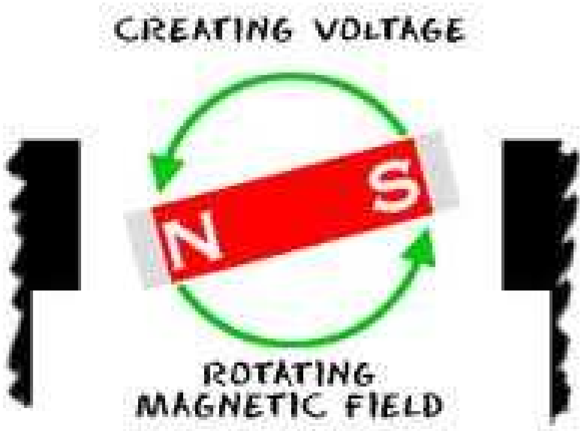
elektromagnetická indukce



statická a dynamická pole

statická pole:

elektrické

$$\oint\!\!\!\oint_S \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = 0$$

magnetické

$$\oint_C \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = \mu_0 I$$

$$\oint\!\!\!\oint_S \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = 0$$

dynamické pole:

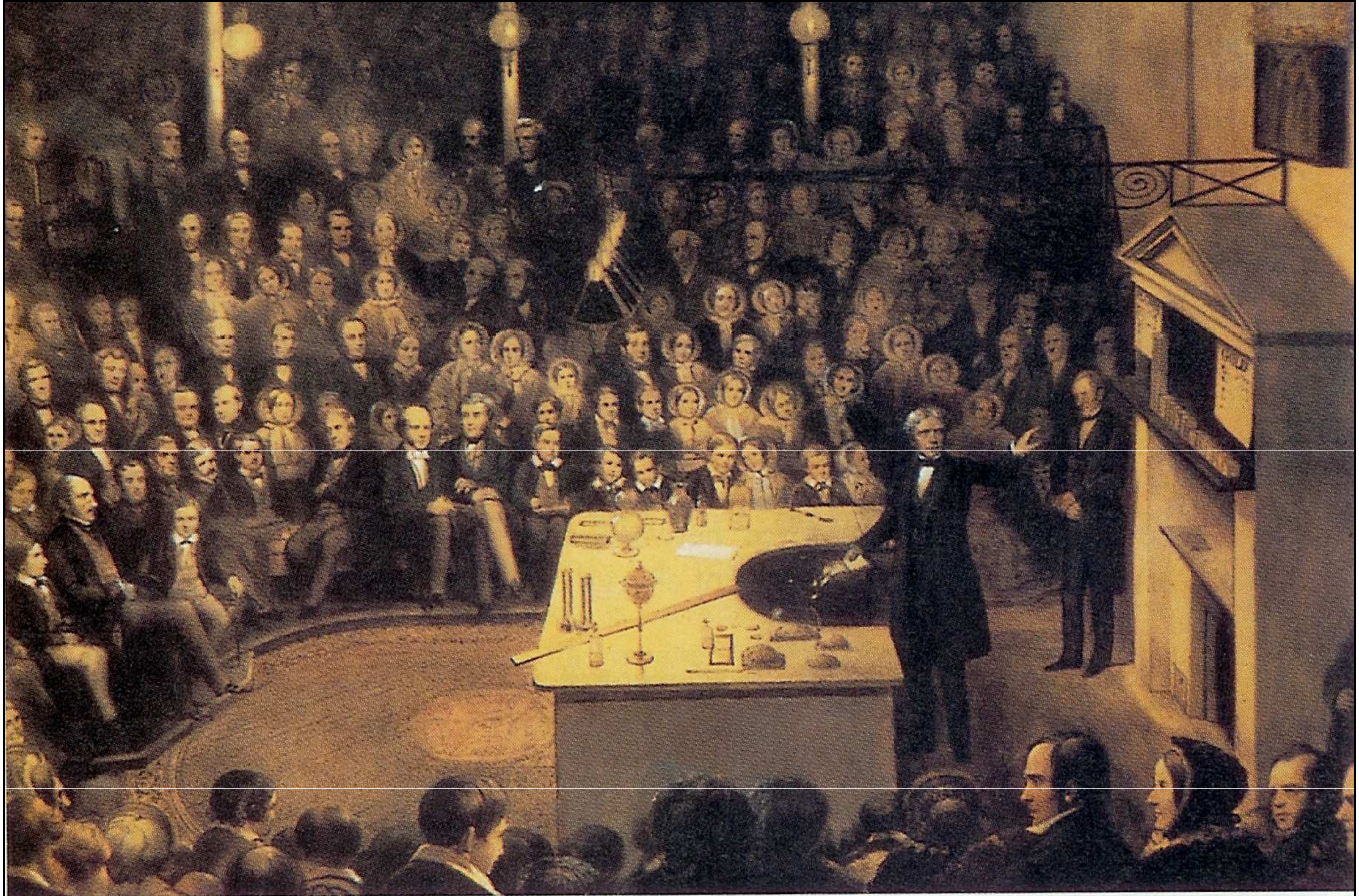
elektromagnetické

$$\oint\!\!\!\oint_S \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = 0 \;+$$

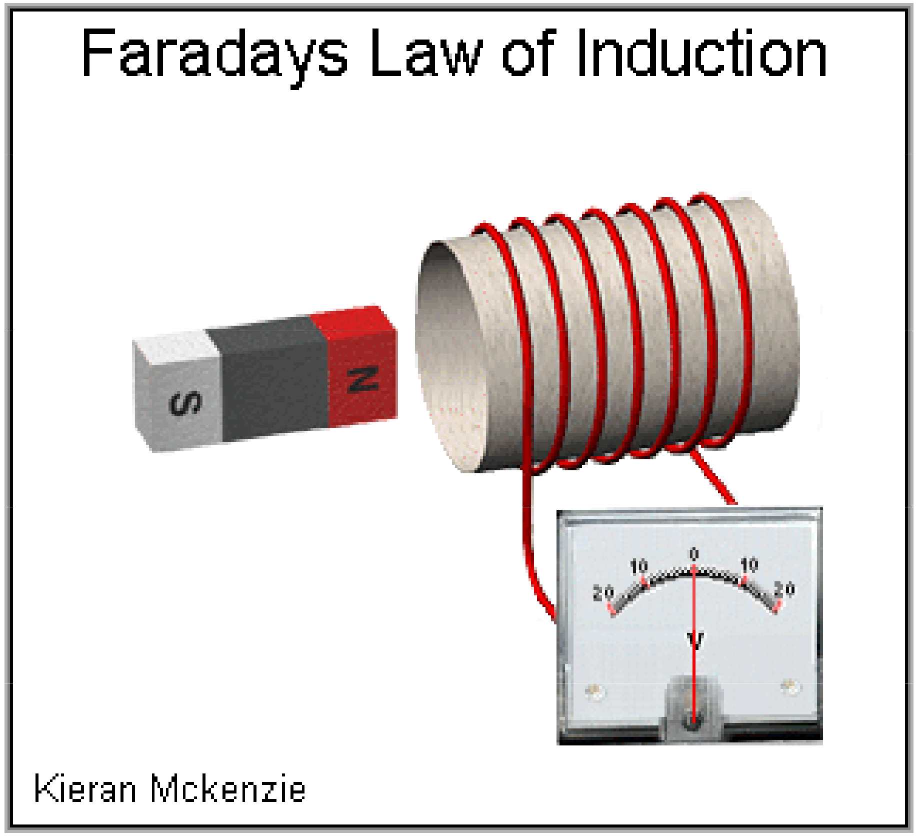
$$\oint_C \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = \mu_0 I \;+$$

$$\oint\!\!\!\oint_S \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = 0$$

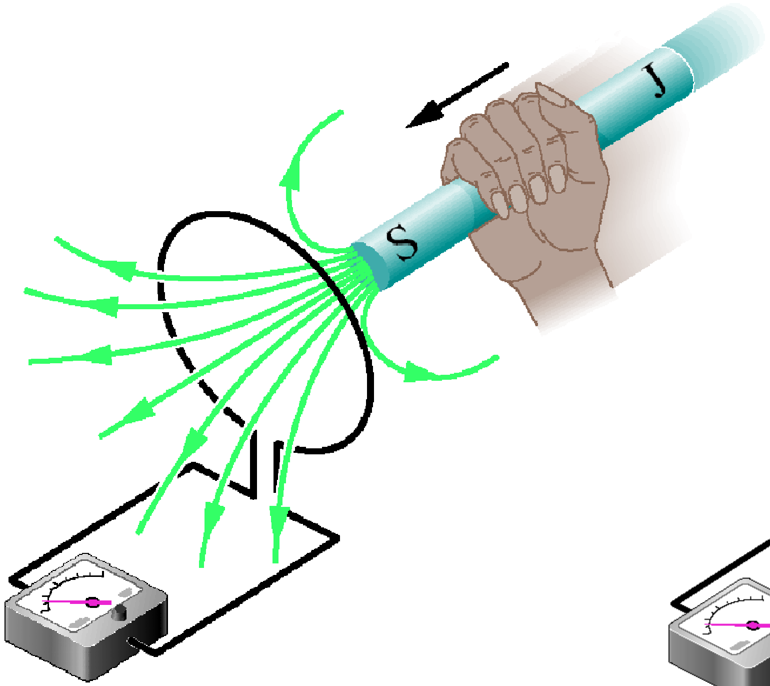


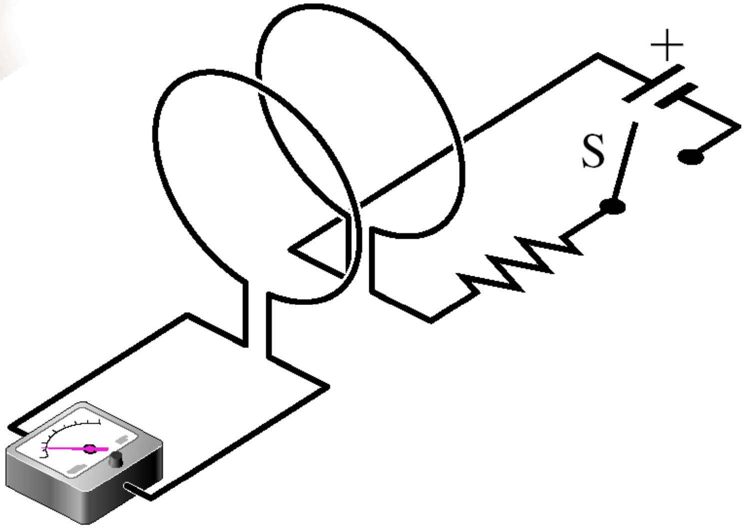
Michael Faraday delivering one of his famous public lectures in 1856. These lectures earned him great popular success.

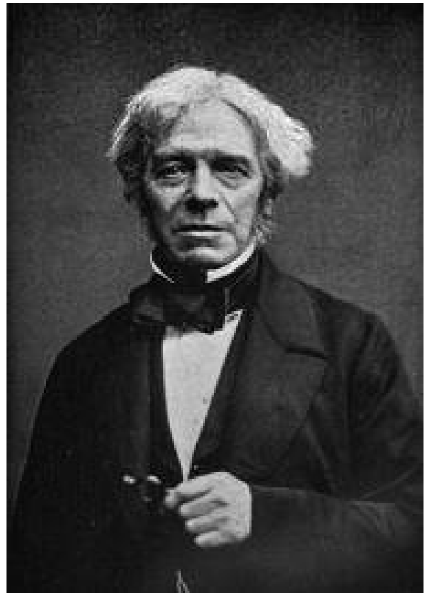
jev elektromagnetické indukce



formulace M. Faradaye



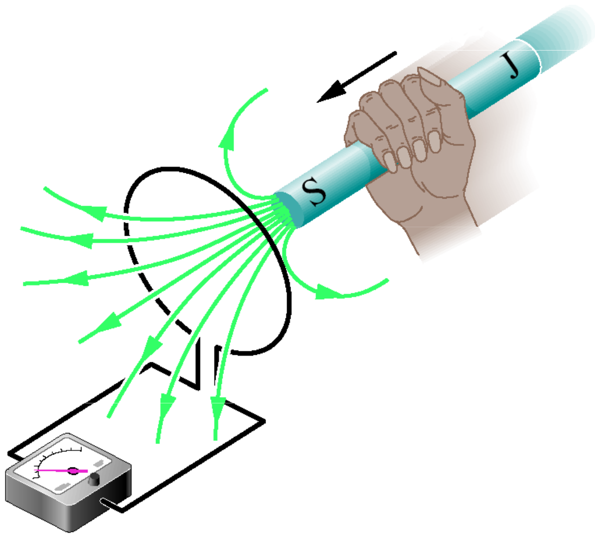




Michael Faraday:

Elektromotorické napětí (emn) se ve smyčce indukuje při změně počtu indukčních čar, které procházejí smyčkou.

Faradayův zákon elektromagnetické indukce



velikost emn ve vodivé smyčce je rovna rychlosti změny magnetického indukčního toku procházejícího touto smyčkou.

$$\boxed{\mathcal{E} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t}} \longleftarrow \Phi_B = \iint \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$$\mathcal{E} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t}$$

Magnetický indukční tok cívkou můžeme měnit různě:

- Měníme velikost B magnetického pole v cívce.
- Měníme obsah průřezu cívky, resp. té části plochy, která leží v magnetickém poli (ať už např. rozpínáním cívky nebo vysouváním cívky z magnetického pole).
- Měníme úhel mezi směrem magnetického pole ***B*** a plochou cívky (například otáčením cívky) tak, aby se měnil počet indukčních čar procházejících plochou cívky.

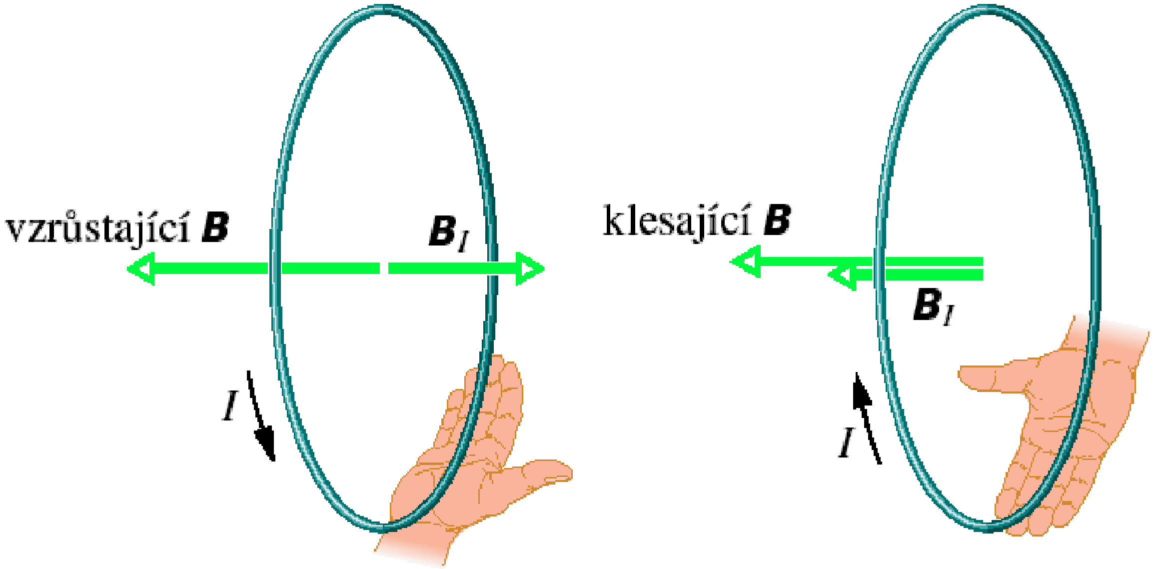
nebo tak, tak i tak <u>současně</u>

Lenzův zákon

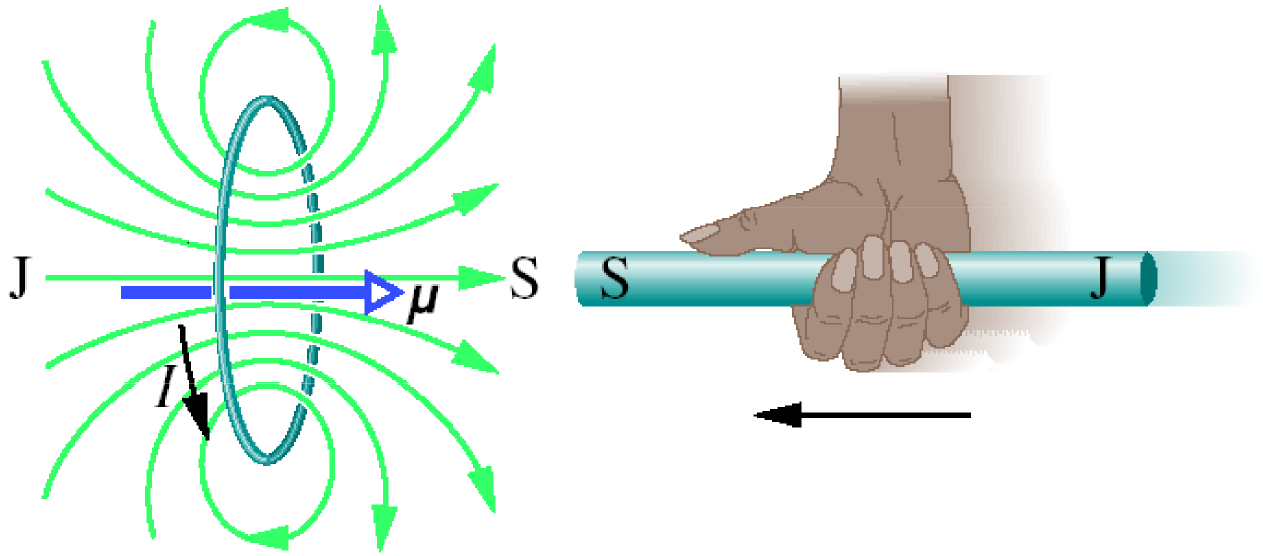
$$\mathcal{E} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t}$$

Emil Lenz
1804 - 1865

indukovaný proud (I) má takový směr, že magnetické pole (B_I) tímto proudem vzbuzené působí proti změně magnetického pole (B) , která proud indukovala

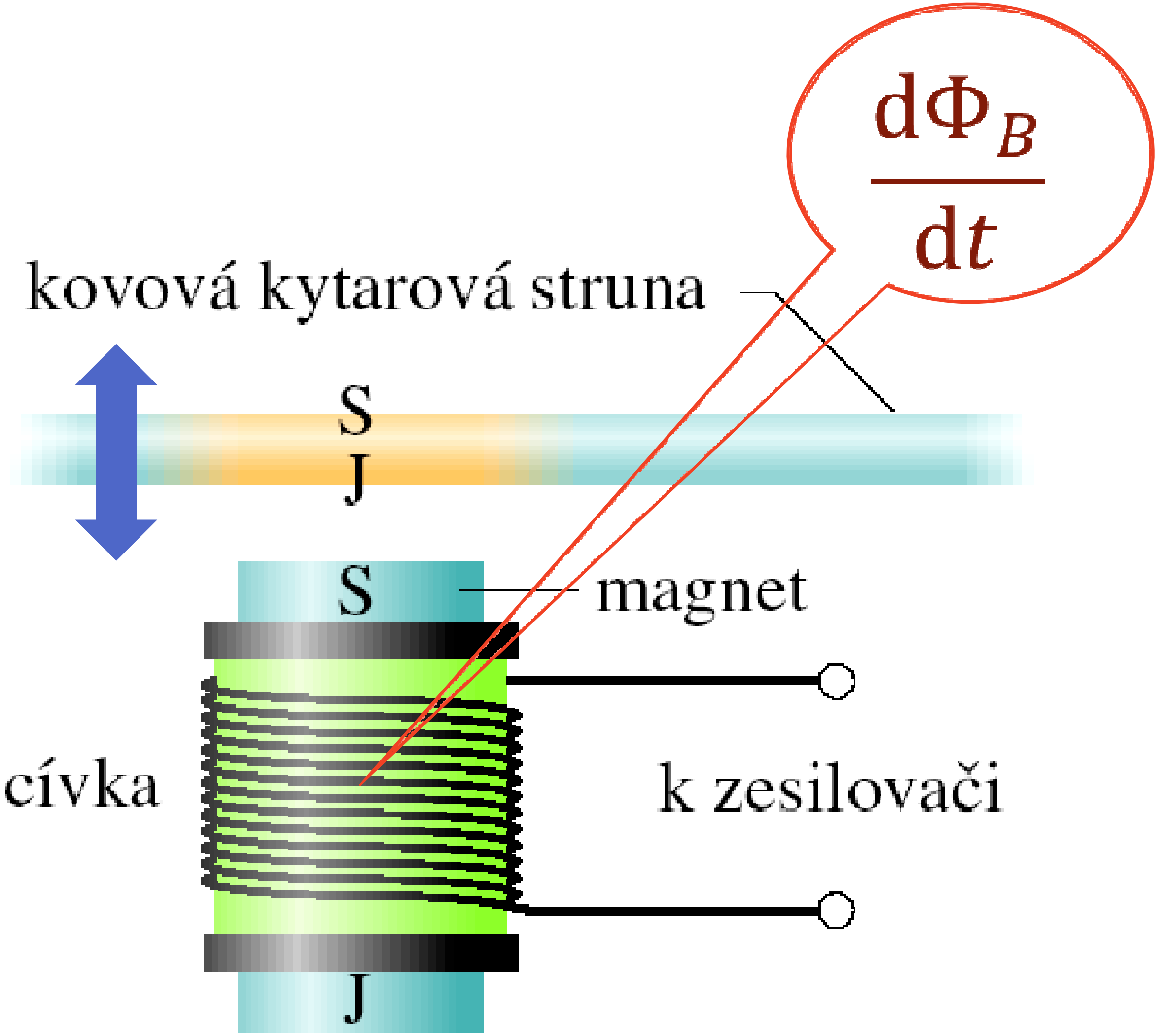


Lenzův zákon

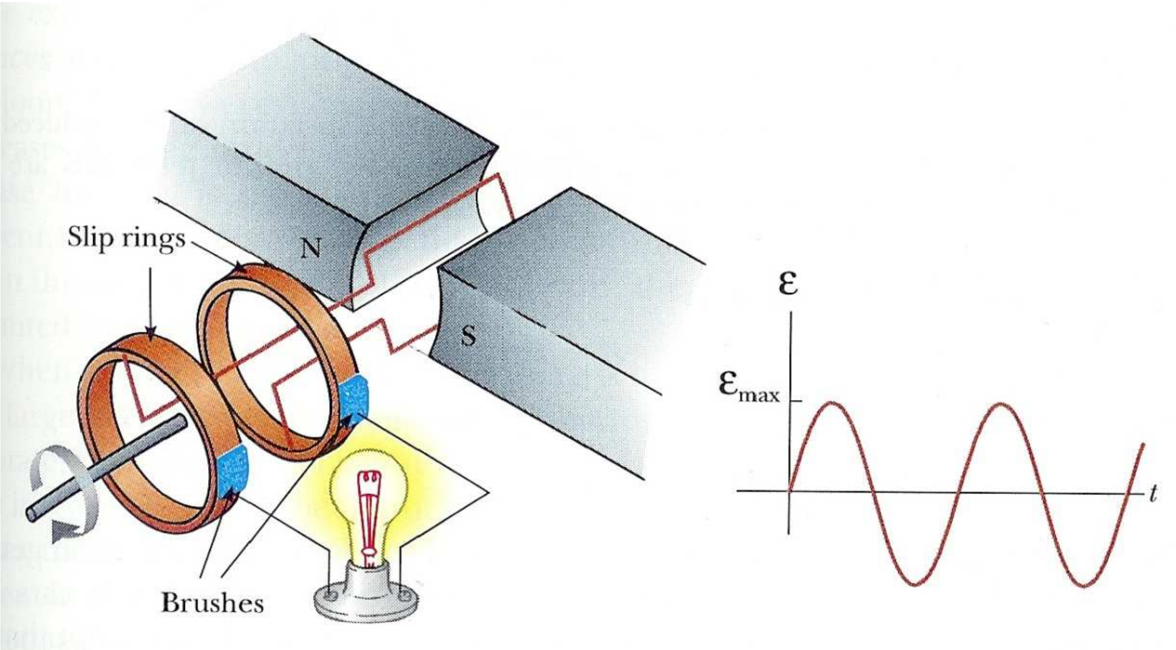


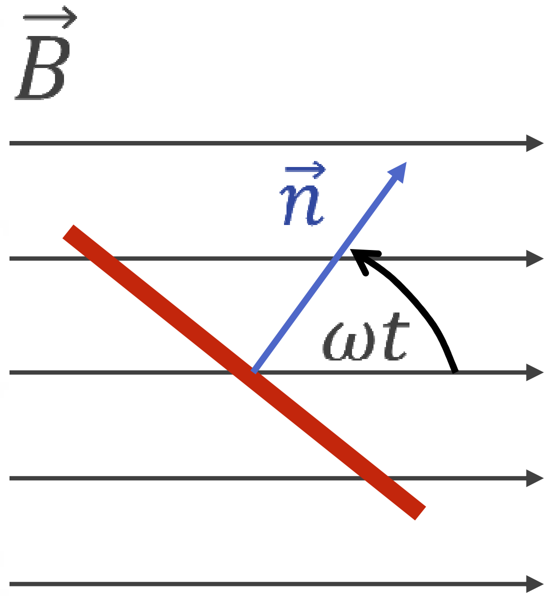
Obr. 31.4 Použití Lenzova zákona. Pohybujeme-li magnetem ke smyčce, indukuje se ve smyčce proud I proti směru otáčení hodinových ručiček; tento proud vytváří vlastní magnetické pole s magnetickým dipólovým momentem $\boldsymbol{\mu}$ takovým, že brání přibližování magnetu.

aplikace: elektrická kytara



aplikace: výroba elektřiny





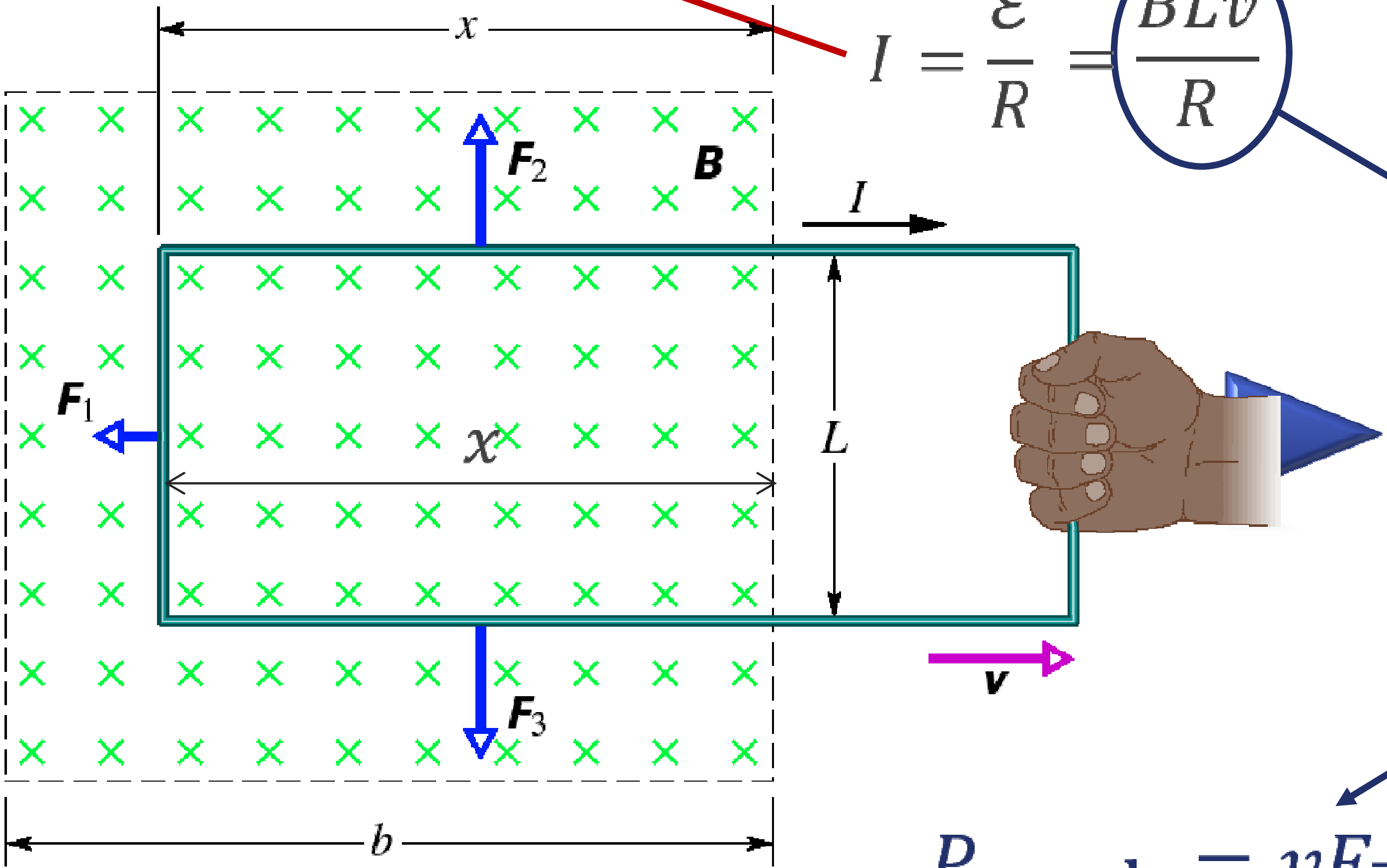
$$\mathcal{E} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(BS\cos\omega t) = BS\omega\sin\omega t$$

indukce a přenosy energie

$$P_{\text{tep}} = I^2 R = \frac{(BLv)^2}{R}$$

$$\mathcal{E} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(BLx) = BLv$$

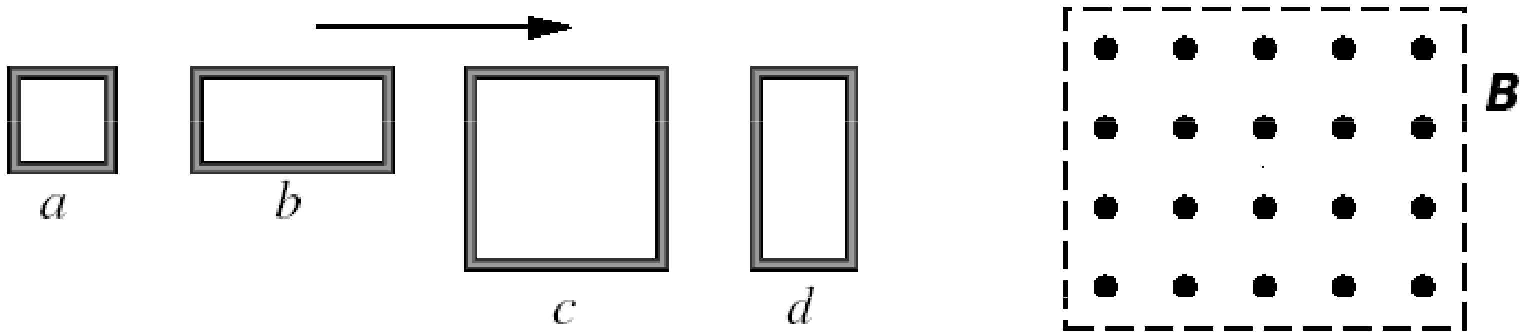
$$I = \frac{\mathcal{E}}{R} = \frac{BLv}{R}$$



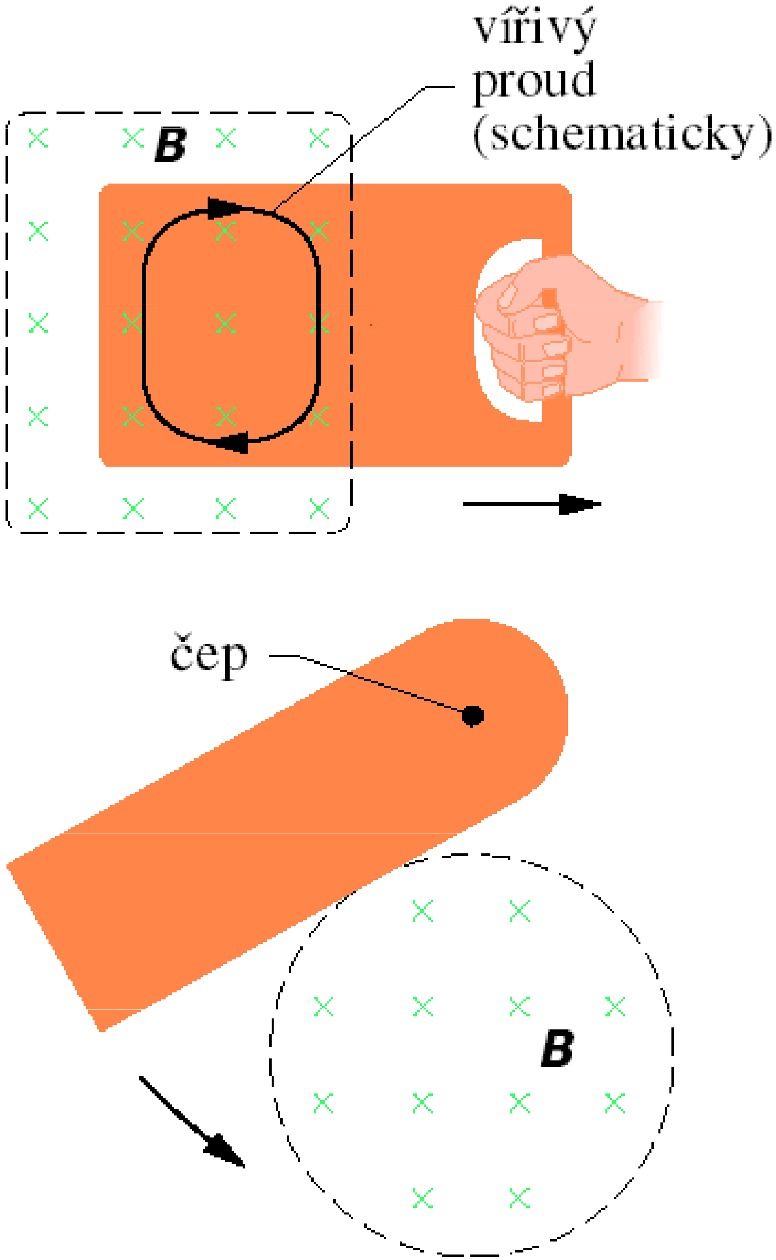
$$F = ILB = \frac{B^2L^2v}{R}$$

$$P_{\text{mech}} = vF = \frac{(BLv)^2}{R}$$

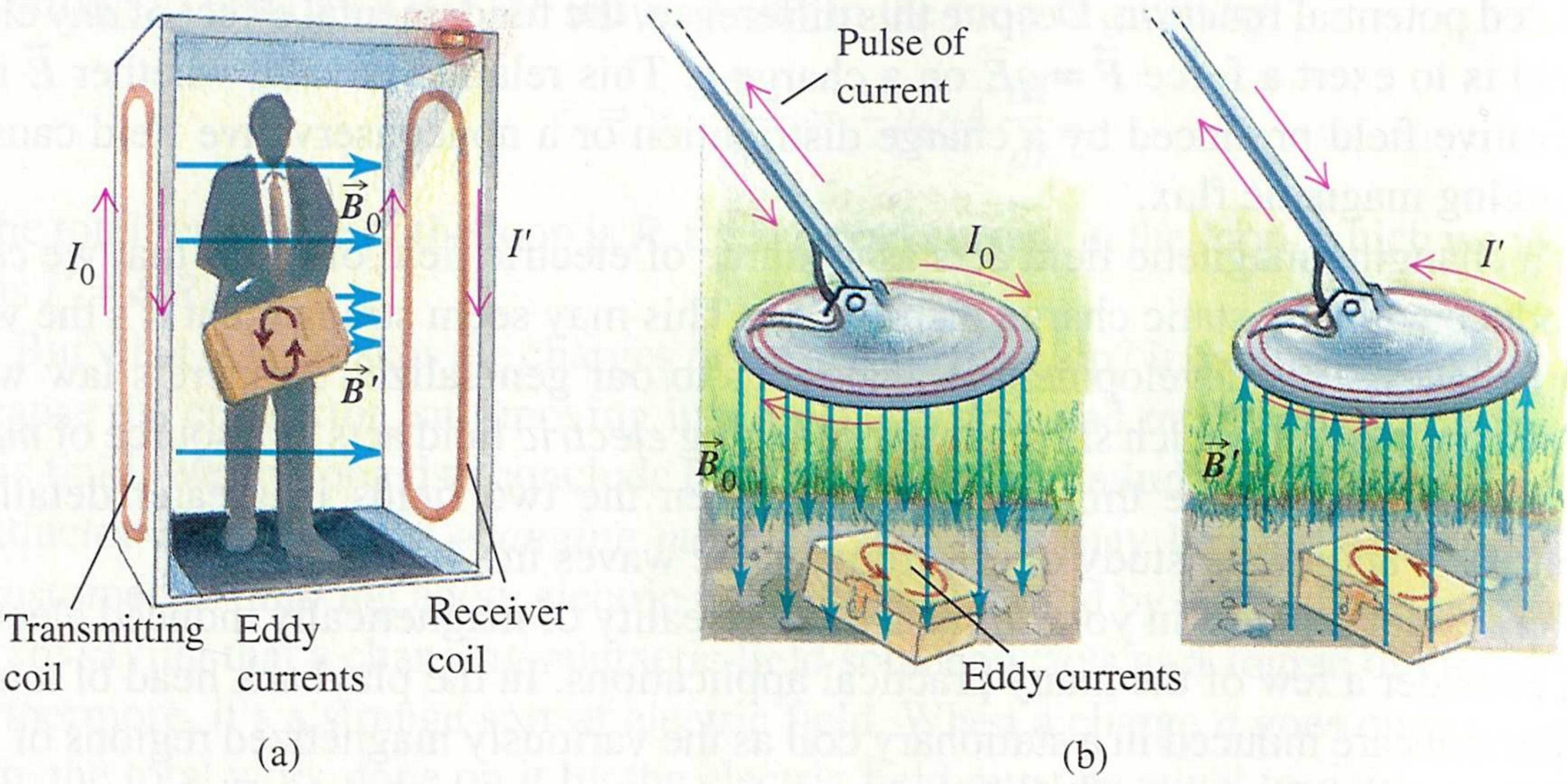
KONTROLA 3: Obrázek ukazuje čtyři vodivé smyčky s délkami stran L nebo $2L$. Všechny smyčky budou vnikat stejnou stálou rychlostí do oblasti homogenního magnetického pole $\boldsymbol{B}$ (vystupujícího kolmo ze stránky). Seřaďte tyto čtyři smyčky podle velikosti emn, indukovaného během vstupu do pole, největší uveďte jako první.



vířivé proudy

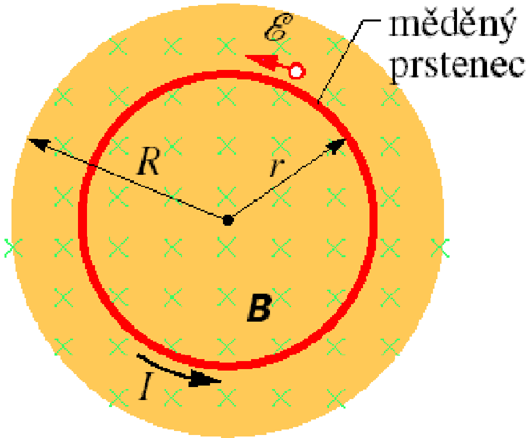


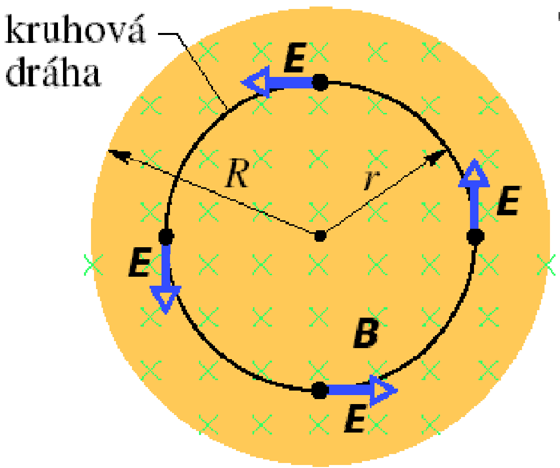
vířivé proudy: aplikace

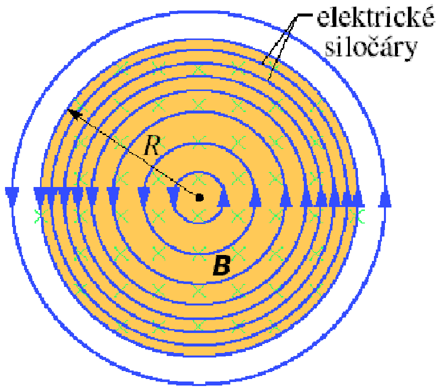


30–20 (a) A metal detector at an airport security checkpoint generates an alternating magnetic field $\vec{B}_0$. This induces eddy currents in a conducting object carried through the detector. The eddy currents in turn produce an alternating magnetic field $\vec{B}'$, and this field induces a current in the detector's receiver coil. (b) Portable metal detectors work on the same principle.

indukované elektrické pole







- na elektrony v klidu působí síla – elektrická
- měnící se magnetické pole vytváří pole elektrické
- vzhledem k symetrii musí mít směr tečny ke kružnici – (radiální složka nulová – Gaussův zákon)
- práce při jednom oběhu náboje Q_0:

$$W = Q_0 \oint_C \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = Q_0 \mathcal{E}$$

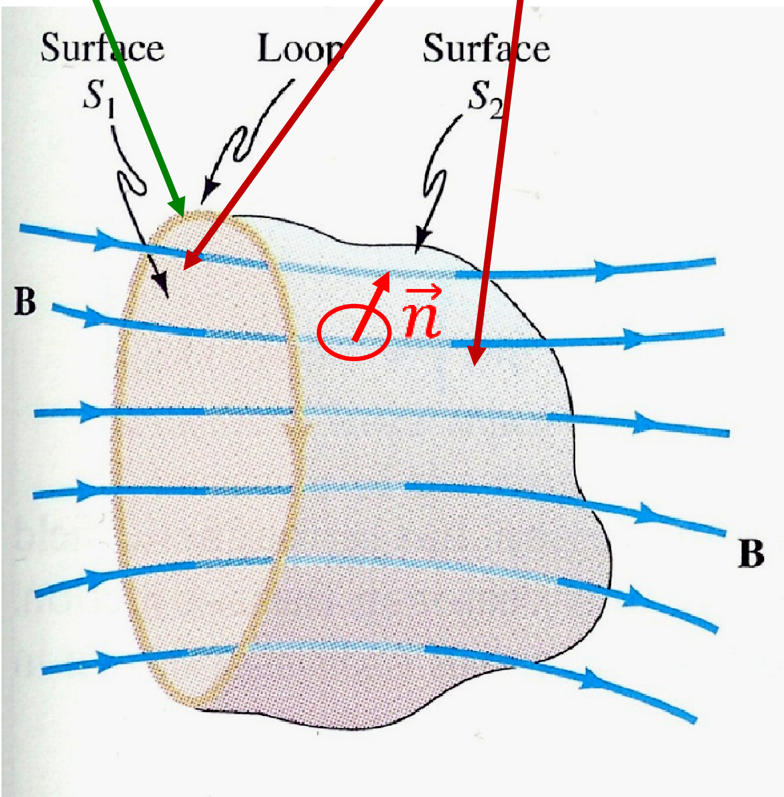
$$\mathcal{E} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t}$$

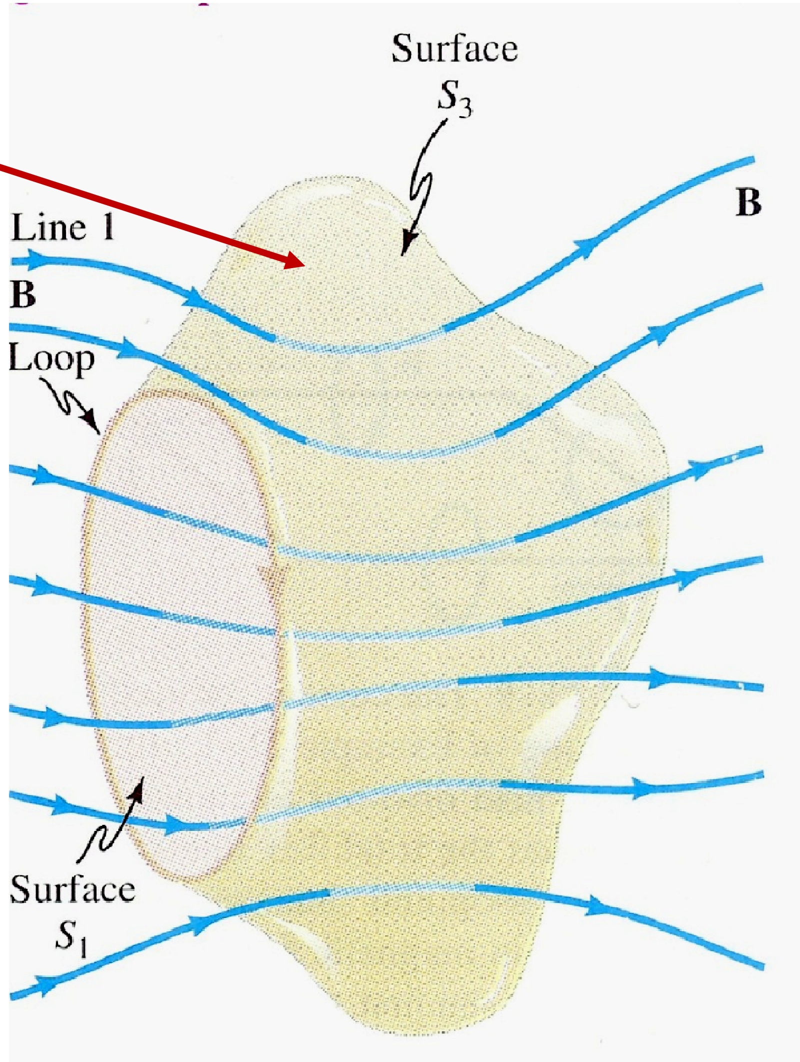
$$\oint_C \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint_{S(C)} \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S} \neq 0$$

nelze zavést elektrický potenciál!

orientace křivky a plochy

$$\oint_{C} \vec{E}\cdot \mathrm{d}\vec{s} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\iint_{S(C)} \vec{B}\cdot \mathrm{d}\vec{S}$$





betatron

elektrony   o energii 100 MeV (v = 0.999987 c)

Magnetické pole

- udržuje elektron na kruhové dráze
- proměnné v čase indukuje elektrické pole, které elektron urychluje

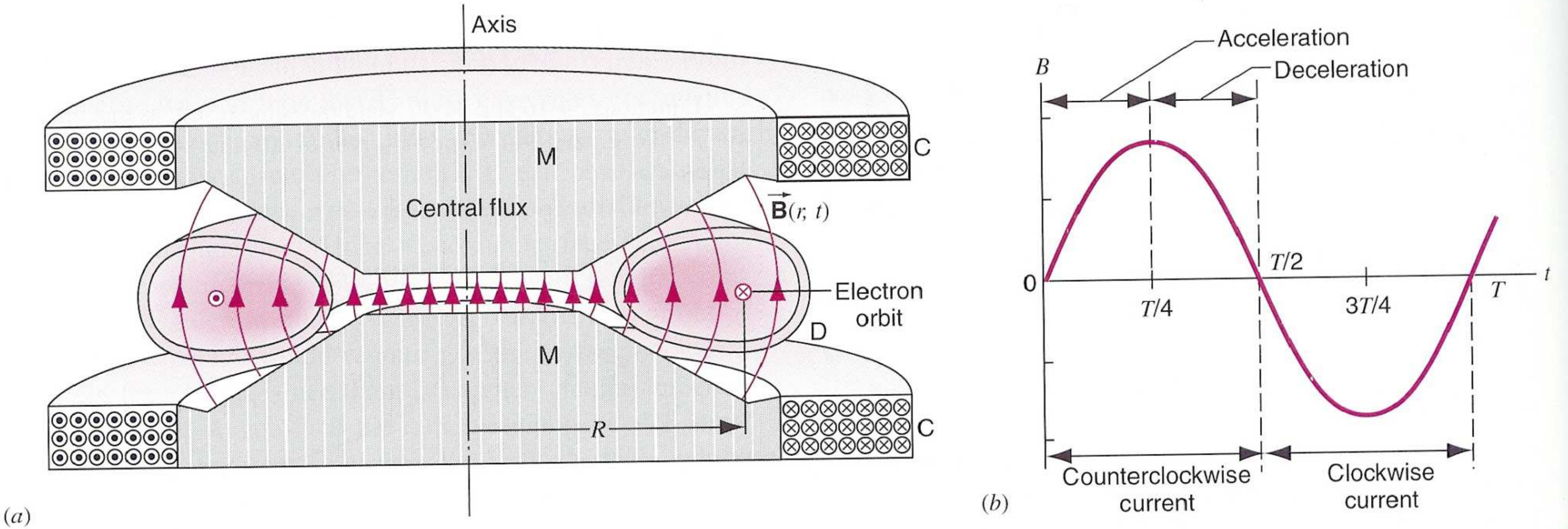
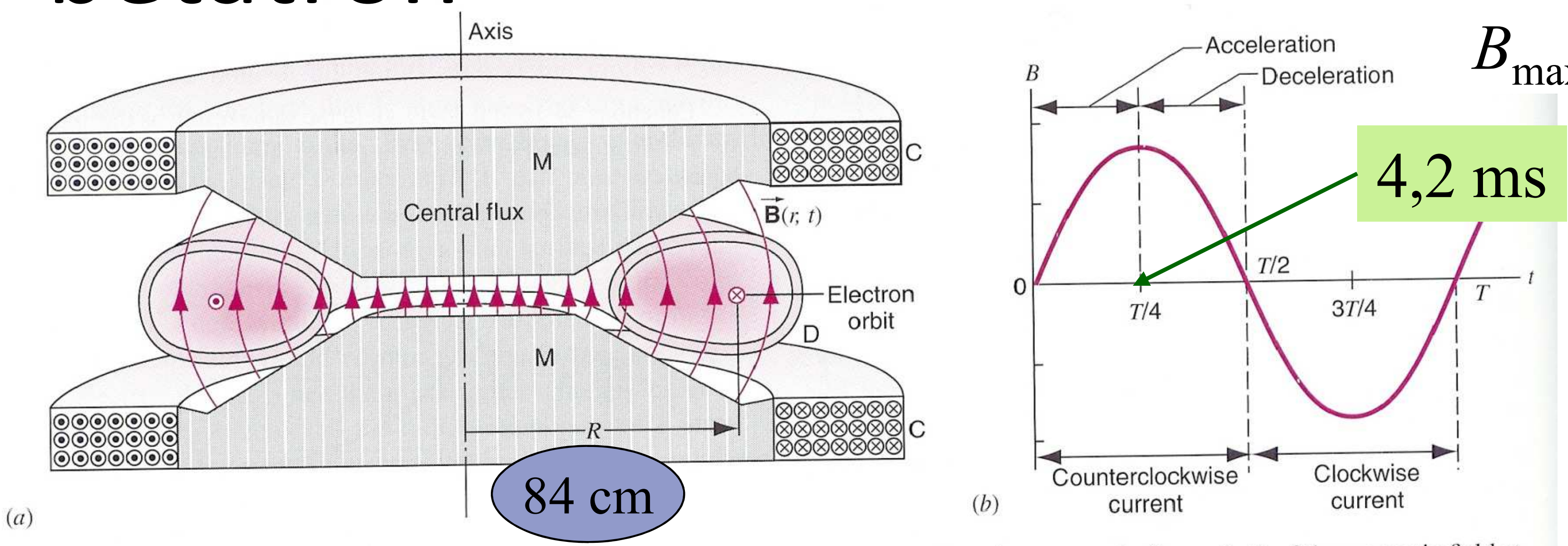


FIGURE 34-18. (a) Cross section of a betatron, showing the orbit of the accelerating electrons and a "snapshot" of the magnetic field at a certain time during the cycle. The magnetic field is produced by the coils C and shaped by the magnetic pole pieces M. Electrons circulate within the evacuated, doughnut-shaped ceramic tube D. Electrons orbit perpendicular to the plane of the figure, entering at right and leaving at left. (b) The variation with time of the betatron magnetic field during one cycle.

betatron



$B_{max} = 0.8$ T

FIGURE 34-18. (*a*) Cross section of a betatron, showing the orbit of the accelerating electrons and a "snapshot" of the magnetic field at a certain time during the cycle. The magnetic field is produced by the coils C and shaped by the magnetic pole pieces M. Electrons circulate within the evacuated, doughnut-shaped ceramic tube D. Electrons orbit perpendicular to the plane of the figure, entering at right and leaving at left. (*b*) The variation with time of the betatron magnetic field during one cycle.

indukované napětí po jednom oběhu

$$\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t} = \frac{(0{,}8)(\pi)(0{,}84)^2\ \mathrm{Wb}}{4{,}2\,.\,10^{-3}\ \mathrm{s}} = 430\ \mathrm{V}$$

výsledná kinetická energie elektronu

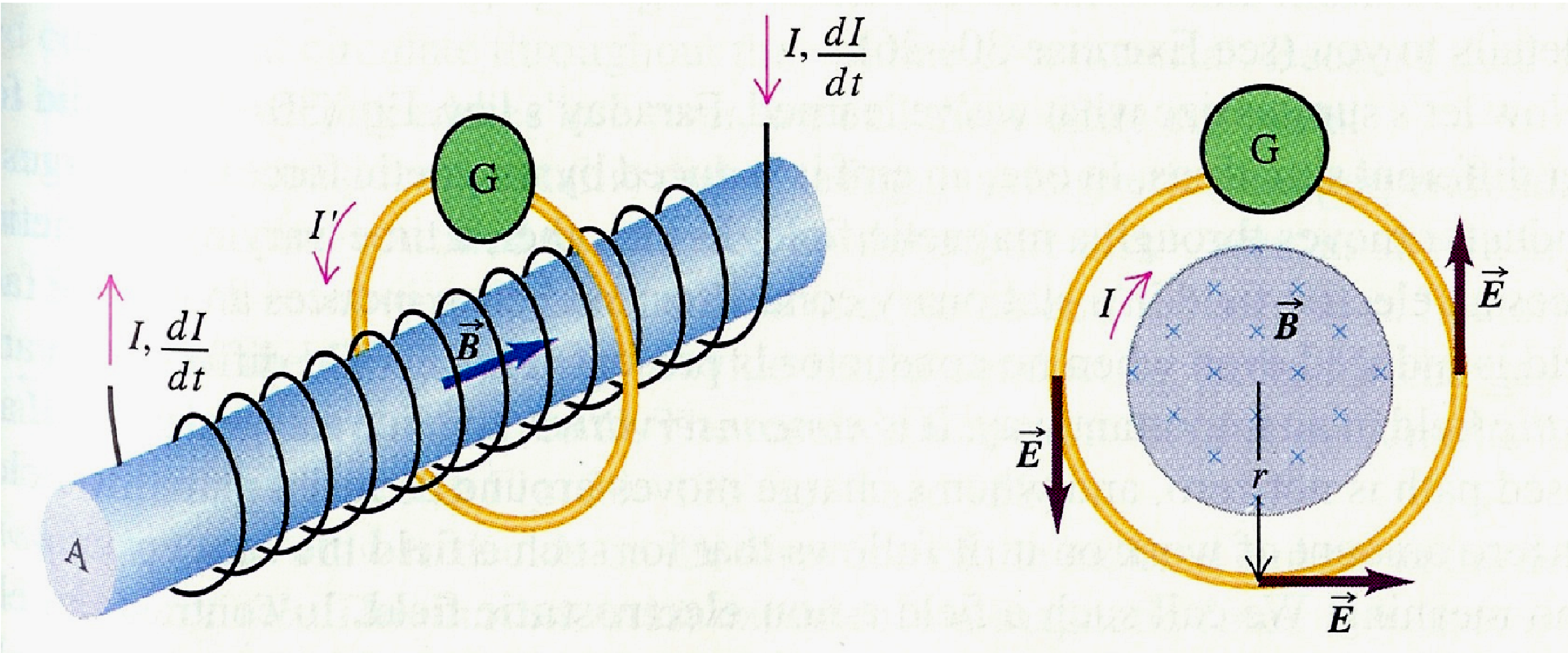
100 MeV = (430 eV).(230 000 oběhů)

průměrná rychlost elektronu

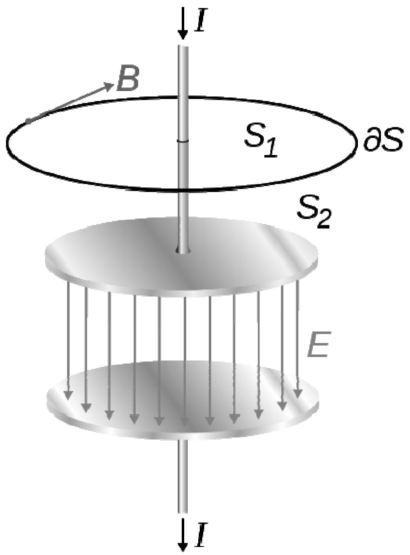
$$\bar{v} = \frac{1200\ \mathrm{km}}{4{,}2\ \mathrm{ms}} = 2{,}86 \cdot 10^8\ \mathrm{m/s}$$

indukce vně magnetického pole

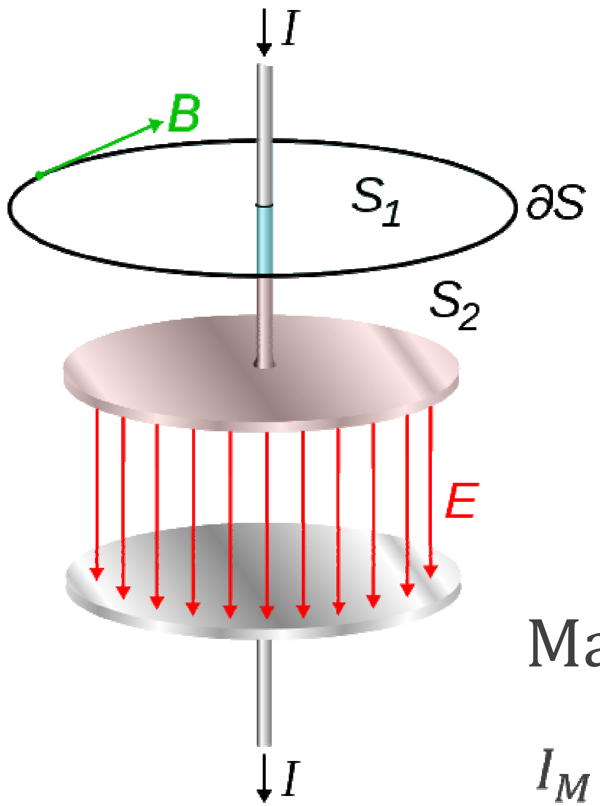
$$\oint_C \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint_S \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$



magnetoelektrická indukce a Maxwellovy rovnice



Ampérův-Maxwellův zákon



Ampérův zákon:

$$\oint_{\partial S} \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = \mu_0 I = \mu_0 \iint_{S_1} \vec{J} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$$\iint_{S_2} \vec{J} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = 0$$

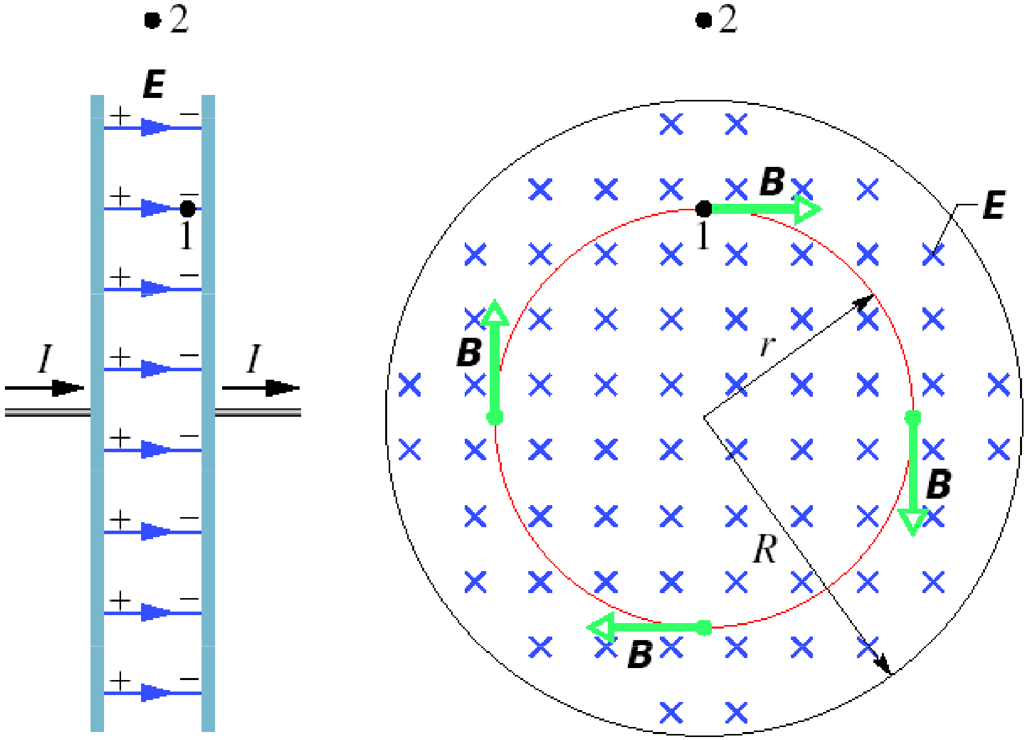
Maxwellův (posuvný) proud:

$$I_M = I = \frac{\mathrm{d}Q}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}(\varepsilon_0 S E) = \varepsilon_0 \frac{\mathrm{d}\Phi_E}{\mathrm{d}t} = \varepsilon_0 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

Ampérův-Maxwellův zákon:

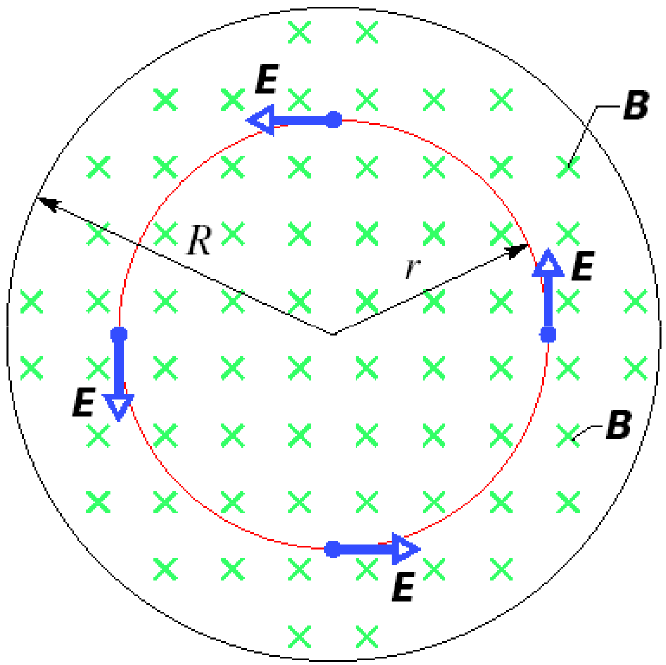
$$\oint_{\partial S} \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = \mu_0 \iint_S \left(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\mathrm{d}\vec{E}}{\mathrm{d}t}\right) \cdot \mathrm{d}\vec{S} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint_S \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$\vec{J}_M$ c^{-2} I_M



Ampérův-Maxwellův zákon

$$\frac{1}{\mu_0}\oint \boldsymbol{B}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s} = \varepsilon_0 \frac{\mathrm{d}\Phi_E}{\mathrm{d}t} + I_\mathrm{c}$$



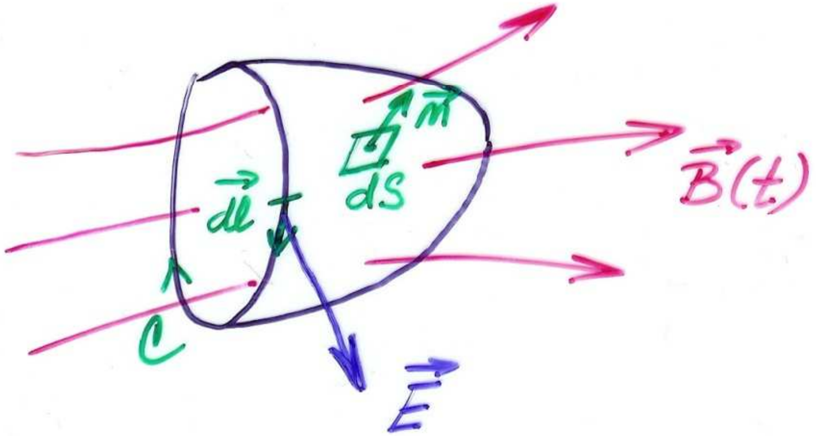
Faradayův zákon

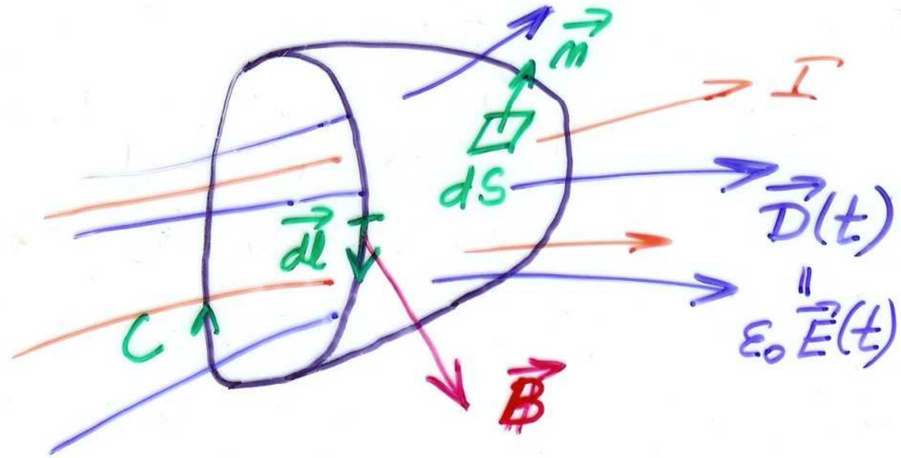
$$\oint \boldsymbol{E}\cdot \mathrm{d}\boldsymbol{s} = -\frac{\mathrm{d}\Phi_B}{\mathrm{d}t}$$

ELEKTROMAGNETICKÁ | MAGNETOELEKTRICKÁ

INDUKCE

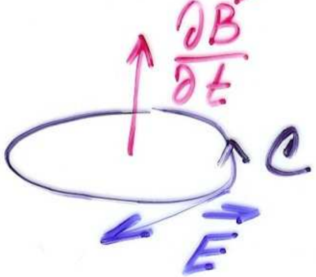
(FARADAY)	(AMPÈR – MAXWELL)
$\vec{B}(t) \rightarrow \vec{E}(t)$	$\vec{E}(t) \rightarrow \vec{B}(t)$

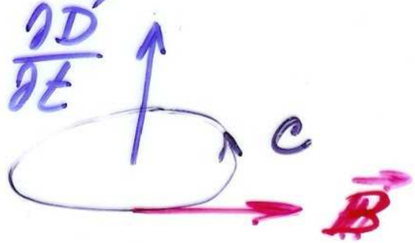




$$\oint_C \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\iint_{S(C)} \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

$$\frac{1}{\mu_0}\oint_C \vec{B}\cdot d\vec{l} = \iint_{S(C)} \vec{j}\cdot d\vec{S} + \frac{d}{dt}\iint_{S(C)} \vec{D}\cdot d\vec{S}$$





$$\oint_C \vec{E}\cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt}\iint_{S(C)} \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

$$\frac{1}{\mu_0}\oint_C \vec{B}\cdot d\vec{l} = \iint_{S(C)} \vec{j}\cdot d\vec{S} + \frac{d}{dt}\iint_{S(C)} \vec{D}\cdot d\vec{S}$$

$C \to$ bod

$\oint_C \ldots \to 0$

$$\iiint \rho \, \mathrm{d}V = Q$$

$$0 = -\frac{d}{dt}\oiint \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

$$\mathrm{konst} = \oiint \vec{B}\cdot d\vec{S}$$

$$0 = \oiint \vec{j}\cdot d\vec{S} + \frac{d}{dt}\oiint \vec{D}\cdot d\vec{S}$$

$$0 = \oiint \vec{j}\cdot d\vec{S} + \frac{dQ}{dt}$$

$$0 = \mathrm{div}\,\vec{j} + \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

rovnice kontinuity

(zákon zach. el. náboje)

Maxwellovy rovnice

$$\oiint_S \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = \frac{Q}{\varepsilon_0}$$

Gaussův zákon

$$\oint_{\partial S} \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint_S \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

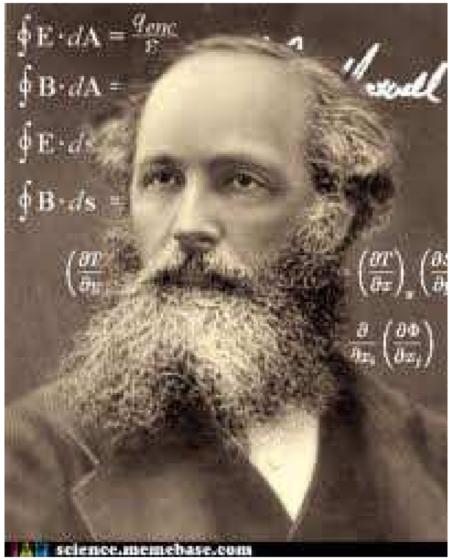
Ampérův-Maxwellův zákon

$$\oiint_S \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S} = 0$$

Gaussův zákon pro magnetické pole

$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint_S \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

Faradayův zákon



James Clerk Maxwell
1831 - 1879

kvazistacionární aproximace

$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint_S \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$$\oint_{\partial S} \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 \varepsilon_0 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint_S \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

(elektromagnetické pole)

$$\vec{E}(t) \quad \vec{B}(t)$$

$$\oint_{\partial S} \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint_S \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$$\oint_{\partial S} \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = \mu_0 I + \cancel{\mu_0 \varepsilon_0 \frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint_S \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{S}}$$

(kvazistacionární pole)

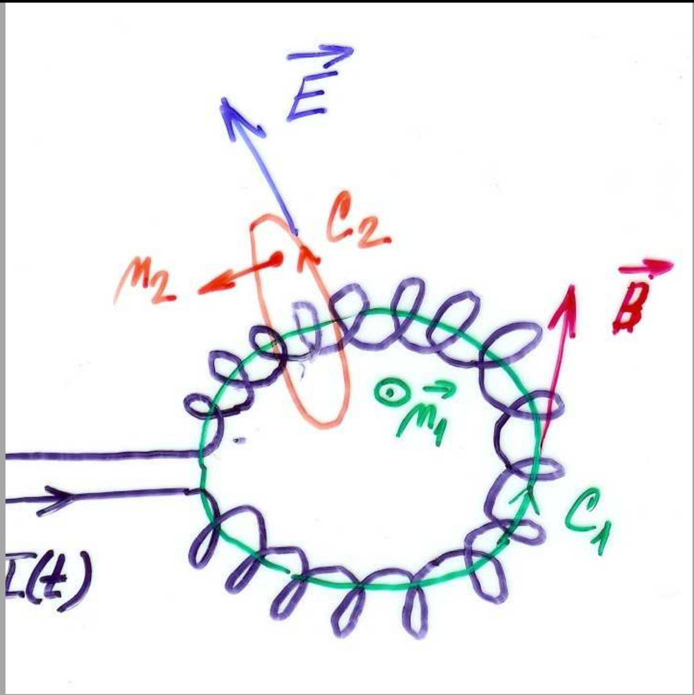
$$\vec{E}(t) \quad \vec{B}(t)$$

podmínka kvazistacionarity:

$$\boxed{d \ll cT}$$

rozměr obvodu → d; T ← perioda změn polí

Kvazistacionární pole



$$\boxed{\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}_1 + \dots \\ \vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_1 + \dots}$$

$$I(t) = I_m \sin \omega t$$

$$\oint_{C_1} \vec{B}_0 \cdot \mathrm{d}\vec{s} = \mu_0 \sum I(t)$$

$$2\pi R B_0 = \mu_0 N |I(t)|$$

$$\frac{\mu_0 N |I(t)|}{2\pi R}$$

$$\oint_{C_2} \vec{E}_0 \cdot \mathrm{d}\vec{s} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint_{S(C_2)} \vec{B}_0 \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

$$2\pi r E_0 = \dot{B}_0 (\pi\rho^2)$$

$$\frac{1}{2\pi r}\frac{\mu_0 N |\dot{I}(t)|}{2\pi R}(\pi\rho^2)$$

$$\oint_{C_1} \vec{B}_1 \cdot \mathrm{d}\vec{s} = \frac{1}{c^2}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint_{S(C_1)} \vec{E}_0 \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$

...

$$\boxed{B_1 \le \frac{\omega^2}{c^2}(R\rho) B_0}$$

typický rozměr obvodu ... d^2

Kvazistacionární pole

$$\boxed{B_1 \leq \frac{\omega^2}{c^2} d^2 B_0}$$

$$B_1 << B_0 \quad \Leftrightarrow \quad d << \frac{c}{\omega} \approx cT = \lambda$$

$$\left(\lambda = cT = \frac{2\pi c}{\omega} \right)$$

$$\oint_C \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = \mu_0 \sum I(t) + \cancel{\mu_0 I_M}$$

$$\oint_C \vec{E} \cdot \mathrm{d}\vec{s} = -\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t} \iint_{S(C)} \vec{B} \cdot \mathrm{d}\vec{S}$$