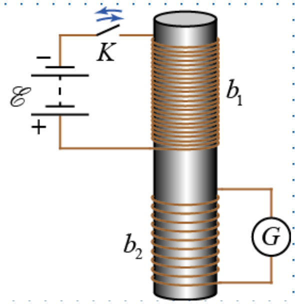
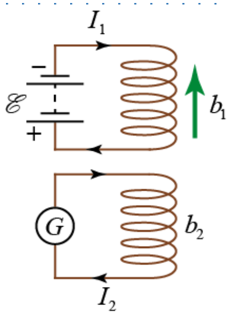
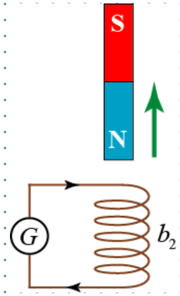
Tema 12. Câmpul electromagnetic

Fenomenul inducției electromagnetice

Experiențele lui Faraday 1) 

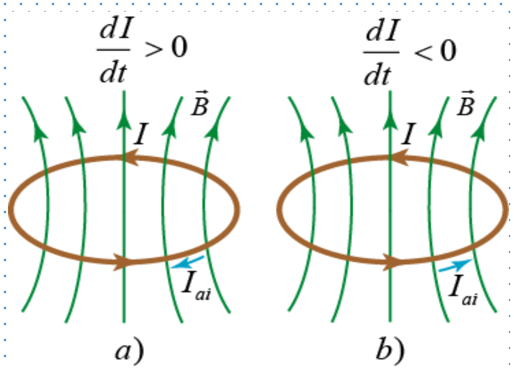
2) 

3) 

Legea fundamentală a inducției electromagnetice (Legea lui Faraday)

$$\boxed{\mathscr{E}_i = -\frac{d\Phi_m}{dt}}$$

Fenomenul de autoinducție



constă în: apariția în orice contur conductor închis parcurs de curent a unei *t.e.m.* de inducție datorită variației curentului în acest contur.

$$\mathscr{E}_{ai} = -\frac{d\Psi_{ai}}{dt} = -L\frac{dI}{dt} \qquad [L] = 1\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{A}} = 1\mathrm{H} \qquad \Psi_{ai} = LI$$

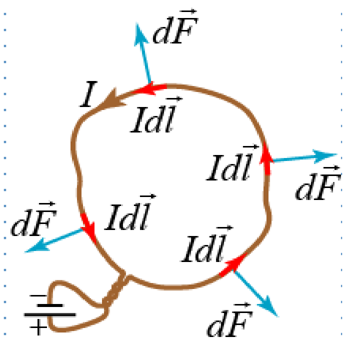
Tema 12. Câmpul electromagnetic

Inductanța solenoidului

$$\Psi_{ai} = N\Phi_m = NBS = \mu_0 NnIS = \frac{\mu_0 NnISl}{l} = \mu_0 n^2 VI \quad \Rightarrow \quad L = \mu_0 n^2 V$$

$$\delta L = \mathscr{E}_{ai} Idt = -Id\Psi_{ai}$$

$$E_p = L_{I\to 0} = \int_I^0 \mathscr{E}_{ai} Idt = -\int_I^0 L\frac{dI}{dt} Idt = -L\int_I^0 IdI = -L\left.\frac{I^2}{2}\right|_I^0 = \frac{LI^2}{2} \quad \Rightarrow$$



$$\Rightarrow \quad E_p = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Psi_{ai} I}{2} = \frac{\Psi_{ai}^2}{2L}$$

Energia potențială de interacțiune a părților componente ale solenoidului

$$E_p = \frac{LI^2}{2} = \frac{1}{2}\mu\mu_0 n^2 V \frac{B^2}{\mu^2\mu_0^2 n^2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}V$$

Energia câmpului magnetic

$$W_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{\Psi_{ai} I}{2} = \frac{\Psi_{ai}^2}{2I} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0}V$$

Densitatea de energie a câmpului magnetic

$$w_m = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\vec{B}\vec{H}}{2} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

Tema 12. Câmpul electromagnetic

Prima ecuație a lui Maxwell

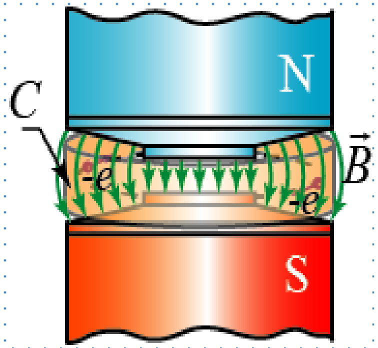
$$\left.\begin{aligned} \mathscr{E}_i &= \oint_{(\mathscr{L})} \left(\vec{E}d\vec{l}\right) \\ \mathscr{E}_i &= -\frac{\partial \Phi_m}{\partial t} \\ \Phi_m &= \int_{(S)} \left(\vec{B}d\vec{S}\right) \end{aligned}\right\} \rightarrow \boxed{\oint_{(\mathscr{L})} \left(\vec{E}d\vec{l}\right) = -\int_{(S)} \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}\right)}$$

Teorema lui Stokes

$$\oint_{(\mathscr{L})} \left(\vec{E}d\vec{l}\right) = \int_{(S)} \operatorname{rot} \vec{E}\, d\vec{S}$$

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

Orice câmp magnetic variabil induce în spațiul înconjurător un câmp electric turbionar, care nu depinde de prezența sau de absența materialelor conductoare în acest câmp.



Betatronul este un accelerator inductiv de electroni.

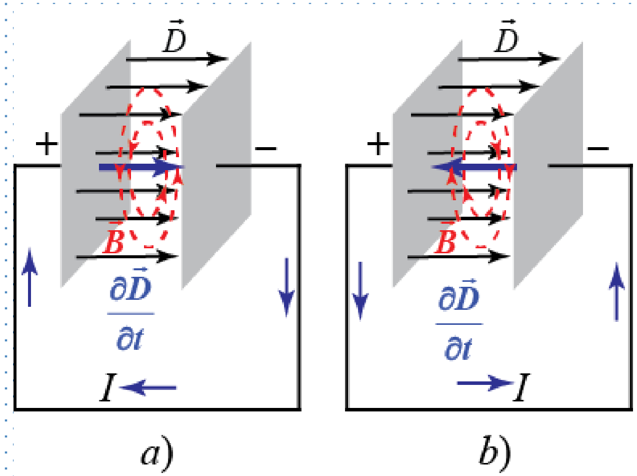
Fluxul de electroni accelerați într-un betatron capătă energii cinetice de zeci sau chiar și sute de megaelectronvolți.

Tema 12. Câmpul electromagnetic

Curentul de deplasare. A doua ecuație a lui Maxwell

A doua ecuație a lui Maxwell este legea curentului total

$$\oint_{(\mathscr{L})} \left(\vec{H}d\vec{l}\right) = I_{\text{c.}}$$ sub formă integrală

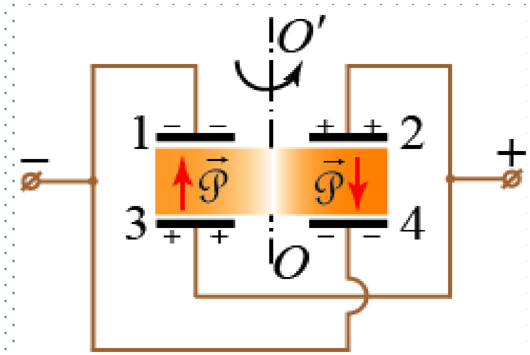


$$\text{rot}\,\vec{H} = \vec{j}_{\text{c.}}$$ sub formă diferențială

Pentru curentul alternativ.

$$I_{\text{depl.}} = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt}\int_S \sigma dS = \int_S \frac{\partial \sigma}{\partial t} dS = \int_S \frac{\partial D}{\partial t} dS = \int_S \vec{j}_{\text{depl.}} d\vec{S}$$

$$\left.\begin{aligned} \vec{j}_{\text{depl.}} &= \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \vec{D} &= \varepsilon_0 \vec{E} + \vec{\mathscr{P}} \end{aligned}\right\} \Rightarrow \vec{j}_{\text{depl.}} = \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \frac{\partial \vec{\mathscr{P}}}{\partial t}$$



Experiența Eichenwald

Tema 12. Câmpul electromagnetic

Curentul total $$I = I_{\text{c.}} + I_{\text{depl.}} = I_{\text{c.}} + \int_S \vec{j}_{\text{depl.}} d\vec{S}$$

Densitatea curentului total $$\vec{j} = \vec{j}_{\text{c.}} + \vec{j}_{\text{depl.}} = \vec{j}_{\text{c.}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$$

A doua ecuație Maxwell sub formă integrală

$$\boxed{\oint_{(\mathscr{L})} \left(\vec{H} d\vec{l} \right) = I_{\text{c.}} + I_{\text{depl.}}}$$

sau

$$\boxed{\oint_{(\mathscr{L})} \left(\vec{H} d\vec{l} \right) = \int_{(S)} \left(\vec{j}_{\text{c.}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right) d\vec{S}}$$

A doua ecuație a lui Maxwell sub formă diferențială

$$\boxed{\text{rot}\, \vec{H} = \vec{j}_{\text{c.}} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t}}$$

Câmpurile electrice variabile sunt surse de câmpuri magnetice, la fel cum în conformitate cu legea inducției electromagnetice, câmpurile magnetice variabile induc câmpuri electrice.

Tema 12. Câmpul electromagnetic

Ecuațiile a treia și a patra ale lui Maxwell

$$\oint_{(S)} \left(\vec{D} d\vec{S}\right) = \int_{(V)} \rho dV \qquad \operatorname{div} \vec{D} = \rho$$

Fluxul vectorului inducției electrice $\vec{D}$ printr-o suprafață arbitrară închisă S ce nu se mișcă și nu se deformează, trasată imaginar în câmpul electromagnetic, este egal cu suma algebrică a sarcinilor libere q aflate în interiorul acestei suprafețe.

$$\oint_{(S)} \left(\vec{B} d\vec{S}\right) = 0 \qquad \operatorname{div} \vec{B} = 0$$

Fluxul vectorului inducției magnetice $\vec{B}$ printr-o suprafață arbitrară închisă S ce nu se mișcă și nu se deformează, trasată imaginar în câmpul electromagnetic, este egal cu zero.

Tema 12. Câmpul electromagnetic

Sistemul de ecuații Maxwell. Ecuații de material

$$\begin{cases} \oint\limits_{(\mathscr{L})} \left(\vec{E}d\vec{l}\right) = -\int\limits_{(S)} \left(\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S}\right), \\ \oint\limits_{(\mathscr{L})} \left(\vec{H}d\vec{l}\right) = \int\limits_{(S)} \left(\vec{j}_c + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t}\right) d\vec{S}, \\ \oint\limits_{(S)} \left(\vec{D}d\vec{S}\right) = \int\limits_{(V)} \rho dV, \\ \oint\limits_{(S)} \left(\vec{B}d\vec{S}\right) = 0, \end{cases}$$

$$\begin{cases} \mathrm{rot}\,\vec{E} = -\dfrac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \\ \mathrm{rot}\,\vec{H} = \vec{j}_c + \dfrac{\partial \vec{D}}{\partial t}, \\ \mathrm{div}\,\vec{D} = \rho, \\ \mathrm{div}\,\vec{B} = 0. \end{cases}$$

$$\begin{cases} \vec{D} = \varepsilon\varepsilon_0 \vec{E}, \\ \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}, \\ \vec{j} = \sigma \vec{E}, \end{cases}$$

Sursele câmpului electric sunt sarcinile electrice și/sau câmpurile magnetice variabile. Sursele câmpurilor magnetice sunt sarcinile electrice în mișcare (curenții electrici) și/sau câmpurile electrice variabile.