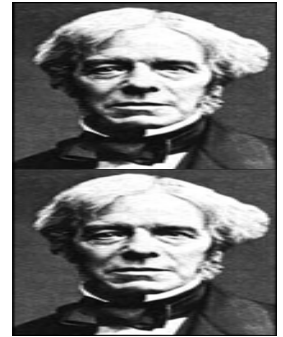


Elektromagnetické pole

Zákon elektromagnetické indukce

- ⊕ pohybujeme-li uzavřeným vodičem vhodným způsobem v magnetickém poli, vzniká ve vodiči elektrický proud
- ⊕ nachází-li se uzavřený vodič v časově proměnném magnetickém poli, vzniká ve vodiči elektrický proud



$$\vec{F} = Q(\vec{v} \times \vec{B}) = Q\vec{E} \quad \longleftrightarrow \quad \vec{E} = \vec{v} \times \vec{B}$$

Účinek magnetické síly na náboj je stejný jako kdyby působilo elektrické pole o intenzitě E

Indukované napětí

$$U_{in} = \int_0^L \vec{E} d\vec{l} = \int_0^L (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{l}$$

na koncích vodiče délky L vzniká indukované napětí U_{in}

$$U_{in} = \oint_C \vec{E} d\vec{l} = \oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{l}$$

Elektromagnetické pole

- ⊕ indukovaný proud ve smyčce má takovou hodnotu, jako kdyby byl zapojen zdroj elektromotorického napětí

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

magnetický
indukční tok

Faradayův indukční
zákon

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\oint_C \vec{E} d\vec{l} = U_{in}$$

$$\Phi = \iint_S \vec{B} d\vec{S}$$

Lencovo pravidlo

Časová změna magnetického toku indukuje v uzavřeném vodiči proud takového smyslu, aby magnetické pole buzené indukovaným proudem působilo proti změně magnetického toku

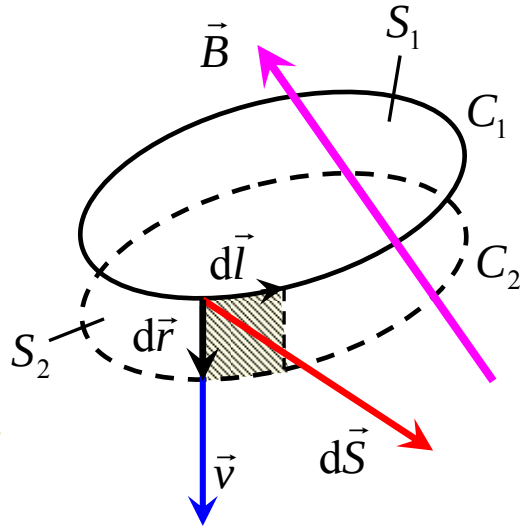
$$\oint_C \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} d\vec{S}$$

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

2. Maxwellova
rovnice

Elektromagnetické pole

Pohyb smyčky v magnetickém poli



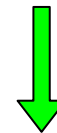
$$d\vec{S} = d\vec{r} \times d\vec{l} = \vec{v} dt \times d\vec{l} = (\vec{v} \times d\vec{l}) dt$$

$$\Phi(t) = \iint_{S_1} \vec{B} d\vec{S}$$

$$\Phi(t + dt) = \iint_{S_2} \vec{B} d\vec{S}$$

$$\Phi(t + dt) = \iint_{S_1 + S} \vec{B} d\vec{S} = \iint_{S_1} \vec{B} d\vec{S} + \iint_S \vec{B} d\vec{S} = \Phi(t) + \iint_S \vec{B} d\vec{S}$$

$$d\Phi = \iint_S \vec{B} d\vec{S} = dt \oint_{C_1} \vec{B} (\vec{v} \times d\vec{l}) = -dt \oint_{C_1} (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{l} = -U_{in} dt$$



Faradayův indukční zákon

$$\frac{d\Phi}{dt} = -\oint_C (\vec{v} \times \vec{B}) d\vec{l} = U_{in}$$

Elektromagnetické pole

Vlastní indukčnost vodiče

- ⊕ uzavřenou křivkou C vodiče prochází **magnetický indukční tok**:

$$\Phi = \iint_S \vec{B} d\vec{S} = I \frac{\mu}{4\pi} \iint_S \oint_C \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_o}{r^2} d\vec{S} = I \cdot L \quad \longrightarrow \quad \boxed{\Phi = I \cdot L}$$

vlastní indukčnost

$$L = \frac{\mu}{4\pi} \iint_S \oint_C \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_o}{r^2} d\vec{S}$$

- ⊕ charakteristika vodiče, která je závislá na tvaru a rozměrech vodiče a prostředí, v němž se vodič nachází

$L = \text{konst.}$



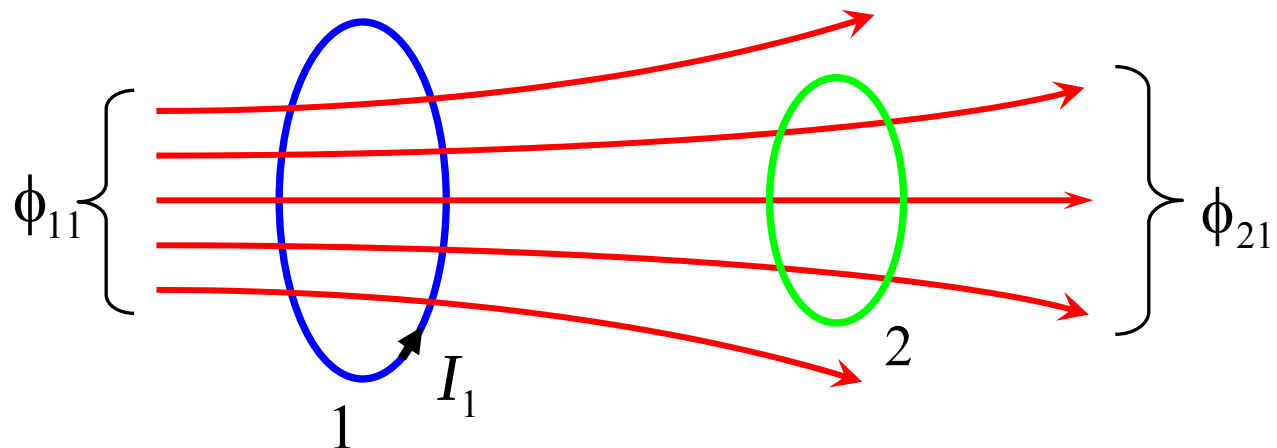
$$U_{in} = -\frac{d\Phi}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

protéká-li vodičem časově proměnný proud bude se ve vodiči indukovat napětí, jež závisí na indukčnosti vodiče

Elektromagnetické pole

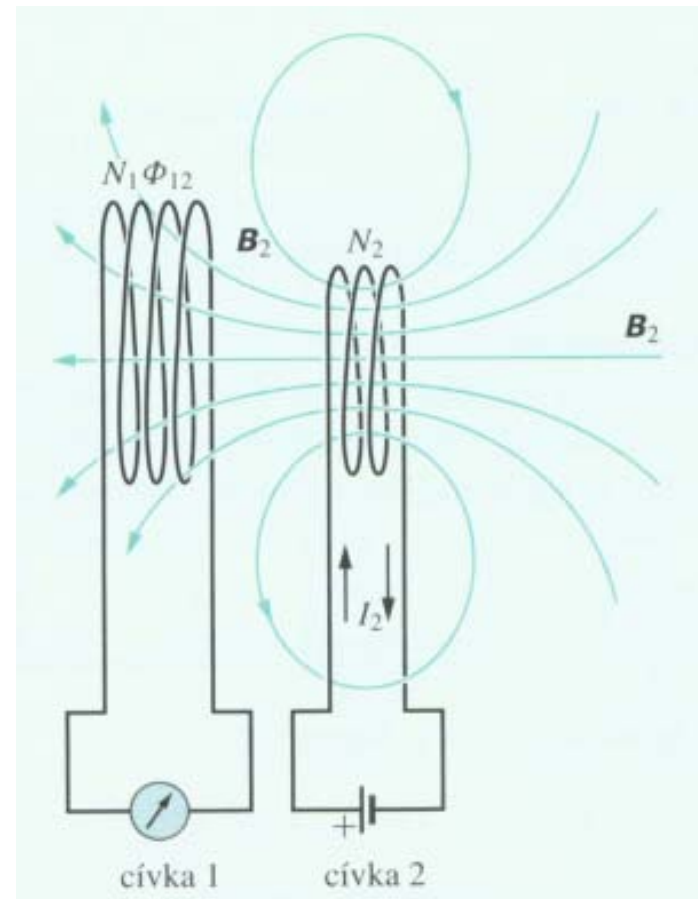
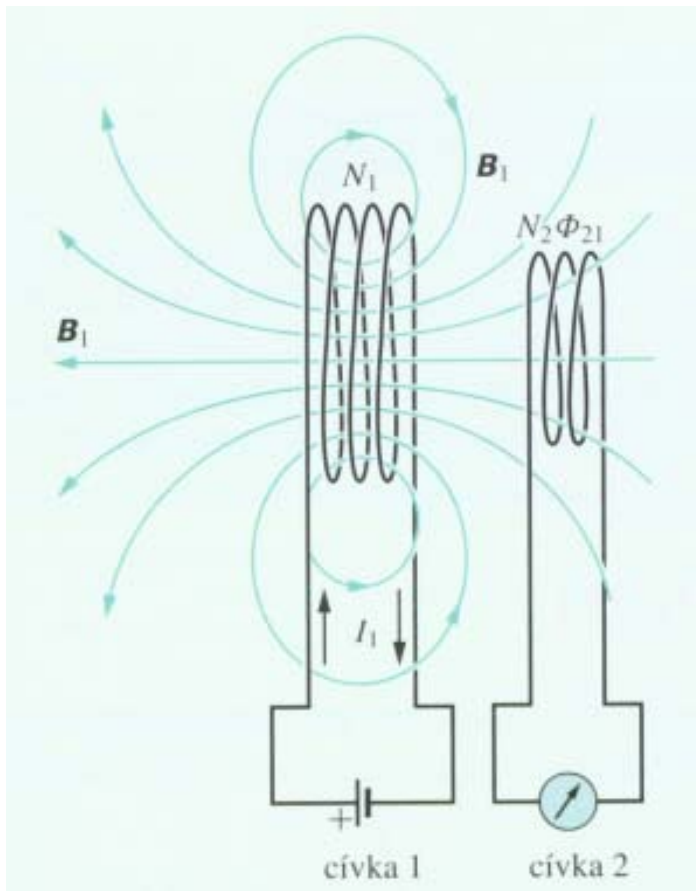
Vzájemná indukčnost

- ⊕ část **magnetického indukční toku** buzeného průchodem proudu I_1 smyčkou 1 bude procházet i smyčkou 2
- ⊕ tento tok je přímo úměrný velikosti proudu I_1 $\Phi_{21} = L_{21}I_1$ $L_{12} = -L_{21}$
- ⊕ indukované napětí ve smyčce 2: $U_2 = -\frac{d\Phi_{21}}{dt} = -L_{21} \frac{dI_1}{dt}$



Elektromagnetické pole

Vzájemná indukčnost



Elektromagnetické pole

Energie magnetického pole

- ⊕ při připojení obvodu o odporu R na elektromotorické napětí ε vznikne magnetické pole a v obvodu se bude indukovat elektromotorické napětí opačného smyslu než má zdroj

$$\varepsilon - \frac{d\Phi}{dt} = IR \quad \xrightarrow{\text{green}} \quad \varepsilon I dt = I^2 R dt + I d\Phi \quad \longleftrightarrow \quad W_\varepsilon = W_Q + W_m$$

energie dodaná
zdrojem

Jouleovo
teplo

přírůstek
magnetické energie
 W_m obvodu

$$W_m = \int_0^\Phi I d\Phi = L \int_0^I I dI = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} I\Phi$$

pomalé časové změny,
obvod nemění svůj tvar,
permeabilita nezávislá
na intenzitě pole

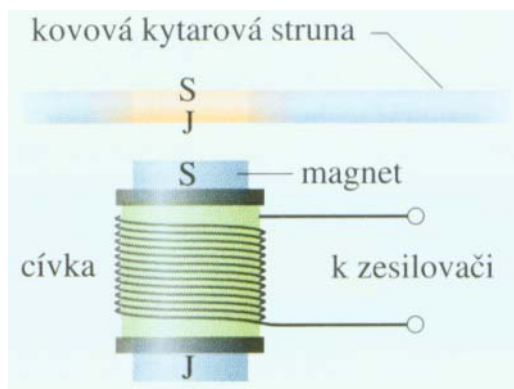
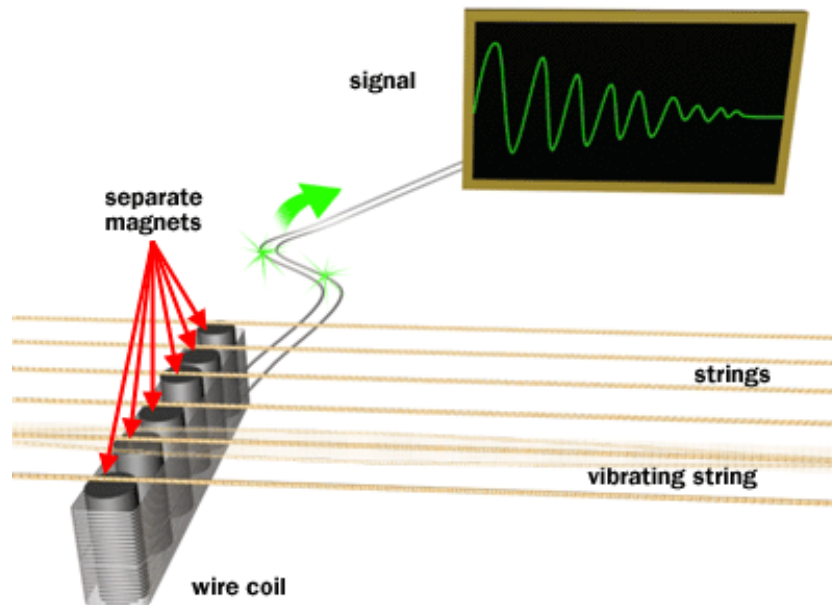
Celková magnetická energie
 n -obvodů

$$W_m = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n L_{ik} I_i I_k = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n I_k \Phi_k$$

Elektromagnetické pole

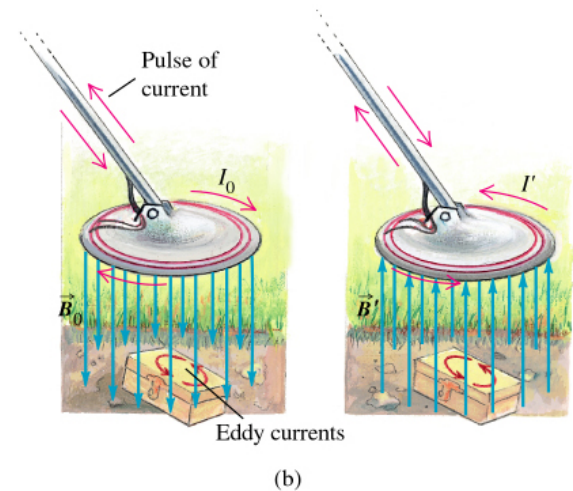
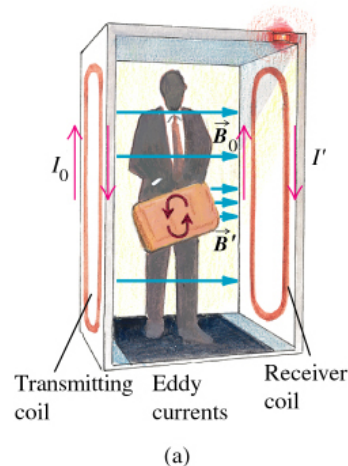
Elektrická kytara

v cívce snímače se indukuje
el.proud v závislosti na
kmitech kovové struny



Elektromagnetické pole

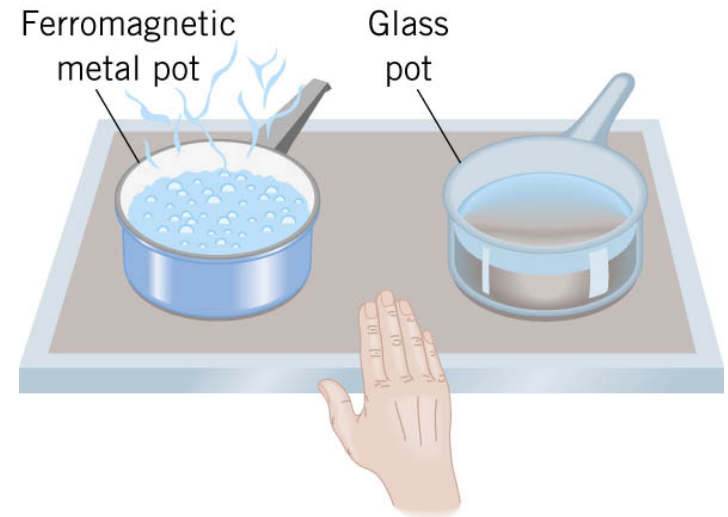
Vířivé proudy – detekce kovů



Elektromagnetické pole

Vířivé proudy – indukční ohřev

- ⊕ pod varnou plochou je umístěna cívka, která je napájena vysokofrekvenčním střídavým proudem
- ⊕ magnetické pole se periodicky mění a indukuje proud ve vodivé pánvi
- ⊕ vlivem odporu materiálu pánve dochází k přeměně elektrické energie na Jouleovo teplo
- ⊕ varná plocha se nezahřívá



Elektromagnetické pole

Pohyb nabité částice v magnetickém poli

$$\mathbf{B} = (B_x, 0, 0)$$

$$\mathbf{F}_L = e(\mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \mathbf{F}_L = (0, eB_x v_z, -eB_x v_y)$$

$$m_e \frac{dv_x}{dt} = 0 \quad m_e \frac{dv_y}{dt} = eB_x v_z \quad m_e \frac{dv_z}{dt} = -eB_x v_y$$

$$x = x_0 + v_{x0} t$$

$$\frac{d}{dt}(v_y + iv_z) = -i\omega(v_y + iv_z)$$

$$\omega = \frac{eB_x}{m_e}$$

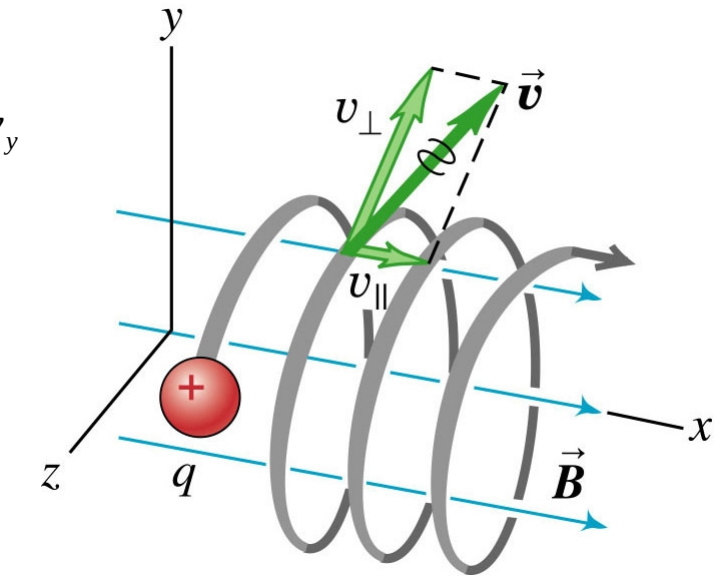
$$w = v_y + iv_z = v_0 e^{-i(\omega t + \varphi)}$$

$$v_y = v_0 \cos(\omega t + \varphi)$$

$$v_z = -v_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

$$y = y_0 + \frac{v_0}{\omega} \sin \omega t$$

$$z = z_0 + \frac{v_0}{\omega} \cos \omega t$$

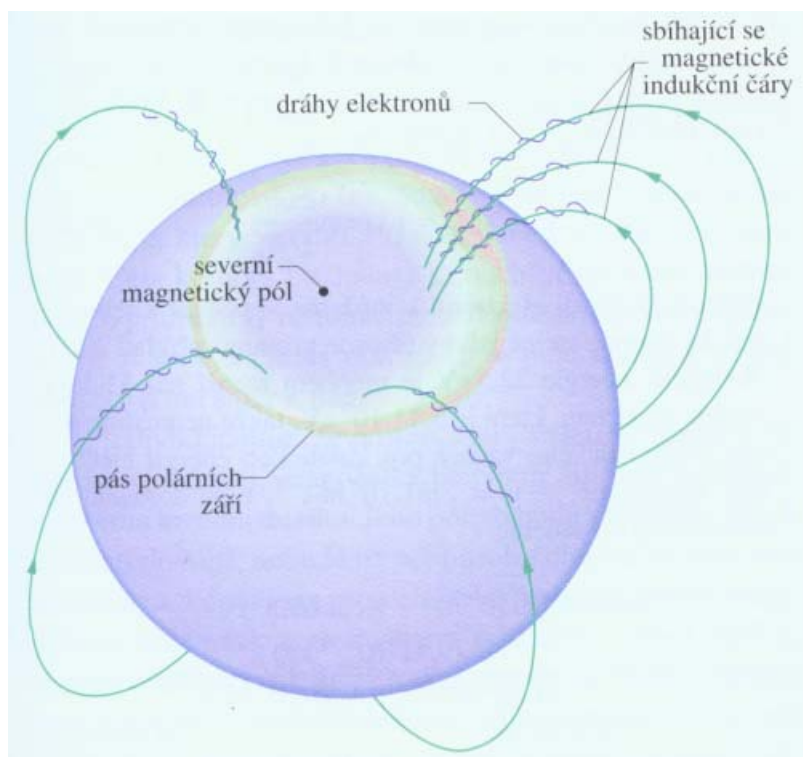
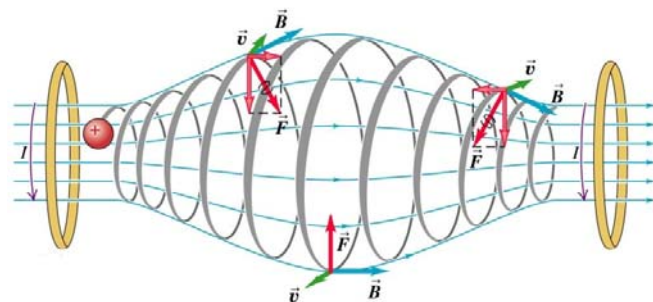


šroubovice o
poloměru R

$$R = \frac{v_0}{\omega} = \frac{m_e v \sin \alpha}{eB_x}$$

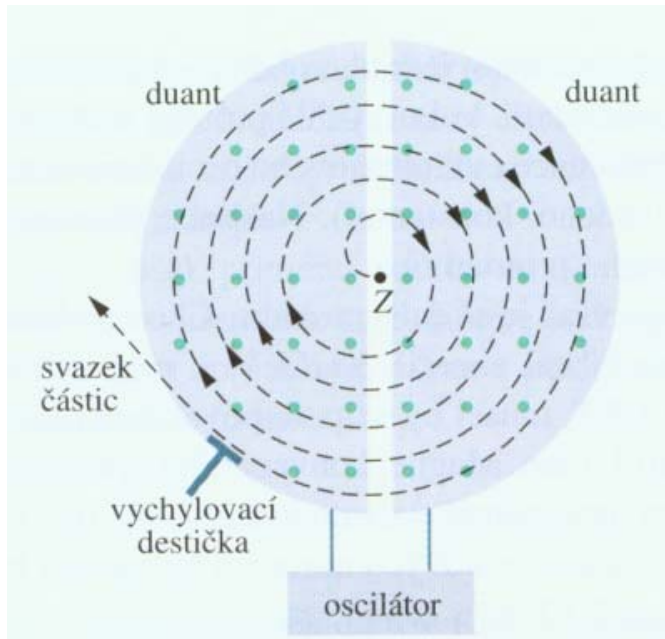
Stacionární magnetické pole

⊕ **Příklad:** (polární záře)

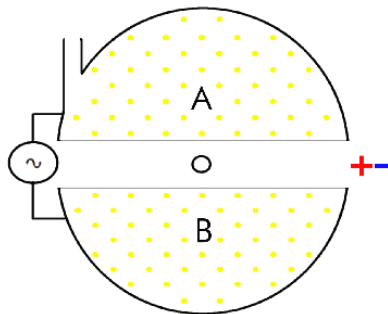


Elektromagnetické pole

Pohyb částice v elmag.poli – cyklotron, synchotron

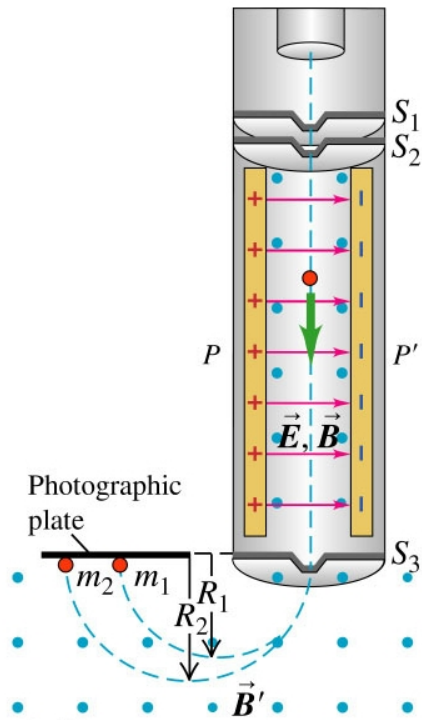


FermiLab (USA)



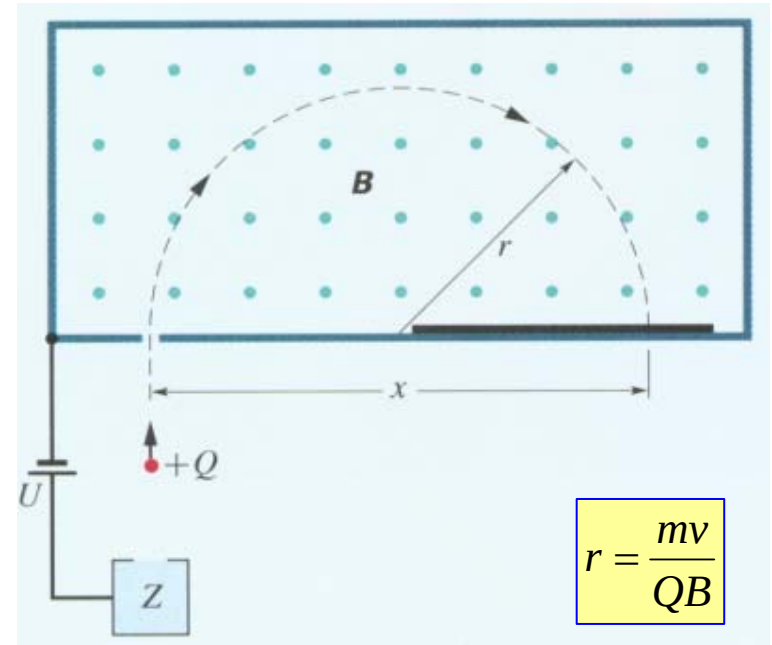
Elektromagnetické pole

Pohyb částice v elmag.poli – hmotnostní spektrograf



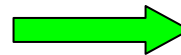
$$\frac{mv^2}{2} = QU$$

$$v = \sqrt{\frac{2QU}{m}}$$



$$r = \frac{mv}{QB}$$

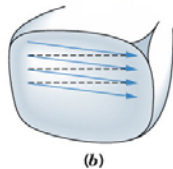
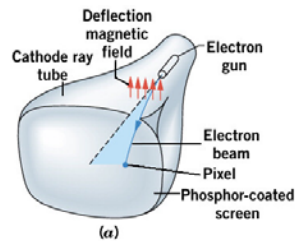
$$x = 2r = \frac{2m}{QB} \sqrt{\frac{2QU}{m}} = \frac{2}{B} \sqrt{\frac{2mU}{Q}}$$



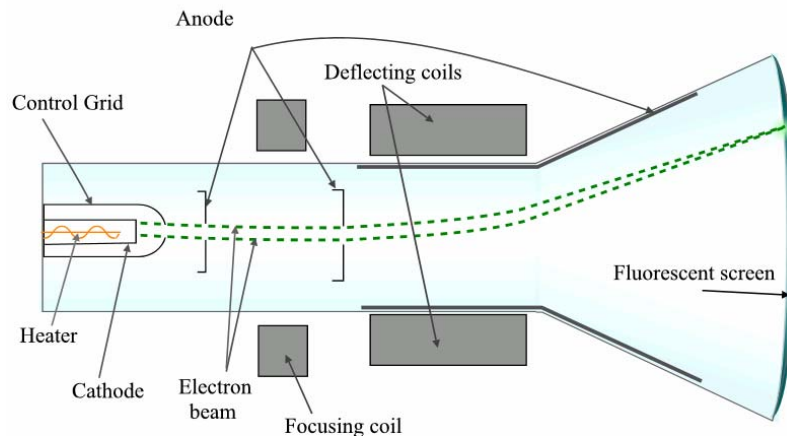
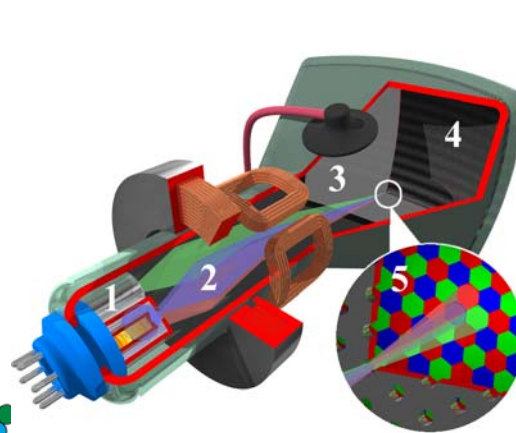
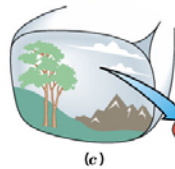
$$m = \frac{B^2 Q x^2}{8U}$$

Elektromagnetické pole

Pohyb částice v elmag.poli – televizní CRT obrazovka



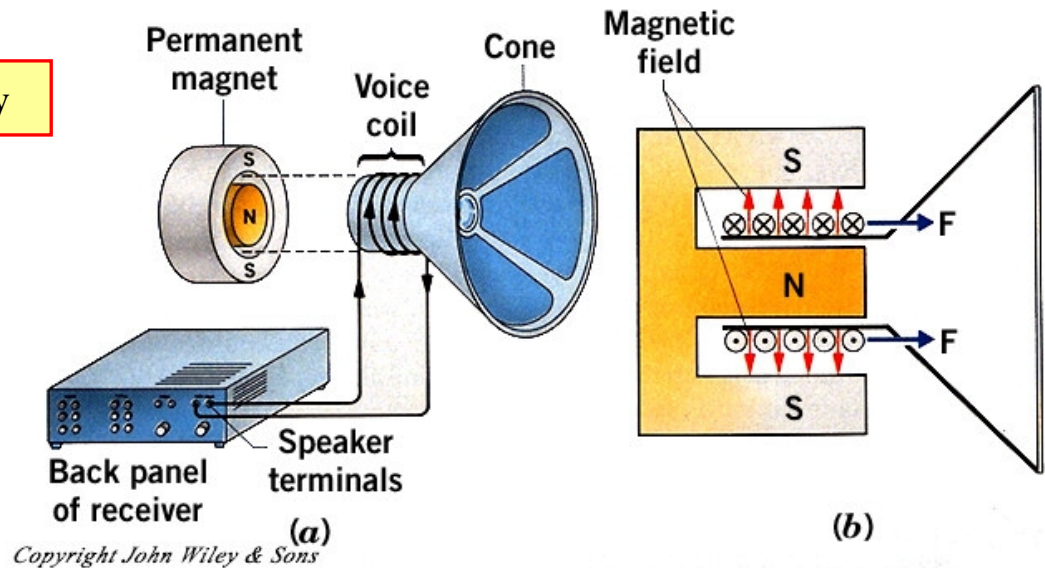
Copyright John Wiley & Sons



Elektromagnetické pole

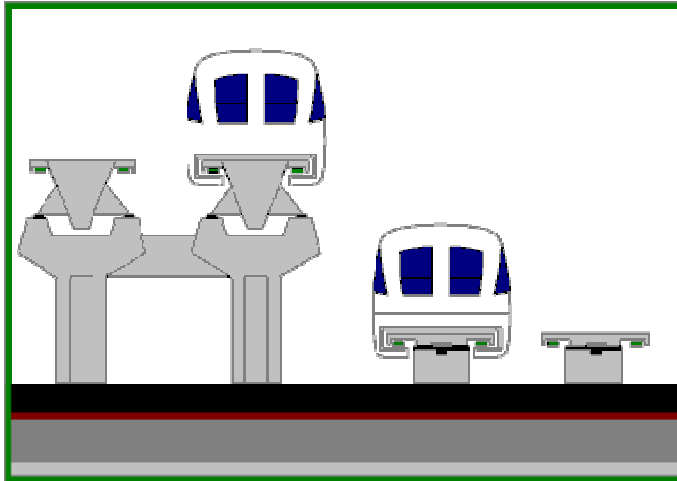
Reproduktor

elektromechanické kmity

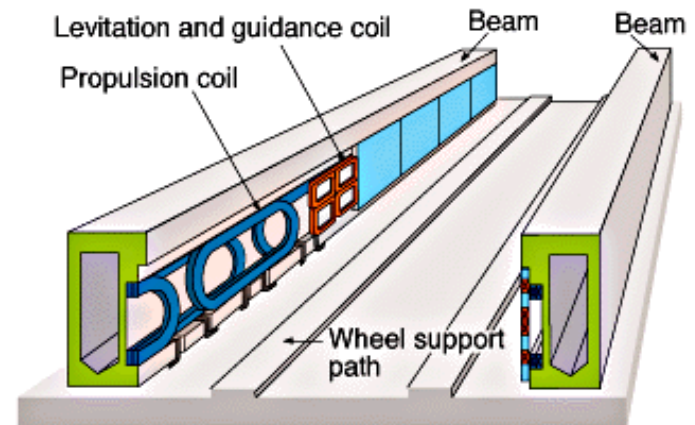
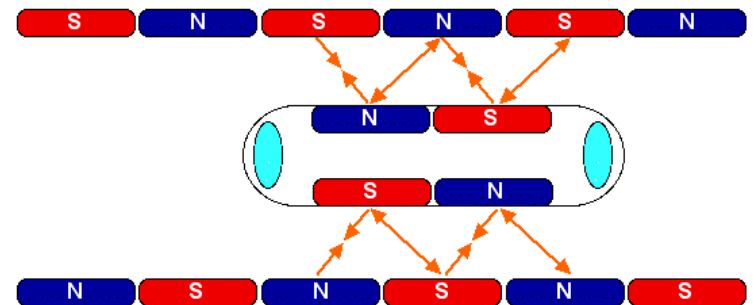
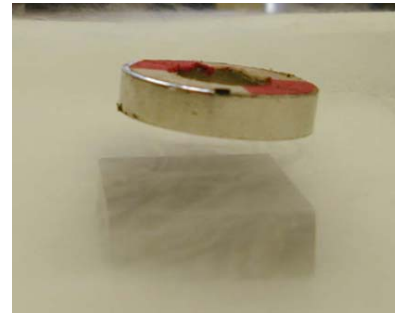
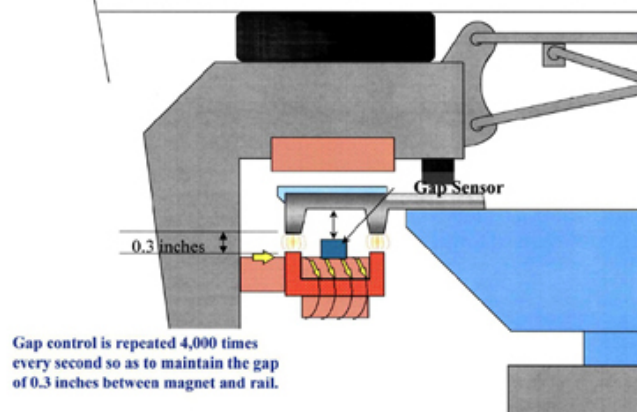


Elektromagnetické pole

Magnetická levitace



Cross Section of Module

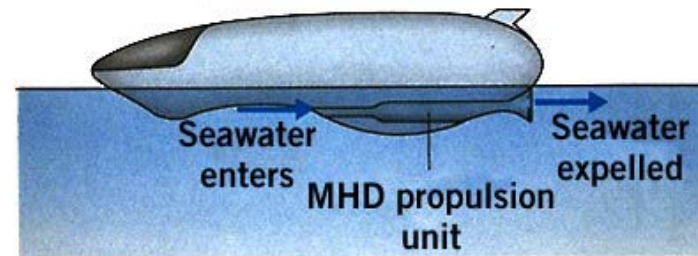
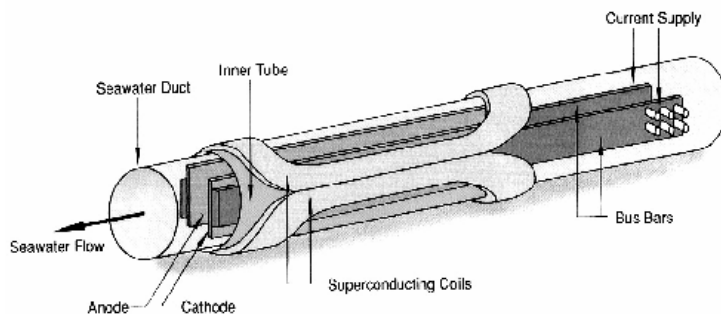


Elektromagnetické pole

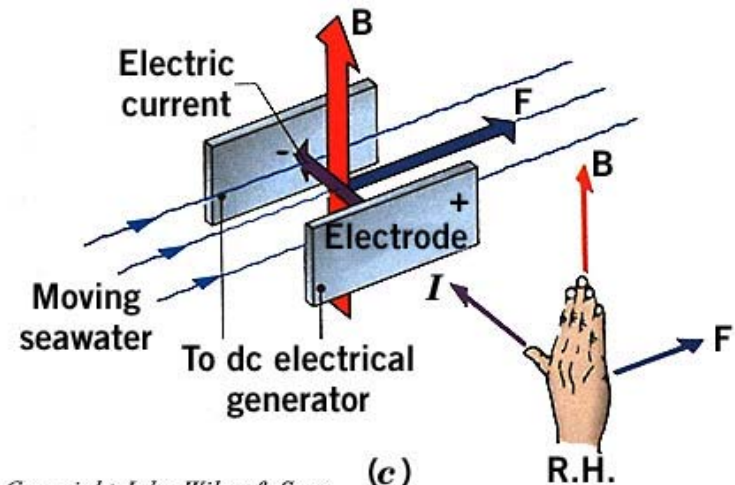
Magnetohydrodynamický pohon



magnetohydrodynamický
pohon lodi Yamato



(b)



(c)

Copyright John Wiley & Sons

$$B > 10 \text{ T}$$

Elektromagnetické pole

L-C obvod – kmitavý elektrický obvod

$$R = 0$$

$$W = \frac{1}{2}Cu^2 + \frac{1}{2}Li^2 = \frac{1}{2}CU_m^2 + \frac{1}{2}LI_m^2 = \text{konst.}$$

$$\frac{dW}{dt} = Cu \frac{du}{dt} + Li \frac{di}{dt} = 0$$

$$u = q/C \quad dQ = i dt$$

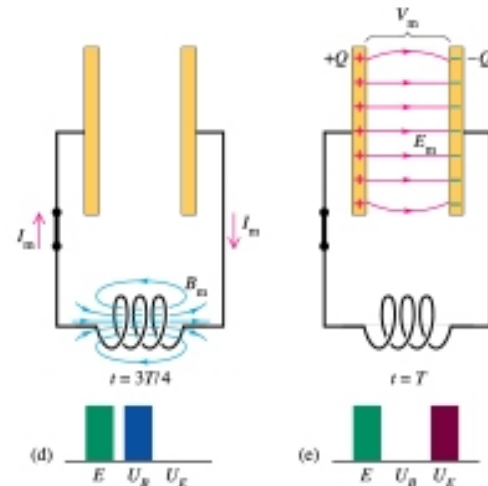
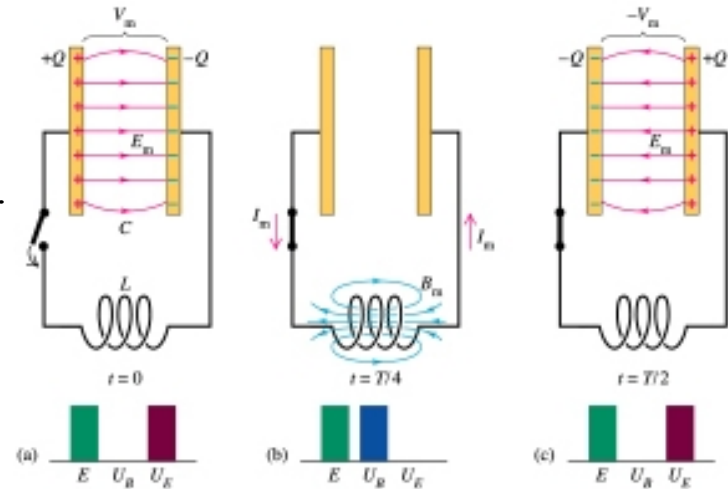
$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + \frac{q}{C} = 0$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

$$q = Q_m \cos(\omega t + \varphi)$$

$$i = -\omega Q_m \sin(\omega t + \varphi)$$

$$U = \frac{Q_m}{C} \cos(\omega t + \varphi)$$



Elektromagnetické pole

R-L obvod

