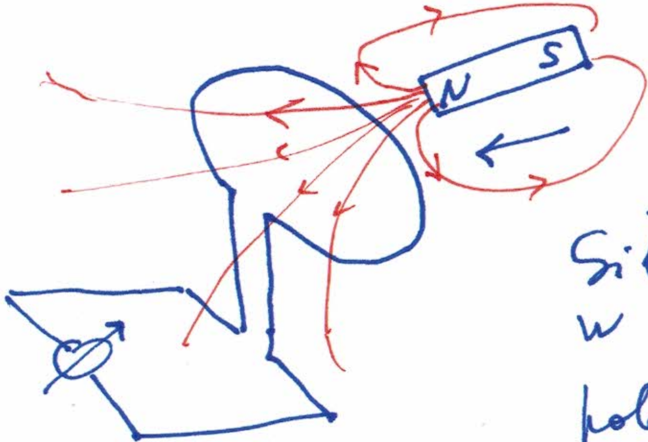
Indukcja Faradaya

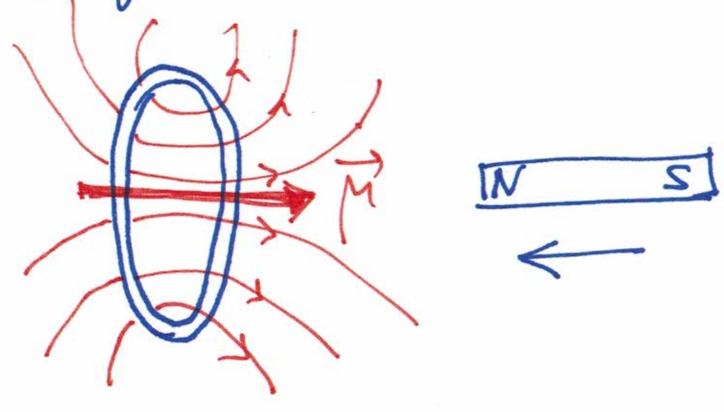


Siła elektromotoryczna jest indukowana w pętli gdy zmienia się liczba linii pola magnetycznego, przechodzących przez pętlę

Prawo Faradaya: $\boxed{\mathcal{E} = -\frac{d\Phi_B}{dt}}$

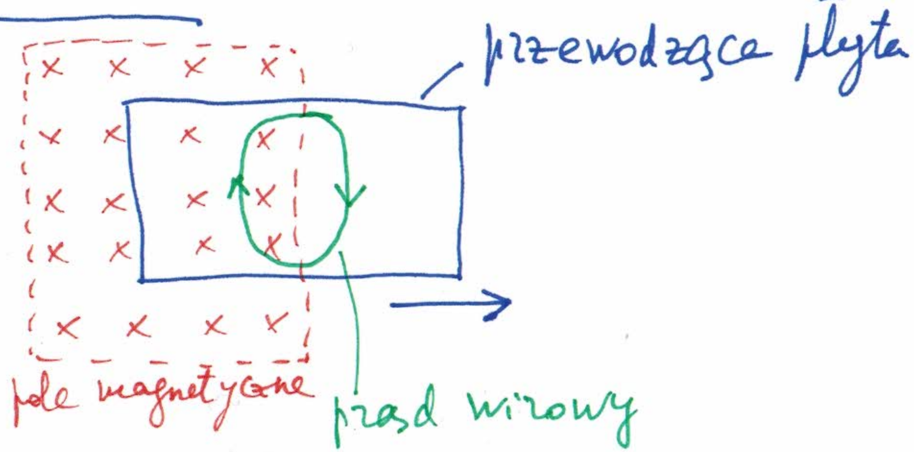
$\underbrace{\Phi_B = \int \vec{B} \cdot d\vec{S}}_{\text{strumień magnetyczny przez powierzchnię } S}$ - całka po powierzchni S

Reguła Lenza

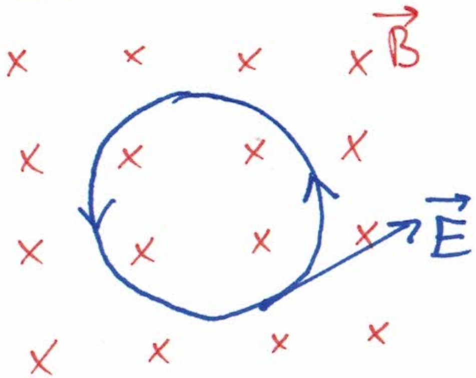


Prąd indukowany płynie w takim kierunku, że pole magnetyczne wytworzone przez ten prąd przeciwdziała zmianie strumienia pola magnetycznego, która ten prąd indukuje.

Prądy wirowe



Indukowane pole elektryczne



Zmienne pole magnetyczne wytwarza pole elektryczne

$\Rightarrow$ Prawo Faradaya:

$$\boxed{\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}}$$

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = \mathcal{E} \quad \text{(SEM)}$$

całkowanie wzdłuż konturu zamkniętego

Indukcyjność cewki

$$\boxed{L = \frac{N\Phi_B}{I}}$$

Φ_B – strumień magnetyczny
N – ilość zwojów

$$1\,\text{henr} = 1\,H = 1\,\frac{T \cdot m^2}{A}$$

$\Rightarrow$ Indukcyjność solenoidu:

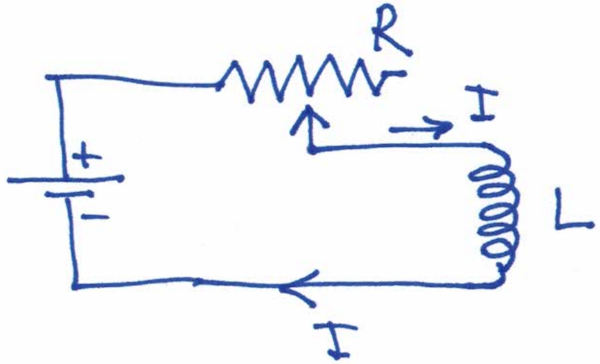
$B = \mu_0 I n$

$$L = \frac{N\Phi_B}{I} = \frac{nl \cdot BS}{I} = \frac{nl \cdot \mu_0 I n \cdot S}{I} = \mu_0 n^2 l S$$

n – ilość zwojów na jednostkę długości

$$L = \mu_0 n^2 l S$$

Samoindukcja



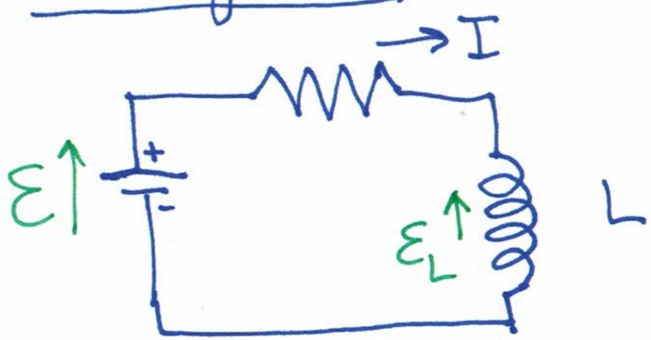
$$\mathcal{E}_L = -\frac{d(N\Phi_B)}{dt}$$

$$N\Phi_B = LI$$

$$\boxed{\mathcal{E}_L = -L\frac{dI}{dt}}$$

SEM samoindukcji

Obwody RL



Włączamy prąd:

$$-IR - L\frac{dI}{dt} + \mathcal{E} = 0$$ – drugie prawo Kirchhoffa

$$L\frac{dI}{dt} + RI = \mathcal{E}$$

Rozwiązanie: $I = \frac{\mathcal{E}}{R}\left(1 - e^{-t/\tau_L}\right)$

$\tau_L = \frac{L}{R}$ – stała czasowa

Energia zmagazynowana w polu magnetycznym

Równanie dla SEM

$$\mathcal{E} = L\frac{dI}{dt} + IR$$

$$\mathcal{E}I = \underbrace{LI\frac{dI}{dt}}_{} + I^2R$$

$$= \frac{dE_B}{dt}$$

E_B - energia magnetyczna

$$\mathcal{E}I = \mathcal{E}\frac{dq}{dt}$$

szybkość, z jaką źródło wykonuje pracę nad ładunkiem q

$$\frac{dE_B}{dt} = LI\frac{dI}{dt} = \frac{1}{2}L\frac{dI^2}{dt}$$

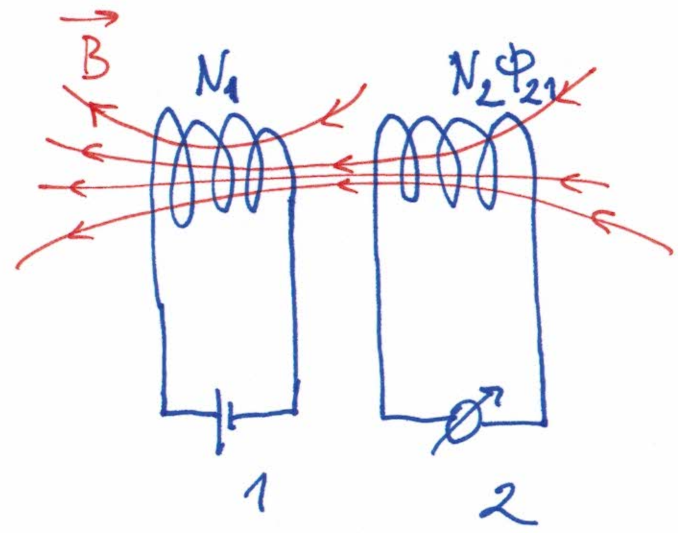
$$\boxed{E_B = \frac{1}{2}LI^2}$$

Energia pola magnetycznego

Energia pola elektrycznego:

$$E_E = \frac{q^2}{2C}$$

Indukcja wzajemna



$$M_{21} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1}$$ – definicja indukcji wzajemnej

$$M_{21} I_1 = N_2 \Phi_{21}$$

Jeżeli I będzie się zmienić w czasie:

$$M_{21} \frac{dI_1}{dt} = \underbrace{N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt}}$$
$$= \mathcal{E}_2 \text{ (prawo Faradaya)}$$

$$\boxed{\mathcal{E}_2 = -M_{21} \frac{dI_1}{dt}}$$

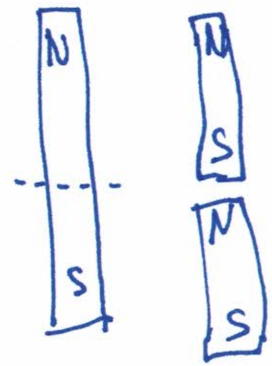
Analogicznie, $\mathcal{E}_1 = -M_{12} \dfrac{dI_2}{dt}$

$M_{21} = M_{12} = M$

indukcja wzajemna

Prawo Gaussa dla pól magnetycznych

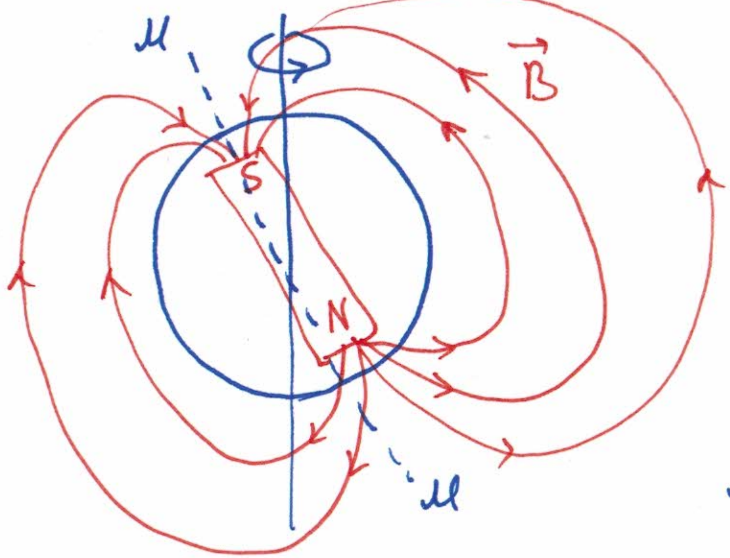
$$\boxed{\Phi_B = \oint \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0}$$



$$\Phi_E = \oint \vec{E}\cdot d\vec{S} = \frac{q_{wewn}}{\varepsilon_0}$$

dla pól elektrycznych

Magnetyzm ziemski



uu – oś dipola

magnetyzm i elektrony

Elektron ma swój własny moment pędu nazywany spinem: $\vec{S}$

Z tym spinem jest związany własny moment magnetyczny: $\vec{\mu}_s$

$$\boxed{\vec{\mu}_s = -\frac{e}{m}\vec{S}}$$

$e = 1{,}6 \cdot 10^{-19}\ C$

$m = 9{,}11 \cdot 10^{-31}\ kg$

można zmierzyć składowe spinu wzdłuż pewnego kierunku z

$$S_z = m_s \frac{h}{2\pi} = m_s \hbar \quad , \quad m_s = \pm\frac{1}{2}$$

– magnetyczna spinowa liczba kwantowa

h – stała Plancka $\qquad h = 6{,}63 \cdot 10^{-34}\ J \cdot s$

$\hbar = \frac{h}{2\pi}$ – stała Diracka

$$\mu_{s,z} = -\frac{e}{m} S_z$$

$$\mu_{s,z} = \mp \frac{eh}{4\pi m} = \mp \mu_B$$

$$\mu_B = \frac{eh}{4\pi m} = 9{,}27 \cdot 10^{-24}\ \frac{J}{T}$$

magneton Bohra

Orbitalny moment magnetyczny

$$\boxed{\mu_{orb} = -\frac{e}{2m}\vec{L}_{orb}}$$

$\vec{L}_{orb}$ – orbitalny moment pędu

Składowa orbitalnego momentu pędu wzdłuż osi z:

$$L_{orb,z} = m_l \frac{h}{2\pi} = m_l \hbar, \quad m_l = 0, \pm 1, \pm 2, \ldots \pm(\text{wartość maksymalna})$$

$$\mu_{orb,z} = -\mu_B m_l$$

Elektron w polu magnetycznym

Energia potencjalna: $E_p = -(\vec{\mu}_s + \vec{\mu}_{orb}) \cdot \vec{B}$

Indukowane pole magnetyczne

$$\boxed{\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}}$$

– całka po konturze

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

prawo indukcji Faradaya

zmienne pole elektryczne indukuje pole magnetyczne

uogólnione prawo Ampère'a

$$\boxed{\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I_p}$$

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 I_p$$

prawo Ampère'a

Prąd przesunięcia: $I_{prz} = \varepsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt}$

$$\Rightarrow \oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0 \left(I_{prz} + I_p\right)$$

Równania Maxwella

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{S} = \frac{q_{wewn}}{\varepsilon_0}$$ prawo Gaussa dla elektryczności

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{S} = 0$$ prawo Gaussa dla magnetyzmu (monopoli nie istnieją)

$$\oint \vec{E}\cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$ prawo Faradaya

$$\oint \vec{B}\cdot d\vec{s} = \mu_0\varepsilon_0\frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I_p$$ uogólnione prawo Ampère'a

Równania Maxwella (2)

$$\operatorname{div} \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0$$

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

$$\frac{1}{\mu_0} \operatorname{rot} \vec{B} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \vec{j}$$

$$\operatorname{div} \vec{A} = \lim_{V \to 0} \frac{\oint \vec{A} \cdot d\vec{S}}{V}$$

$$\operatorname{rot} \vec{A} = \lim_{S \to 0} \frac{\oint \vec{A} \cdot d\vec{s}}{S}$$

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

$$\operatorname{rot} \vec{A} = \nabla \times \vec{A} = \begin{vmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ A_x & A_y & A_z \end{vmatrix}$$

$$(\operatorname{rot} \vec{A})_x = \frac{\partial A_z}{\partial y} - \frac{\partial A_y}{\partial z}, \quad (\operatorname{rot} \vec{A})_y = \frac{\partial A_x}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial x}$$

$$(\operatorname{rot} \vec{A})_z = \frac{\partial A_y}{\partial x} - \frac{\partial A_x}{\partial y}$$