

# Stacionární magnetické pole



# 29. Magnetické pole vodiče s proudem



➤ sledujme střílku kompasu

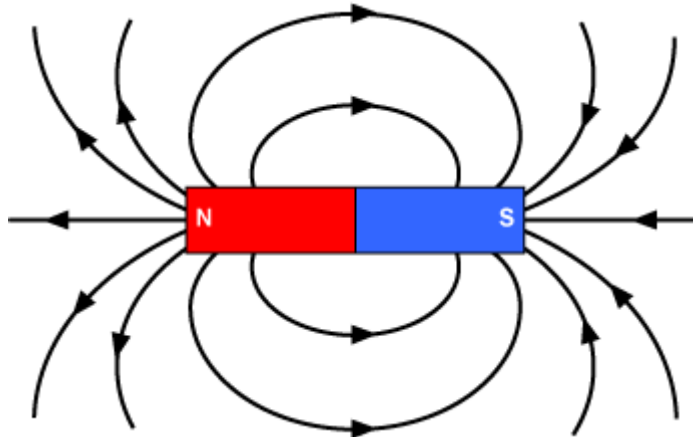
<https://www.youtube.com/watch?v=FPoqvWiHck>

## Oerstedův experiment (1820)

- vychýlení magnetky kompasu v okolí vodiče s proudem
- závěr: kolem vodiče existuje magnetické pole

## Permanентní magnet – tyčový

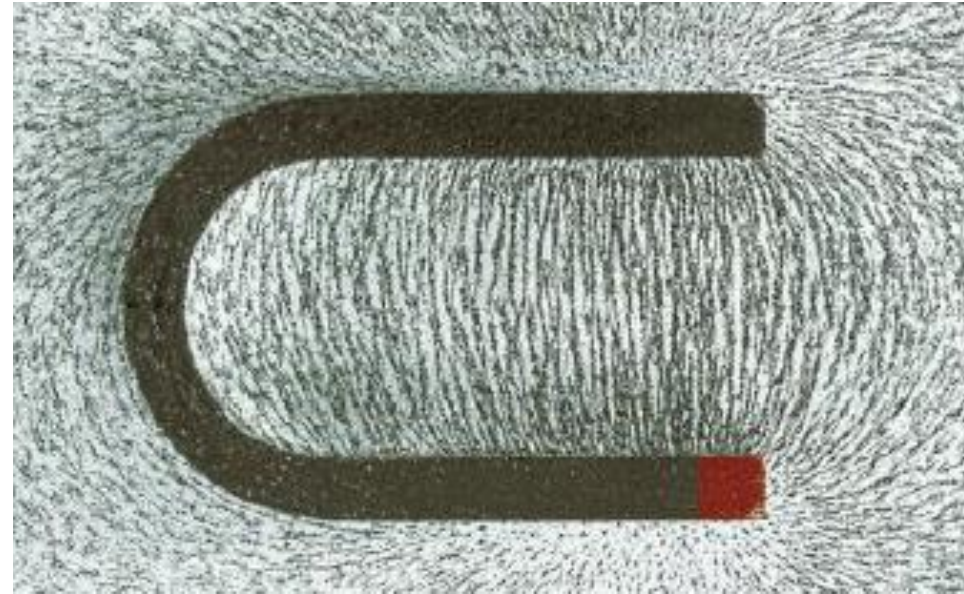
- **severní pól:** N (north)
- **jižní pól:** S (south)
- směr siločar: **dohodou od N do S**



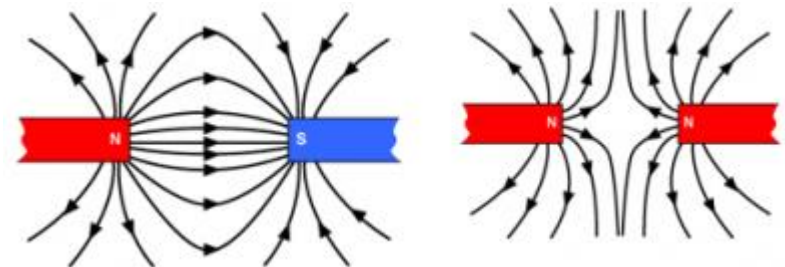
# 29. Magnetické pole vodiče s proudem

## Homogenní magnetické pole

- **permanentní magnet – podkova**
- **siločáry** uvnitř podkovy **jsou** přibližně **rovnoběžné**
- **Helmholtzovy cívky** – mezi cívkami je homogenní magnetické pole



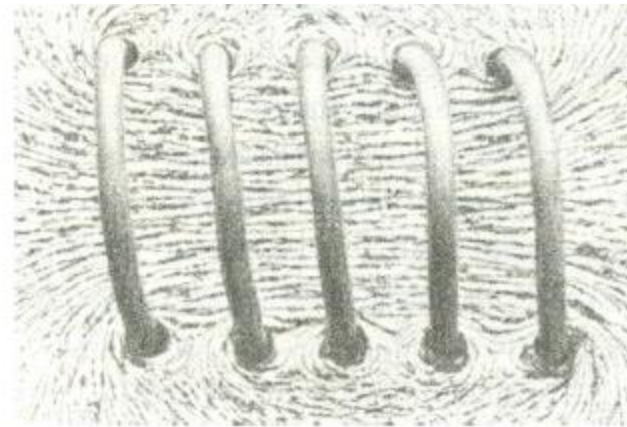
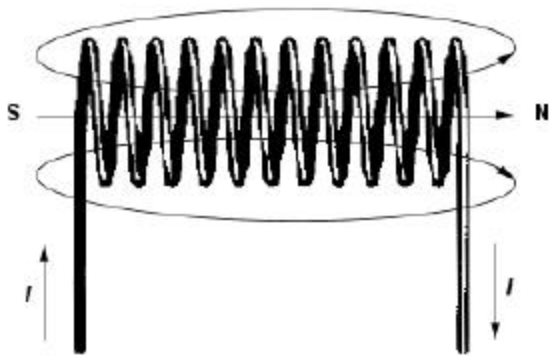
- pomocí permanentního magnetu lze trvale zmagnetovat předměty vyrobené z magneticky měkké oceli – např. hřebíky
- **souhlasné** póly se **odpužují**, **nesouhlasné** **přitahují**



# 29. Magnetické pole vodiče s proudem

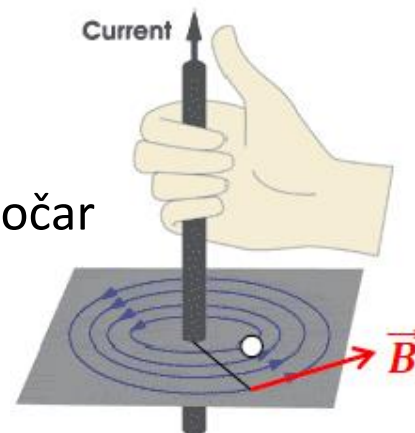
## Cívka s proudem

- mag. pole podobné jako u permanentního tyčového magnetu
- **siločáry** uvnitř cívky **jsou rovnoběžné**
- **Ampérovo pravidlo pravé ruky**
  - prsty ve směru proudu, palec ukazuje severní pól



## Přímý vodič

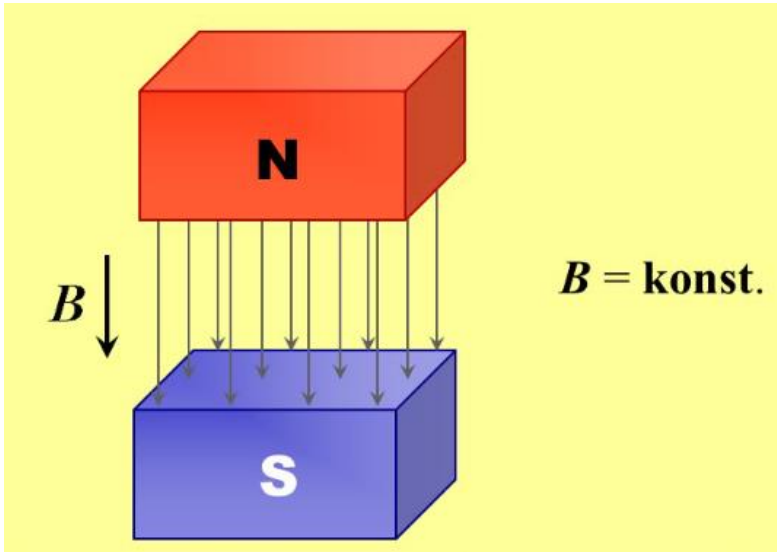
- **siločáry** **jsou soustředné kružnice**
- **Ampérovo pravidlo pravé ruky**
  - palec ve směru proudu, prsty ukazují směr siločar



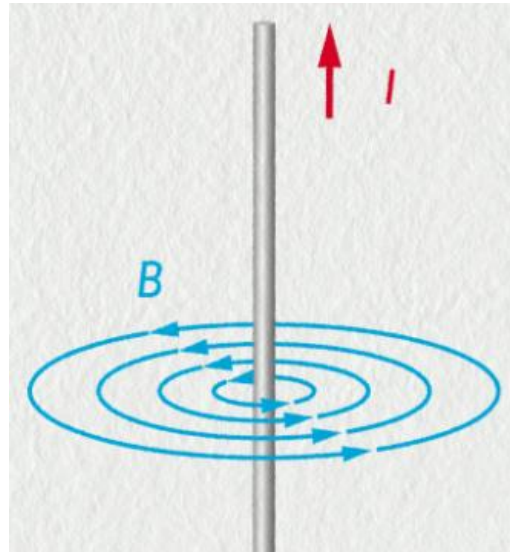
# 29. Magnetické pole vodiče s proudem

## Magnetická indukční čára

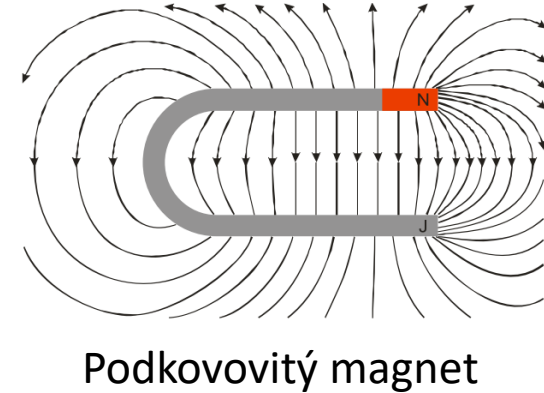
- prostorově orientovaná křivka, jejíž tečna v daném bodě určuje směr magnetické indukce  $B$
- magnetická indukce –  $B$        $[B] = \text{T (tesla)}$ 
  - fyzikální vektorová veličina, kterou popisujeme vlastnosti magnetického pole



Homogenní magnetické pole



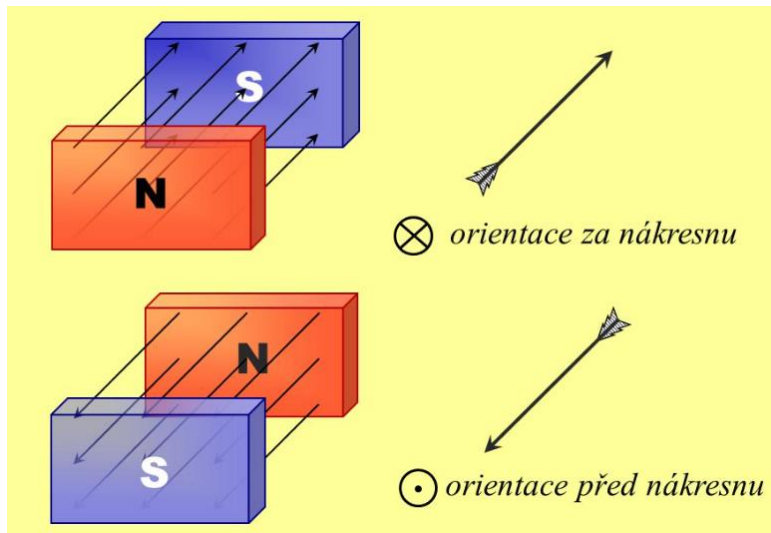
Přímý vodič



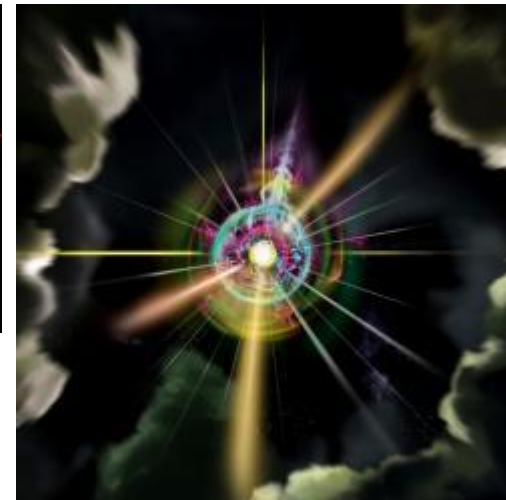
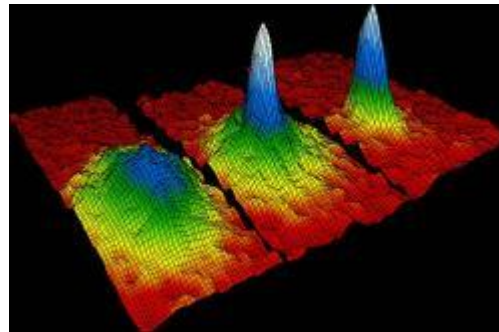
Podkovovitý magnet

# 29. Magnetické pole vodiče s proudem

- **magnetická indukce –  $B$** 
  - **křížek** v kolečku: vektor indukce směřuje „do tabule“
  - **tečka** v kolečku: vektor indukce směřuje „z tabule“



- **magnetické siločáry**
  - jsou uzavřené křivky
  - magnetické pole je tzv. **vírové**
  - běžně nelze oddělit severní a jižní pól
  - **elektrické pole je zřídlové**, existují samostatné kladné i záporné bodové náboje
- **magnetické monopóly**
  - existence byla experimentálně prokázána 2013 na kvantové úrovni
  - v přírodě či vesmíru zatím přirozeně neobjevy



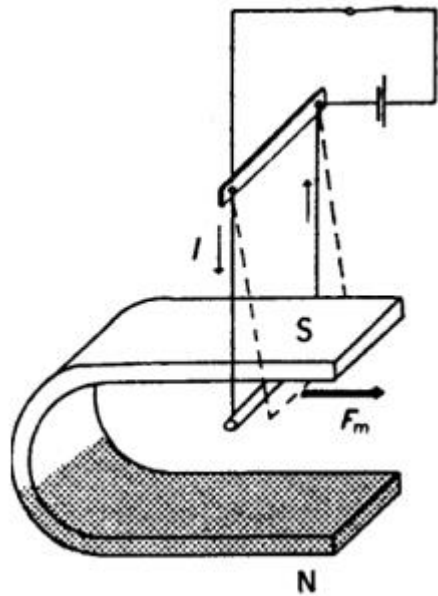
# 30. Magnetická síla. Magnetická indukce

## Magnetická síla působící na vodič s proudem v magnetickém poli

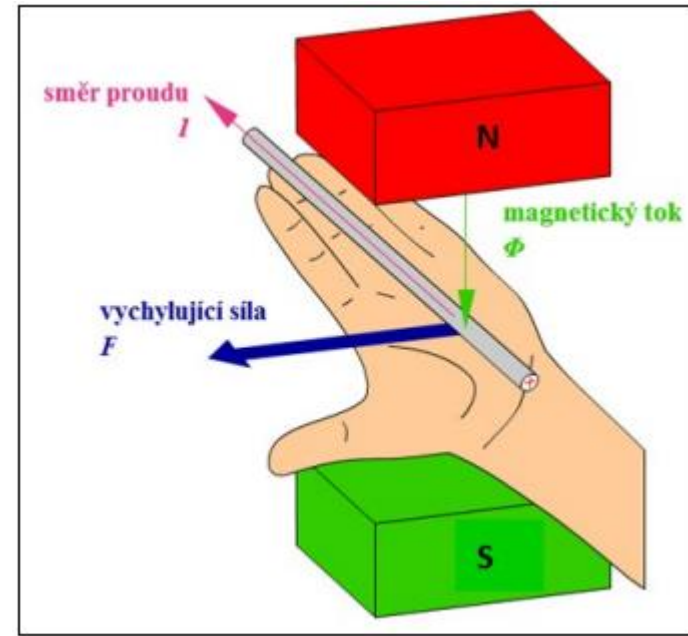


➤ sledujme pohyb vodivé tyčinky

<https://www.youtube.com/watch?v=IXUw6vZKNp8>



- siločáry magnetického pole směřují od N k S, čili nahoru
- proud míří směrem do tabule
- vodič se vychýlí směrem ven z podkovy
- při změně polaroty zdroje se vodič vychýlí na opačnou stranu
- čím větší proud, tím větší výchylka vodiče



## Flemingovo pravidlo levé ruky

- prsty ve směru proudu
- indukční čáry magnetického pole směřují do dlaně
- závěr: **palec ukazuje směr magnetické síly**

# 30. Magnetická síla. Magnetická indukce

## Magnetická síla $F_m$

- $B$  – magnetická indukce
- $I$  – elektrický proud
- $l$  – délka vodiče v magnetickém poli
- $\alpha$  – úhel mezi směrem  $B$  a směrem  $I$  ve vodiči

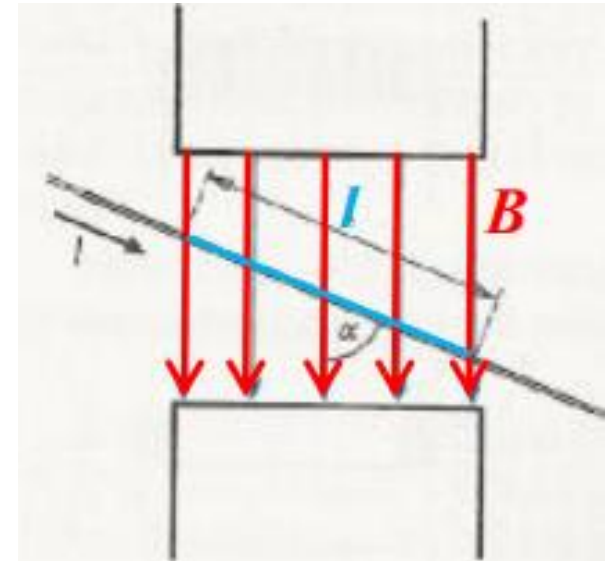
$$F_m = I(l \times B) = BIl \sin \alpha$$

## Magnetická indukce $B$     $[B] = \text{T (tesla)}$

- základní veličina charakterizující magnetické pole
- vektorová veličina
- homogenní mag. pole:  $B = \text{konst.}$

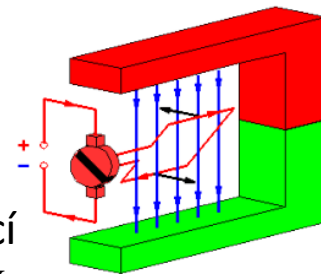
### Indukce některých magnetických polí

|   |                      |
|---|----------------------|
| Povrch neutronové hvězdy                        | $10^8 \text{ T}$     |
| Blízko velkého elektromagnetu                   | $1,5 \text{ T}$      |
| Blízko malého tyčového magnetu                  | $10^{-2} \text{ T}$  |
| Na povrchu Země                                 | $10^{-4} \text{ T}$  |
| V mezihvězdném prostoru                         | $10^{-10} \text{ T}$ |
| Nejnižší hodnota v magneticky stíněné místnosti | $10^{-14} \text{ T}$ |
| „Uvnitř“ atomu sodíku                           | $10^2 \text{ T}$     |



## Magnetická síla v praxi

- elektromotor
- alternátor
- dynamo
- ručkové měřicí přístroje  $U$  a  $I$





# 31. Magnetické pole 2 rovnoběžných vodičů



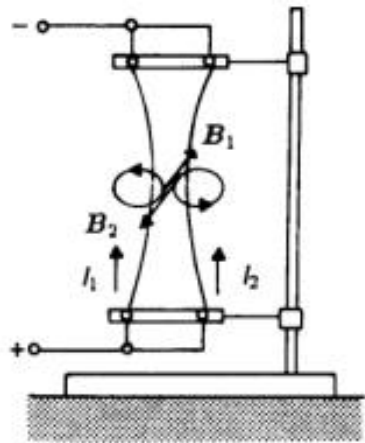
➤ sledujme pohyb vodičů při paralelním a sériovém zapojení

➤ Proud jde vodiči opačným směrem:

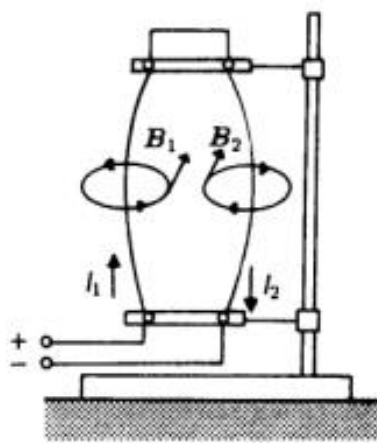
<https://www.youtube.com/watch?v=oW155lbt9fA>

➤ Proud jde vodiči stejným směrem

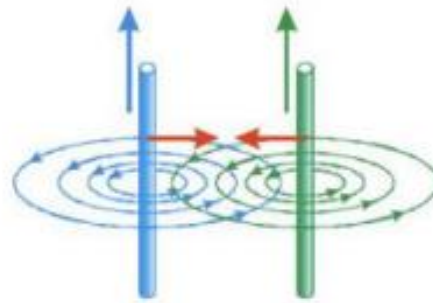
<https://www.youtube.com/watch?v=KmlgTs3ExV8>



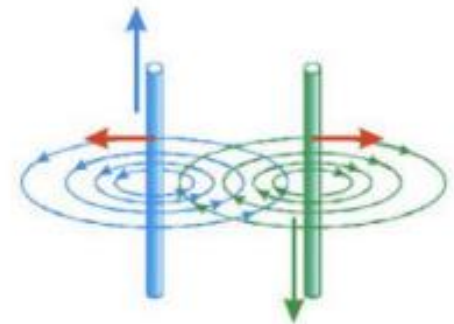
paralelní zapojení



sériové zapojení



vodiče se přitahují



vodiče se odpuzují

# 31. Magnetické pole 2 rovnoběžných vodičů

## Ampérův zákon

$$F_m = \frac{\mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2}{d} \cdot l$$

- $F_m$  – magnetická síla působící mezi dvěma rovnoběžnými vodiči s proudem
- $\mu$  – permeabilita prostředí
- $I_1, I_2$  – elektrické proudy procházející jednotlivými vodiči
- $l$  – délka vodiče
- $d$  – vzdálenost mezi vodiči

## Permeabilita prostředí – $\mu$     $[\mu] = \text{N} \cdot \text{A}^{-2}$

- základní veličina charakterizující magnetické vlastnosti látky
- $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$  (přesně) – permeabilita vakua
- $\mu_r$  – **relativní permeabilita** prostředí
  - bezrozměrné číslo
  - udává kolikrát je v daném prostředí magnetické pole silnější ( $\mu_r > 1$ ) nebo slabší ( $\mu_r < 1$ ) než ve vakuu

$$\mu = \mu_0 \mu_r$$

$$B = \mu_r B_0$$

# 31. Magnetické pole 2 rovnoběžných vodičů

## Tabulka relativních permeabilit

| Materiál       | $\mu_r$          |
|----------------|------------------|
| Kobalt         | 80 - 200         |
| Permalloy      | 50 000 - 140 000 |
| Železo         | 300 - 10 000     |
| Kapalný kyslík | 1,003 620        |
| Platina        | 1,000 264        |
| Hliník         | 1,000 023        |
| Plynný kyslík  | 1,000 001 86     |
| Voda           | 0,999 991        |
| Měď            | 0,999 990        |

## Definice 1 ampéru

- 1 ampér je proud, který při průchodu 2 nekonečně dlouhými rovnoběžnými vodiči, vzdálenými od sebe 1 m, vyvolá ve vakuu sílu  $2 \cdot 10^{-7}$  N na jeden metr délky vodiče.

# 31. Magnetické pole 2 rovnoběžných vodičů

## Elektromagnetické dělo - Railgun



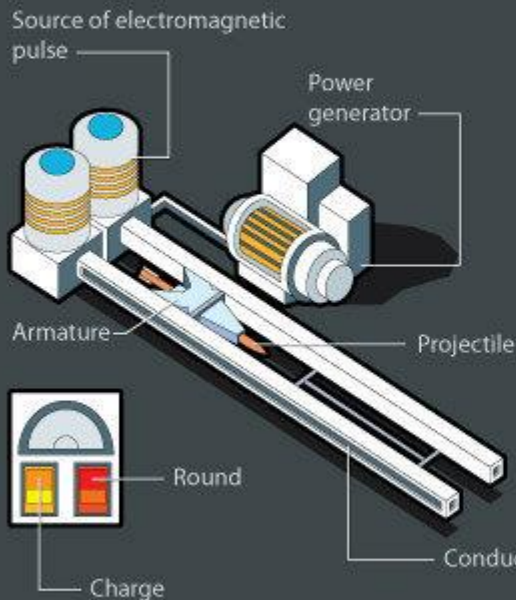
<https://www.youtube.com/watch?v=VvXXtT3HoU>

- rychlost projektilu až 9000 km/h, dostřel až 200 km (klasická houfnice 80 km)

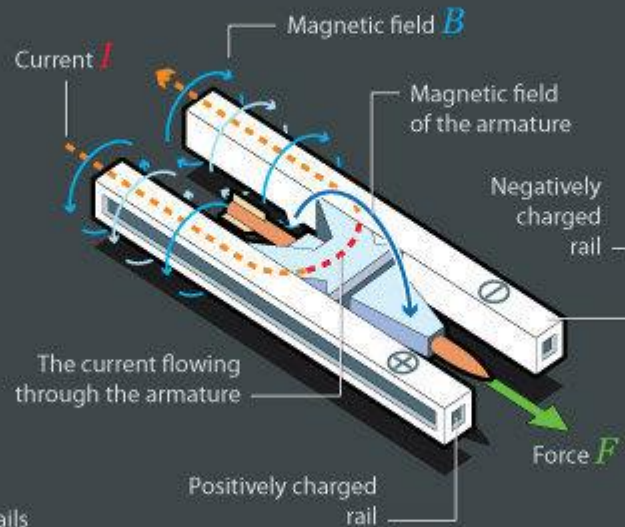


The most powerful railgun in the world was designed at the U.S. naval research laboratory in Dahlgren, Virginia. The energy of its rounds is 33 megajoules. Projectile velocity is five times the speed of sound and its firing range can reach 370 km

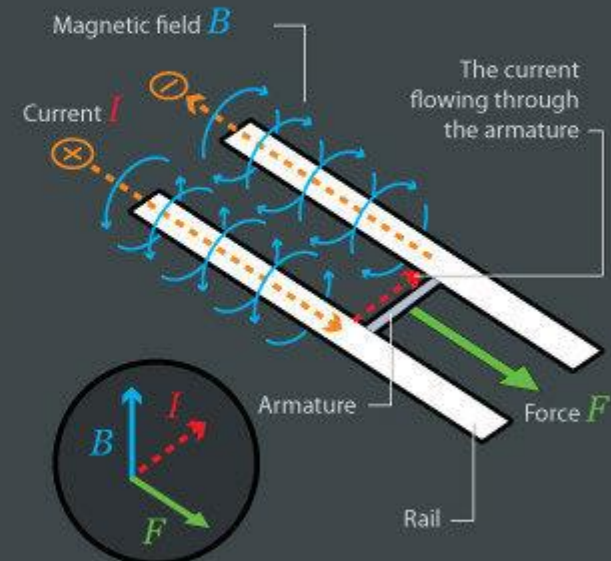
### Railgun device



### Interaction of magnetic fields



### The principle behind Lorentz force



The railgun uses electromagnetic force (Lorentz force) to propel an electrically conductive projectile that is initially part of a chain. Current  $I$ , flowing through the rails, generates magnetic field  $B$  in the rails and armature. As a result, under the action of force  $F$ , the armature is pushed out of the magnetic field of the rails and the projectile accelerates

# 31. Magnetické pole 2 rovnoběžných vodičů

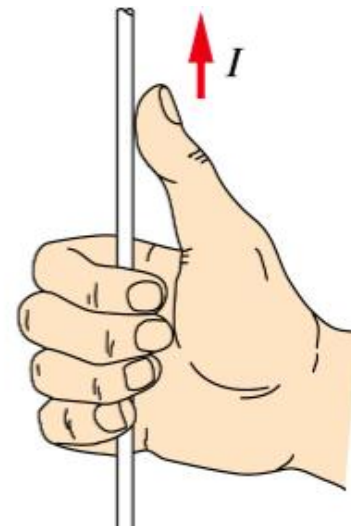
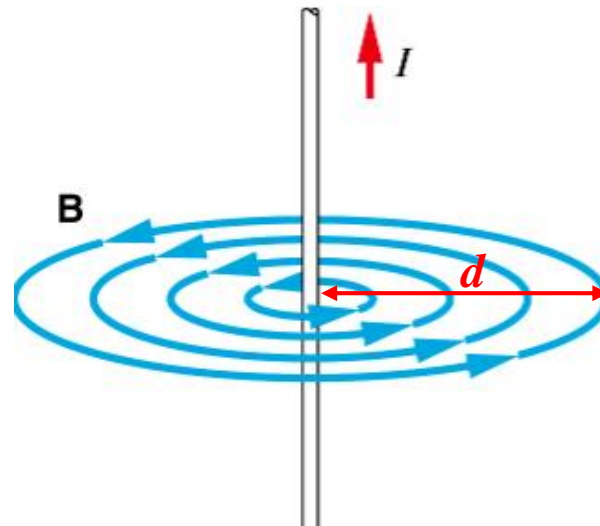
## Elektromagnetické dělo - Railgun



# 32. Magnetické pole přímého vodiče a cívky

## Přímý vodič

- Zopakujeme: magnetické pole charakterizuje veličina **magnetická indukce  $B$**
- směr  $B$  určíme Ampérovým pravidlem pravé ruky



## Magnetická indukce přímého vodiče

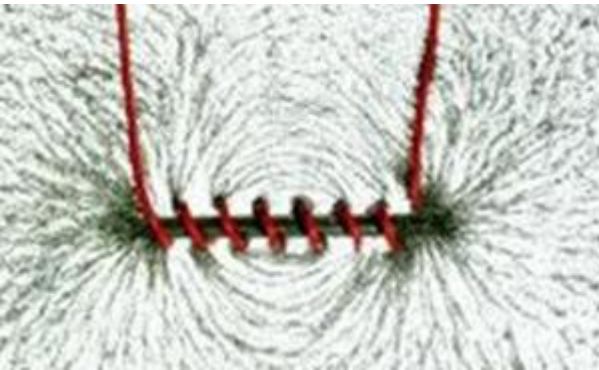
$$B = \mu \cdot \frac{I}{2\pi d} = \mu H$$

- $d$  – kolmá vzdálenost od vodiče
- $I$  – proud protékající vodičem
- $H$  – **intenzita magnetického pole**  $[H] = \text{A} \cdot \text{m}^{-1}$

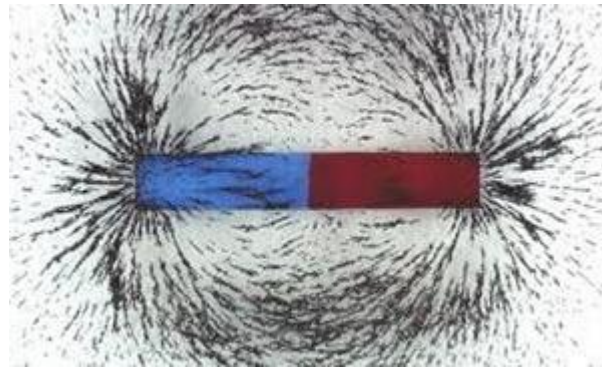
# 32. Magnetické pole přímého vodiče a cívky

## Solenoid – dlouhá válcová cívka

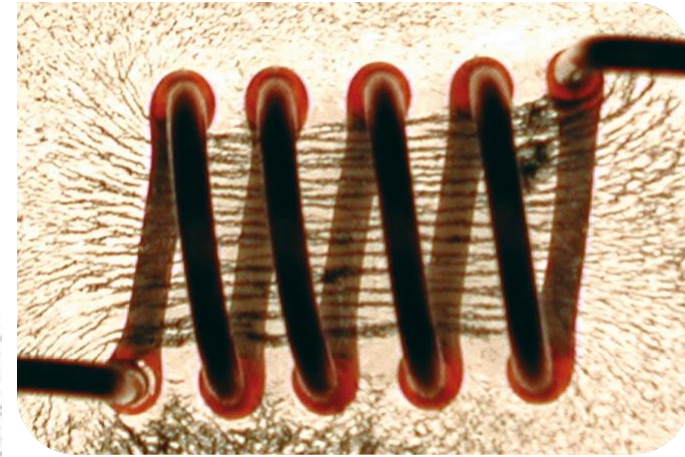
- uvnitř vzniká **homogenní magnetické pole**
- vnější siločáry jsou podobné siločárám permanentního magnetu



cívka

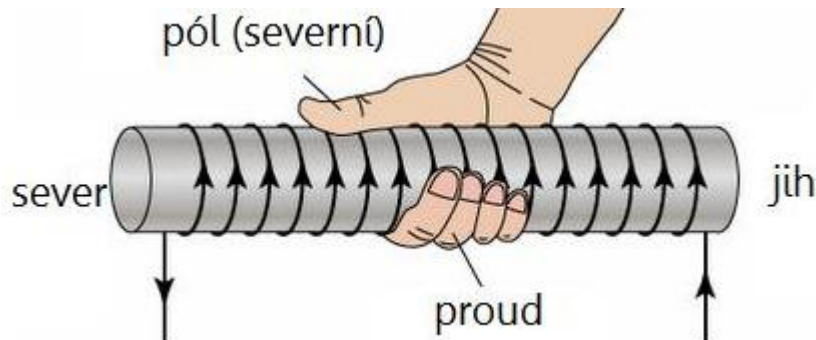


permanentní magnet



## Ampérovo pravidlo pravé ruky

– prsty ve směru proudu, palec ukazuje severní pól



## Magnetická indukce solenoidu

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

- $N$  – počet závitů
- $I$  – proud protékající vodičem
- $l$  – délka cívky

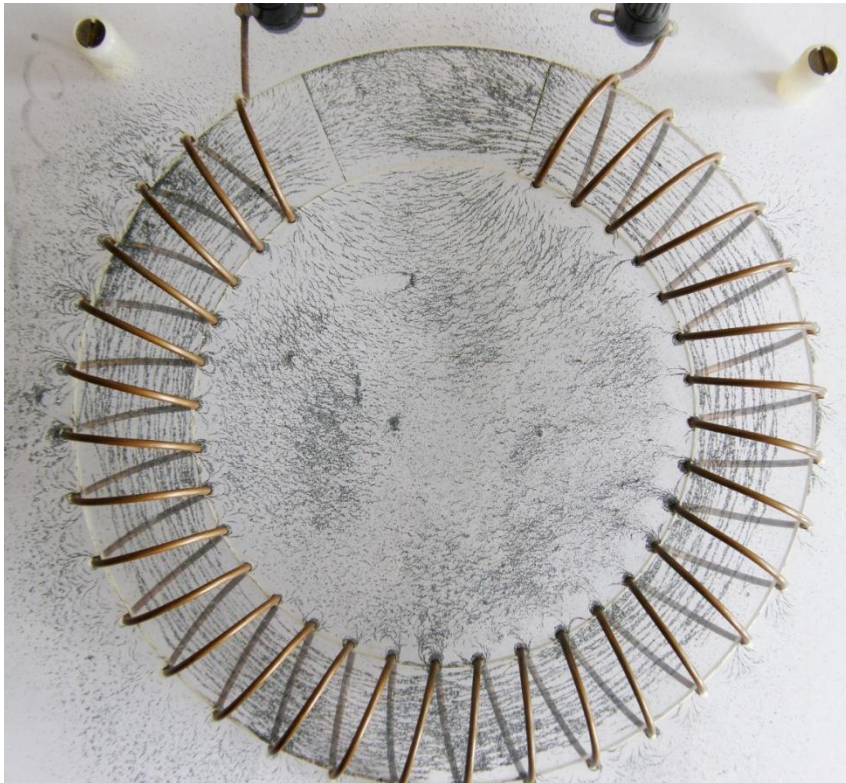
# 32. Magnetické pole přímého vodiče a cívky

## Toroid – prstencová cívka

### Magnetická indukce toroidu

$$B = \mu \cdot \frac{NI}{2\pi R} = \mu H$$

- $N$  – počet závitů
- $I$  – proud protékající vodičem
- $R$  – poloměr toroidu



- silné magnetické pole vzniká uvnitř toroidu
- mimo prsteneč:  $B \rightarrow 0 \text{ T}$
- Využití:
  - magnetický záznam zvuku
  - TOKAMAK (reaktor pro jadernou fúzi)
  - LHC CERN

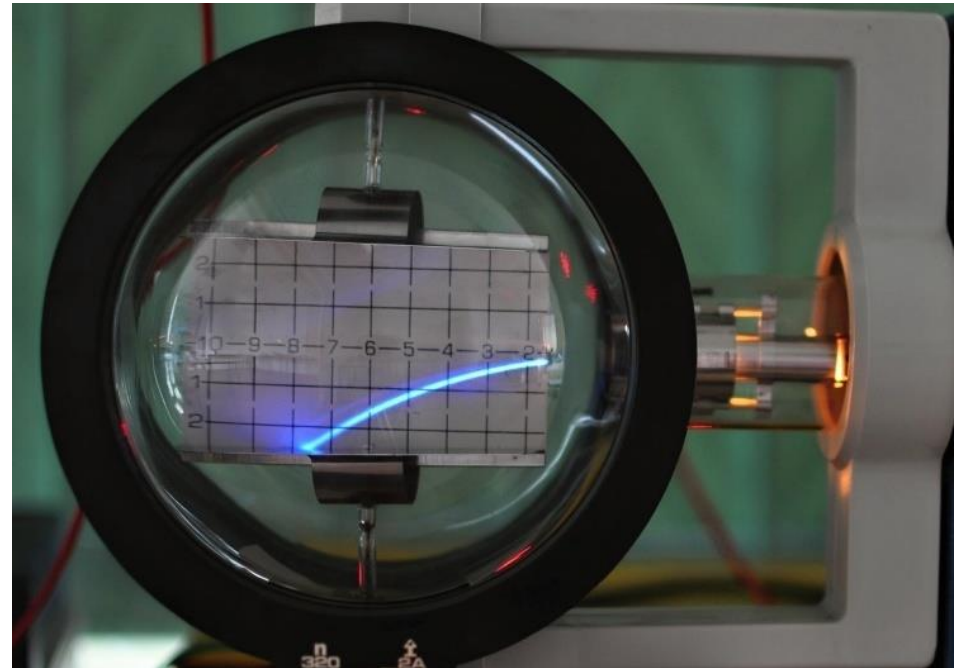




# 32. Magnetické pole přímého vodiče a cívky

## Helmholtzovy cívky

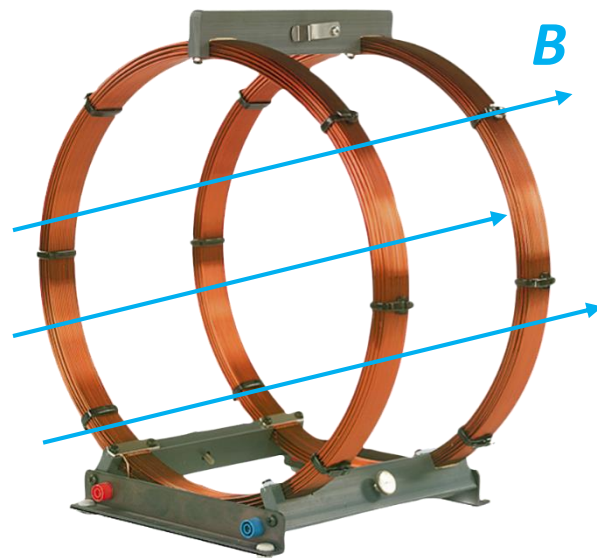
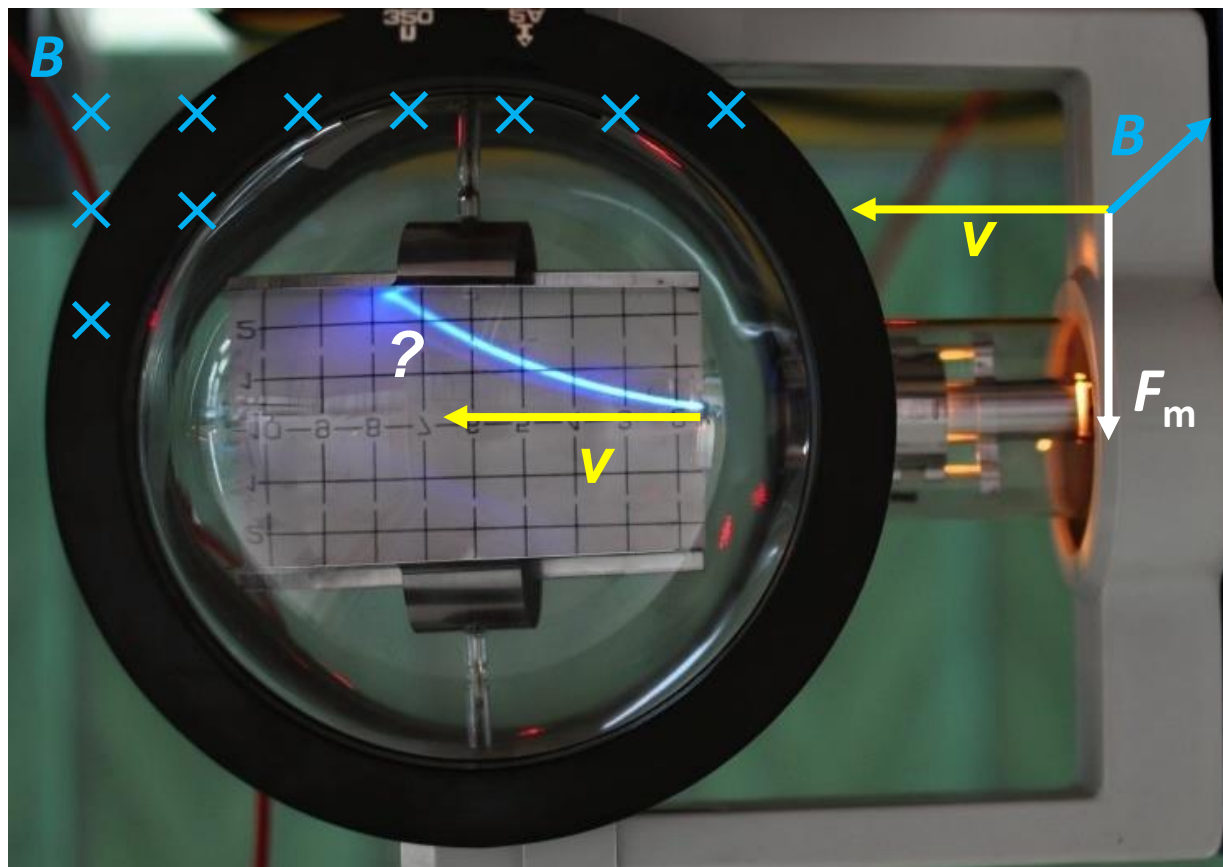
- dvojice cívek, mezi kterými uvnitř vzniká **homogenní magnetické pole**
- využití např. ve **Wehneltově trubici**, která umožňuje sledovat zakřivení trajektorie elektronu v magnetickém poli



# 33. Částice s nábojem v magnetickém poli

## Wehneltův válec

- **homogenní magnetické pole** vytváří dvojice Helmholtzových cívek
- situace 1: elektron vletí kolmo na siločáry magnetického pole  
→ vysvětlete zakřivení jeho trajektorie na základě **Flemingova pravidla levé ruky**



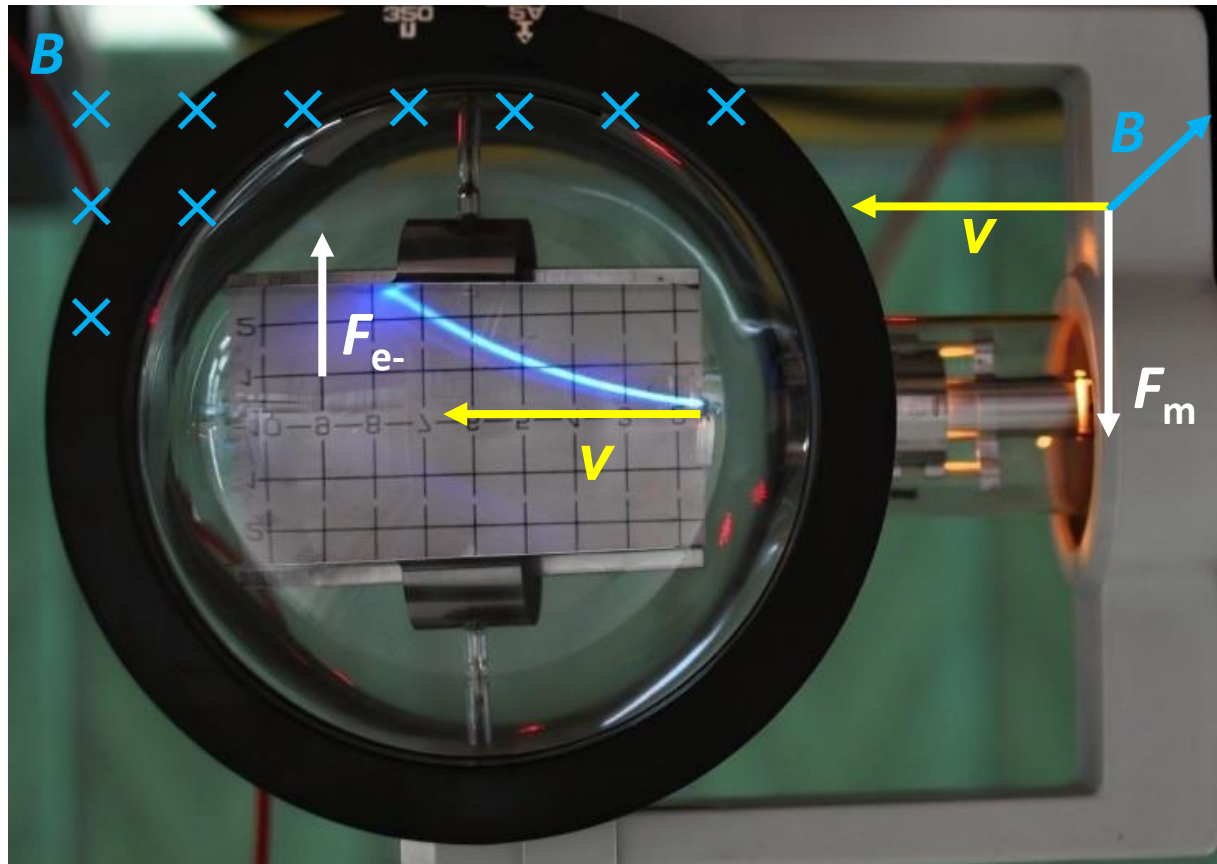
# 33. Částice s nábojem v magnetickém poli

Lorenzova magnetická síla  $F_m$

$$F_m = BQv \sin \alpha$$

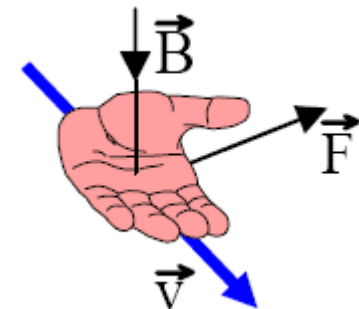
$$\vec{F}_m = Q(\vec{v} \times \vec{B})$$

- $B$  – magnetická indukce magnetického pole
- $Q$  – náboj částice
- $v$  – rychlost částice
- $\alpha$  – úhel mezi vektory  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$



**Flemingovo pravidlo levé ruky**

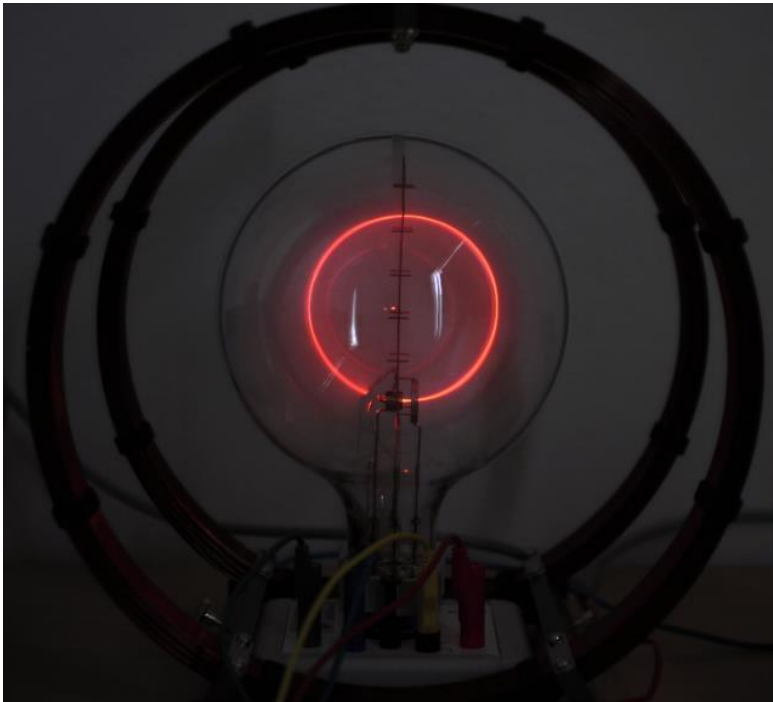
- prsty ve směru rychlosti  $\vec{v}$
- indukční čáry  $\vec{B}$  do dlaně
- palec ukazuje směr magnetické síly  $\vec{F}$  působící na **kladnou částici**
- elektron je **záporný**, síla působí na opačnou stranu



# 33. Částice s nábojem v magnetickém poli

## Pohyb elektronu v homogenním magnetickém poli

$$\alpha = 90^\circ$$



trajektorie je kružnice

$$Bev = \frac{m_e v^2}{r}$$

$$e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$$

$$m_e = 9,31 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

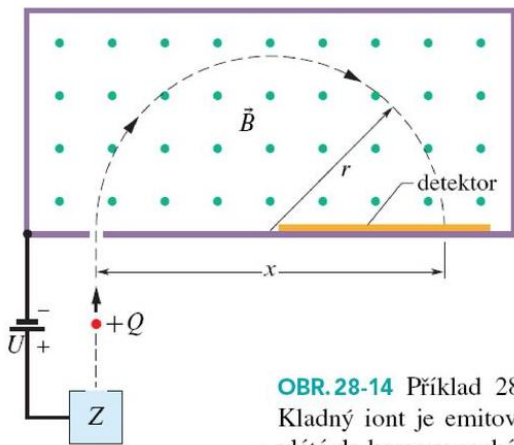
$$\alpha \neq 90^\circ$$



trajektorie je spirála

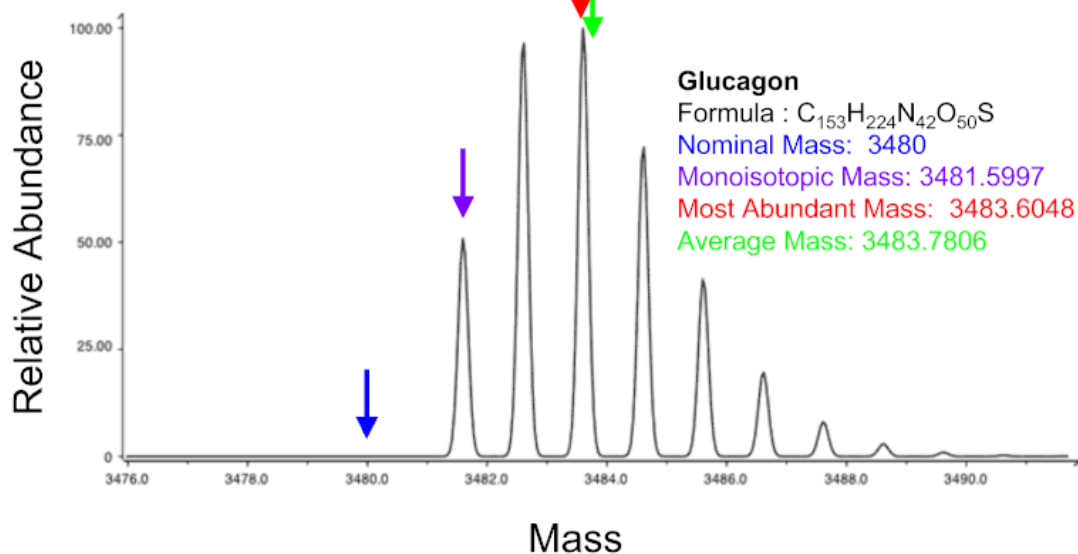
# 33. Částice s nábojem v magnetickém poli

## Hmotnostní spektrometr



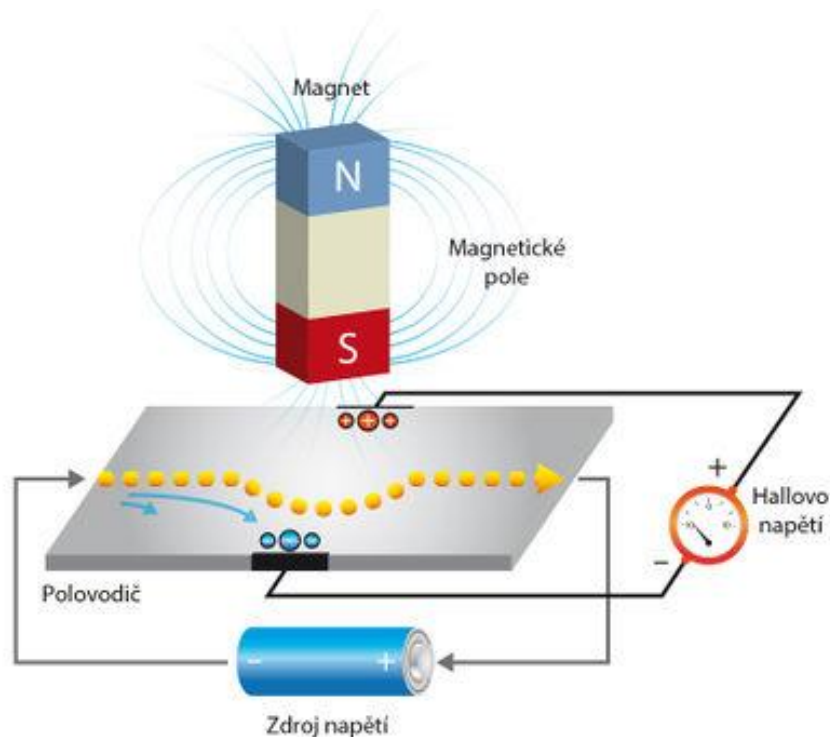
$$r = \frac{mv^2}{BQv}$$

**OBR. 28-14** Příklad 28-3. Podstata hmotnostního spektrometru. Kladný iont je emitován zdrojem Z a po urychlení napětím  $U$  vletá do komory nacházející se v homogenním magnetickém poli s indukcí  $\vec{B}$ . Iont se bude vlivem magnetické síly pohybovat po půlkružnici o poloměru  $r$  a dopadne na detektor ve vzdálenosti  $x$



# 33. Částice s nábojem v magnetickém poli

## Hallův jev – Hallova sonda



| Aplikace                | Popis   |
|-------------------------|---|
| Snímání polohy          | Senzory s Hallovým efektem se používají k detekci polohy objektů v aplikacích, jako jsou rotační kodéry, joysticky a řídicí páky.   |
| Detekce rychlosti       | Tyto senzory se používají v rychloměrech, otáčkoměrech a průtokoměrech k měření rychlosti rotujících předmětů nebo kapalin.   |
| Aktuální měření         | Senzory s Hallovým efektem mohou měřit proud protékající vodičem bez nutnosti přímého elektrického kontaktu, díky čemuž jsou ideální pro aplikace, jako je řízení motoru a monitorování výkonu. |
| Automobilový průmysl    | Snímače s Hallovým efektem jsou široce používány ve vozidlech pro aplikace, jako je snímání otáček kol, snímání polohy škrticí klapky a snímání polohy převodovky.                              |
| Průmyslová automatizace | Tyto senzory hrají klíčovou roli v průmyslových automatizačních systémech pro úkoly, jako je řízení polohy, snímání přiblížení a detekce objektů.   |

# 34. Magnetické vlastnosti látek

## Diamagnetické látky



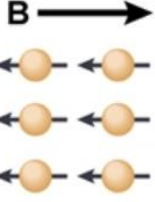
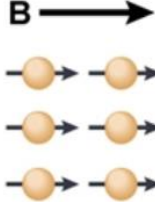
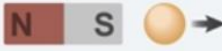

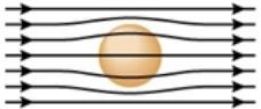

- $\mu_r < 1$
- zeslabují magnetické pole
- nedají se zmagnetovat
- Příklad: Au, Cu, Hg, inertní plyny

## Paramagnetické látky

- $\mu_r \cong 1$
- mírně zesilují magnetické pole
- dají se zmagnetovat dočasně
- Příklad: Na, K, Al, Pt, Mn, Ca, O<sub>2</sub>

## Feromagnetické látky

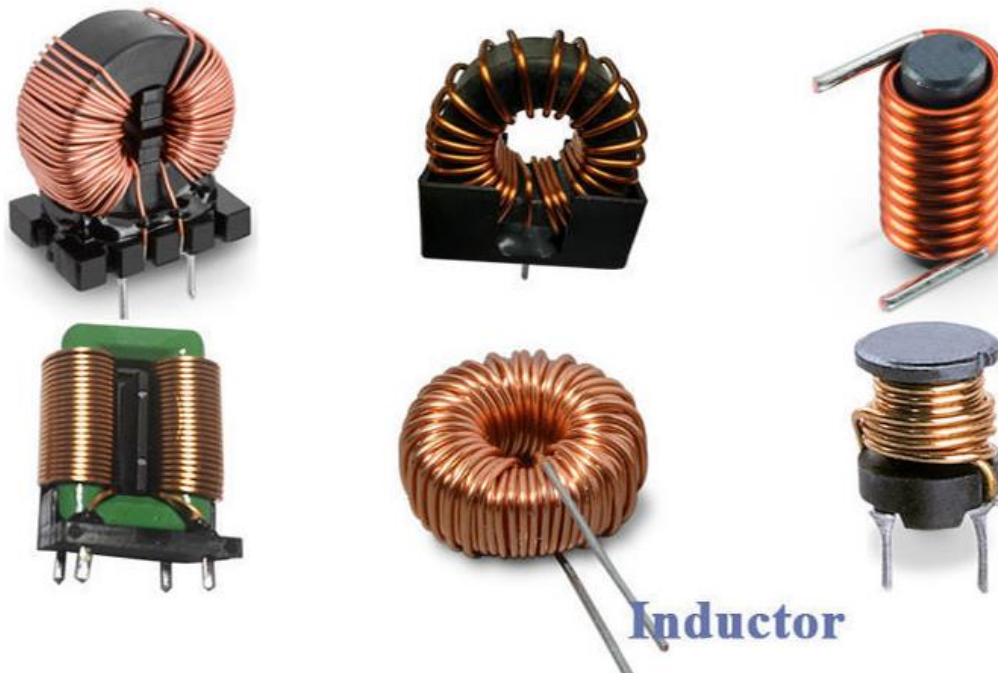
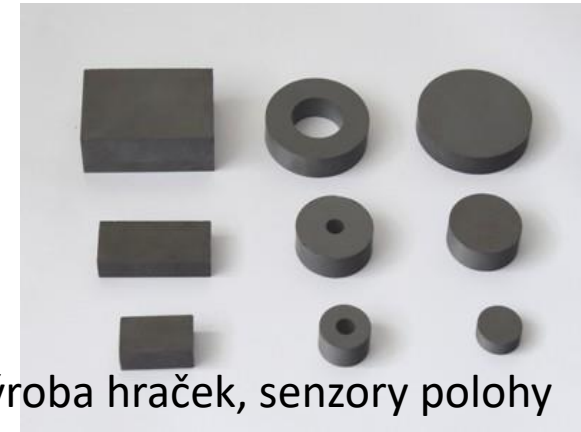
- $\mu_r \gg 1$  ( $10^2 - 10^5$ )
- hodně zesilují magnetické pole
- dají se zmagnetovat trvale
- Příklad: Fe, Co, Ni,

| Types of magnetism                          |  |  |
|---|--|--|
|   | Diamagnetic  | Paramagnetic   |
| Electron pairing                            | <br>No unpaired electrons                         | <br>At least one unpaired electron    |
| Spin alignment with magnetic field <b>B</b> | <br>Anti-parallel                                 | <br>Parallel                          |
| Reaction to magnets                         | <br>Very weakly repelled                         | <br>Attracted                        |
| Effect on magnetic field lines              | <br>Field bends slightly away from the material | <br>Field bends toward the material |

# 34. Magnetické vlastnosti látek

## Ferimagnetické látky - ferity

- $\mu_r \approx 10^4$
- patří mezi feromagnetické látky
- vyrábí se z keramických oxidů (86 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + 14 % BaO)
- permanentní magnety: magnety na tabuli, reproduktory, malé alternátory, jádra cívek rádií, magnetické spojky a brzdy, výroba hraček, senzory polohy a otočení



odrušovací ferity pro kabely HDMI, DVI

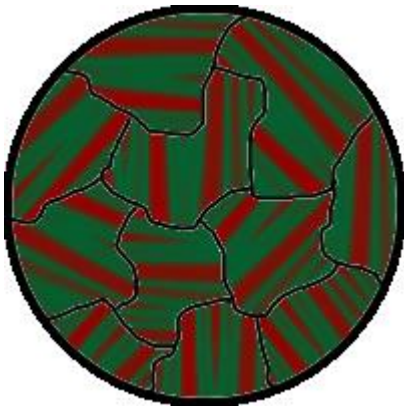
Feritové cívky: PC, NTB, zdroje, TV, rádio



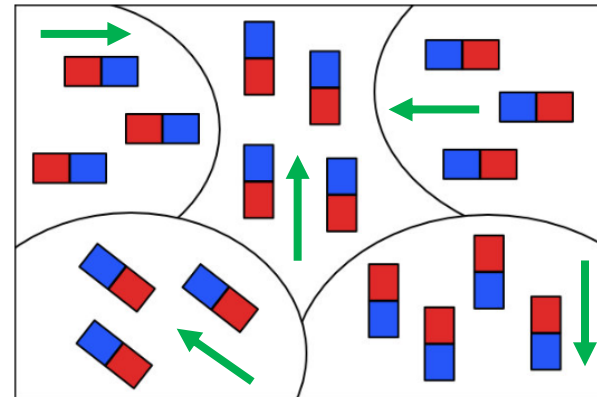
# 34. Magnetické vlastnosti látek

## Weissova teorie domén feromagnetických látek

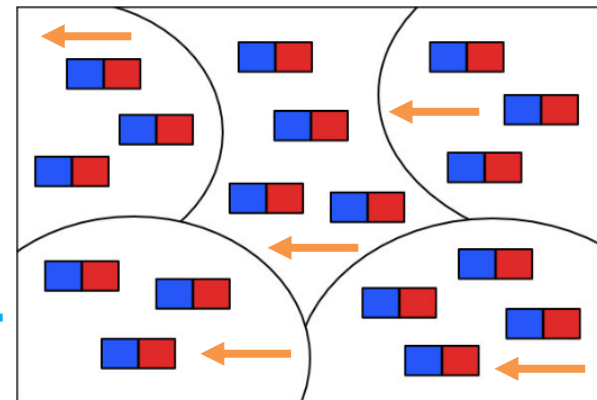
- vysvětluje trvalou magnetizaci látek
- jednotlivé magnetické domény o velikosti  $\approx 10^{-5}m$  jsou orientovány náhodně
- působením vnějšího magnetického pole dojde ke sjednocení směru orientace všech domén, látka se stává trvalým magnetem i po odstranění vnějšího pole



Mikrofotografie zrn s orientací domén



Různé směry natočení molekul v magnetických doménách v nezmagnetovaném materiálu.



Stejně směry natočení molekul v magnetických doménách ve zmagnetovaném materiálu.

→ nahodilá orientace  $B$  jednotlivých domén

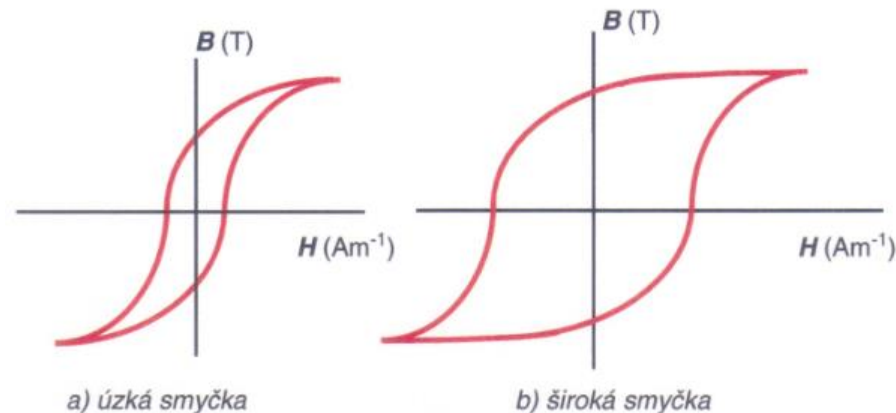
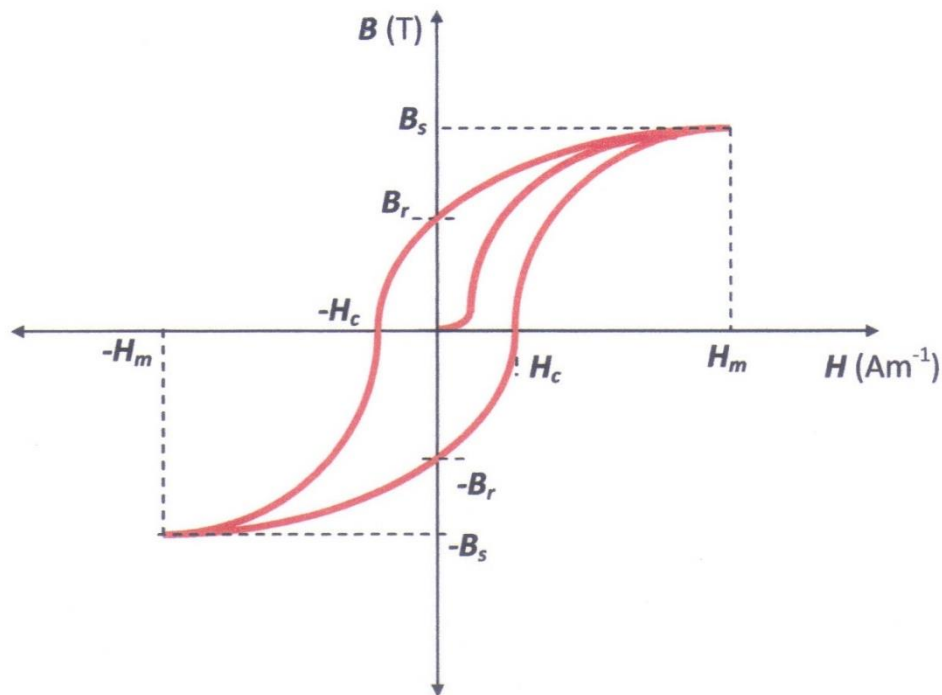
← jednotná orientace  $B$  všech domén

← vnější magnetické pole  $B_0$

# 34. Magnetické vlastnosti látek

## Hysterezní křivka

- vyjadřuje závislost  $B$  na  $H$
- magnetická indukce se mění podle křivky hystereze
- křivka prvotní magnetizace:  $[0;0]$  až  $[H_m;B_s]$
- $B_r$  – remanentní (zbytková) indukce, která zůstává v materiálu i pro  $H = 0$  A/m



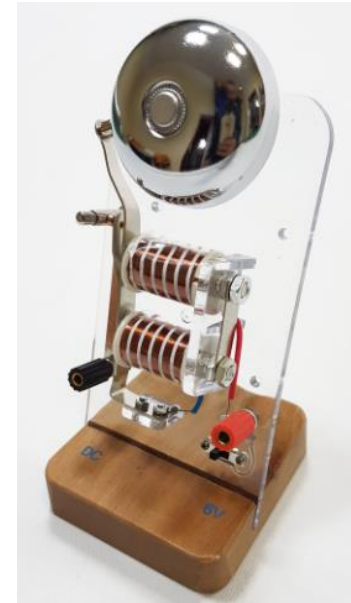
Magneticky měkké látky

Magneticky tvrdé látky

# 34. Magnetické vlastnosti látek

## Magneticky měkké látky

- úzká hysterezní křivka
- snadno se zmagnetují i slabým polem, snadno se odmagnetují → dočasné magnety
- vysoká relativní permeabilita
- PŘ.: čisté železo, nízkouhlíkové oceli, slitiny Fe-Ni (Permalloy)
- v praxi: jádra elektromagnetů (zvonky, kytarové snímače, spínací relé), magnetofonové hlavy, měřící přístroje, magnetické obvody



## Magneticky tvrdé látky

- široká hysterezní křivka
- nese snadno se zmagnetují, nese snadno se odmagnetují → permanentní magnety
- PŘ.: ferity pro jádra reproduktorů, motory a generátory v AI
- magnety vzácných zemin – neodýmové magnety (HDD)

