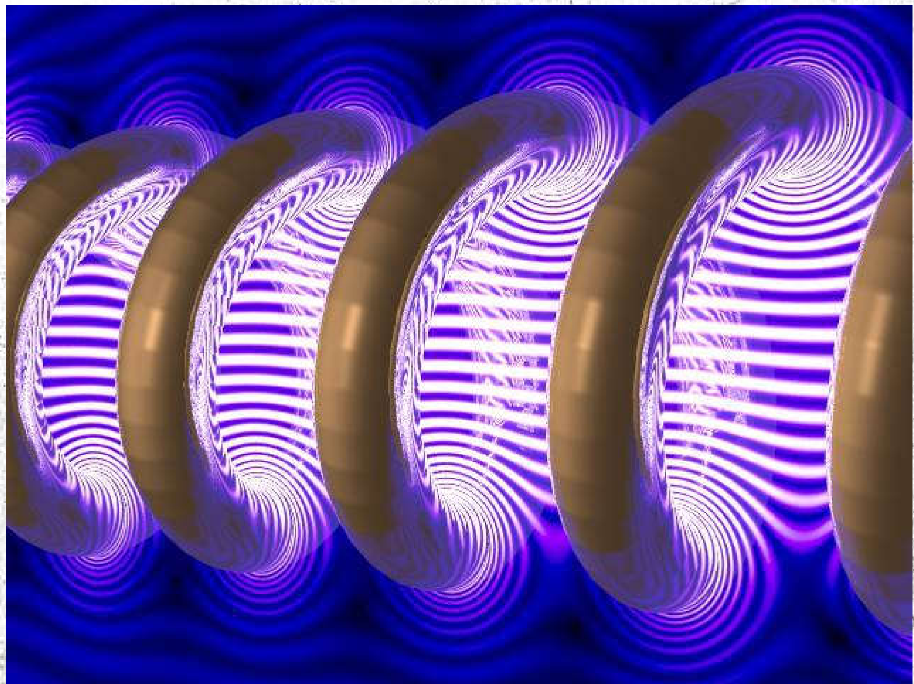
$\frac{\varepsilon}{R} = I_0$



$$\ln I = -\frac{R}{L}t + \ln I_0 \qquad I(t) = I_0\exp\left(-\frac{R}{L}t\right)$$



Енергія магнітного поля. Густина енергії магнітного поля.

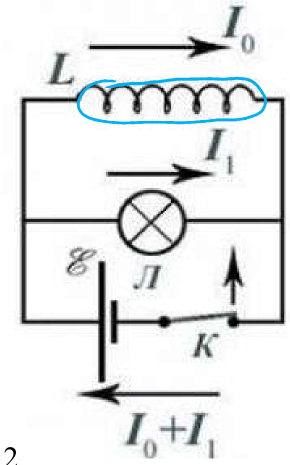


$$W = \frac{1}{2} L I^2$$

$$\xi = \frac{A_{стор}}{q}$$

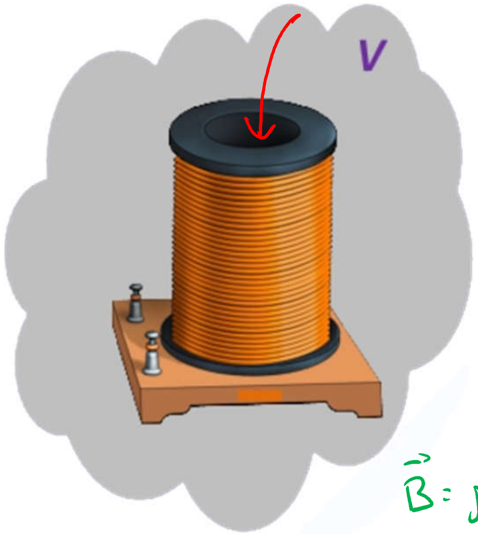
$$\frac{dI}{dt}dt = dI$$

$$\delta A_{стор} = dq \cdot \xi_{c.i.} = I\,dt \cdot \left(-L\frac{dI}{dt}\right) = -L\,I\,dI$$



$$A_{стор} = \int \delta A_{стор} = -\int_{I_0}^{0} LIdI = -\frac{1}{2}LI^2\Big|_{I_0}^{0} = \frac{1}{2}LI_0^2$$

$$\boxed{W_{маг} = \frac{1}{2}LI_0^2}$$



$$L = \mu\mu_0\frac{N^2}{l}S \qquad B = \mu\mu_0\frac{N}{l}I_0$$

$$I_0 = Bl/\mu\mu_0 N$$

$$S \cdot l$$

$$W_{маг} = \frac{1}{2}\mu\mu_0\frac{\cancel{N^2}}{l}S\cdot\left(\frac{Bl}{\mu\mu_0\cancel{N}}\right)^2 = \frac{1}{2}\frac{B^2}{\mu\mu_0}V$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$$

густина енергії:

$$\varpi_{маг} = \frac{W_{маг}}{V} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2} = \frac{\vec{B}\vec{H}}{2}$$

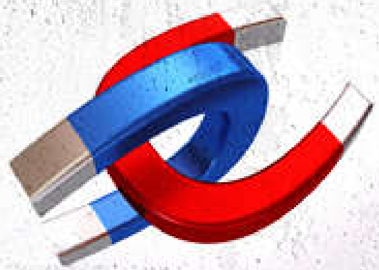
$$\omega_{ел} = \frac{1}{2}\vec{D}\cdot\vec{E}$$

Метод комплексних амплітуд та його застосування до розрахунку кіл змінного струму.

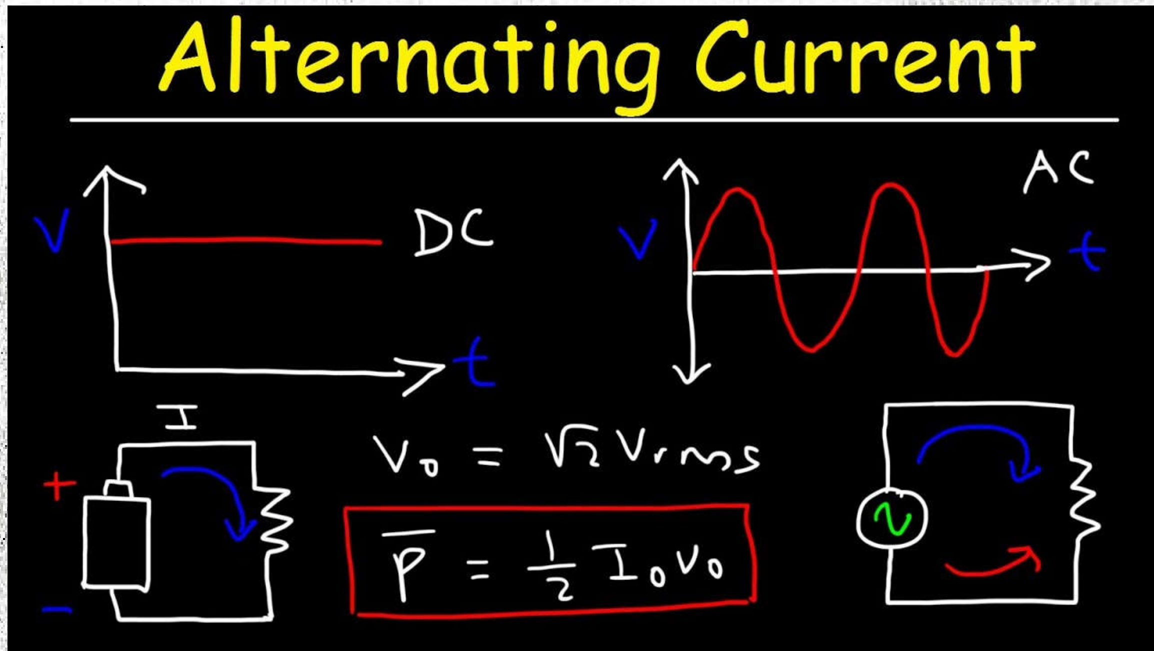
$e^{ix} = \cos\alpha + i\sin\alpha,$

$\boxed{\underline{Z}_R = R;}$ $\boxed{\underline{Z}_L = j\omega L = jX_L;}$ $\boxed{\underline{Z}_C = \dfrac{1}{j\omega C} = -j\dfrac{1}{\omega C} = -jX_C}$

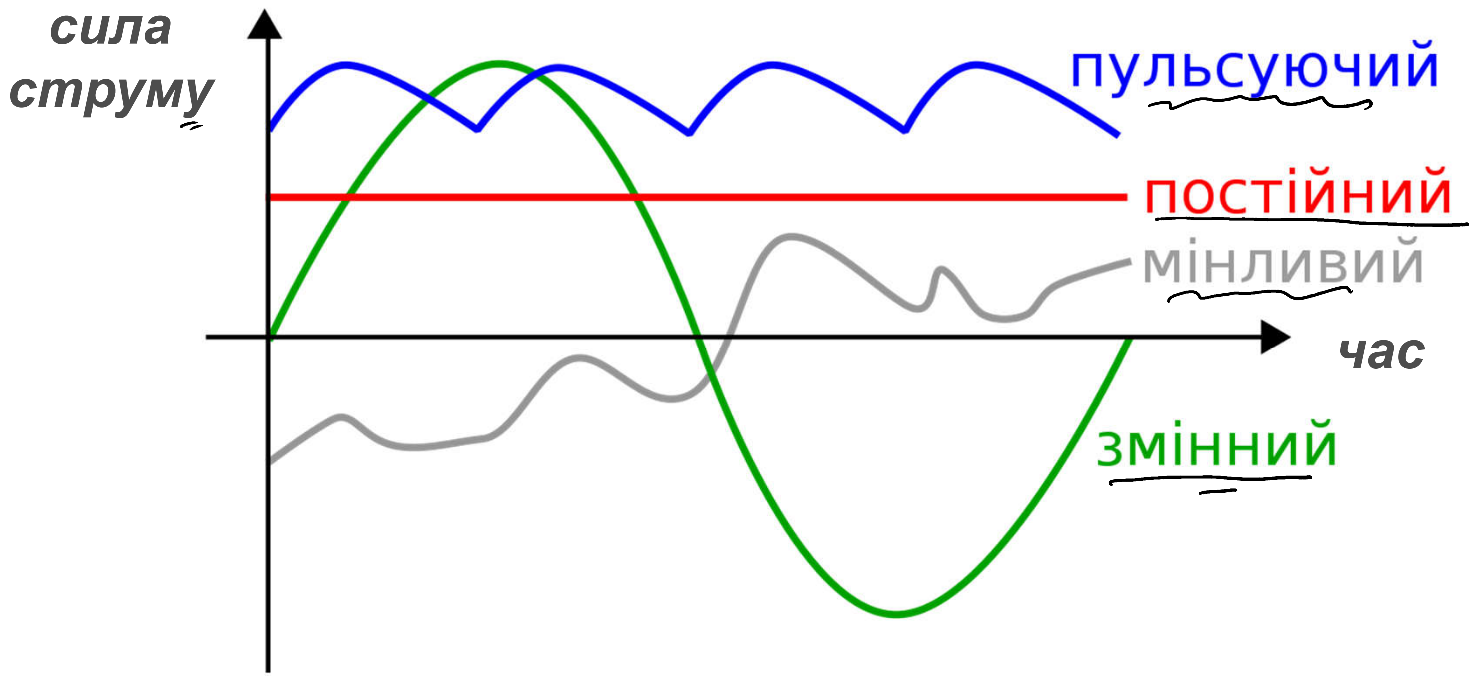
- **Самостійна робота**



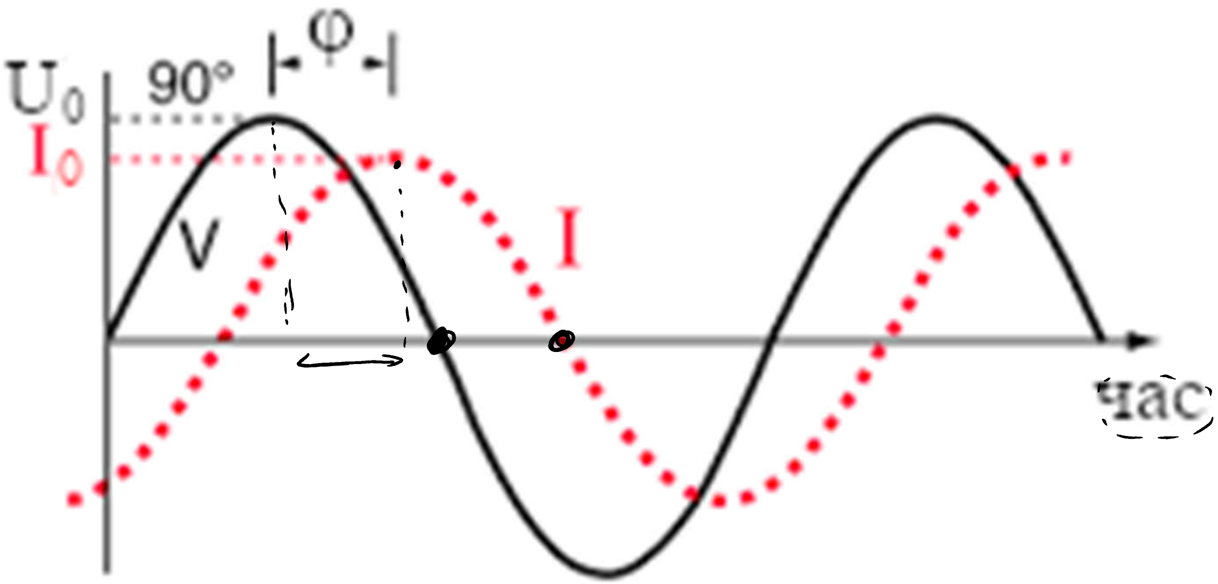
Робота та потужність змінного струму. Ефективні значення сили та напруги змінного струму. Коефіцієнт потужності



https://youtu.be/Ut3sPLy9_dk



$$I(t) = I_0 \sin(\omega t) \qquad I(t) = I_0 \cos(\omega t)$$



зсув фаз.

$$U(t) = U_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

потужність постійного струму

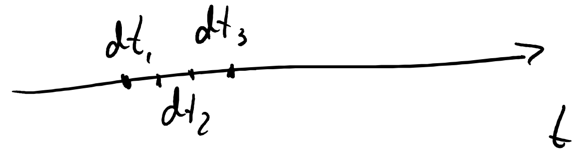
$$P = I \cdot U$$

миттєва потужність

$$P(t) = I(t) \cdot U(t)$$

робота

$$\delta A = P(t)\,dt = I(t)\cdot U(t)\,dt$$



середня потужність за період коливань

$$< P > = \frac{A_T}{T} = \frac{1}{T}\int_0^T \delta A = \frac{1}{T}\int_0^T I(t)\cdot U(t)\,dt$$

$T = \frac{1}{\nu}$; $\omega = 2\pi\nu$

$$I(t)\cdot U(t) = I_0\cos(\omega t)\cdot U_0\cos(\omega t+\varphi) =$$

$$\cos(\alpha\pm\beta) = \cos\alpha\,\cos\beta \mp \sin\alpha\,\sin\beta =$$

$$= \cos\alpha\,\cos\beta + \sin\beta\,\cos\left(\alpha\pm\frac{\pi}{2}\right)$$

$$U_0\cos(\omega t+\varphi) = \underbrace{U_0\cos(\omega t)\cos(\varphi)}_{U^a(t)} + \underbrace{U_0\sin(\varphi)\cos(\omega t\pm\pi/2)}_{U^p(t)} =$$

$$= U^a(t) + U^p(t)$$

$$= \overbrace{I_0\cdot U_0\cos^2(\omega t)\cos(\varphi)} +$$

$$+ \underbrace{I_0\cdot U_0\cos(\omega t)\cos(\omega t\pm\pi/2)\sin(\varphi)}$$

$$A_T^a = \int_0^T I_0 \cdot U_0 \cos^2(\omega t)\cos(\varphi)\,dt = I_0 \cdot U_0 \cos(\varphi)\int_0^T \cos^2(\omega t)\,dt$$

$$\cos^2\alpha = \frac{1}{2}(\cos 2\alpha + 1)$$

$$A_T^a = \frac{1}{2} I_0 \cdot U_0 \cos(\varphi)\int_0^T \left[1 + \cos(2\omega t)\right]dt = \frac{1}{2} I_0 \cdot U_0 \cos(\varphi) \cdot t\,\Big|_0^T +$$

$$+ \frac{1}{2} I_0 \cdot U_0 \cos(\varphi)\frac{1}{2\omega}\sin(2\omega t)\,\Big|_0^T = 0$$

$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$A_T^a = \frac{1}{2} I_0 \cdot U_0 \cdot T \cos(\varphi)$$

$$A_T^p = \int_0^T I_0 \cdot U_0 \cos(\omega t)\cos(\omega t \pm \pi/2)\sin(\varphi)\,dt =$$

$$= \mp I_0 \cdot U_0 \sin(\varphi)\int_0^T \cos(\omega t)\sin(\omega t)\,dt$$

$$\cos\alpha \sin\alpha = \frac{1}{2}\sin 2\alpha$$

$$-\frac{1}{2\omega}\cos(2\omega t)$$

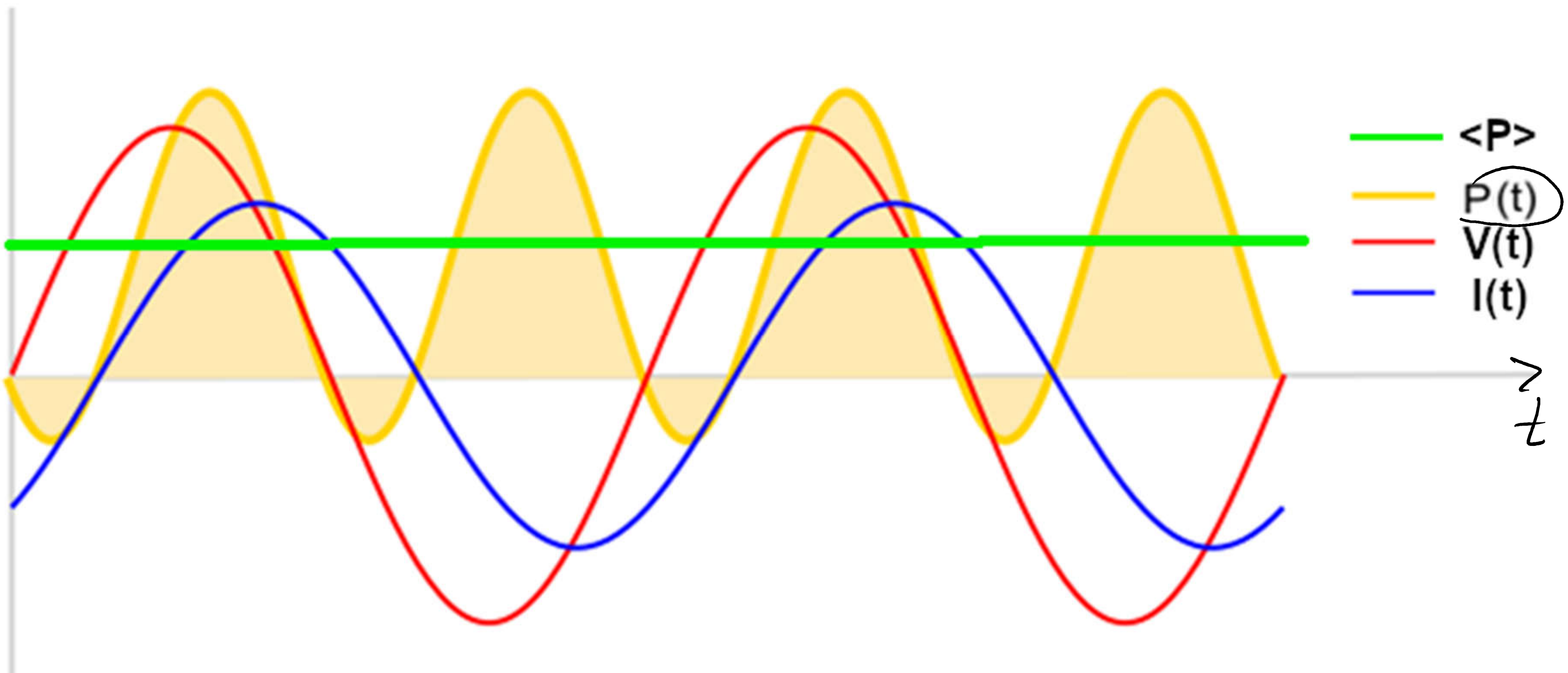
$$A_T^p = \mp\frac{1}{2} I_0 \cdot U_0 \sin(\varphi)\int_0^T \sin(2\omega t)\,dt =$$

$$\pm\frac{1}{2} I_0 \cdot U_0 \cos(\varphi)\frac{1}{2\omega}\cos(2\omega t)\Big|_0^T = 0$$

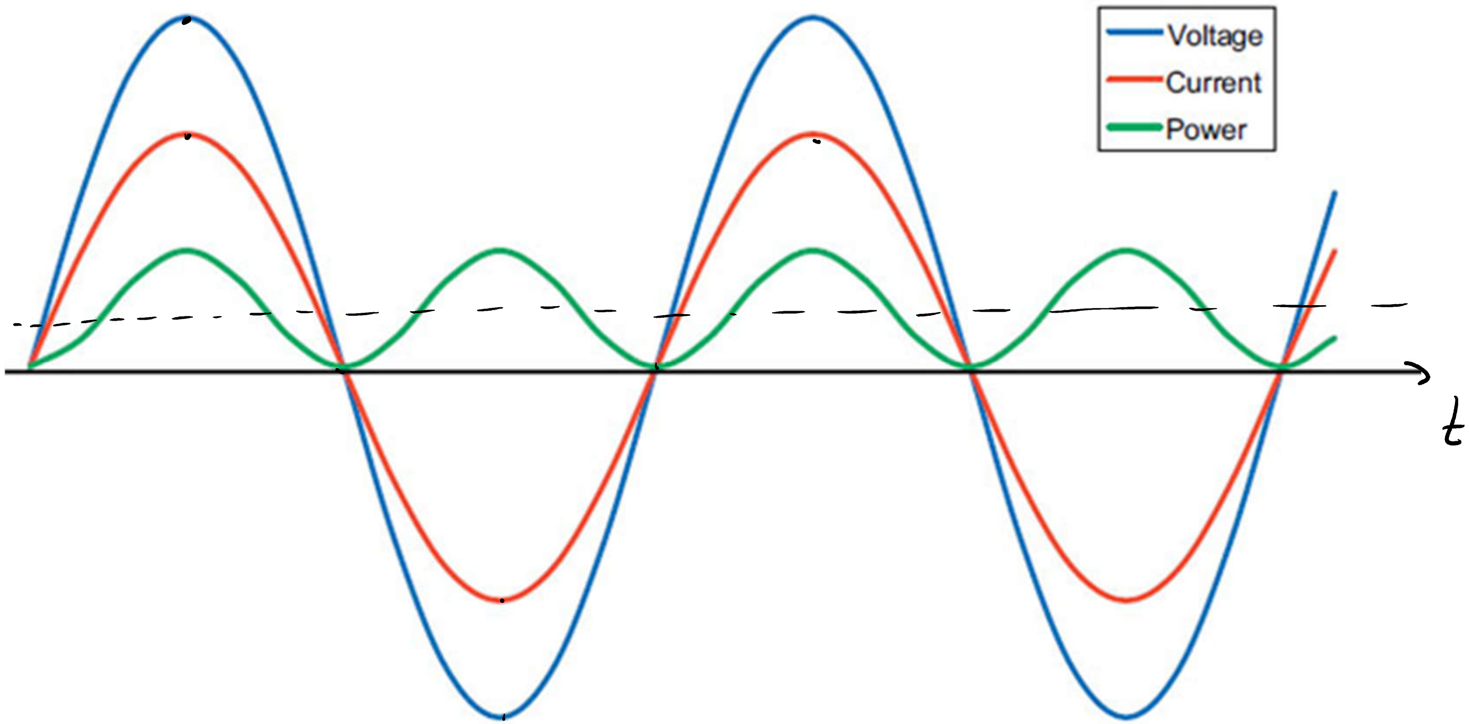
$$A_T = A_T^a + A_T^p = \frac{1}{2} I_0 \cdot U_0 \cdot T \cos(\varphi)$$

$$\boxed{\langle P \rangle = \frac{1}{2} I_0 \cdot U_0 \cdot \cos\varphi}$$

$\cos\varphi$ *- коефіцієнт потужності*



$\varphi = 0$

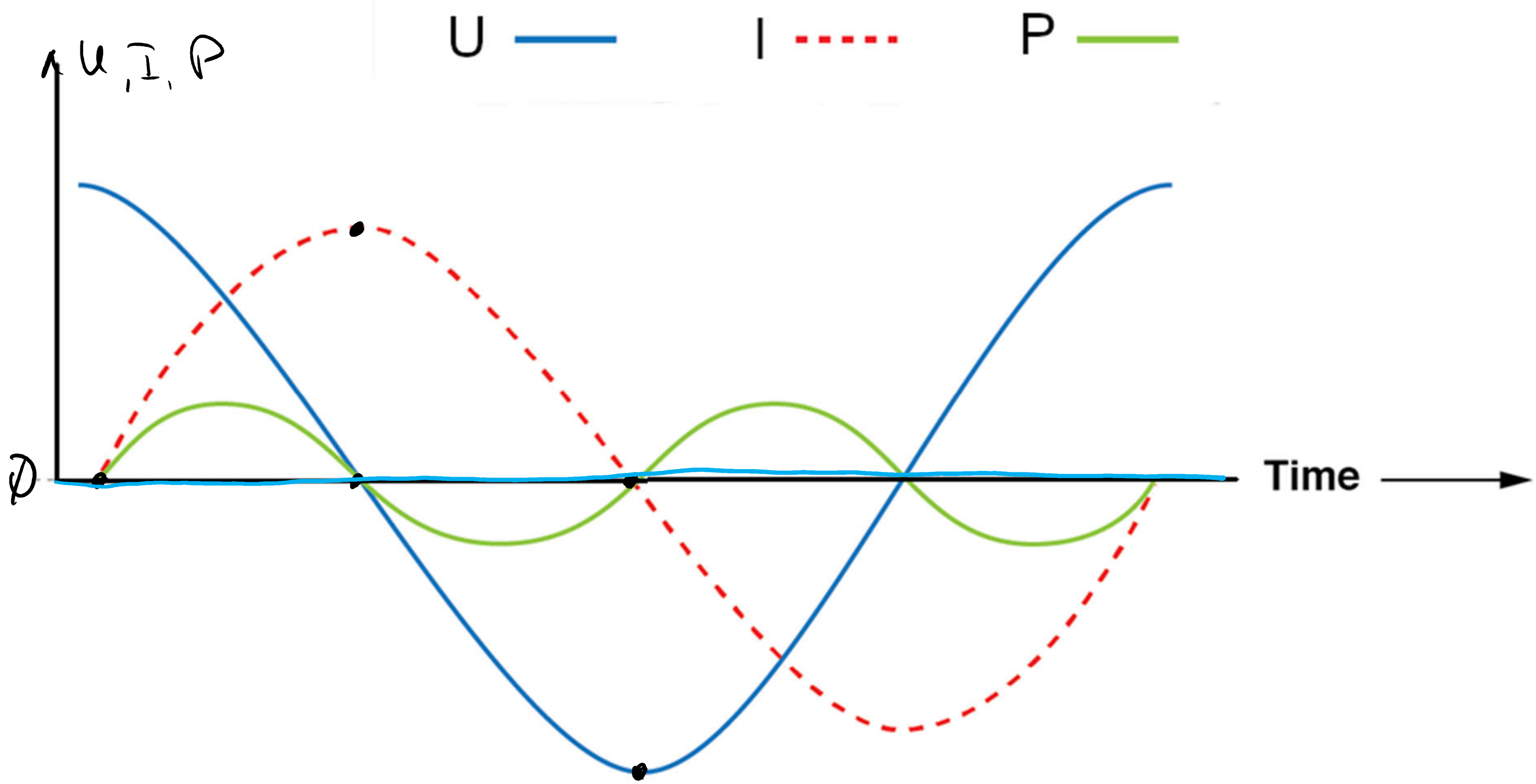


$$<P> = \frac{1}{2} I_0 \cdot U_0 = \frac{I_0}{\sqrt{2}} \cdot \frac{U_0}{\sqrt{2}} = I_{еф} \cdot U_{еф}$$

побутова мережа

$$U_0 = 311\ B \qquad U_{еф} = 220\ B$$

$$\varphi = \pm \frac{\pi}{2}$$

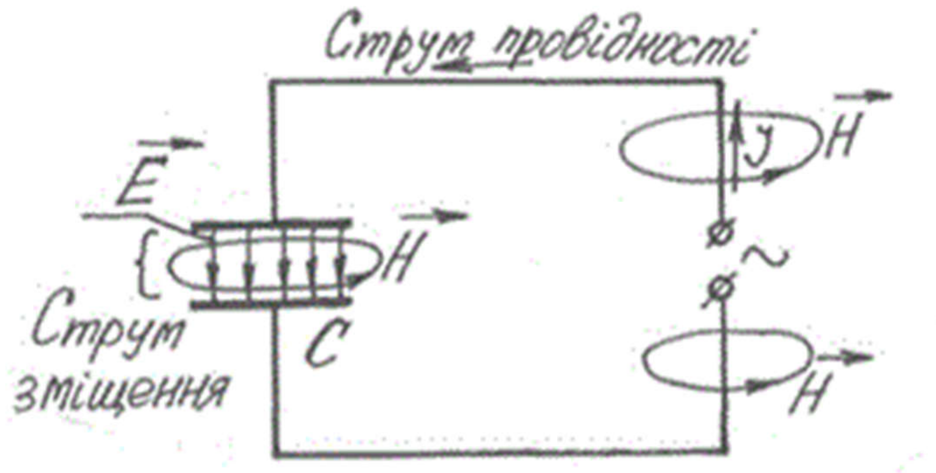


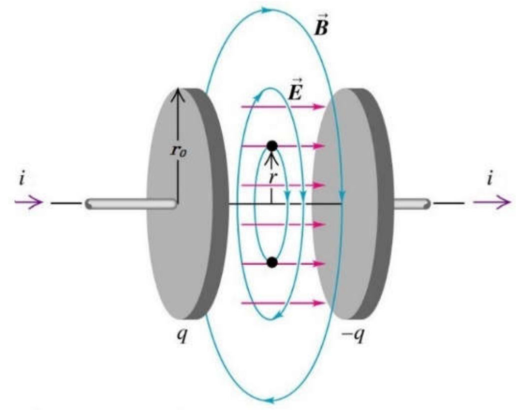
$$< P > = 0$$

Струм зміщення. Система рівнянь Максвелла та їх фізичний зміст.

Джеймс Клерк Максвелл

струм зміщення





$$I = \dot{q} = \frac{dq}{dt}$$

поверхнева густ. заряду

$$j_{np} = \frac{I}{S} = \frac{1}{S}\frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}\left(\frac{q}{S}\right) = \frac{d}{dt}(\sigma) = \dot{\sigma}$$

$$j_{зм} = \dot{\sigma}$$

$$\mathrm{E} = \frac{\sigma}{\varepsilon\varepsilon_0} \qquad D = \varepsilon\varepsilon_0 E = \sigma$$

$$\boxed{j_{зм} = \frac{\partial D}{\partial t}}$$

$$\vec{j}_{зм} = \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad \vec{j}_{повн} = \vec{j}_{пр} + \vec{j}_{зм}$$

$$\oint_L \vec{B}\,\vec{dl} = \mu_0 I = \mu_0 \int_S \vec{j}\,\vec{dS} \qquad \oint_L \vec{H}\,\vec{dl} = \int_S \vec{j}\,\vec{dS}$$

$$\oint_L \vec{H}\,\vec{dl} = \int_S \left(\vec{j}_{пр} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) \vec{dS}$$

$$\int_S rot\,\vec{H}\,\vec{dS} = \int_S \vec{j}_{пр}\,\vec{dS} + \int_S \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\,\vec{dS}$$

$$rot\,\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

Система рівнянь Максвелла

$\vec{E} = (E_x, E_y, E_z)$ $x^2 + y^2 = 25$

16 невідомих
8 рівнянь
+9 = 17
$div\,\vec{D} = \vec{\nabla} \cdot \vec{D}$

$$\oint_L \vec{E}\,d\vec{l} = -\oint_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\,d\vec{S} \qquad\qquad rot\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \;\; -3$$

$$\oint_L \vec{H}\,d\vec{l} = \oint_S \left(\vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) d\vec{S} \qquad\qquad rot\,\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \;\; -3$$

$$\oint_S \vec{D}\,d\vec{S} = \int_V \rho(V)\,dV \qquad\qquad div\,\vec{D} = \rho(V) \;\; -1$$

$$\oint_S \vec{B}\,d\vec{S} = 0 \qquad\qquad div\,\vec{B} = 0 \;\; -1$$

польові

матеріальні

питома провідність

$$\vec{\mathbf{B}} = \mu_0 \mu \vec{\mathbf{H}}, \;\; -3 \qquad \vec{\mathbf{D}} = \varepsilon_0 \varepsilon \vec{\mathbf{E}}, \;\; -3 \qquad \vec{\mathbf{j}} = \sigma \vec{\mathbf{E}} \;\; -3$$

з-н Ома

Система рівнянь Максвелла, властивості

$$rot\,\vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \qquad rot\,\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad div\,\vec{D} = \rho \qquad div\,\vec{B} = 0$$

- в стаціонарному випадку розбивається на дві незалежні групи

$$\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} = 0 \qquad \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$$

$$rot\,\vec{H} = \vec{j} \qquad div\,\vec{B} = 0$$

$$rot\,\vec{E} = 0 \qquad div\,\vec{D} = \rho$$

- лінійні <=> принцип суперпозиції

- релятивістсько-інваріантні

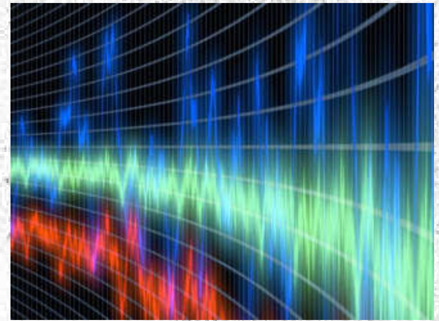
- містять рівняння неперервності

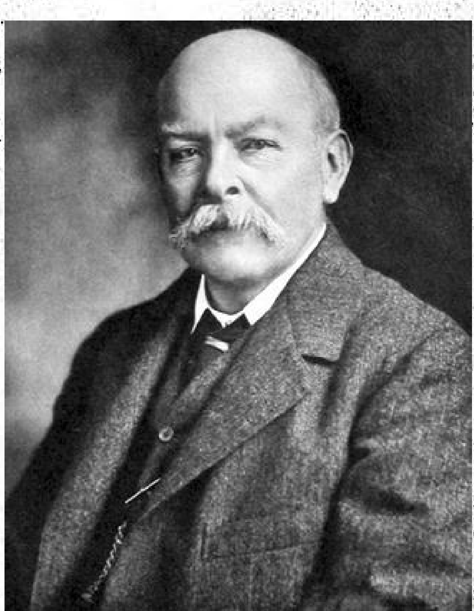
$$\vec{\nabla}\ (\vec{\nabla}\times\vec{H}) \perp \vec{\nabla}$$

$$rot\,\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \qquad div\;rot = 0 \qquad div\,\vec{j} + div\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} = 0$$

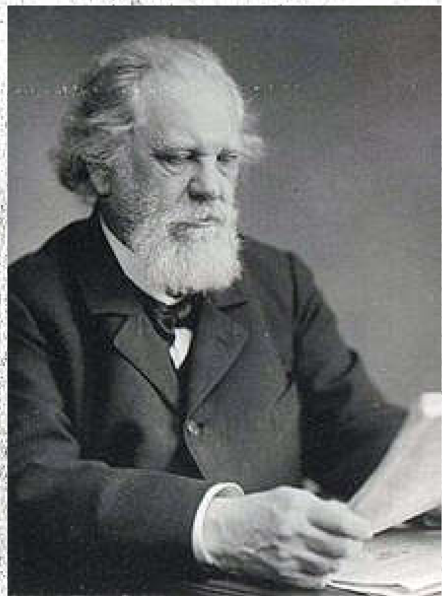
$$div\,\vec{j} = -\frac{\partial}{\partial t}div\vec{D} = -\frac{\partial \rho}{\partial t} \qquad \boxed{div\,\vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0}$$

Електромагнітні хвилі. Властивості плоских електромагнітних хвиль. Абсолютний показник заломлення світла.

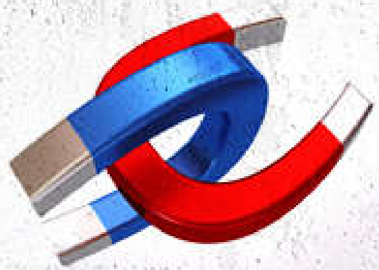




Джон Генрі Пойтінг



Микола Олексійович Умов



$$rot\vec{E} = -\frac{\partial\vec{B}}{\partial t} \qquad rot\vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial\vec{D}}{\partial t} \qquad div\,\vec{D} = \rho \qquad div\,\vec{B} = 0$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \qquad \vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0\vec{E}$$

(середовище однорідне, нейтральне, непровідне

$$\mu = const \qquad \rho = 0 \qquad \vec{j} = 0$$

$$\varepsilon = const$$

$$rot\vec{E} = -\mu\mu_0\frac{\partial\vec{H}}{\partial t} \quad (1) \qquad rot\vec{H} = \varepsilon\varepsilon_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

$$div\left(\varepsilon\varepsilon_0\vec{E}\right) = 0 \qquad div\,\vec{E} = 0 \quad (3) \qquad div\,\vec{H} = 0 \quad (4)$$

$$rot\left(rot\vec{E}\right) = grad\,div\vec{E} - \Delta\vec{E} = -\mu\mu_0\frac{\partial}{\partial t}\left(rot\vec{H}\right) = -\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}$$

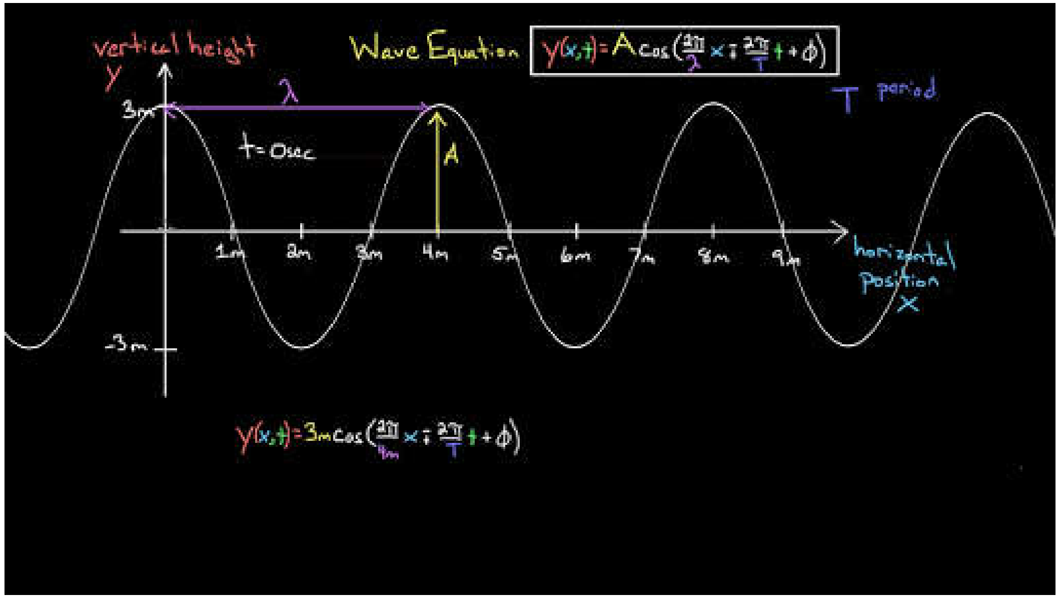
$$\Delta\vec{E} = \mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \qquad \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2\vec{E}}{\partial z^2} = \mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2}$$

$$\Delta\vec{H} = \mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0\frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2}$$

хвильове рівняння

$$\Delta\xi = \frac{1}{v^2}\frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2}$$

фазова швидкість



$$\Delta\vec{E} = \underbrace{\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\partial^2\vec{E}}{\partial t^2} \qquad \Delta\vec{H} = \underbrace{\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0}\frac{\partial^2\vec{H}}{\partial t^2}$$

хвиль

$$\upsilon^2 = \left(\mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0\right)^{-1}$$

$\mu=1,\ \varepsilon=1$

вакуум: $$\upsilon = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\varepsilon_0}} = \underline{\underline{c}} = 3\cdot10^8\, м/с$$

інше середовище: $$\upsilon = \frac{c}{\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{c}{\underline{n}}$$

абсолютний показник заломлення

$$\underline{\underline{n}} = \sqrt{\mu\varepsilon}$$

$$rot\vec{E} = -\mu\mu_0 \frac{\partial \vec{H}}{\partial t}$$

$$rot\vec{H} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

123

$$\left(\cancel{\frac{\partial E_z}{\partial y}} - \cancel{\frac{\partial E_y}{\partial z}}\right) = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_x}{\partial t}$$

231

$$\left(\cancel{\frac{\partial E_x}{\partial z}} - \frac{\partial E_z}{\partial x}\right) = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t}$$

312

$$\left(\frac{\partial E_y}{\partial x} - \cancel{\frac{\partial E_x}{\partial y}}\right) = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t}$$

$$\left(\frac{\partial H_z}{\partial y} - \frac{\partial H_y}{\partial z}\right) = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_x}{\partial t}$$

$$\left(\frac{\partial H_x}{\partial z} - \frac{\partial H_z}{\partial x}\right) = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}$$

$$\left(\frac{\partial H_y}{\partial x} - \frac{\partial H_x}{\partial y}\right) = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t}$$

$$div\,\vec{E} = 0$$

$$div\,\vec{H} = 0$$

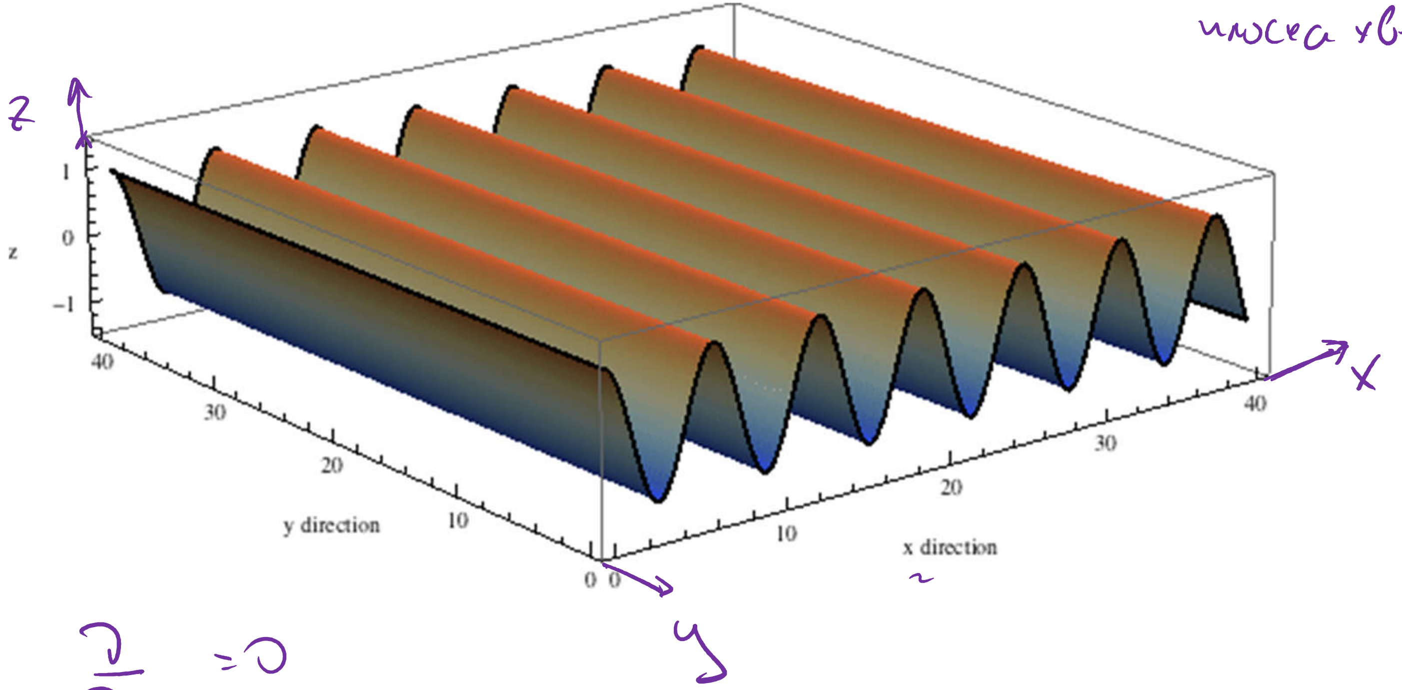
$$\frac{\partial E_x}{\partial x} + \frac{\partial E_y}{\partial y} + \frac{\partial E_z}{\partial z} = 0$$

$$\frac{\partial H_x}{\partial x} + \frac{\partial H_y}{\partial y} + \frac{\partial H_z}{\partial z} = 0$$

$$\mathrm{rot}\,\bar{a} = \begin{vmatrix} \bar{i} & \bar{j} & \bar{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ a_x & a_y & a_z \end{vmatrix}$$

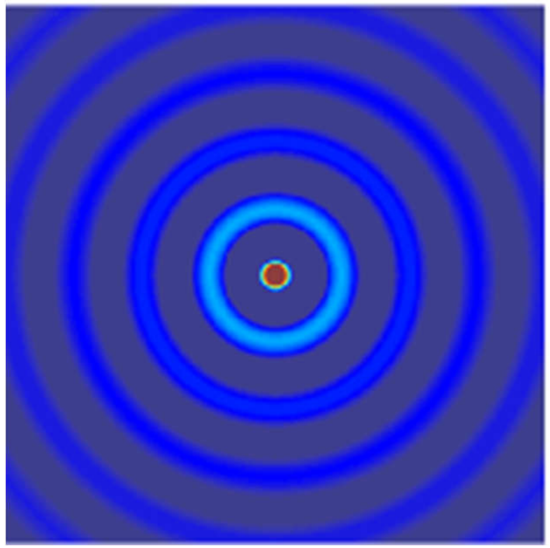
$$div\vec{A} = \frac{\partial A_x}{\partial x} + \frac{\partial A_y}{\partial y} + \frac{\partial A_z}{\partial z}$$

плоска хвиля



$$\frac{\partial}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial z} = 0$$



$$0 = \frac{\partial H_x}{\partial t} \qquad 0 = \frac{\partial E_x}{\partial t} \qquad \frac{\partial E_x}{\partial x} = 0$$

$$-\frac{\partial E_z}{\partial x} = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_y}{\partial t} \qquad -\frac{\partial H_z}{\partial x} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t} \qquad \frac{\partial H_x}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} \qquad \frac{\partial H_y}{\partial x} = \varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_z}{\partial t}$$

джерело

$E_x = 0$

$H_x = 0$

$$E_x = const$$
$$H_x = const$$

$$E_x = 0$$
$$H_x = 0$$

$$\vec{H}, \vec{E} \perp \vec{\upsilon}$$

хвілі поперечні

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_z}{\partial x} = \mu\mu_0 \dfrac{\partial H_y}{\partial t} \\ \\ \dfrac{\partial H_y}{\partial x} = \varepsilon\varepsilon_0 \dfrac{\partial E_z}{\partial t} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu\mu_0 \dfrac{\partial H_z}{\partial t} \\ \\ \dfrac{\partial H_z}{\partial x} = -\varepsilon\varepsilon_0 \dfrac{\partial E_y}{\partial t} \end{cases}$$

$\vec{E} = (\cancel{E_x}, E_y, \cancel{E_z})$

$\vec{H} = (\cancel{H_x}, \cancel{H_y}, H_z)$

$$E_x = 0$$
$$H_x = 0$$

$$E = E_y$$
$$H = H_z$$

$$\underbrace{\vec{E} \perp \vec{H}}$$

$$\frac{\partial^2 E_y}{\partial x^2} = \mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2 E_y}{\partial t^2} \qquad \frac{\partial^2 H_z}{\partial x^2} = \mu\mu_0\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial^2 H_z}{\partial t^2}$$

$$E_y(x,t) = E_0 \cos(\omega t - k\,x + \phi_{10})$$

$$H_z(x,t) = H_0 \cos(\omega t - k\,x + \phi_{20})$$

$$k = \frac{\omega}{\upsilon} \qquad \upsilon^2 = \frac{\omega^2}{k^2} = \left(\varepsilon\varepsilon_0\mu\mu_0\right)^{-1}$$

хвильовий вектор

$$\nu\lambda = \upsilon \qquad \omega = 2\pi\nu \qquad k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$n = 1 \qquad \nu_0\lambda_0 = c$$

$$n \neq 1 \qquad \nu\lambda = \frac{c}{n} \qquad \nu = \nu_0 \qquad \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

$$E_y(x,t) = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi_{10}) \qquad H_z(x,t) = H_0 \cos(\omega t - kx + \phi_{20})$$

$$\frac{\partial E_y}{\partial x} = -\mu\mu_0 \frac{\partial H_z}{\partial t} \qquad \frac{\partial H_z}{\partial x} = -\varepsilon\varepsilon_0 \frac{\partial E_y}{\partial t}$$

$$k\, E_0 \sin(\omega t - kx + \phi_{10}) = \mu\mu_0\, \omega H_0 \sin(\omega t - kx + \phi_{20})$$

$$k\, H_0 \sin(\omega t - kx + \phi_{10}) = \varepsilon\varepsilon_0\, \omega E_0 \sin(\omega t - kx + \phi_{20})$$

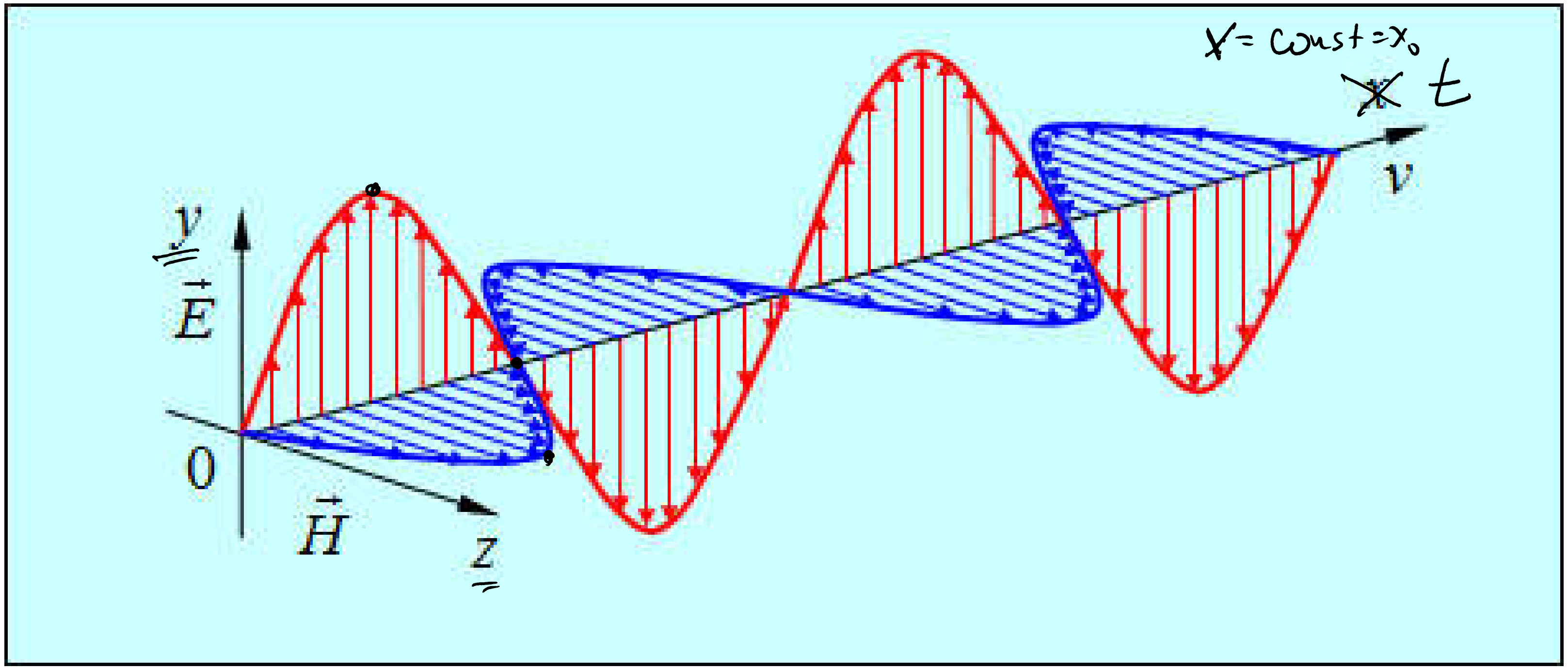
$$\phi_{10} = \phi_{20} = \phi_0$$

$$\frac{E_0}{H_0} = \frac{\mu\mu_0 H_0}{\varepsilon\varepsilon_0 E_0} \qquad \sqrt{\varepsilon\varepsilon_0}\, E_0 = \sqrt{\mu\mu_0}\, H_0$$

$$E_y = E_0 \cos(\omega t - kx + \phi_0)$$

$$H_z = H_0 \cos(\omega t - kx + \phi_0)$$

$(\vec{E}, \vec{H}, \vec{\vartheta})$ - права трійка векторів



$\nu \cdot \lambda = \frac{c}{n}$