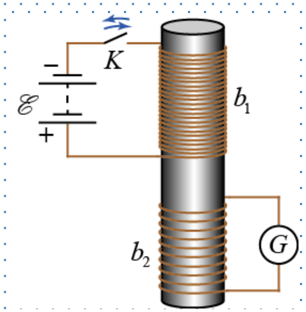
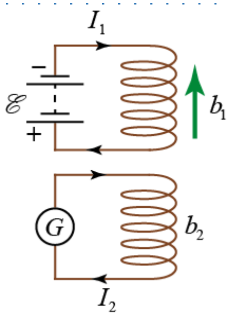
# Tema 12. Câmpul electromagnetic

## Fenomenul inducției electromagnetice

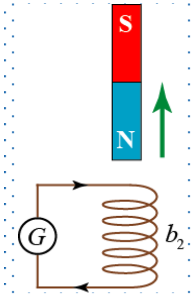
Experiențele lui Faraday 1)




2)



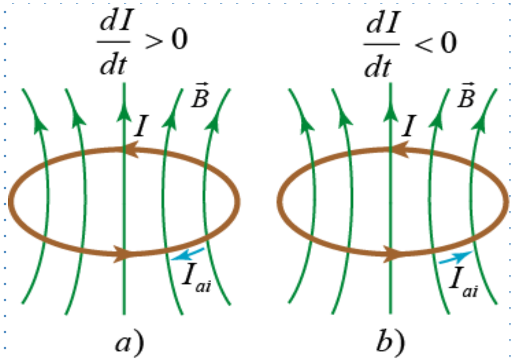

3)




## 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.

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

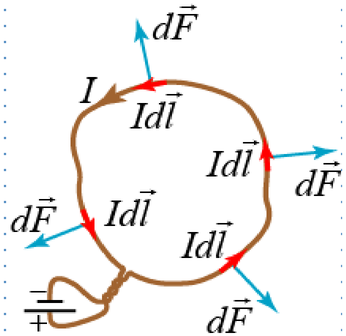
# Tema 12. Câmpul electromagnetic

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

$$\mathscr{E}_i = \oint_{(\mathscr{L})} \left(\vec{E} d\vec{l}\right)$$

$$\mathscr{E}_i = -\frac{\partial \Phi_m}{\partial t}$$

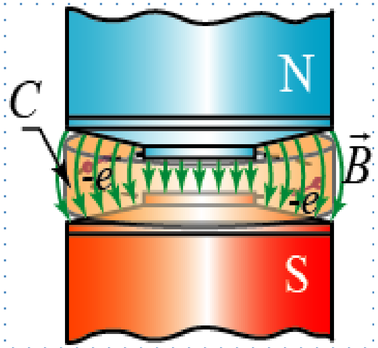
$$\Phi_m = \int_{(S)} \left(\vec{B} d\vec{S}\right)$$

$$\boxed{\oint_{(\mathscr{L})} \left(\vec{E} d\vec{l}\right) = -\int_{(S)} \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{S}\right)}$$

Teorema lui Stokes

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

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




**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.

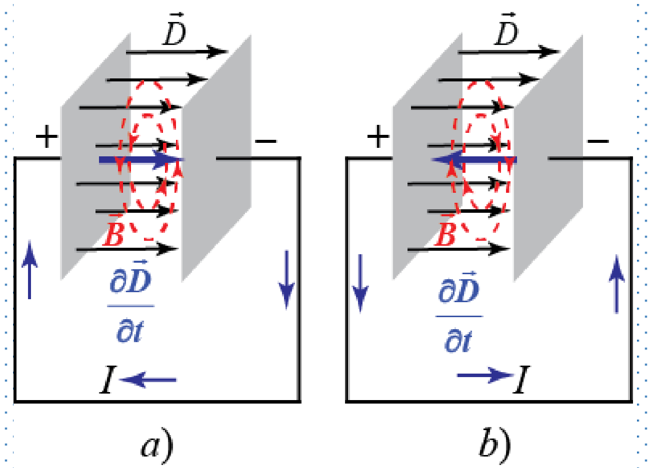
# Tema 12. Câmpul electromagnetic

## Curentul de deplasare. A doua ecuație a lui Maxwell

A doua ecuație a lui Maxwell este legea curentului total

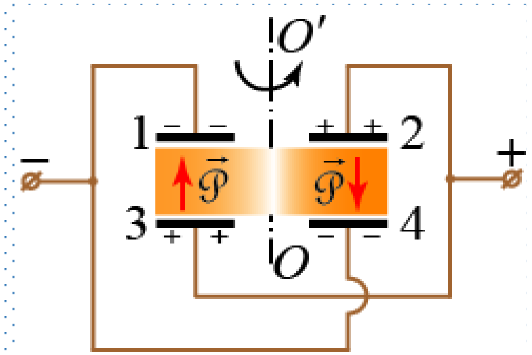
$$\oint\limits_{(\mathscr{L})} \left(\vec{H} d\vec{l}\right) = I_{\text{c.}}$$ sub formă integrală

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




<u>Pentru curentul alternativ.</u>

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




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

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

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

**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.**