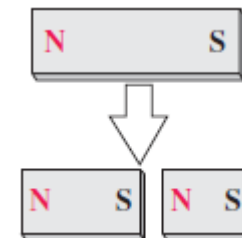


MAGNETIZAM

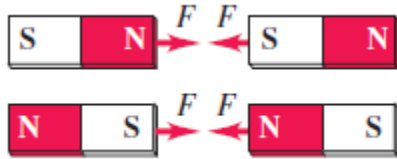
MAGNETSKO POLJE

- ▶ **Magneti** - materijali koji privlače predmete od željeza, nikla, kobalta i njihovih legura.
- ▶ **Prirodni magnet** - željezna ruda (magnetit, Fe_3O_4)
- ▶ **Umjetni magneti:**
 - ▶ **Permanentni magneti** - izrađuju se od posebnih željeznih legura i trajno zadržavaju magnetska svojstva.
 - ▶ **Elektromagneti** - zavojnice s jezgrom od meka željeza - magneti samo dok teče struja kroz zavojnicu.
- ▶ **Magneti imaju dva pola: sjeverni N i južni S**
 - ▶ Dijeljenjem magneta dobijemo dva, od kojih svaki ima južni i sjeverni pol
 - magnetski se polovi ne mogu razdvojiti!!
 - **NE POSTOJI MAGNETSKI MONOPOL!**



Magnetski polovi

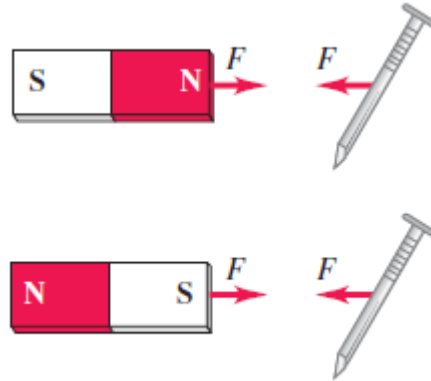
- Magneti imaju dva pola: sjeverni N i južni S



Raznoimeni polovi se privlače

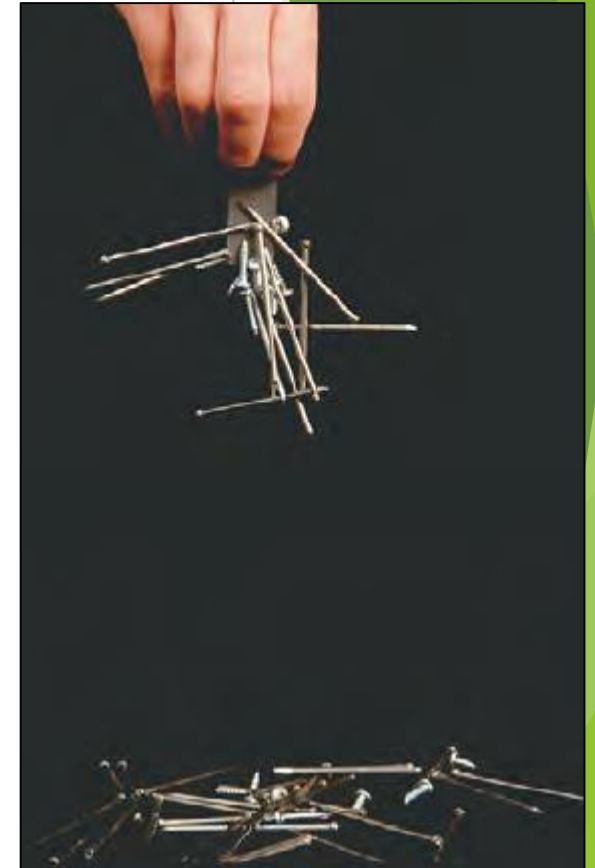


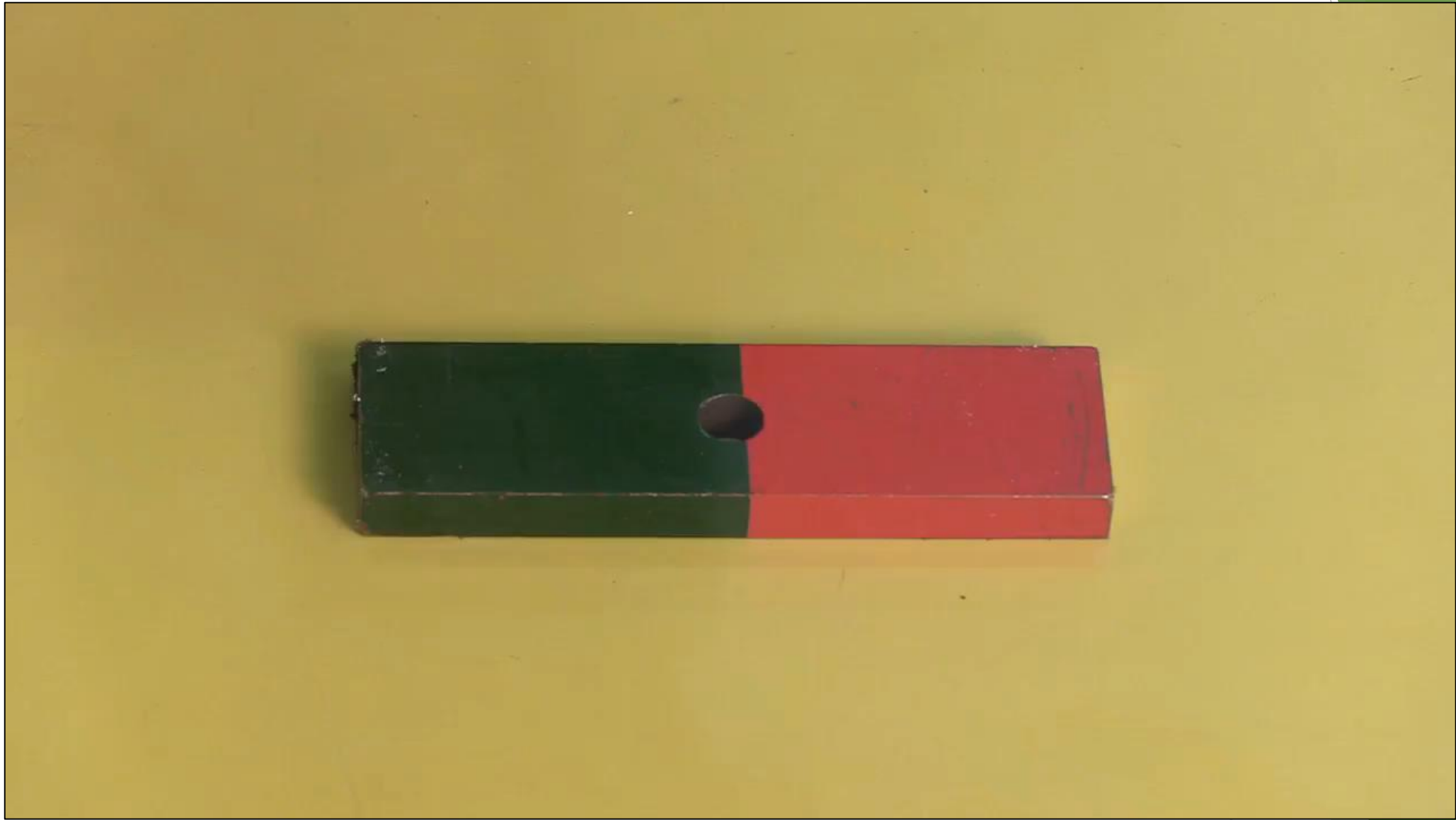
Istoimeni polovi se odbijaju



Oba pola privlače
nemagnetizirano željezo

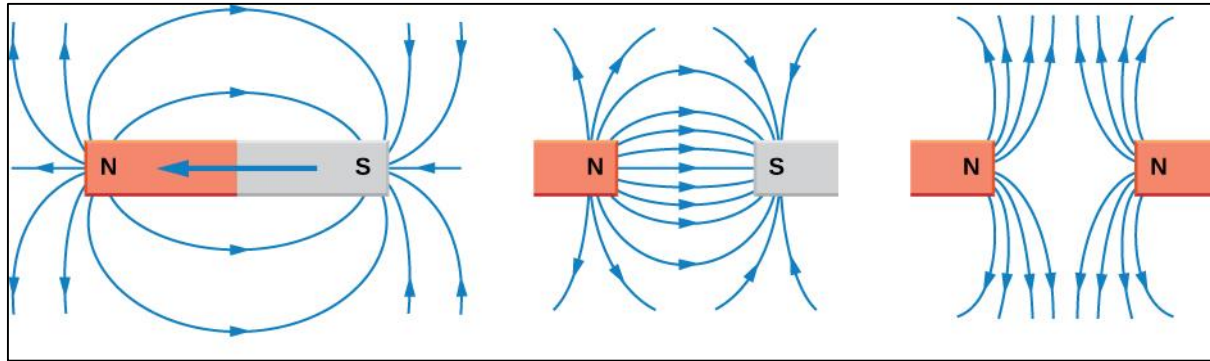
Magnetska sila !



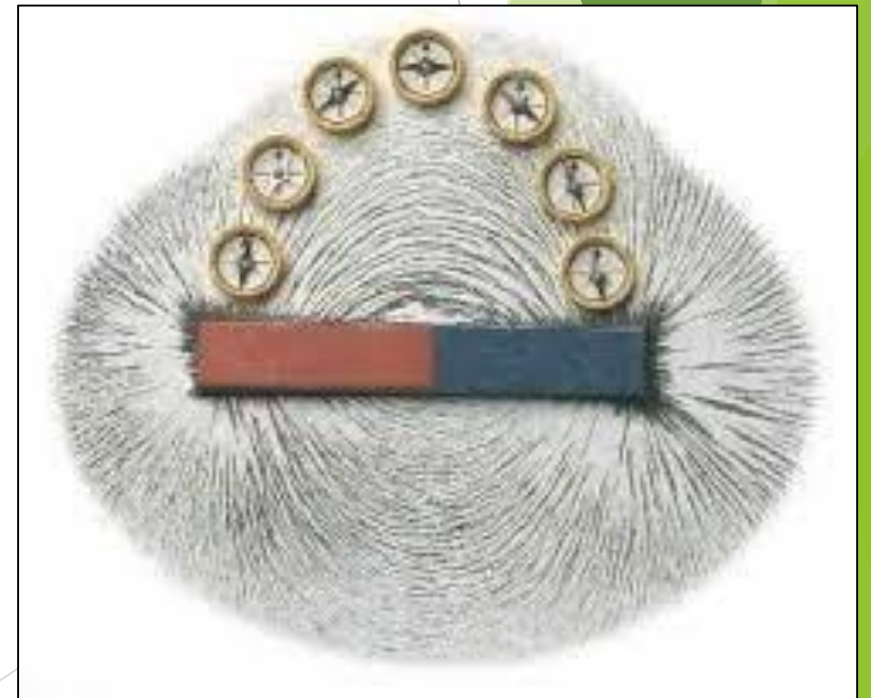


Magnetske silnice

- ▶ Magnetsko polje, slično kao i električno, možemo prikazati silnicama.



- ▶ Silnice izlaze iz sjevernog i ulaze u južni pol.
- ▶ ZATVORENE LINIJE!
- ▶ Tangenta na silnicu pokazuje smjer magnetskog polja.



Magnetska influencija

- U magnetskom polju željezni predmet postaje magnetičan.
- Svojstvo može ostati manje ili više trajno.

Opis polja:

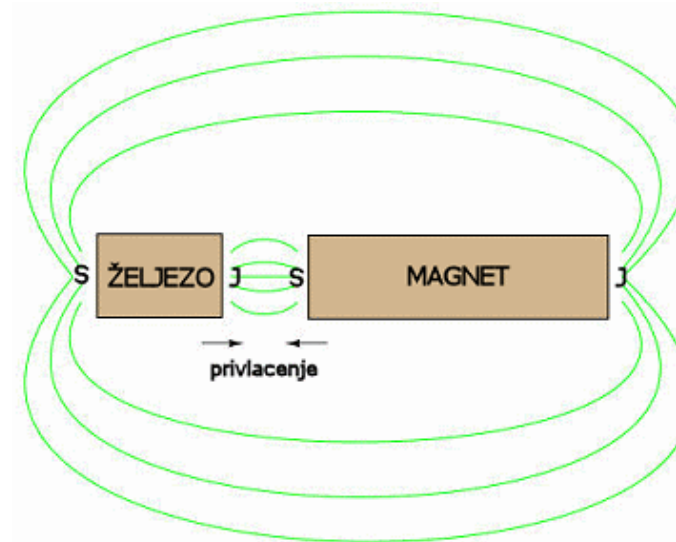
- ▶ Jakost magnetskog polja, \vec{H}

U nekim tvarima silnice će biti gušće, u nekima rjeđe - govorimo o veličini koja se zove:

- ▶ Gustoća magnetskog toka ili magnetska indukcija, \vec{B}

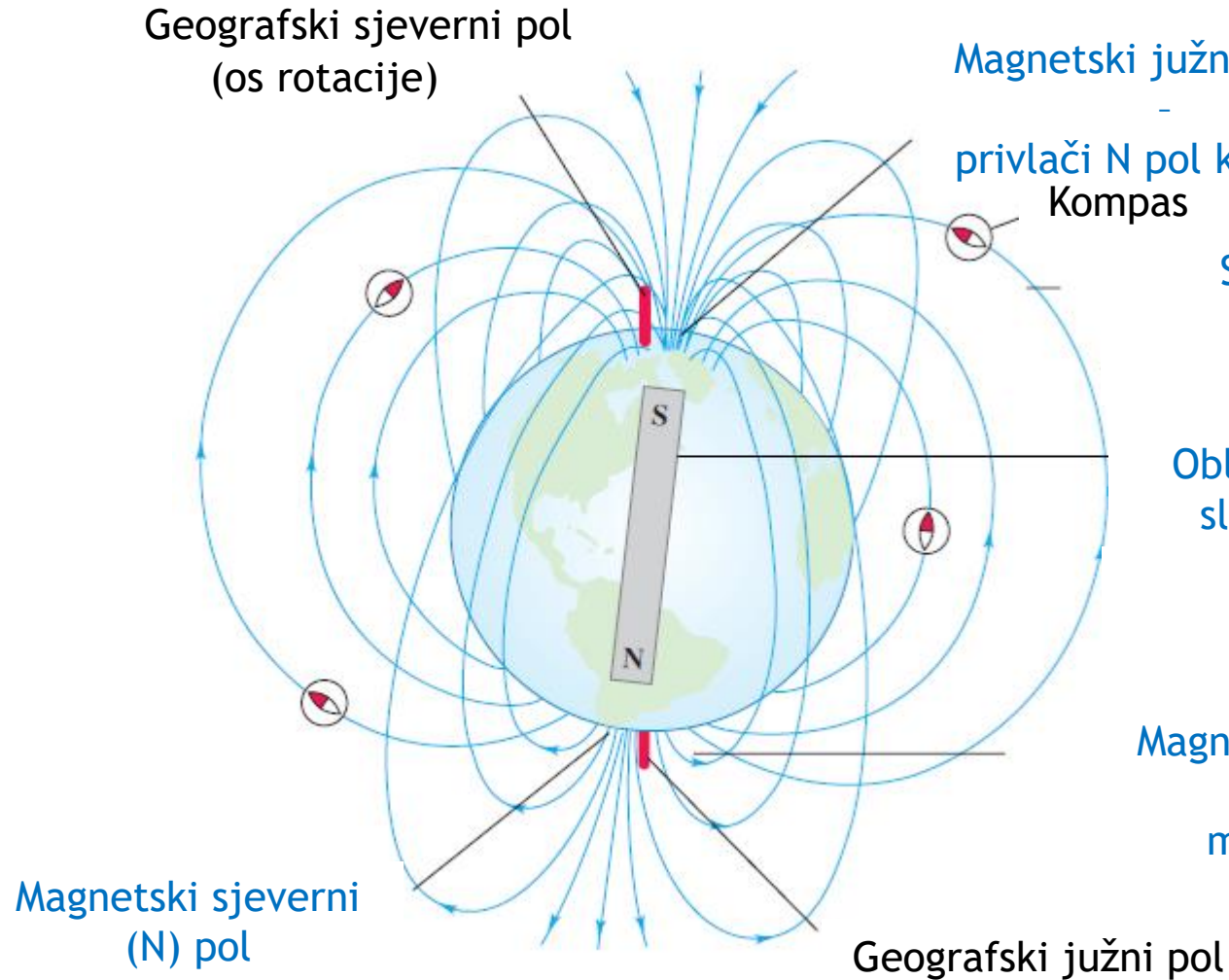
$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

μ – magnetska permeabilnost - ovisi o svojstvima tvari



Magnetsko polje Zemlje

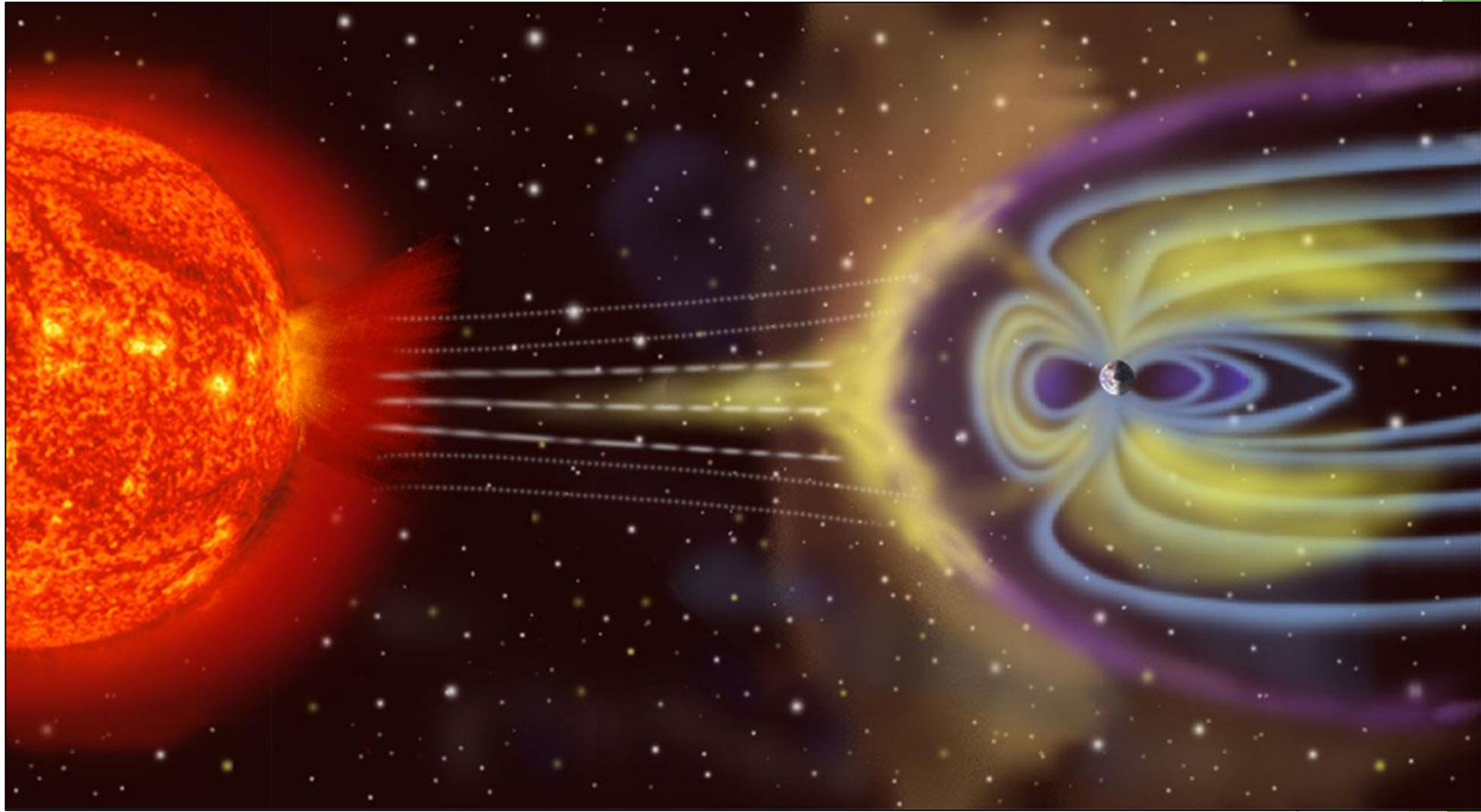
- Magnetsko polje Zemlje ima oblik sličan onome od štapičastog magneta, uzrok su mu struje u Zemljinom jezgri.



Silnice magnetskog polja predočavaju smjer koji bi pokazivala igla kompasa u na danoj lokaciji - otklon prema horizontalnoj ravnini = *inklinacija*

Oblik magnetskog polja Zemlje sličan onome od štapičastog magneta

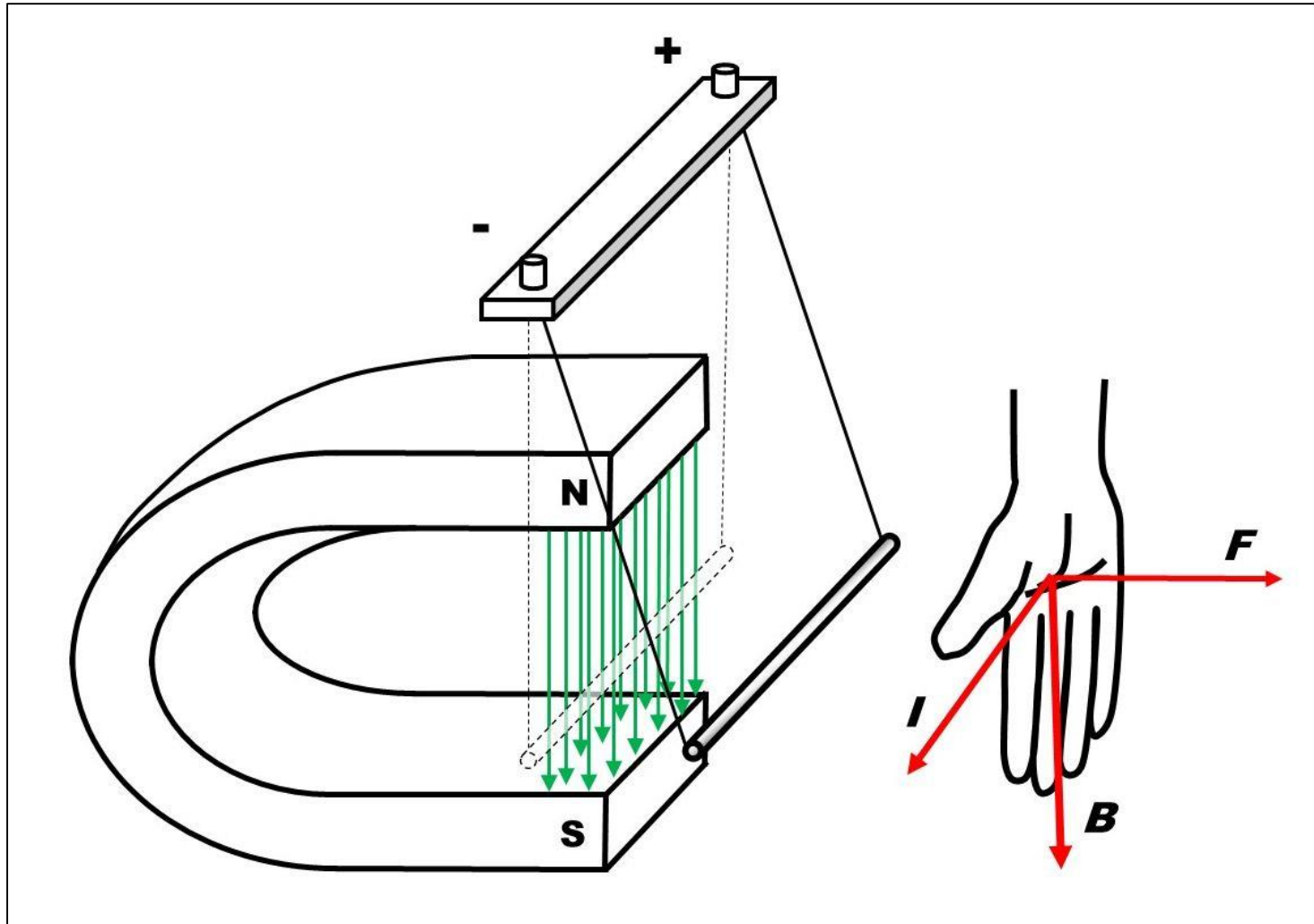
Magnetska os se ne poklapa s geografskom osi - magnetska *deklinacija*





Aurora borealis



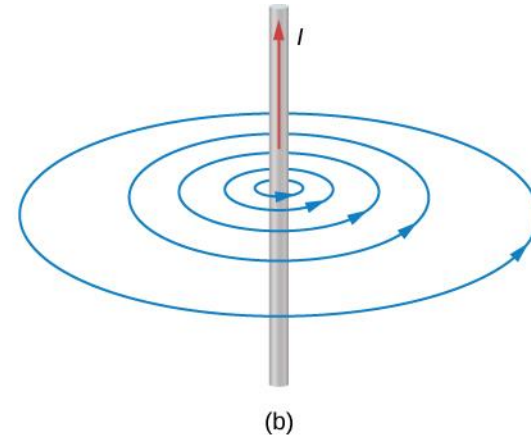
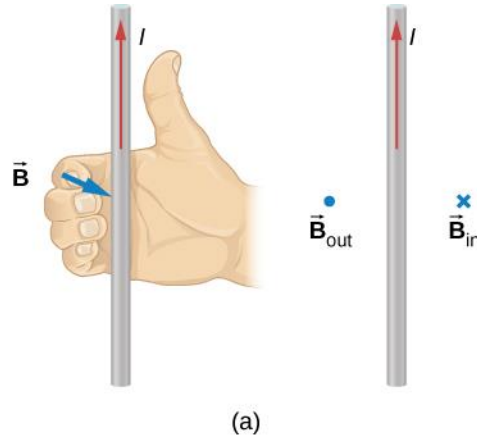


Magnetsko polje električne struje

- ▶ Vežu između naboja u gibanju i magnetizma prvi je otkrio danski fizičar Oersted: oko vodiča kojim teče struja stvara se magnetsko polje.

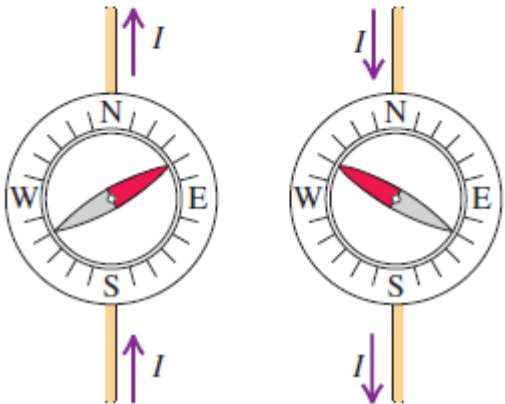


Kad vodičem ne teče struja, igla kompasu orijentirana je sjever-jug



Silnice magnetskog polja

Kad vodičem teče struja, igla kompasu odklanja se ovisno o smjeru struje



Pravilo desne ruke - smjer magnetskog polja

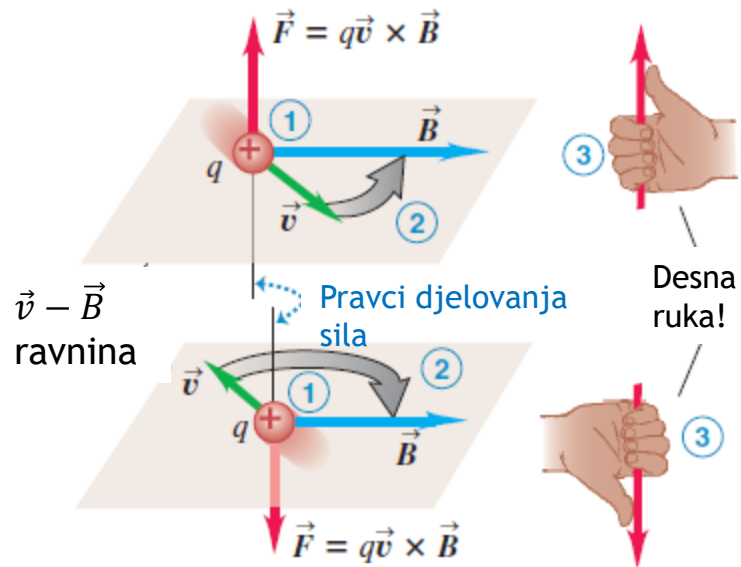
Nastanak Magnetskog polja Zemlje ?

Magnetska indukcija \vec{B}

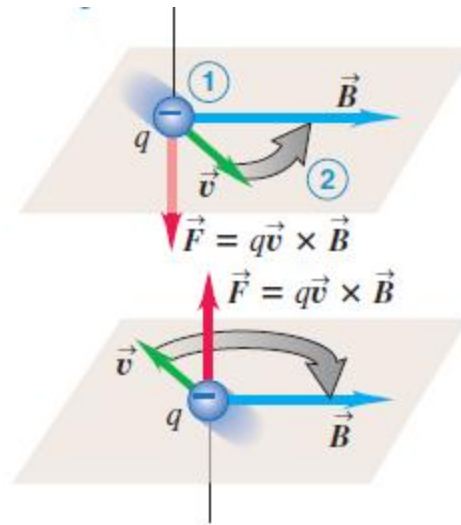
- ▶ Magnetska indukcija \vec{B} (gustoća magnetskog toka) definira se pomoću sile \vec{F} kojom magnetsko polje djeluje na naboj q koji se giba brzinom \vec{v} :

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

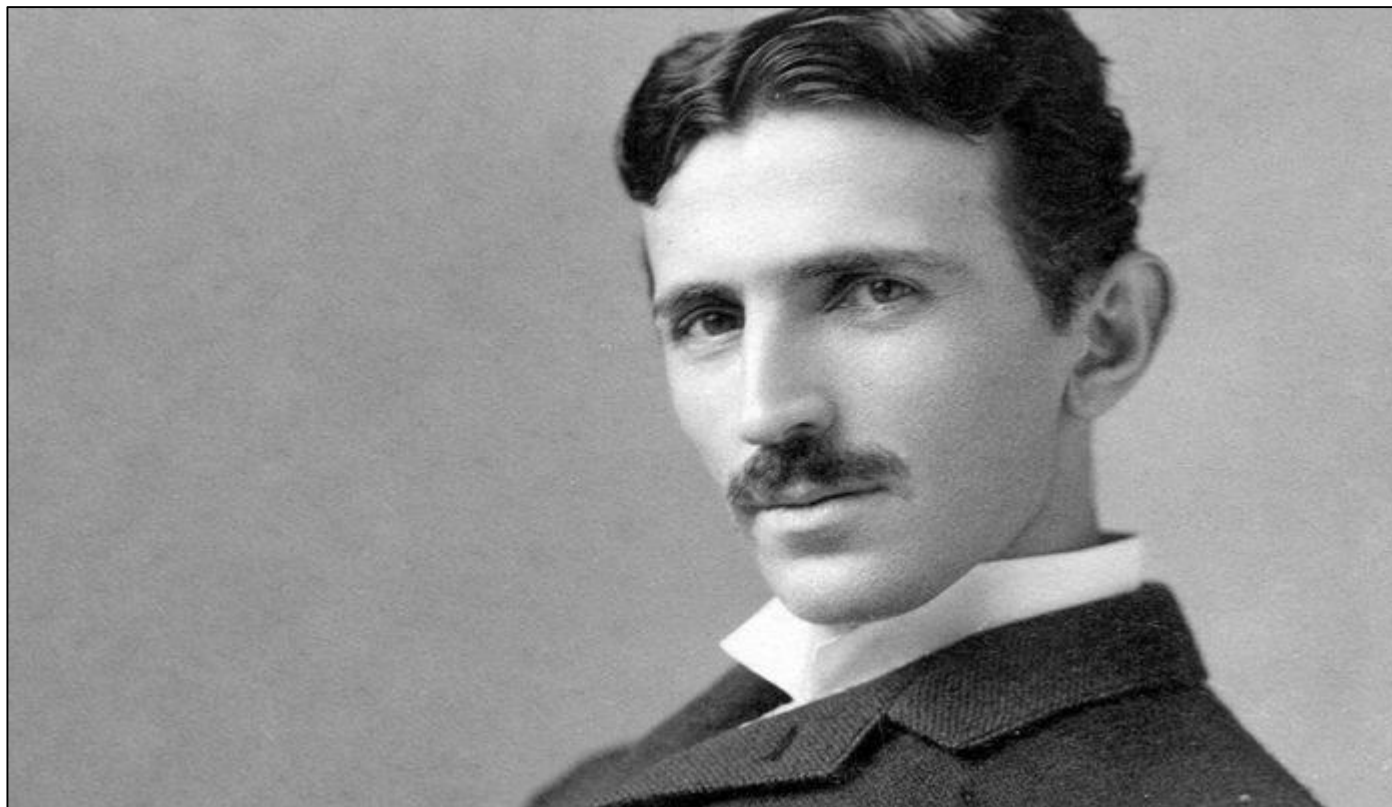
Sila na POZITIVAN naboj koji se giba u magnetskom polju:



Ako je naboj negativan, sila je suprotnog smjera nego na pozitivan naboj!



Jedinica: tesla, T
 $[B] = \text{NC}^{-1}\text{m}^{-1}\text{s} = \text{T}$



„Smatram svojom dužnošću da kao rođeni sin svoje zemlje pomognem gradu Zagrebu u svakom pogledu i savjetom i činom.”

Lorentzova sila

- ▶ Nabijena čestica naboja q giba se brzinom \vec{v} kroz magnetsko polje \vec{B} , na nju djeluje magnetska sila:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

- ▶ Ako imamo i električno polje, na naboje djeluje i električna sila:

$$\vec{F} = q\vec{E}$$

- ▶ Ukupna sila koja pri tome djeluje na naboj q - LORENTZOVA SILA:

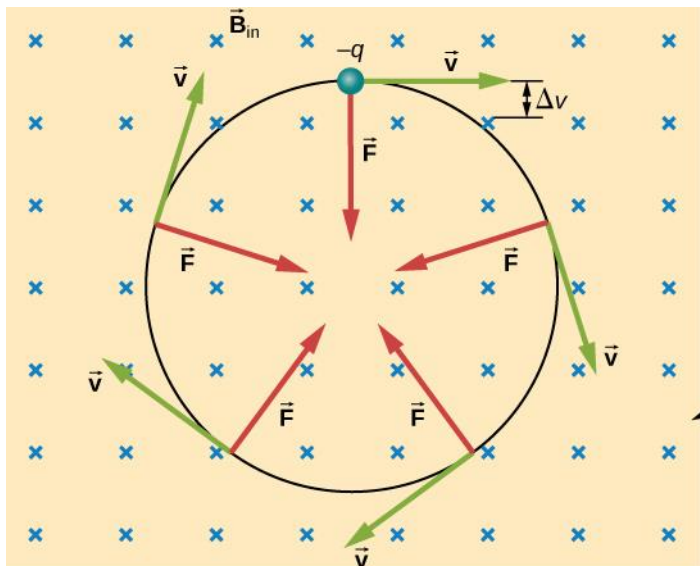
$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Gibanje nabijene čestice u homogenom magnetskom polju



Gibanje nabijene čestice u homogenom magnetskom polju

- Sila je uvijek okomita na \vec{v} i \vec{B} ($\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$)



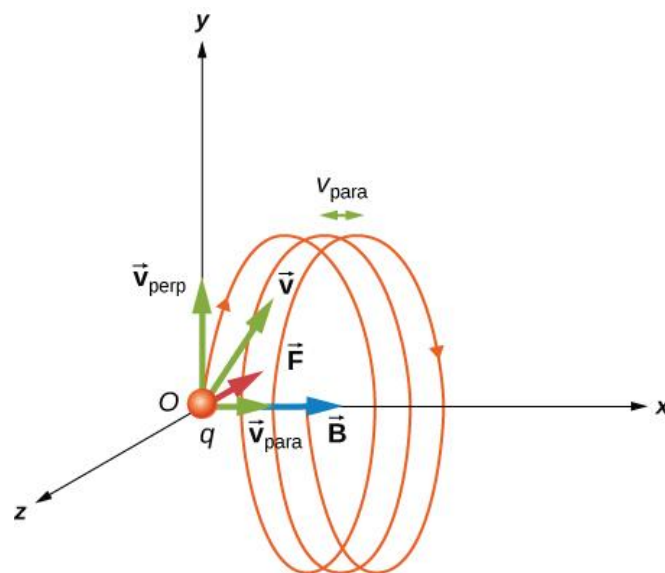
Ravnina papira

$\vec{v} \perp \vec{B}$ Putanja je kružnica

Postoji samo centripetalna akceleracija

$$\frac{mv^2}{r} = qvB \quad \longrightarrow \quad r = \frac{mv}{qB}$$

\vec{v} i \vec{B} zatvaraju proizvoljni kut
Putanja je vijčana spirala



- Brzina:

$$\vec{v} = \vec{v}_{perp} + \vec{v}_{para}$$

- Sila na česticu:

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$$\vec{v}_{para} \times \vec{B} = 0$$

$$\vec{v}_{perp} \times \vec{B} \neq 0$$

$$\vec{a}_x = 0$$

$$v_x = konst$$

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

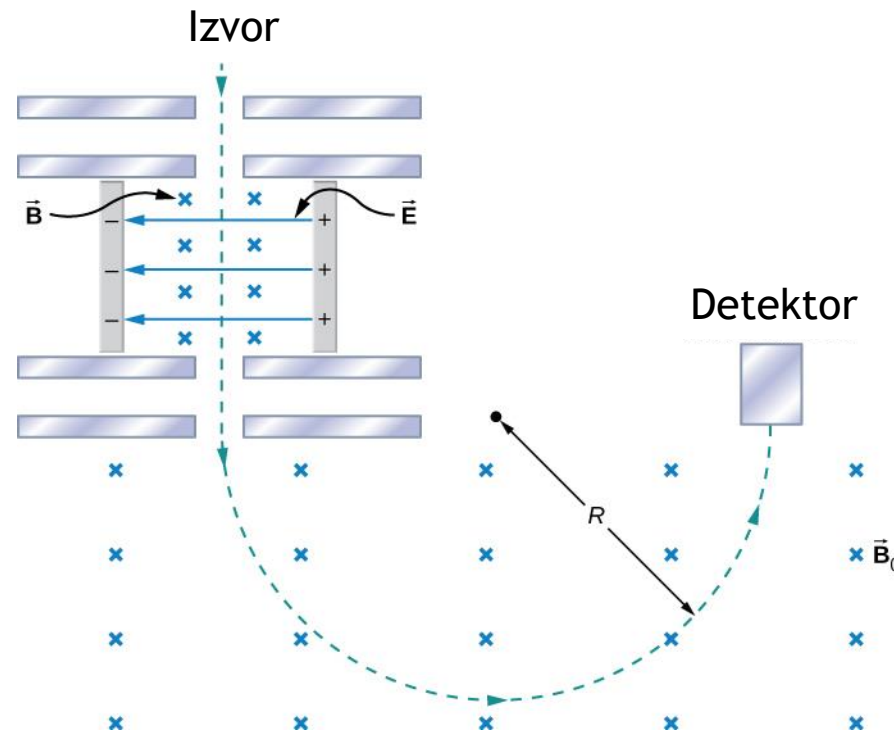
Gibanje nabijene čestice u homogenom magnetskom polju

Spektrometar masa

- ▶ Odjeljuje ione ovisno o njihovom naboju i masi.
- ▶ J.J. Thompson 1897. otkrio elektron.

- Nabijene čestice ulaze u *selektor brzine* - prostor s električnim i magnetskim poljem, $\vec{E} \perp \vec{B}$.
- U sljedeći prostor izlaze samo neotklonjene čestice, točno određene brzine:

$$qE = qvB$$



- U prostor s homogenim magnetskim poljem B_0 , sve čestice ulaze s istom brzinom, okomitom na B_0 .
- Magnetsko polje otklanja ione po kružnici radijusa:

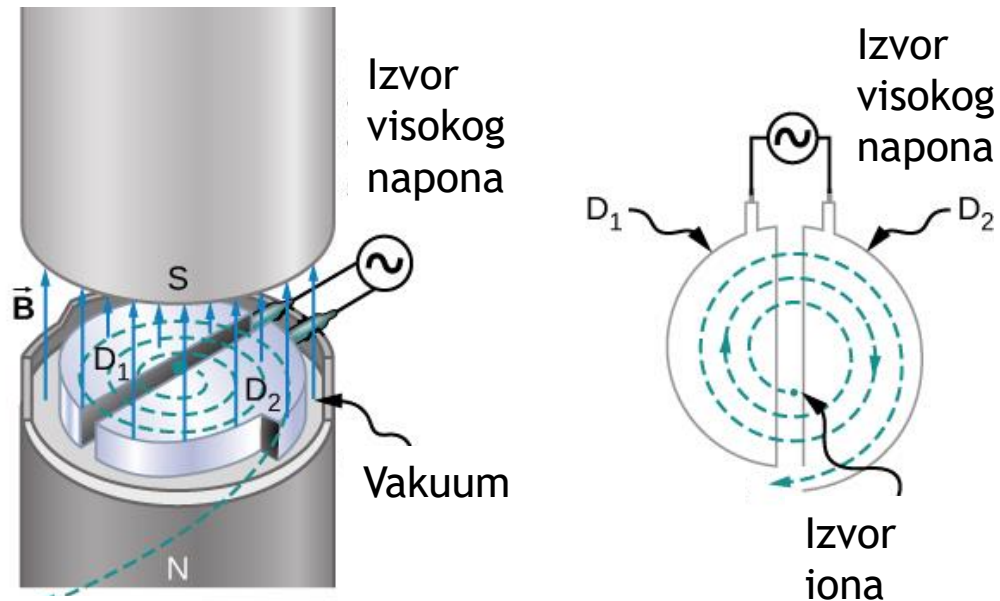
$$R = \frac{mv}{qB_0}$$

$$\frac{q}{m} = \frac{E}{BB_0R}$$

Gibanje nabijene čestice u homogenom magnetskom polju

Ciklotron

- Ubrzava nabijene čestice do velikih brzina/kinetičkih energija.



Izlaz čestica velikih energija

$$E_K = \frac{mv^2}{2} = \frac{q^2 B^2 R^2}{2m}$$
$$E_K \leq 20 \text{ MeV}$$

- Čestice se ubrzavaju izmjeničnim električnim poljem između dviju elektroda u obliku slova D, smještenih u vakuumskoj komori između polova velikog magneta.
- Čestice se u konstantnom magnetskom polju gibaju po kružnici radijusa R i perioda T :

$$R = \frac{mv}{qB} \quad T = \frac{2\pi m}{qB}$$

- Period izmjeničnog napona namješten je na T , tako da se čestice svakim prolaskom kroz prostor između elektroda ubrzavaju.
- Kako rastu brzina i energija čestica, polumjer se njihove staze povećava i ona je spiralna. Kada snop čestica dosegne rub komore, čestice izlaze iz akceleratora, pa se dobiva vanjski ciklotronski snop.

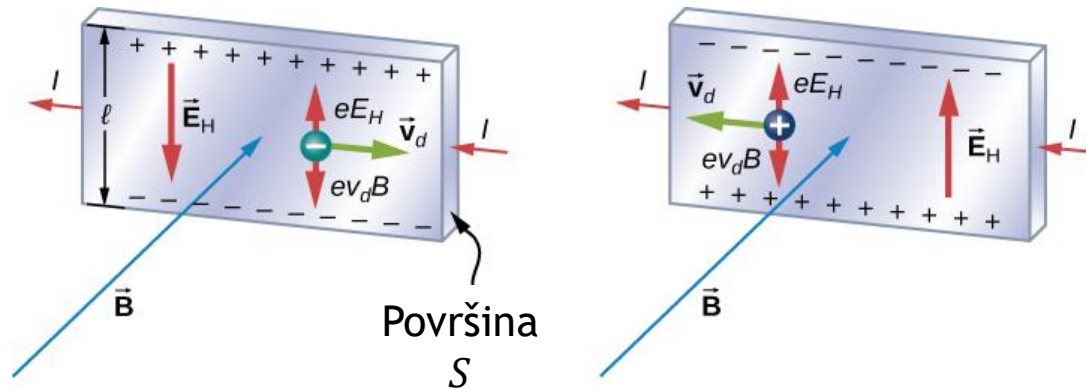


CERN (Conseil européen pour la recherche nucléaire)

Gibanje nabijene čestice u homogenom magnetskom polju

Hallov efekt

- ▶ Kad vodljivu pločicu kroz koju protječe struja unesemo u magnetsko polje, magnetska sila će otklanjati slobodne nosioce naboja u poprečnom smjeru - jedna strana pločice bit će pozitivno, a druga negativno nabijena.



- Naboji se nakupljaju dok se sila zbog nastalog električnog polja ne izjednači, po iznosu, s magnetskom silom:

$$qE = qvB$$

$$I = nevS$$

$$E = \frac{U}{l}$$



$$U_H = \frac{IBl}{neS}$$

Hallov napon

Jakost magnetskog polja

Magnetsko polje nastaje u prostoru oko naboja u gibanju.

- ▶ Magnetska indukcija, \vec{B} , ovisi o sredstvu koje se nalazi u magnetskom polju. $[B] = \text{T}$

Uvodimo veličinu koja ne ovisi o sredstvu, samo o strujama koje proizvode magnetsko polje:

- ▶ Jakost magnetskog polja, \vec{H} , $[H] = \text{A/m}$

B i H su proporcionalni:

- ▶ Vakuum:

$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H},$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ TmA}^{-1}$$

- ▶ Sredstvo:

$$\vec{B} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$$

Relativna magnetska
permeabilnost
materijala

apsolutna
permeabilnost
vakuuma

Simulacija: Magneti

Magnets and Electromagnets (2.07.01)

File Options Help

Bar Magnet Electromagnet

Bar Magnet

Strength: 75 %

0 50 100

Flip Polarity

See Inside Magnet

Show Field

Show Compass

Show Field Meter

Show planet Earth

Reset All

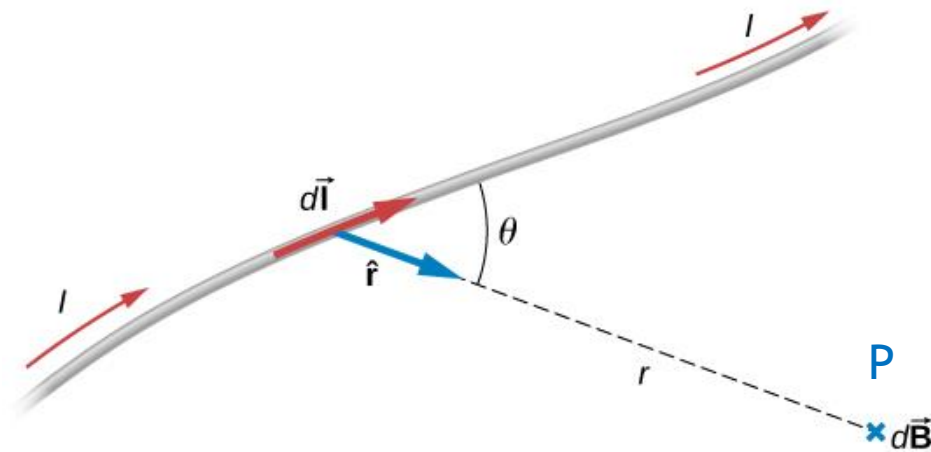
Move me or me

Biot-Savartov zakon

Za bilo koji oblik vodiča kojim teče struja I vrijedi: element struje $I d\vec{l}$ u točki P uzrokuje magnetsku indukciju $d\vec{B}$:

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

Jedinični vektor



Magnetska indukcija koju u točki P uzrokuje čitavi vodič (superpozicija):

$$\vec{B} = \int d\vec{B}$$

Biot-Savartov zakon - magnetsko polje ravnog vodiča

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{I d\vec{x} \times \hat{r}}{r^2}$$

Za sve elemente struje $I d\vec{x}$ vodiča, doprinosi $d\vec{B}$ magnetskoj indukciji u točki P imaju isti smjer (iz ravnine).

Iznos:

$$dB = \frac{\mu I dx \sin \theta}{4\pi r^2}$$

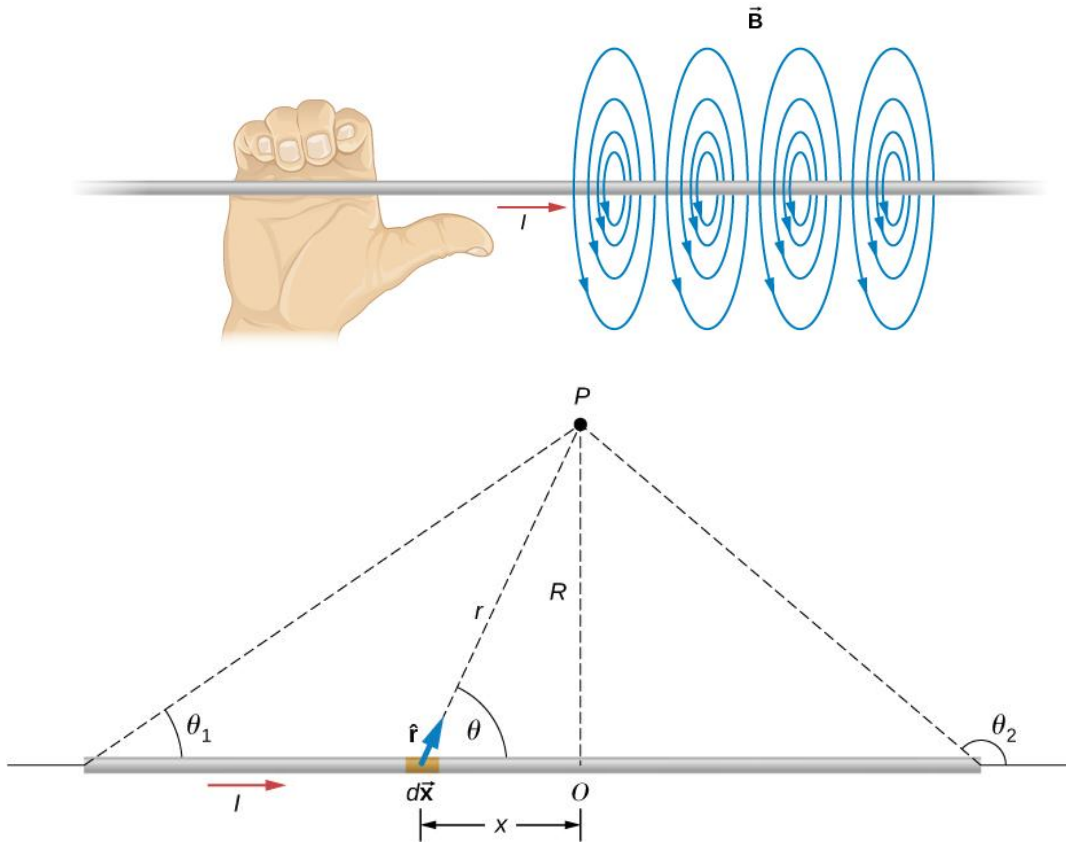
$$\sin \theta = \frac{R}{r} = \frac{R}{\sqrt{x^2 + R^2}}$$

$$B = \frac{\mu I R}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dx}{(x^2 + R^2)^{3/2}}$$

$$B = \frac{\mu I R}{4\pi} \frac{x}{R^2 \sqrt{x^2 + R^2}} \Big|_{-\infty}^{\infty}$$

Uvrštavanjem granica:

$$B = \frac{\mu I}{2\pi R}$$



Biot-Savartov zakon - magnetsko polje kružne petlje

$$d\vec{B} = \frac{\mu}{4\pi} \frac{I d\vec{l} \times \hat{r}}{r^2}$$

- ▶ Točka P - na osi kružne petlje radijusa R
- ▶ Doprinos $d\vec{B}$ od elementa struje $d\vec{l}$ ima komponentu duž osi, dB_y , i komponentu okomitu na os kružne petlje

$$dB = \frac{\mu I r dl}{4\pi r^3} = \frac{\mu I dl}{4\pi r^2}$$

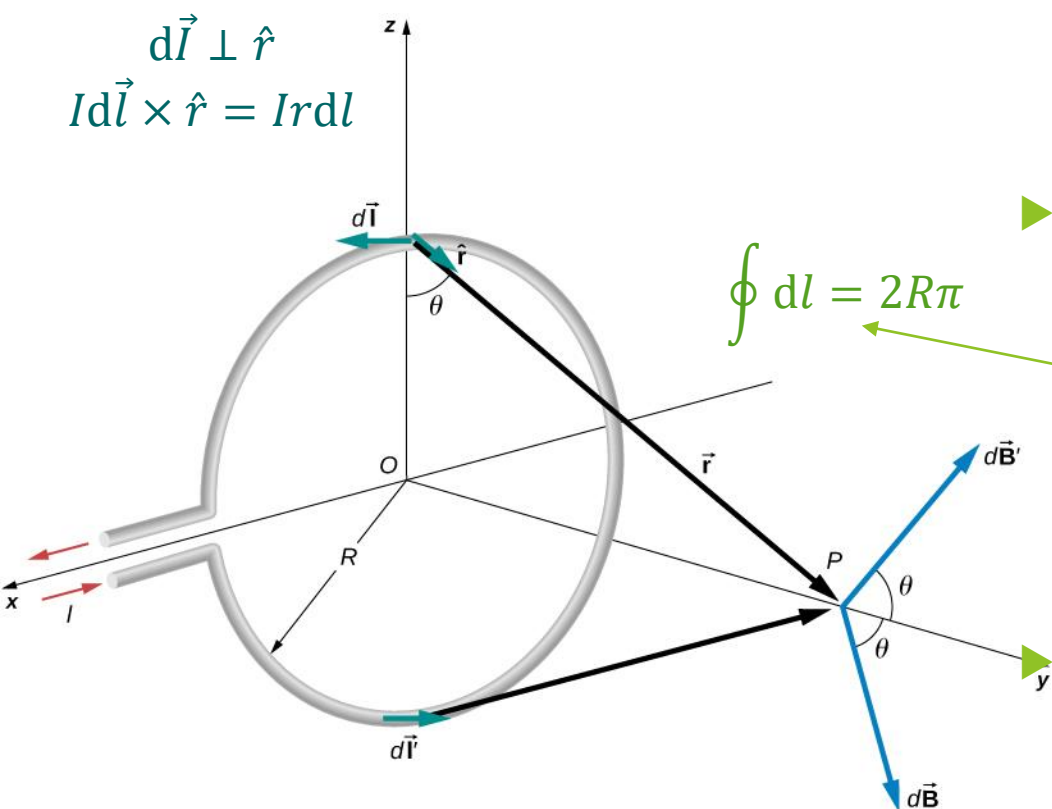
- ▶ Okomite komponente se zbog simetrije međusobno ponište.

$$dB_y = dB \cos \theta = dB \frac{R}{r} = \frac{\mu I R dl}{4\pi r^3}$$

$$B = \oint dB_y = \frac{\mu I R}{4\pi r^3} \left(\oint dl \right) = \frac{\mu I R^2}{2(y^2 + R^2)^{3/2}}$$

Kad smo u središtu petlje ($y = 0$):

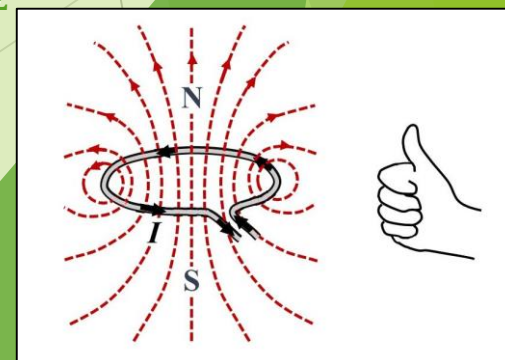
$$B = \frac{\mu I}{2R}$$



$$\oint dl = 2R\pi$$

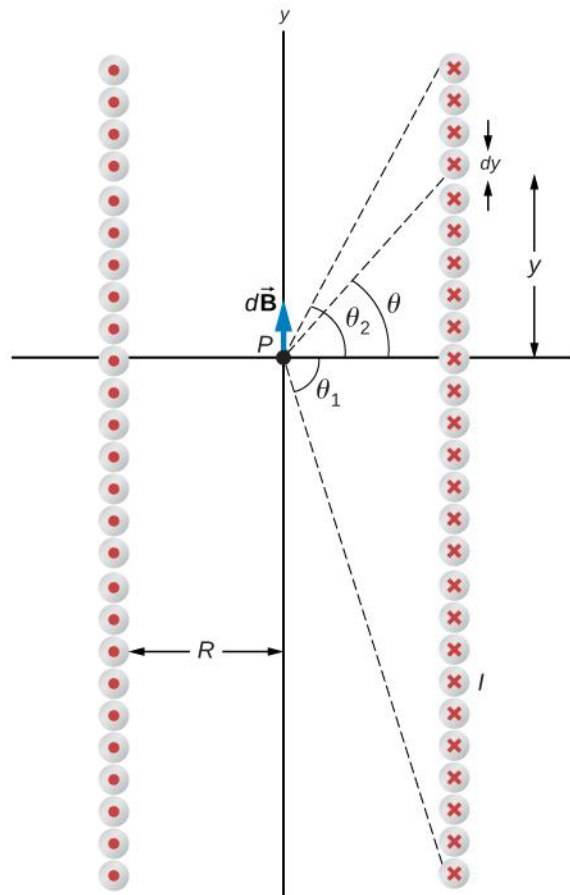
$$d\vec{l} \perp \hat{r}$$

$$I d\vec{l} \times \hat{r} = I r dl$$



Biot-Savartov zakon - magnetsko polje zavojnice

$$B = \frac{\mu I R^2}{2(y^2 + R^2)^{3/2}} \text{ kružna petlja}$$



- ▶ Točka P - na osi zavojnice radijusa R
- ▶ Zavojnica: N namotaja žice na duljini l
- ▶ Zavojnicu predstavimo nizom kružnih petlji debljine dy
- ▶ Polje u P:

$$dB = \frac{\mu I R^2}{2(y^2 + R^2)^{3/2}} \frac{N}{l} I dy$$

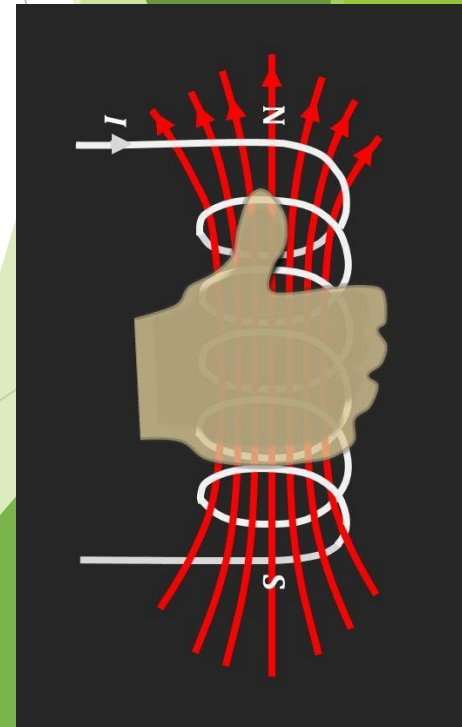
I – struja kružne petlje

- ▶ Integriramo po cijeloj zavojnici:

$$B = \frac{\mu NI}{2l} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \cos \theta d\theta = \frac{\mu NI}{2l} (\sin \theta_2 - \sin \theta_1)$$

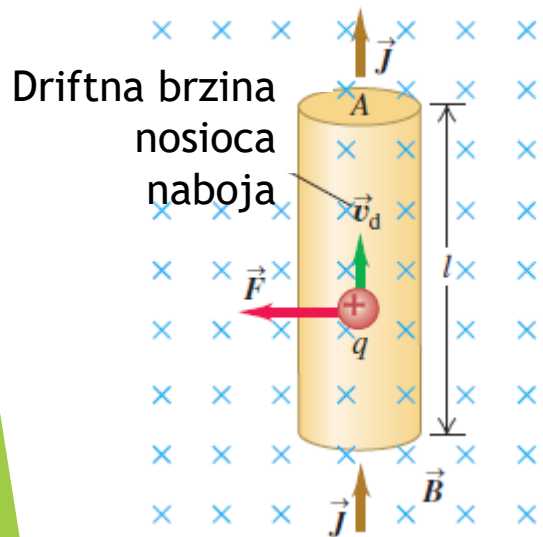
- ▶ Dugačka zavojnica ($l \gg R$): $\theta_1 = -\frac{\pi}{2}$, $\theta_2 = \frac{\pi}{2}$:

$$B = \frac{\mu NI}{l}$$



Vodič kojim teče struja u magnetskom polju

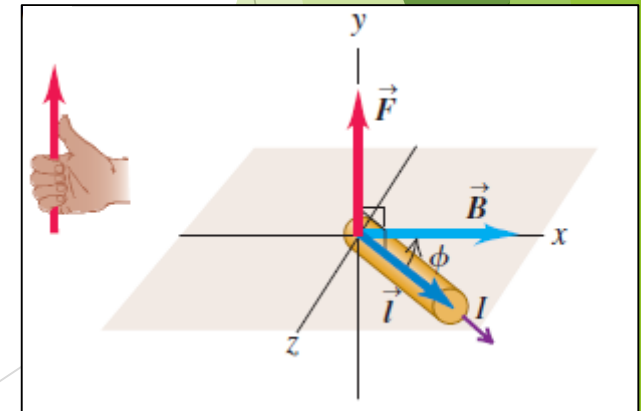
- ▶ Na naboj koji se giba u magnetskom polju djeluje sila $\vec{F}_1 = q\vec{v} \times \vec{B}$
- ▶ Što kad imamo ravni vodič u magnetskom polju?

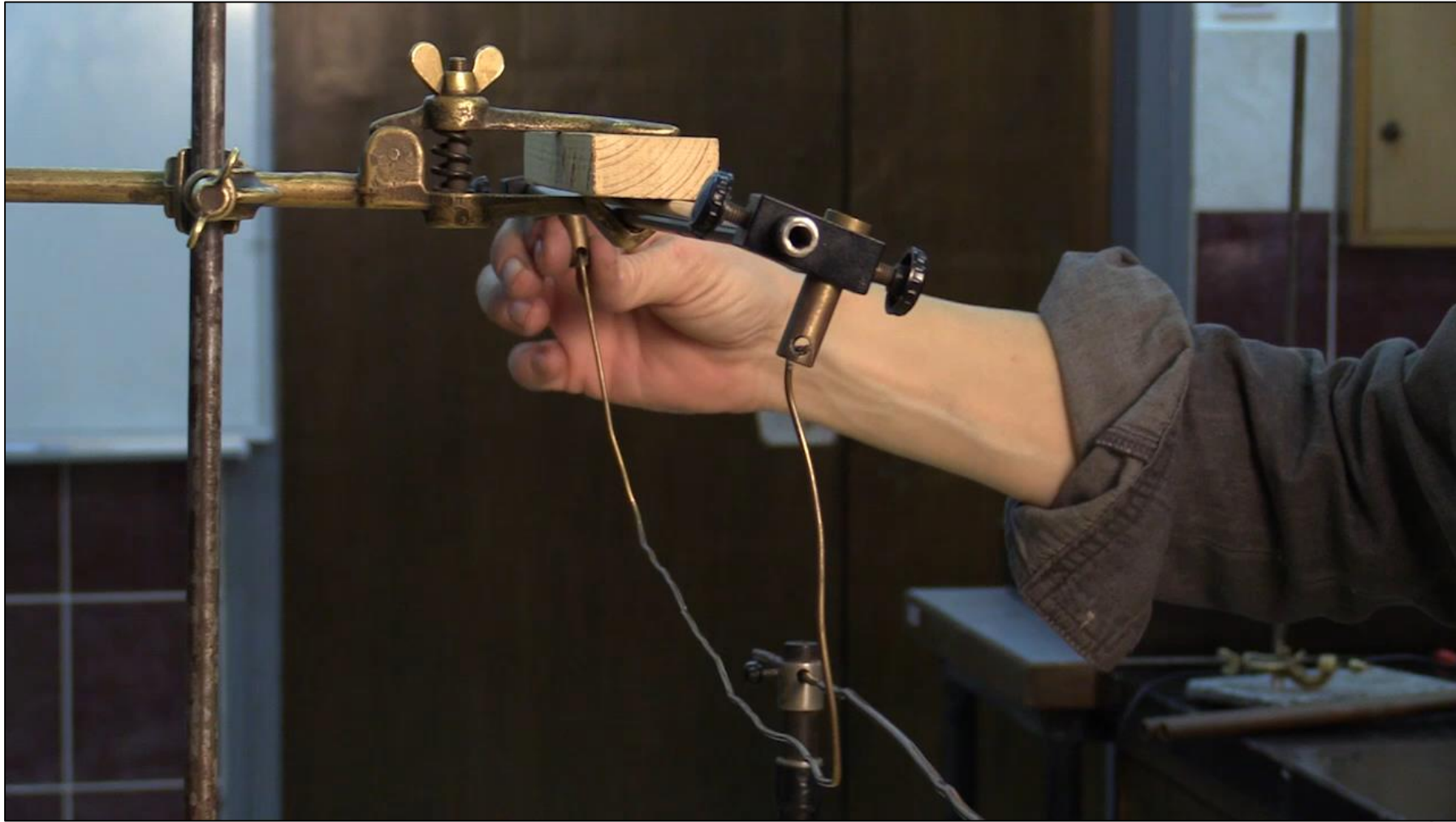


- Broj naboja u dijelu vodiča duljine l i presjeka A : nAl
- Sila na sve naboje u vodiču:
$$\vec{F} = N\vec{F}_1 = nAlq\vec{v} \times \vec{B}$$
- Gustoća struje:

$$\vec{J} = nq\vec{v}$$
$$\vec{F} = Al\vec{J} \times \vec{B}$$

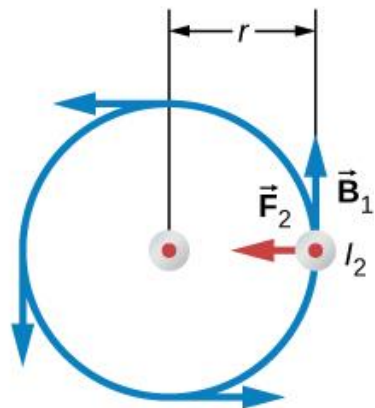
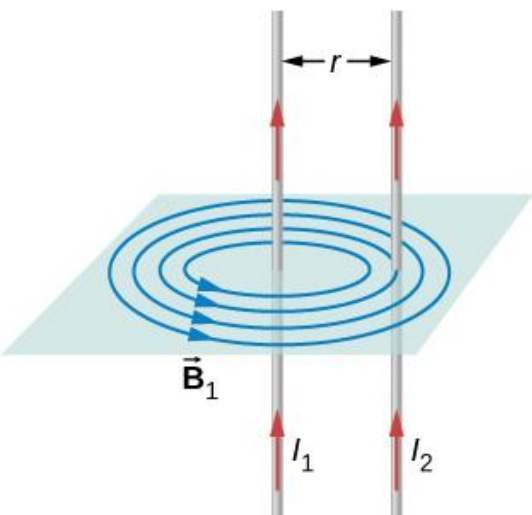
$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$$





Magnetska sila između dva paralelna vodiča

- ▶ Što kad magnetsko polje stvara drugi ravni vodič?



- Jedan vodič nalazi se u polju drugoga i obrnuto.
- Prvi vodič stvara polje B_1 na mjestu drugog vodiča:

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

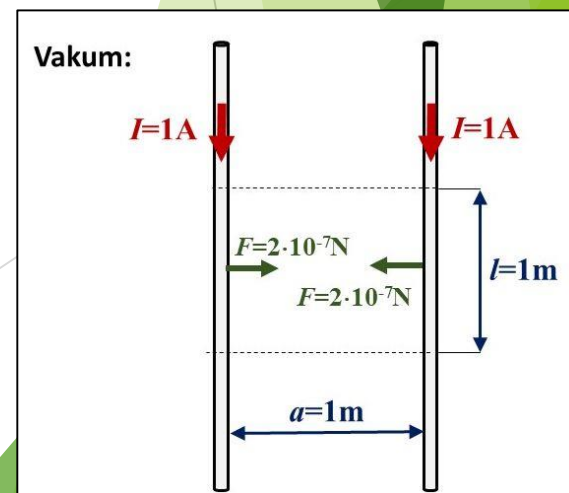
- To magnetsko polje djeluje na struju I_2 silom

$$F_2 = F = I_2 l B_1$$

Paralelni vodiči:

struje u istom smjeru → privlačna sila
struje suprotnog smjera → odbojna sila

$$F = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r} l$$



Ampèrov zakon

Cirkulacija vektora (jakosti magnetskog polja) linijski je integral po zatvorenoj krivulji projekcije vektora (jakosti magnetskog polja) na krivulju u svakoj točki te krivulje:

$$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{l}$$

Dugački ravni vodič kojim teče struja I

Zatvorena krivulja je kružnica oko vodiča:

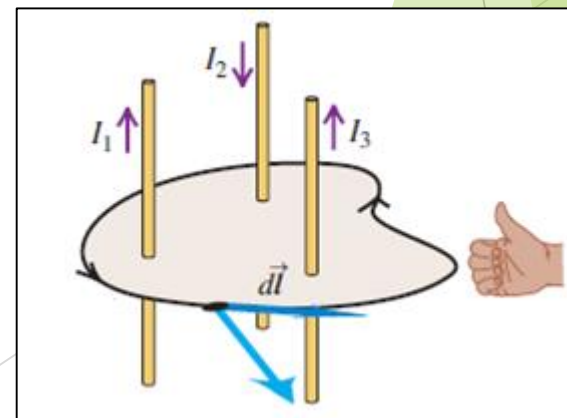
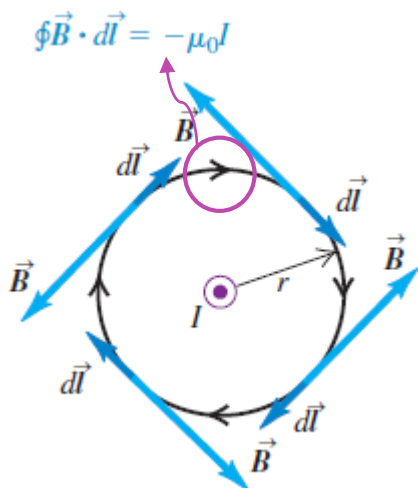
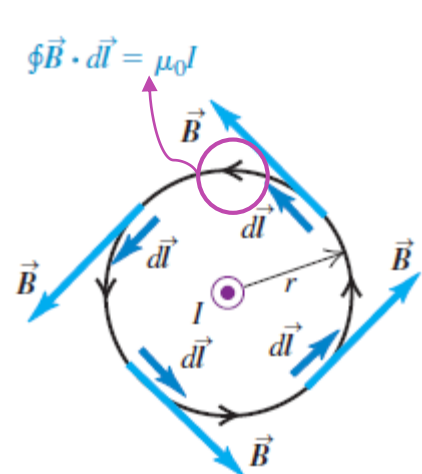
$$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{l} = \oint_K \frac{I}{2\pi r} dl = \frac{I}{2\pi r} \oint_K dl = 2\pi r$$

$$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{l} = I$$

Općenito:

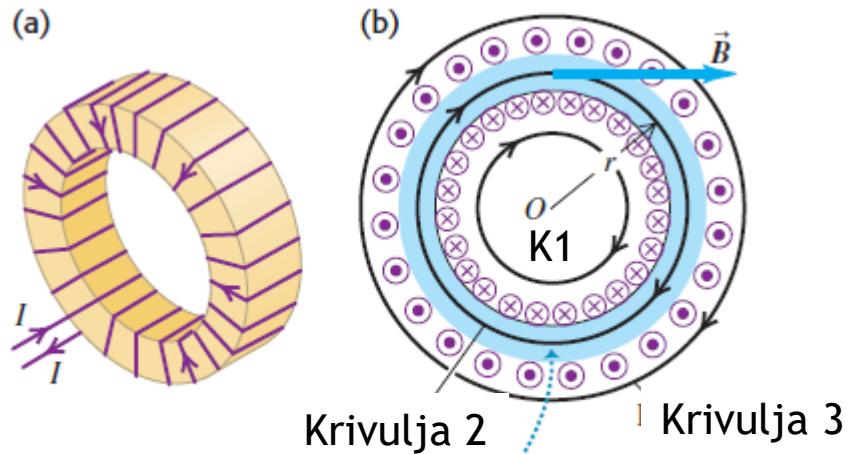
$$\oint_K \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$

$$\oint_K \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu \sum I$$



Ampèreov zakon - magnetsko polje torusne zavojnice

Zbog osne simetrije silnice magnetskog polja su koncentrične kružnice unutar prstena.



Magnetsko polje postoji samo unutar zavojnice

- Ako za krivulju integracije K odaberemo krivulje 1 ili 3, cirkulacija magnetskog polja je 0, jer $\sum I = 0$

$$\oint_{K2} \vec{H} \cdot d\vec{l} = \sum I$$

$$H \oint_{K2} dl = \sum I$$

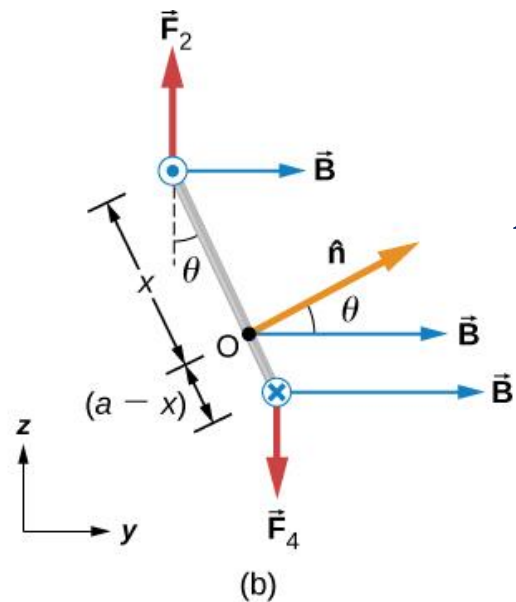
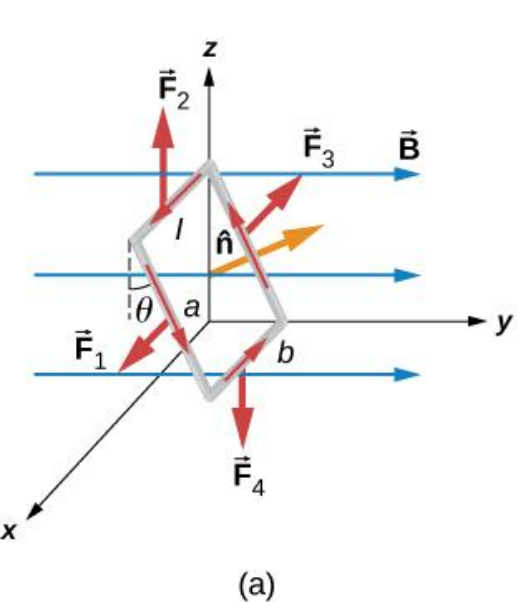
NI

$2\pi r = l$

$$H = \frac{NI}{2r\pi} \quad B = \frac{\mu NI}{2r\pi}$$

Magnetski moment

Okvir od žice (strujnu petlju) stavimo u vanjsko homogeno magnetsko polje.



\vec{F}_2 i $\vec{F}_4 \rightarrow$ par sila, zakreću okvir
 $M = Fa \sin \theta = IabB \sin \theta = ISB \sin \theta$

$$\vec{M} = I\vec{S} \times \vec{B}$$

$$\vec{p}_m = I\vec{S}$$

$$p_m = NIS \quad \text{zavojnica s N zavoja}$$

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}$$

$$\vec{F} = I\vec{l} \times \vec{B}$$

$$\sum \vec{F} = 0$$

\vec{F}_1 i \vec{F}_3 – jednakih iznosa, suprotnih smjerova, na istom pravcu nosiocu
 \rightarrow ne pomiču niti ne zakreću okvir

Strujna petlja - magnetski dipol
 p_m – magnetski dipolni moment

Potencijalna energija magnetskog dipola

- ▶ Potencijalna energija električnog dipola: $E_p = -\vec{p} \cdot \vec{E}$
- ▶ Potencijalna energija magnetskog dipola, slično:

$$E_p = -\vec{p}_m \cdot \vec{B} = -p_m B \cos \theta$$

- θ {
- = 0 - dipol u smjeru polja - E_p je minimalna
 - = 90° - dipol okomit na smjer polja - $E_p = 0$
 - = 180° - dipol u smjeru suprotnom smjeru polja - E_p je maksimalna

Magnetski tok

- Gustoća silnica - daje stvarnu jakost polja.
- **Magnetski tok, Φ_B** (tok magnetskog polja) - skup silnica koje prolaze kroz neku plohu.

- ▶ Za homogeno polje, okomito na površinu :

$$\Phi_B = BS \quad [\Phi_B] = \text{Wb} = \text{T} \cdot \text{m}^2 \quad \text{veber}$$

- ▶ Općenito:

$$\Phi_B = \iint_S d\Phi_B = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

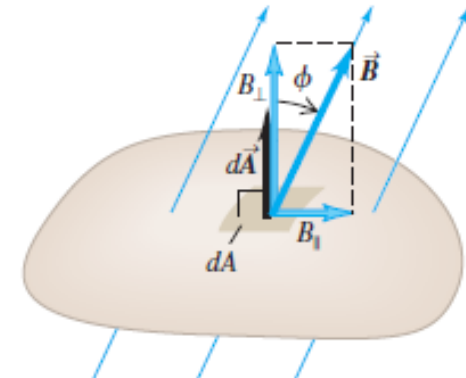
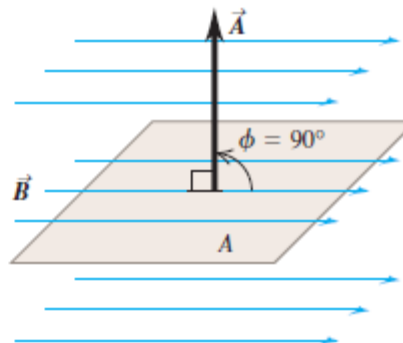
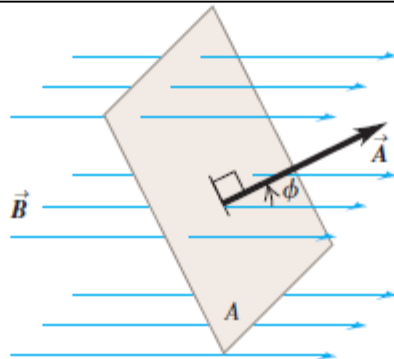
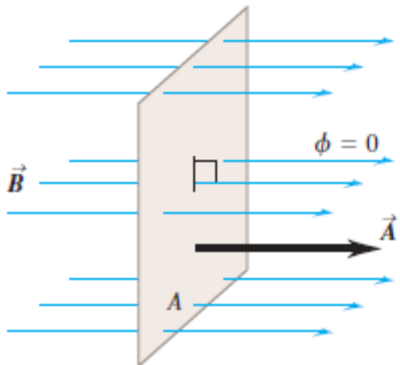
$$B = \frac{d\Phi_B}{dS} \quad \text{Gustoća magnetskog toka}$$

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA = BS$$

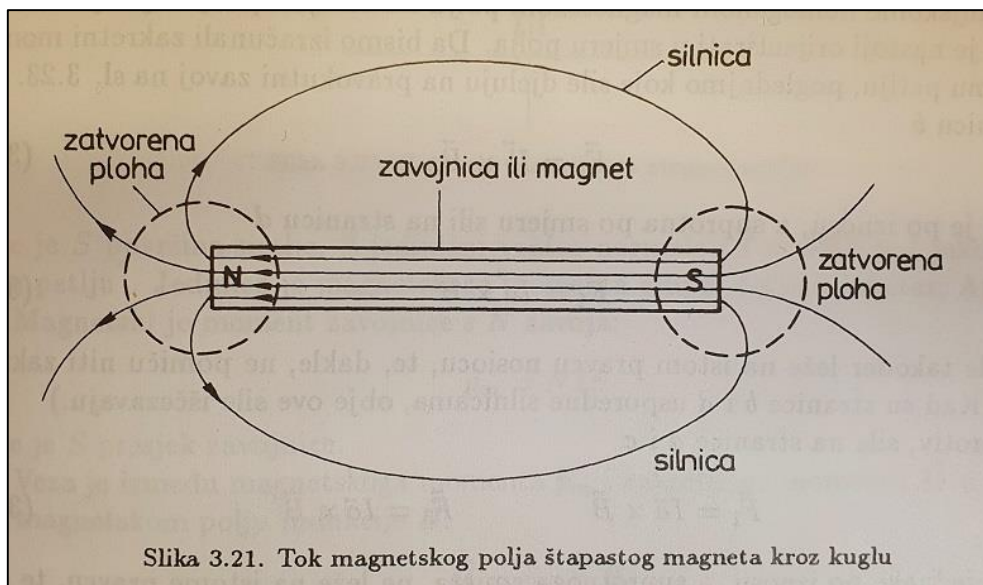
$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = BS \cos \phi$$

$$\Phi_B = \vec{B} \cdot \vec{S} = 0$$

$$d\Phi_B = \vec{B} \cdot d\vec{S} = BdS \cos \phi$$



Gaussov zakon za magnetizam



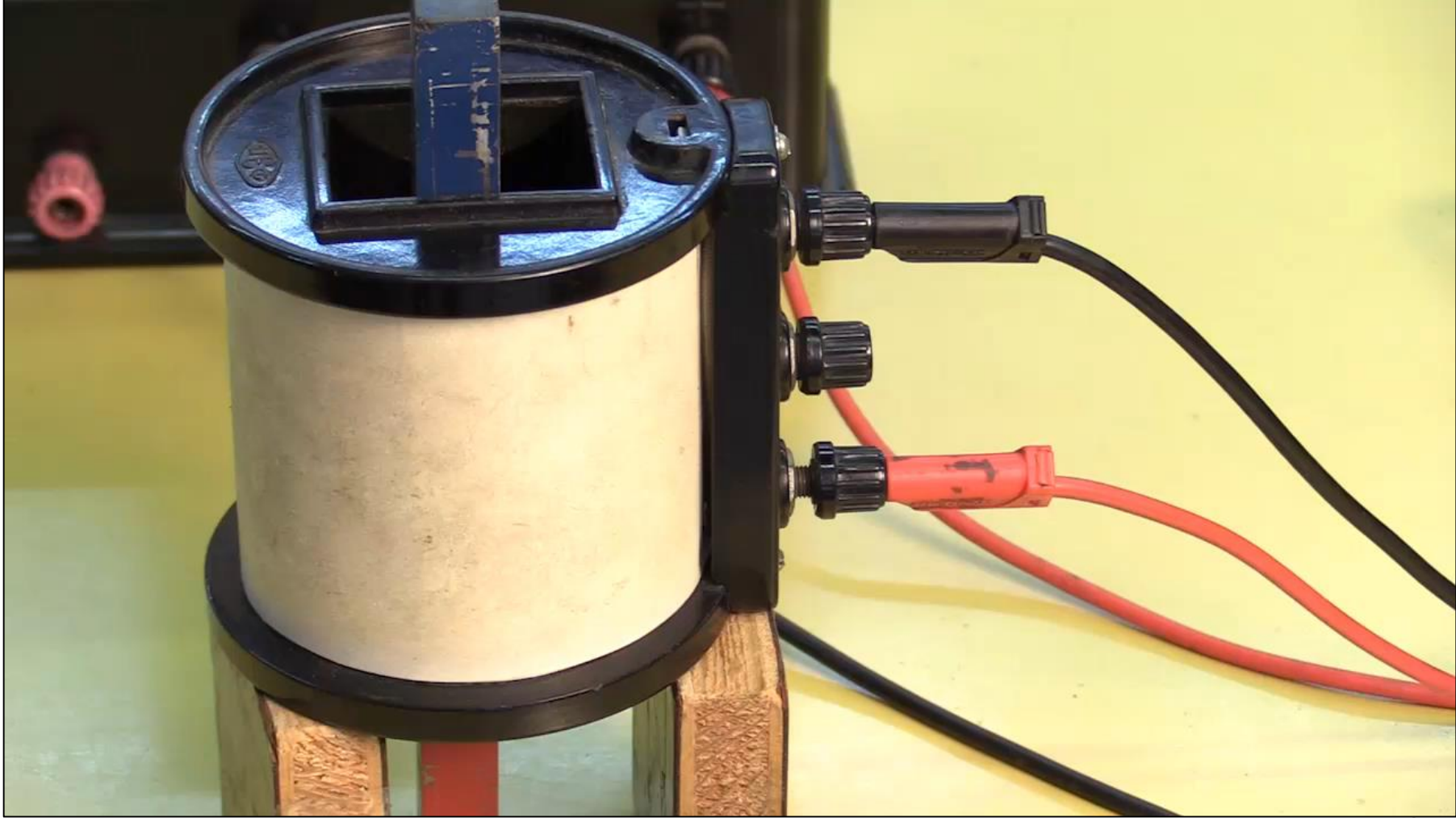
- Silnice magnetskog polja su zatvorene linije. → Broj silnica koje ulaze u neku zatvorenu plohu jednak je broju silnica koje izlaze iz te plohe. → Tok magnetskog polja kroz zatvorenu plohu uvijek je jednak nuli!
- Nema "izvora magnetskog polja"!

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

Integralni oblik

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Diferencijalni oblik



ELEKTROMAGNETSKA INDUKCIJA

Faradayev zakon indukcije

Oersted (1819.) → Pokazao da električna struja stvara magnetsko polje.

- ▶ Vrijedi li obrnuto? Stvaraju li magneti električnu struju?
- ▶ Pokusi:
 - ▶ Oko magneta se stave zavoji bakrene žice → Nema struje.
 - ▶ Umjesto magneta uzmemo zavojnicu kroz koju teče struja (elektromagnet) → Nema struje.
- ▶ Ne vrijedi obrat?

Faraday (1831.) → Bitan korak:

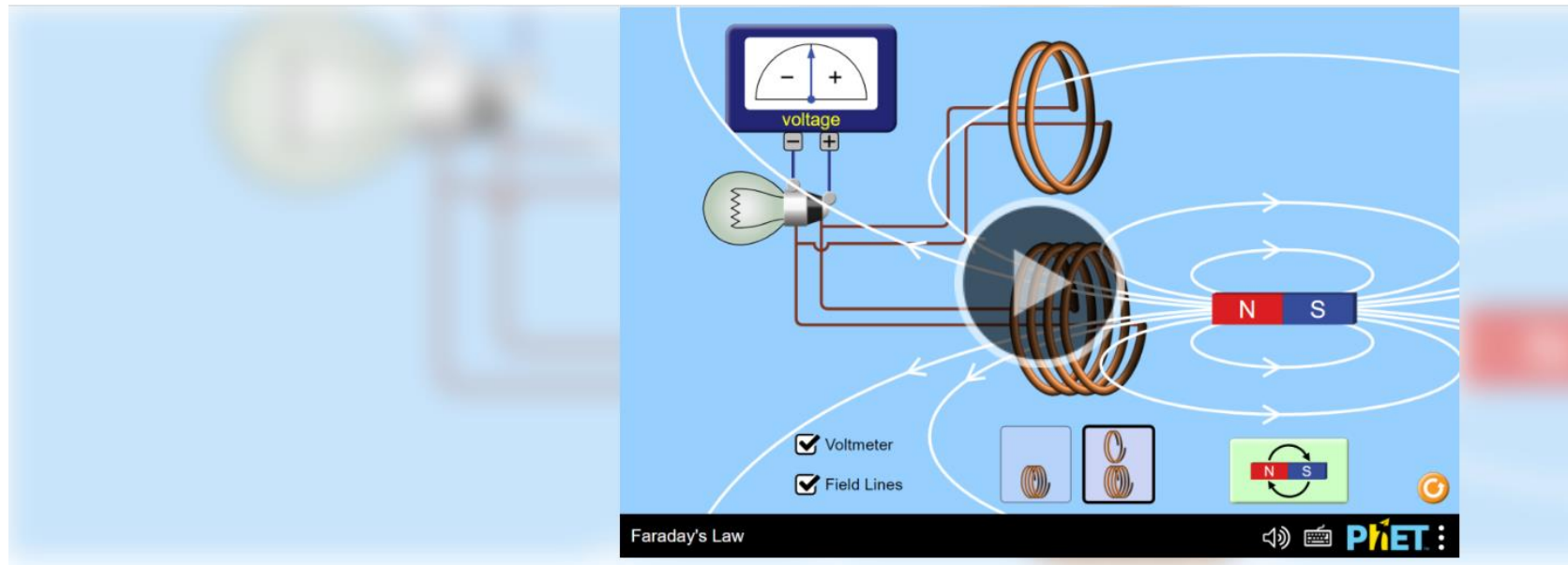
- ▶ Moramo "pomicati" magnet (mijenjati struju kroz zavojnicu)!
- ▶ Promjenjivi magnetski tok kroz neki vodič stvara induciranu elektromotornu silu na njegovim krajevima → ELEKTROMAGNETSKA INDUKCIJA

→ Jedan od najvažnijih načina dobivanja električne energije

Faradayev zakon indukcije



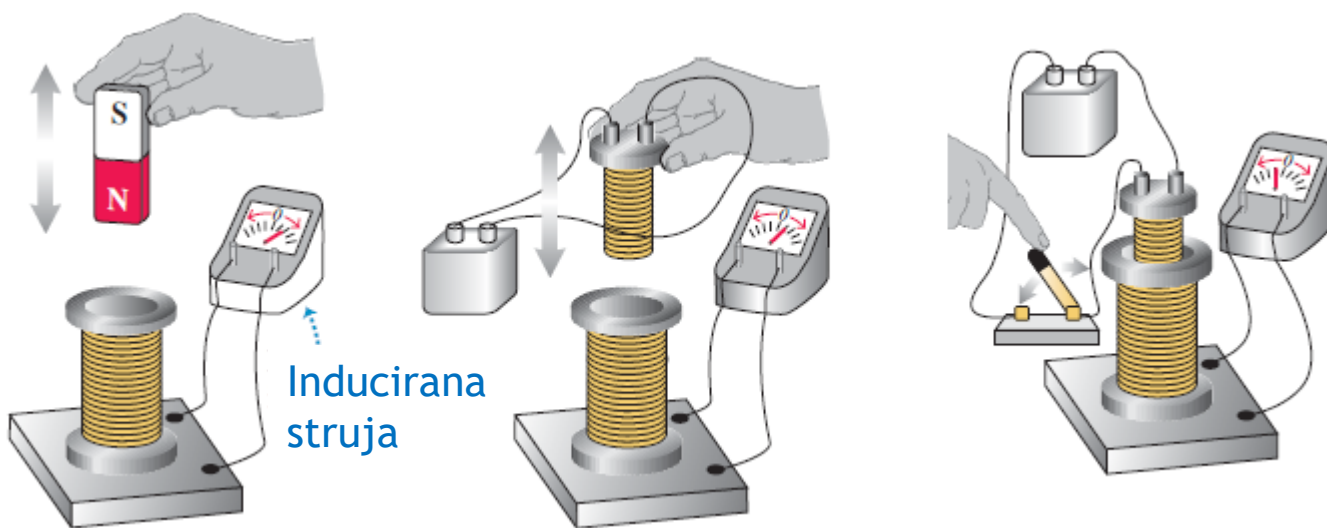
SIMULATIONS TEACHING RESEARCH



Faraday's Law



Faradayev zakon indukcije



Postoji struja
iako nema
nikakve baterije
u strujnom krugu
→ Inducirana
struja, stvara ju
inducirana ems.

Promjena magnetskog toka kroz zavojnicu:

- pomicanjem magneta prema (ili od) zavojnici
- pomicanjem druge zavojnice kojom teče struja prema (ili od) zavojnici
- promjenom iznosa struje u drugoj zavojnici

...inducira elektromotornu silu, tj. struju ako je zatvoren strujni krug.

Faradayev zakon indukcije

- ▶ Mjerenja pokazuju da je veličina inducirane elektromotorne sile proporcionalna brzini promjene magnetskog toka kroz petlju:

$$\varepsilon = -\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

- ▶ Kada imamo zavojnicu s N namotaja:

$$\varepsilon = -N\frac{\Delta\Phi_B}{\Delta t}$$

Negativan predznak - Lenzovo pravilo - inducirana struja nastoji spriječiti promjenu magnetskog toka (koji ju uzrokuje).

Faradayev zakon indukcije - izvod

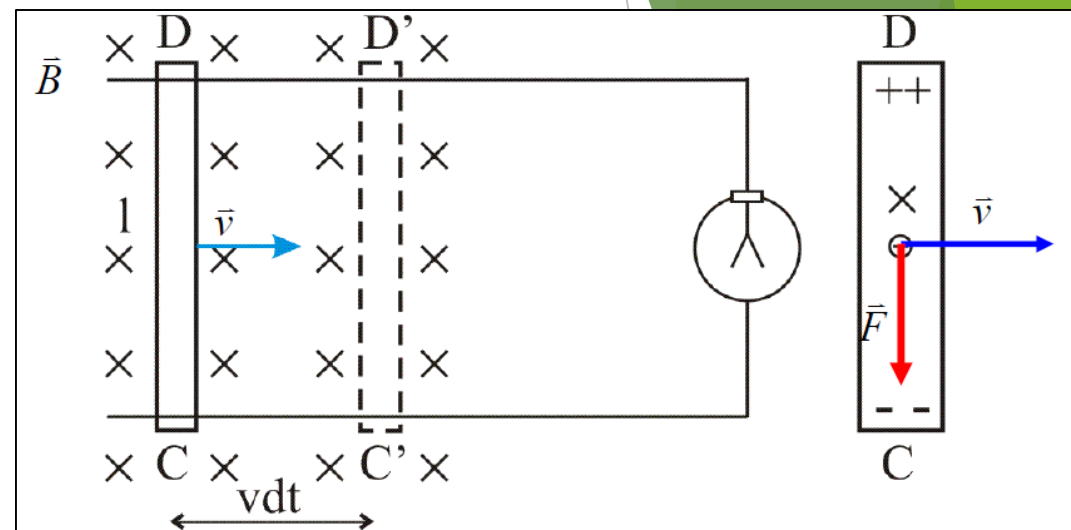
- Promatramo kratki metalni vodič duljine l koji klizi jednolikom brzinom \vec{v} (okomito na mag. polje indukcije \vec{B}) preko dviju usporednih metalnih tračnica.
- Lorentzova sila slobodne elektrone u vodiču tjera prema jednom kraju žice:

$$\vec{F} = -e\vec{v} \times \vec{B}$$

- To gibanje naboja (D→C) uzrokovano je induciranim

neelektrostatskim električnim poljem: $\vec{E}_{ind} = \frac{\vec{F}}{Q} = \vec{v} \times \vec{B}$

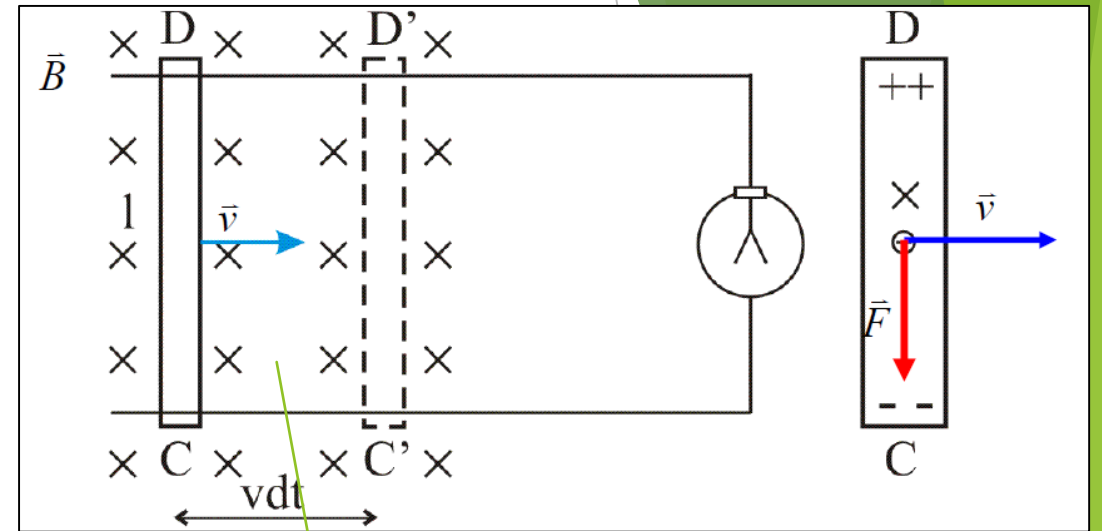
- Razdvojeni naboji stvaraju elektrostatsko polje \vec{E} .
- Razdvajanje naboja traje dok se ne uspostavi ravnoteža, elektrostatsko polje \vec{E} postane jednako $-\vec{v} \times \vec{B}$ i tako poništi inducirano električno polje.



Faradayev zakon indukcije - izvod

- Inducirana elektromotorna sila jednaka je cirkulaciji induciranog (neelektrostatskog) polja:

$$\varepsilon_{ind} = \oint \vec{E}_{ind} \cdot d\vec{l} = \int_C^D (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = vBl$$



- Gibanjem vodiča mijenja se površina S koju petlja (CD-galvanometar pravokutnik) obuhvaća u magnetskom polju. U vremenu dt vodič se pomakne za vdt te se površina promijeni za $lvdt$. Promjena magnetskog toka:

$$d\Phi = -Blvdt$$

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

$$\varepsilon_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

Površina se smanjuje

Faradayev zakon indukcije

$$\varepsilon_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

- Induciranu elektromotornu silu možemo prikazati cirkulacijom induciranog (neelektrostatskog) polja:

$$\varepsilon_{ind} = \oint_K \vec{E} \cdot d\vec{l}$$

- Magnetski tok možemo prikazati plošnim integralom gustoće magnetskog toka

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

$$\oint_K \vec{E} \cdot d\vec{l} = -\frac{d}{dt} \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{s}$$

Opći oblik
Faradayeva
zakona

Lenzovo pravilo

Inducirana elektromotorna sila uzrokuje struju u zatvorenom strujnom krugu:

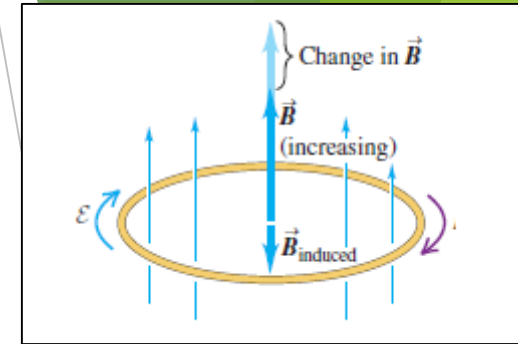
$$\varepsilon_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} \rightarrow I = \frac{\varepsilon}{R} = -\frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dt}$$

Inducirana električna struja u nekoj petlji ima takav smjer da svojim magnetskim poljem djeluje protiv uzroka svog nastanka - Lenzovo pravilo.

- Kada se tok kroz petlju smanjuje inducirana struja vlastitim tokom nastoji povećati tok; kada se tok povećava, inducira se takva struja koja svojim magnetskim učinkom nastoji smanjiti taj tok.

Posljedica zakona očuvanja energije

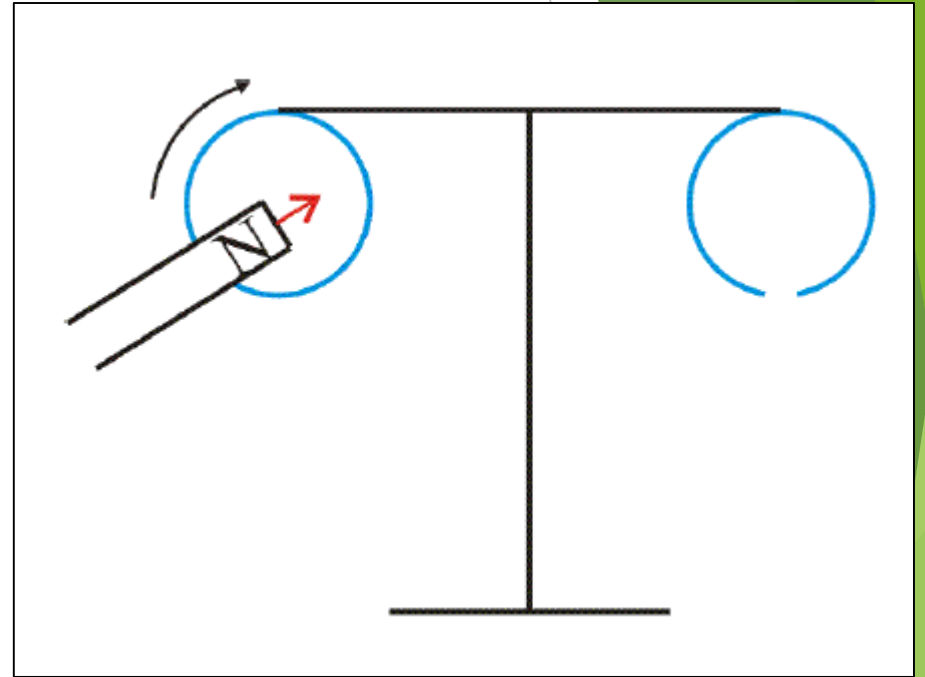
- Rad koji ulažemo kad npr. pomaknemo vodič u magn. polju pretvara se u električnu energiju.
- Da ne vrijedi Lenzovo pravilo, inducirana struja stalno bi rasla → perpetuum mobile (ne bi vrijedio zakon očuvanja energije).





Lenzovo pravilo

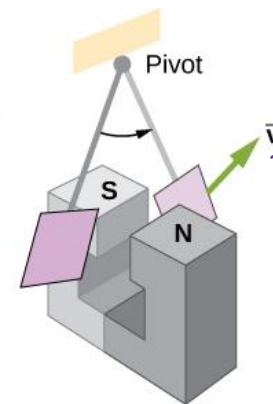
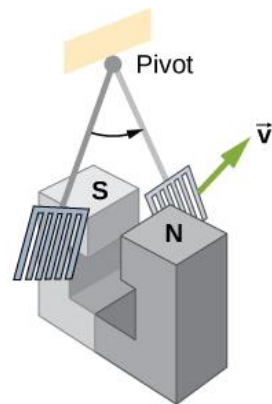
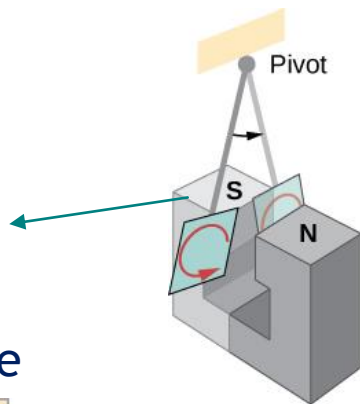
- U zatvoreni aluminijski prsten uvlačimo magnet → Prsten se protivi i nastoji se izmaknuti.
- U zatvorenom aluminijskom prstenu izvlačimo magnet → Prsten se protivi i nastoji slijediti magnet.
- Ako prsten nije zatvoren? → Ništa se ne događa (Jer struja ne može teći).



Lenzovo pravilo - vrtložne struje

- Do sada smo promatrali samo krugove od metalnih žica u kojima se inducirala el. struja.
- Što se događa ako umjesto žice stavljamo velike metalne mase (ploče)?

Metalna ploča - prolaskom kroz magnetsko polje induciraju se tzv. vrtložne struje - prigušeno nihanje



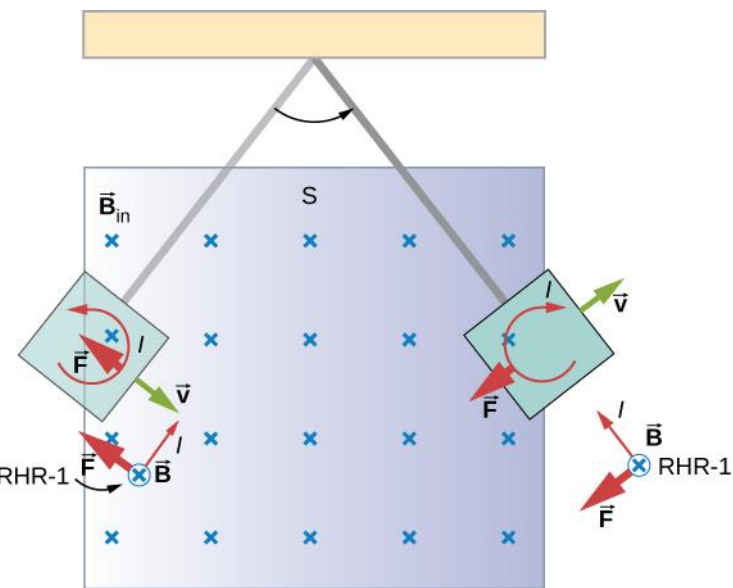
Izolator - prolaskom kroz magnetsko polje ne nastaju vrtložne struje - nema prigušenja titranja

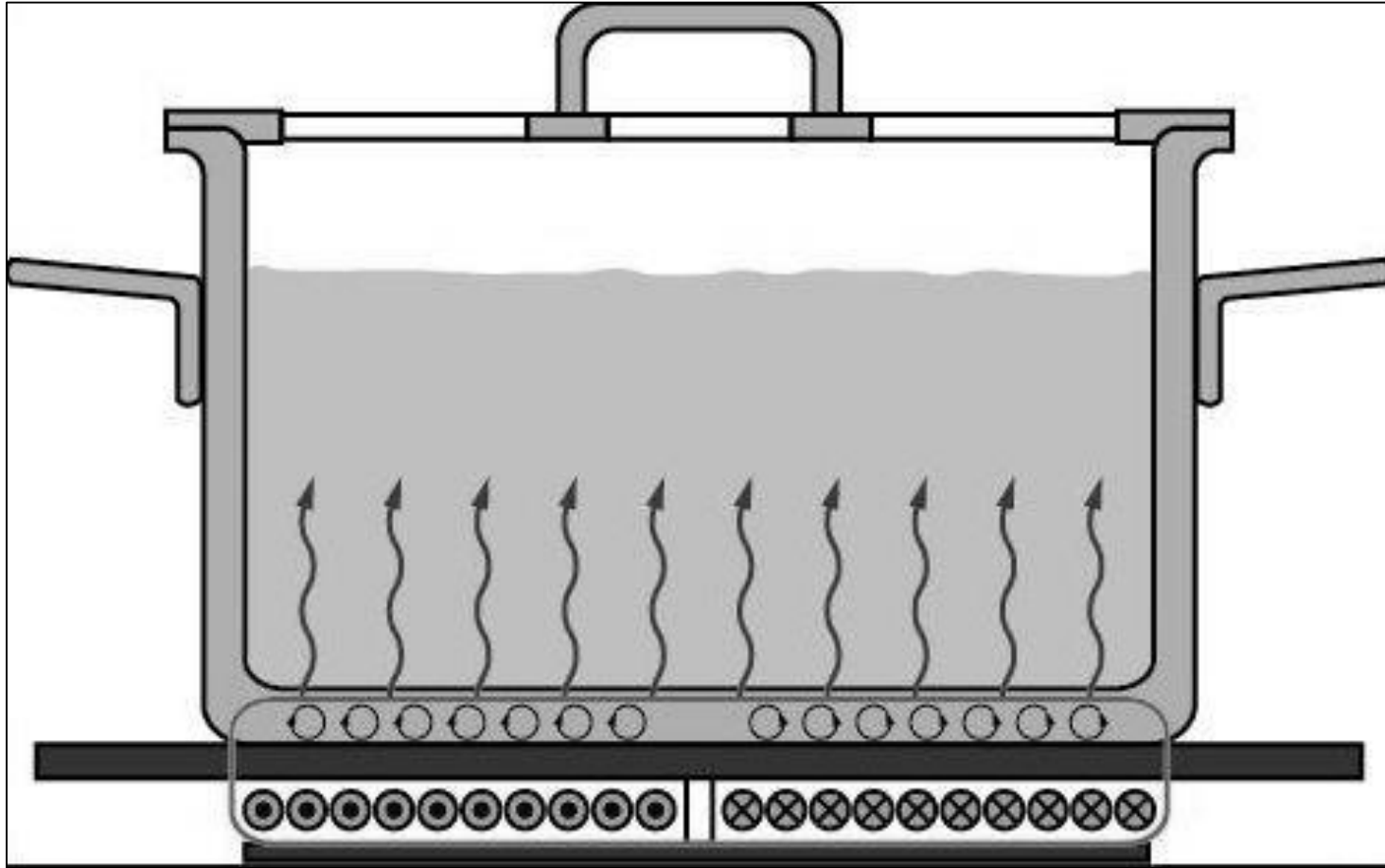
(a)

(b)

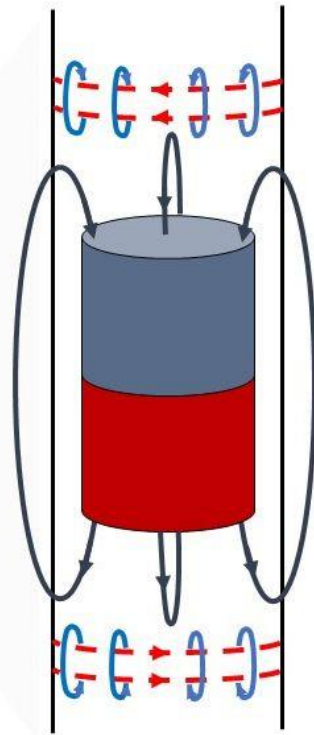
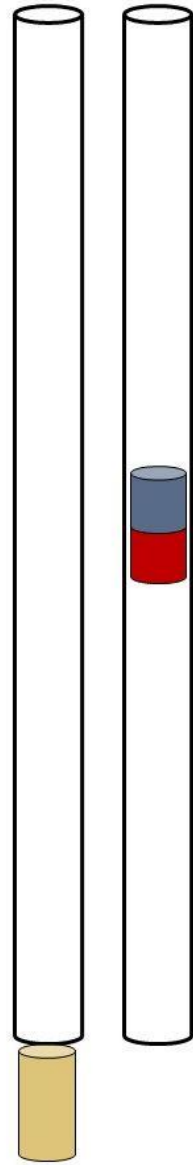
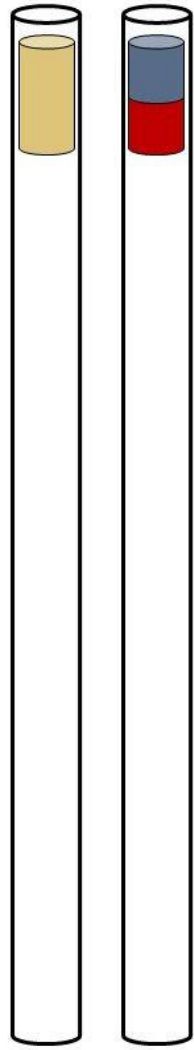
(c)

- U polju nema promjene toka, nema vrtložnih struja.
- Ulaskom u magnetsko polje inducira se vrtložna struja i javlja se sila koja usporava.
- Na izlasku induciraju se struje u suprotnom smjeru - opet sila koja usporava gibanje.
- Vrtložne struje slične su trenju u mehanici, troše energiju pretvarajući ju u toplinu.





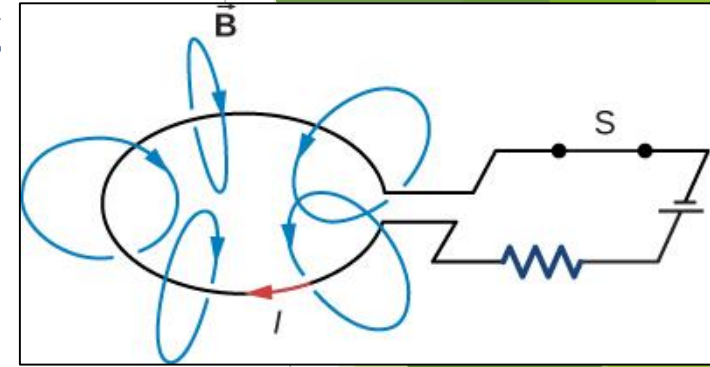






Samoindukcija i induktivitet

- Strujna petlja ili zavojnica protjecane strujom stvaraju magnetski tok. Ako se struja kroz petlju ili zavojnicu mijenja, posljedica je promjena magnetskog toka kroz petlju koja uzrokuje induciranje napona (elektromotorne sile).
- Zavojnica inducira elektromotornu silu sama u sebi pa se ta pojava naziva **samoindukcija**.



$$\varepsilon_{ind} = -N \frac{d\Phi}{dt}$$



- Ako se kroz petlju mijenja struja, mijenja se i magnetski tok. Budući da je magnetsko polje proporcionalno struji kroz petlju, struji je proporcionalan i magnetski tok:

$$\Phi = LI$$

L – induktivitet, koeficijent samoindukcije
[L] = H, henri

- Za zavojnicu od N zavoja: $N\Phi = LI$
- Elektromotorna sila samoindukcije:

$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt}$$

Međuidukcija

- Pojava kod koje se zbog promjene jakosti struje u jednoj zavojnici (primarnoj) inducira napon u sekundarnoj zavojnici.
- Općenito, dio magnetskog toka primarne zavojnice se rasipa.
- **Jezgra od željeza** služi da se tok koji stvara prva zavojnica ne rasipa.
- Elektromotorna sila koju promjena struje u primarnoj zavojnici, I_1 inducira u sekundaru:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi_2}{dt}$$

- Čitav tok koji uzrokuje struja I_1 prolazi i kroz sekundarnu zavojnicu

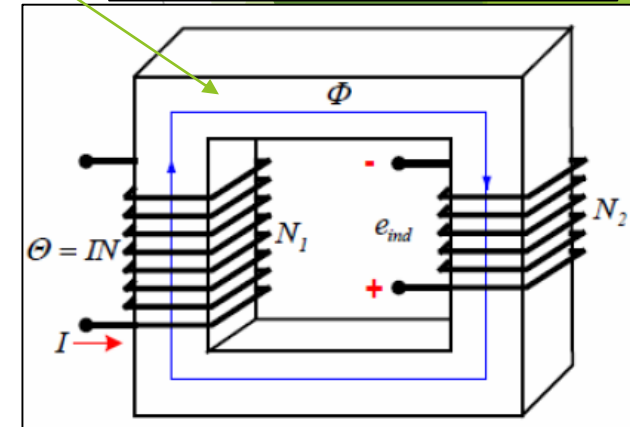
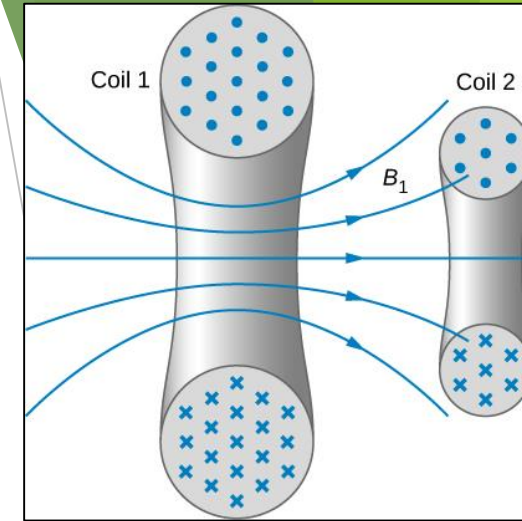
$$\Phi = BS = \mu \frac{N_1 I_1}{l} S$$

- Elektromotornu silu možemo pisati i u obliku:

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi_2}{dt} = -N_2 \mu \frac{N_1 S}{l} \frac{dI_1}{dt} = -\frac{\mu S N_1 N_2}{l} \frac{dI_1}{dt}$$

$$L_{12} = \frac{\mu S N_1 N_2}{l} \quad L_{12} - \text{međuiduktivitet} \quad \longrightarrow$$

$$\varepsilon_2 = -L_{12} \frac{dI_1}{dt}$$





Energija magnetskog polja

- Kada zavojnicu induktiviteta L priključimo na određeni napon, energija iz izvora prelazi u magnetsko polje zavojnice.
- Kada se kroz zavojnicu uspostavi struja jakosti I , ukupna energija magnetskog polja je:

$$E_m = \frac{LI^2}{2}$$

- Možemo uvrstiti izraze za induktivitet zavojnice i magnetsko polje:

$$L = \mu \frac{N^2 S}{l} \quad I = \frac{Hl}{N}$$

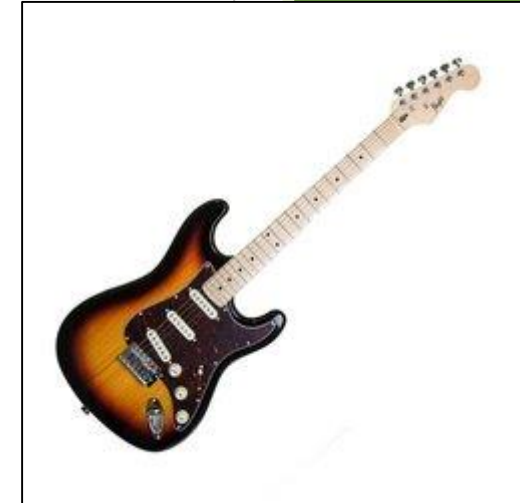
$$E_m = \frac{LI^2}{2} = \frac{1}{2} \mu H^2 S l$$

Gustoća energije:

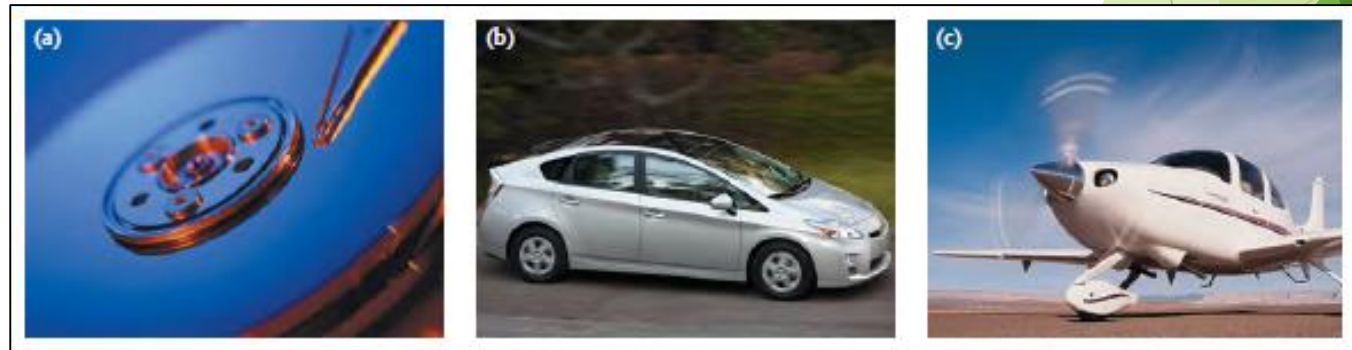
$$w_m = \frac{E_m}{V} = \frac{E_m}{S l} = \frac{1}{2} \mu H^2$$

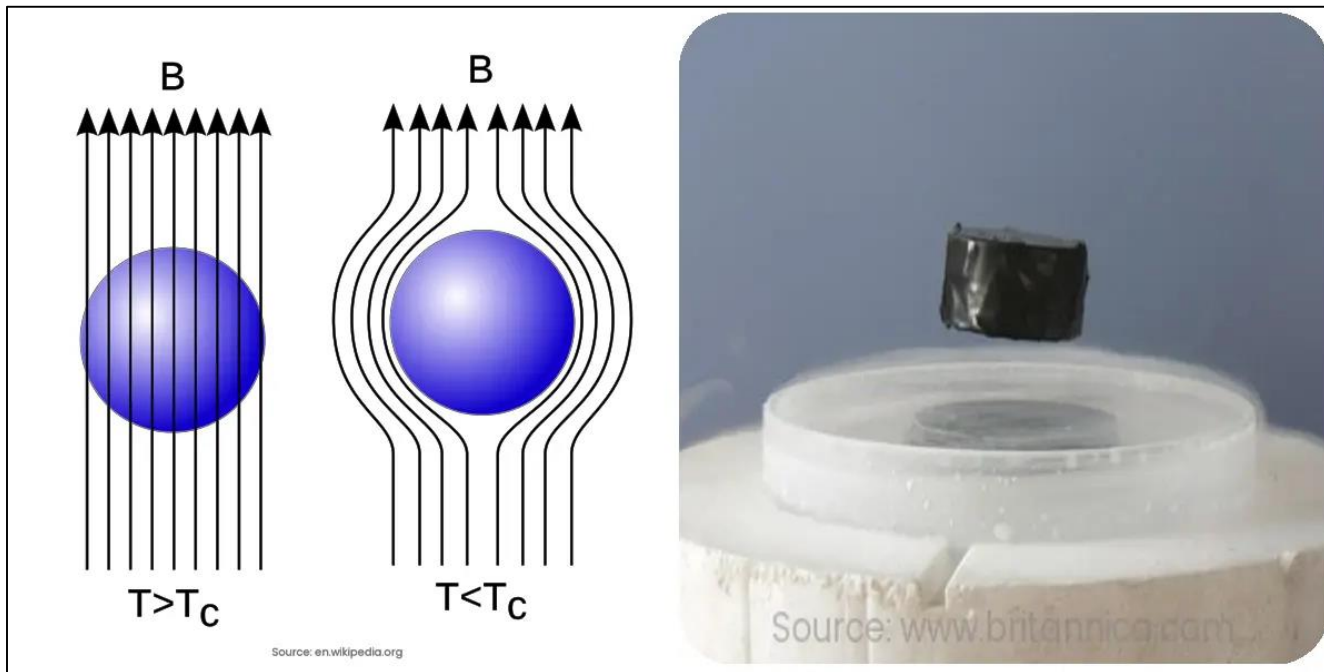
$$\begin{aligned} w_m &= \frac{1}{2} \mu H^2 \\ &= \frac{1}{2} B H = \frac{1}{2\mu} B^2 \end{aligned}$$

Primjena elektromagnetske indukcije



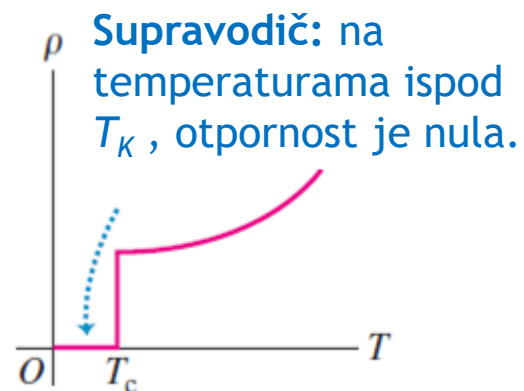
Samonapajajuća LED
svjetiljka





Source: www.britannica.com

Supravodljivost



- ▶ **Supravodljivost:** otpor (i otpornost) pada s temperaturom, ali na kritičnoj temperaturi T_K naglo pada na nulu. U strujnom krugu s takvim elementima, jednom uspostavljena struja mogla bi teći beskrajno bez vanjskog polja.
- ▶ **Primjena:** elektromagneti, magnetska levitacija, čipovi, mjerenja slabih em. polja, pohranjivanje energije.

MAGNETSKO POLJE U MATERIJALU

Magnetizacija

- ▶ Utjecaj sredstva na magnetsko polje opisuje magnetizacija, \vec{M} .
- ▶ Magnetizacija je magnetski dipolni moment po jedinici volumena.

- ▶ $[M] = \frac{\text{A}\cdot\text{m}^2}{\text{m}^3} = \frac{\text{A}}{\text{m}}$

- ▶ Kad se neki uzorak materijala nađe u vanjskom magnetskom polju B_0 , ukupno magnetsko polje B u nekoj točki uzorka ovisi o vanjskom magnetskom polju i magnetizaciji.

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M}$$

↑ ↑
struje tvar

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M})$$

Magnetska susceptibilnost

U većini slučajeva magnetizacija je proporcionalna jakosti magnetskog polja:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H}$$

χ_m – magnetska susceptibilnost

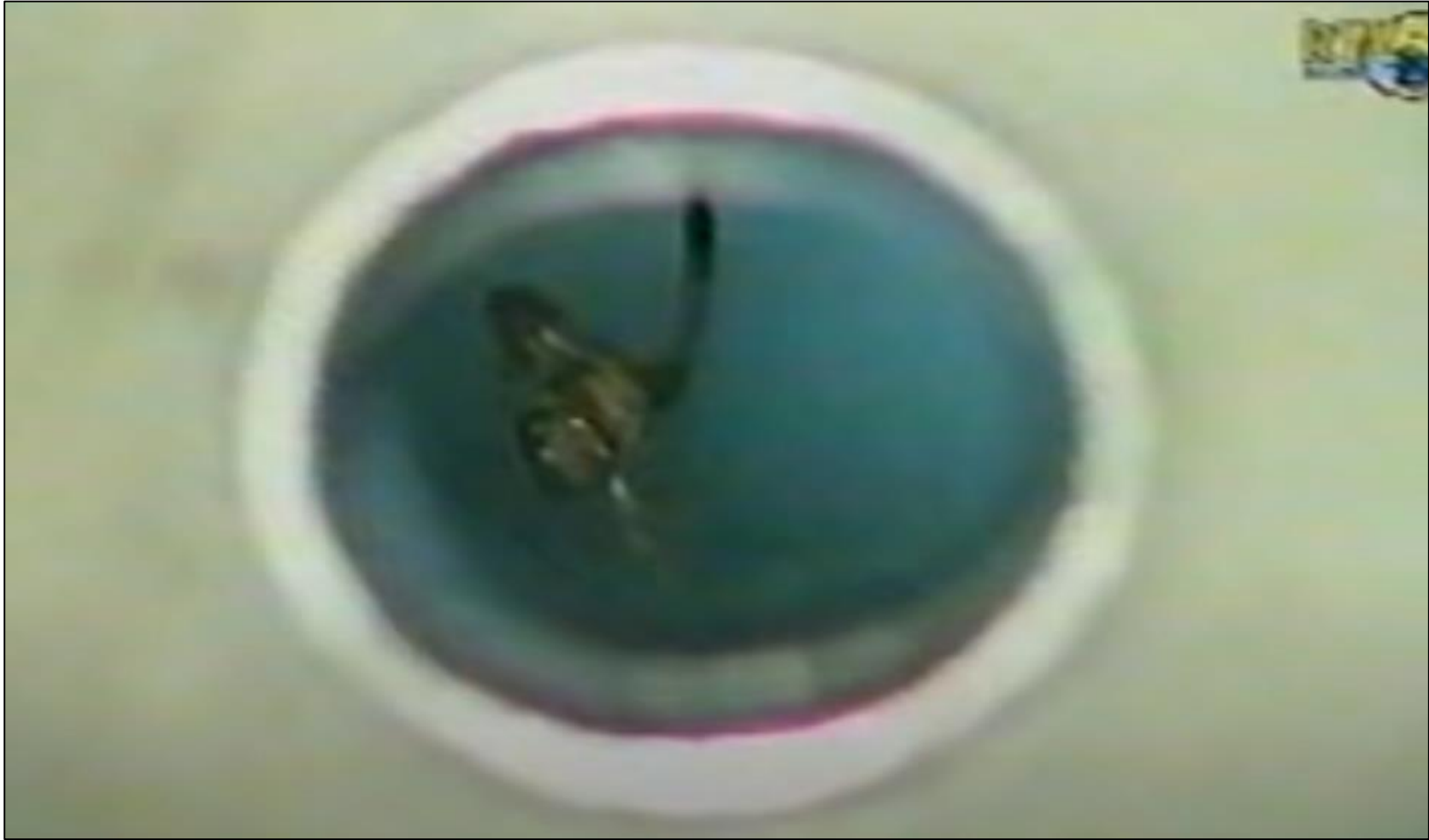
$$\chi_m = \mu_r - 1$$

S obzirom na magnetska svojstva, materijale dijelimo na:

- **Dijamagneti:** $\mu_r < 1 \rightarrow \chi_m < 0$; $-10^{-5} < \chi_m < -10^{-3}$; Bi, Pb, Cu, H₂...
- Malo smanjuju magnetsku indukciju s obzirom na onu u vakuumu.
- **Paramagneti:** $\mu_r > 1 \rightarrow \chi_m > 0$; $\chi_m \approx 10^{-5}$; Al, Pt, W, Ta...
- Malo povećavaju magnetsku indukciju s obzirom na onu u vakuumu.
- **Feromagneti:** $\mu_r \gg 1 \rightarrow \chi_m \gg 0$; $\chi_m \approx 10^3$, čak i do 10^5
- željezo, nikal, kobalt i njihove legure

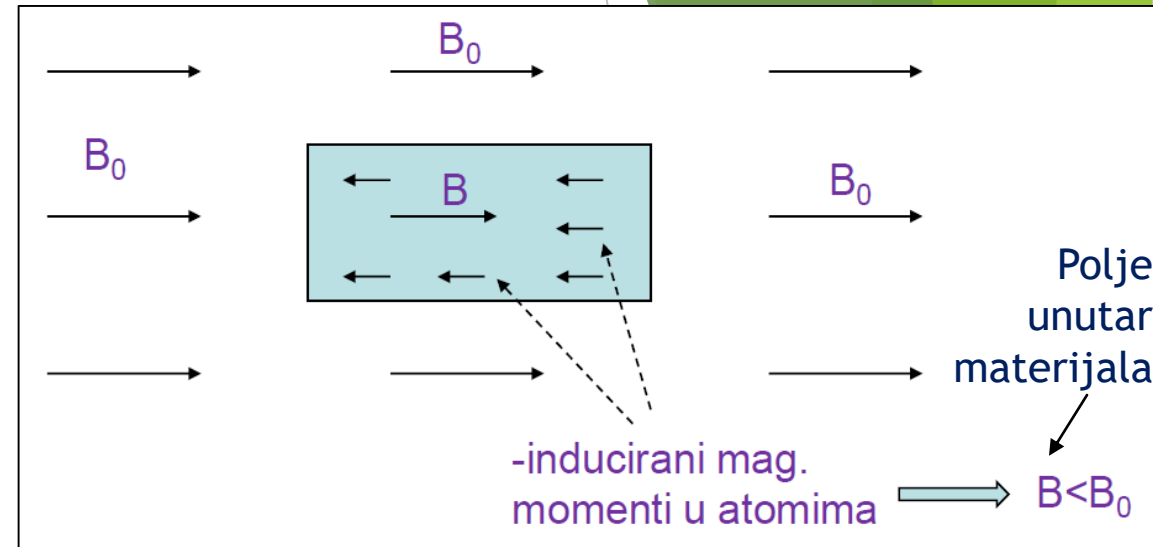
Magnetičnost materijala

- Magnetsko polje stvaraju naboji u gibanju (struje).
- Svaki elektron u atomu ima orbitalni (kruženje oko jezgre) i spinski („vrtnja oko svoje osi”) dipolni moment koji se vektorski zbrajaju i daju rezultantni magnetski dipolni moment elektrona.
- (! ovo je vrlo jednostavan prikaz magnetskog momenta elektrona/atoma - pravu sliku daje kvantna fizika.)
- Rezultantni dipolni momenti pojedinih elektrona u atomu daju vektorsku rezultantu magnetskog dipolnog momenta atoma.
- Rezultantni magnetski dipolni moment pojedinih atoma daje rezultantni magnetski dipolni moment uzorka materijala.
- Ako rezultantni dipolni moment uzorka materijala proizvodi magnetsko polje kaže se da je materijal magnetičan.



Dijamagnetizam

- Dijamagneti imaju nemagnetične molekule.
- Kada dijamagnetski materijal unesemo u vanjsko magnetsko polje B_0 , tada elektroni promijene svoje gibanje i orbitalni magnetski momenti atoma se orijentiraju suprotno od smjera B_0 (Lenzovo pravilo); to su inducirani mag. momenti i ne javljaju se sve dok nema vanjskog magnetskog polja.



- Klasična fizika daje približan rezultat za magnetizaciju dijamagnetskih materijala, odnosno magnetsku susceptibilnost:

$$\vec{M} = -\mu_0 \frac{ne^2 r^2}{4m} \vec{H}; \quad \chi_m = -\mu_0 \frac{ne^2 r^2}{4m}$$

- Negativna
- Neovisna o temperaturi

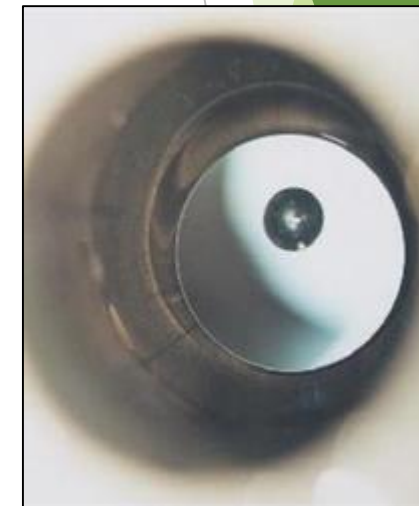
- Dijamagnetizam je svojstvo svih materijala, ali je toliko slab da se praktički ne primjećuje, ukoliko materijal ima paramagnetska ili feromagnetska svojstva.

Dijamagnetizam

- Bizmut - neobično jak dijamagnetski materijal.
- U nehomogenom magnetskom polju kuglica od bizmuta giba se u smjeru slabijeg magnetskog polja - ponaša se sasvim suprotno od željeza.
- Voda je dijamagnetski materijal. Živa bića se većinom sastoje od vode.
- U nehomogenom magnetskom polju na molekule vode djeluje dijamagnetska sila prema gore i ako je dovoljno velika da uravnoteži gravitacijsku silu - tijelo levitira



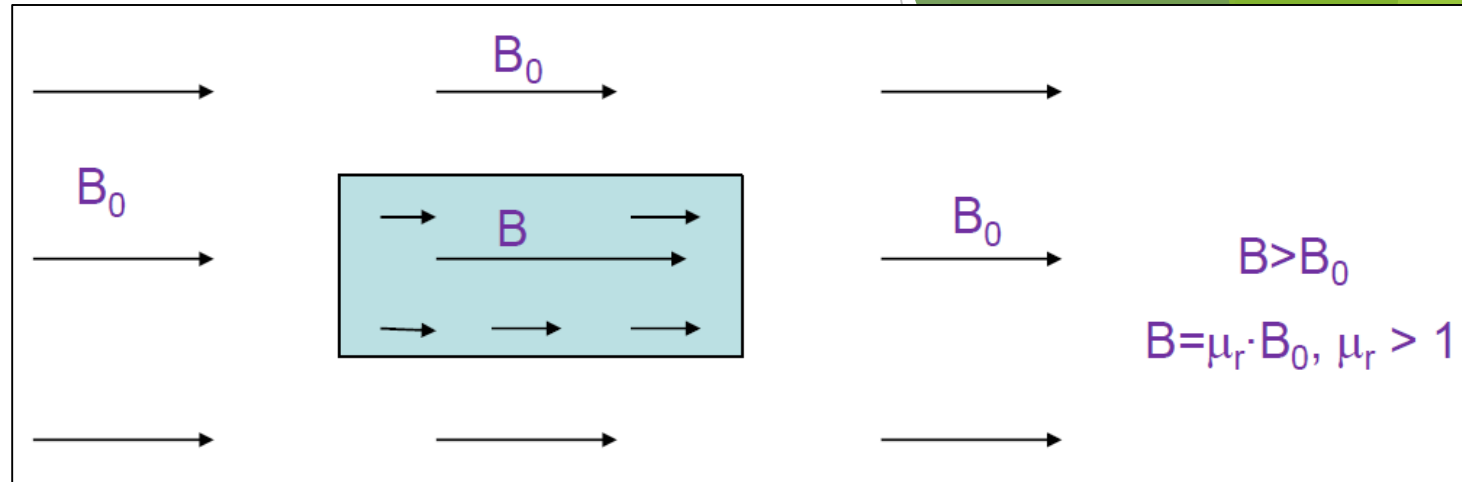
žaba



kapljica vode

Paramagnetizam

- Kada atomi u materijalu imaju permanentni magnetski moment (imaju nesparene elektrone) - materijal je paramagnet.



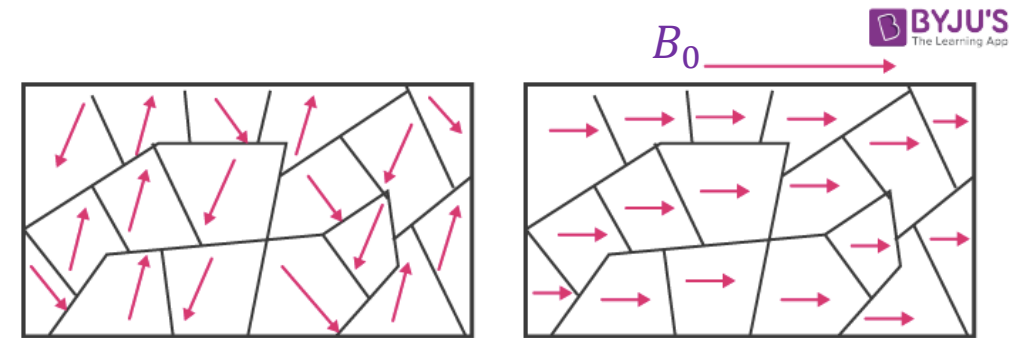
- Kada nema vanjskog magnetskog polja B_0 , atomski magnetski momenti su orijentirani nasumično - ukupni dipolni moment materijala je nula.
- U vanjskom magnetskom polju B_0 , moment sile nastoji usmjeriti dipole duž polja i nastaje određena paramagnetska magnetizacija.
- Magnetizacija M i susceptibilnost χ_m paramagneta ovise o temperaturi:

$$\chi_m = \frac{\mu_0 n}{3kT} p_m = \frac{\text{konst.}}{T}$$

Curiev
zakon

Feromagnetizam

- Feromagnetni imaju jaki, permanentni magnetizam.
- Željezo, kobalt, nikal, gadolinij, disprozij i slitine koje sadrže ove elemente pokazuju feromagnetska svojstva zbog kvantnih efekata pri kojima elektronski spin jednog atoma međudjeluje s onima od susjednih atoma. Kao rezultat ovakvih međudjelovanja stvaraju se mikroskopska ($10^{-12} - 10^{-8} \text{ m}^3$) područja spontane magnetizacije - tzv. Weissove domene.
- U domenama su atomski dipoli (ima ih oko 10^{20}) međusobno poravnati (usmjereni u istom smjeru), stvarajući time magnetski dipol domene.
- Ako su domene nasumično orijentirane - ukupni magnetski moment materijala je nula - nije magnetičan.
- U vanjskom magnetskom polju B_0 :
 - domene se orijentiraju u smjeru polja
 - domene u smjeru polja povećavaju se na račun ostalih domena



Feromagnetizam

- **Curieva temperatura** - temperatura (visoka) pri kojoj toplinsko gibanje postaje dovoljno jako da razruši orijentaciju magnetskih dipola unutar domena pa feromagneti gube feromagnetska svojstva - postaju paramagneti.
- Zbog velikog broja magnetskih dipolnih momenata unutar uzorka i njihove usmjerenosti, polje B unutar uzorka može biti nekoliko tisuća puta veće od vanjskog polja B_0 - dakle, feromagnetizam je vrlo jaka magnetska pojava.
- Ovisnost vektora B i H kod feromagnetskih materijala nije jednostavna, a proces magnetiziranja nije reverzibilan. Prikladan uobičajen način karakterizacije feromagnetskog materijala prikaz je cijelog ciklusa magnetiziranja, tzv. *krivulja histereze*.

