

# Magnetismus

# Hlavní body - magnetismus

- Projevy mgt. pole
- Zdroje magnetického pole
- Základní veličiny popisující mgt. pole
- Magnetické pole proudovodiče -  
**Biotův – Savartův zákon**
- Magnetické vlastnosti látek

# Projevy magnetického pole

- Známe pevné magnety – reagují na sebe silově
- Magnetické pole Země, kompas ukazuje směr



Zřejmě půjde o pole vektorové

- Existuje přitažlivá i odpuzivá síla



Existuje existuje + a – mgt. náboj? NE!

Když se magnet jakéhokoli tvaru nebo velikosti rozdělí, každá vzniklá část má vždy oba „náboje“ = magnetické póly ~~X~~ elektrostatické pole – náboje oddělitelné

Neshodné póly se přitahují a shodné se odpuzují

# Základní veličiny popisující mgt. pole

Magnetické pole se obvykle popisuje podobně jako elektrické pole vektorem **magnetické intenzity**  $\vec{H}$  (a indukce  $\vec{B}$ ).

$$\vec{H} \quad [1 \text{ Am}^{-1}]$$

magnetické pole vytvořené uvnitř nekonečně dlouhého solenoidu s  $n$  závity, kterými protéká proud  $I = I/n$  [A],



$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} \quad [1 \text{ T}] \quad \text{vakuum}$$

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

**Výchozím bodem může být magnetický moment**  $\vec{m}$ , který dovoluje přímé srovnání permanentních magnetů s elektromagnety

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \quad [Tm A^{-1}]$$

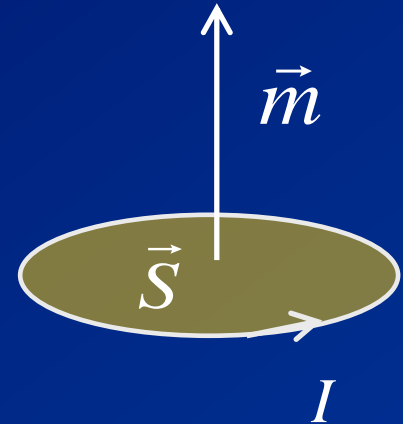
# Zdroje magnetického pole – magnetický moment

## 1. Elektrický proud

Mgt. moment proudové smyčky:

$$\vec{m} = I \cdot \vec{S} \quad (\text{Am}^2)$$

Elektromagnety



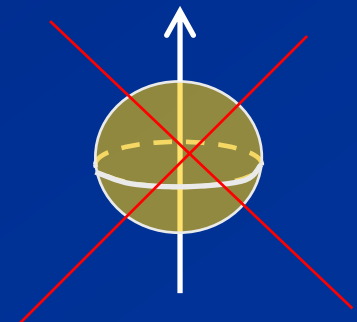
## 2. Spin elektronu

I když se myslelo, že je též proudové povahy, jde o kvantovou veličinu, magnetický moment příslušný některým částicím mikrosvěta

$$\vec{m}(\text{elektronu}) = \mu_B = 9.27 \cdot 10^{-24} \text{ Am}^2$$

$\mu_B$  = Elementární magnetický moment

Permanентní magnety, mgt. vlastnosti látek



- Protože **neexistují magnetické monopóly**, jsou magnetické indukční **čáry uzavřené křivky**
- Přestože by bylo principiálně možné studovat přímo vzájemné působení zdrojů magnetismu, rozdělují se problémy z praktických důvodů na 2 úlohy

1. **vytváření polí zdroji magnetismu**

2. **působení polí na zdroje magnetismu.**

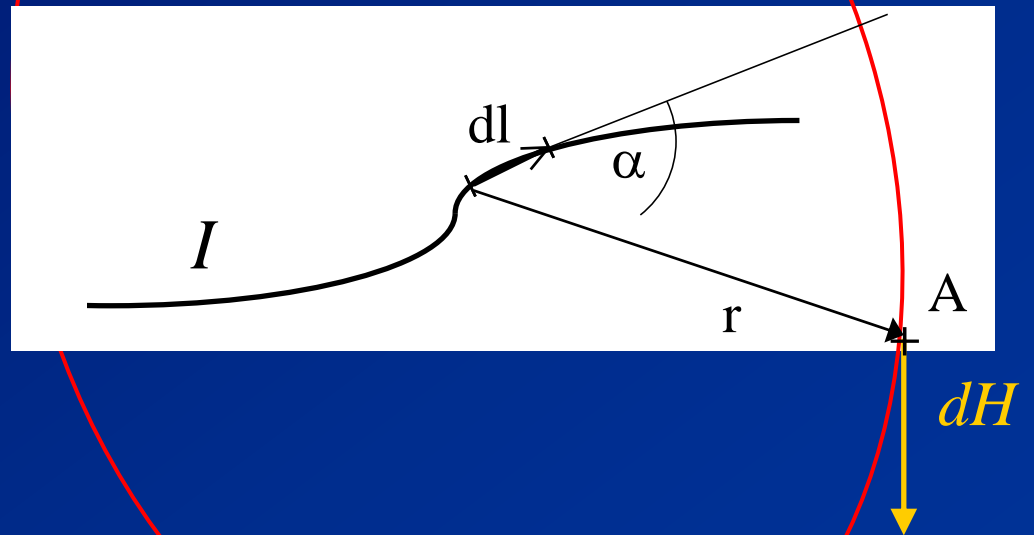
# Elektrický proud jako zdroj magnetického pole

## Biotův – Savartův zákon

Magnetické pole  $H/B$  –produkované elementem proudovodiče je dáno vztahem:

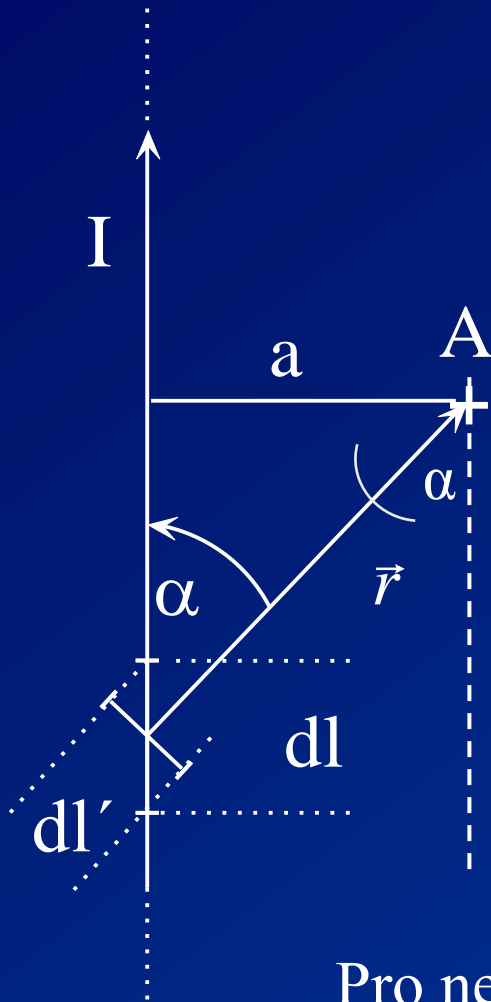
$$d\vec{H}_A = \frac{I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

$$d\vec{B}_A = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$



Vektor magnetické intenzity/indukce je kolmý na element proudovodiče a polohový vektor bodu A

# Příklad - magnetické pole v okolí přímého vodiče



$$d\vec{B}_A = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}$$

Substituce podle obrázku:

$$dl' = dl \cdot \sin \alpha \quad r = \frac{a}{\sin \alpha}$$

$$dl' = r \cdot d\alpha$$

$$B_A = \int_{\alpha_1}^{\alpha_2} \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \sin \alpha d\alpha$$

Pro nekonečný vodič  $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a}$



# Ampèrův zákon

Je to Ampérův zákon, který dává do souvislosti integrál  $\vec{B}$  po uzavřené křivce  $\Gamma$  s proudy, které tato křivka obemyká. Podobně jako v případě elektrostatického pole Gaussova věta

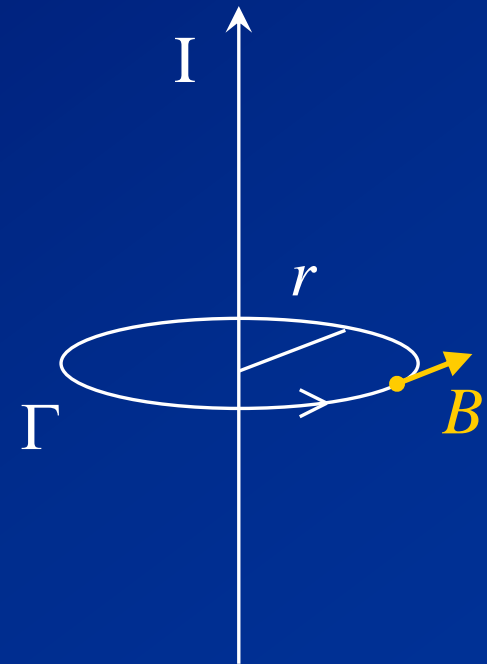
Srovnej: 
$$\oint_S \vec{E} \cdot d\vec{S} = \frac{\sum Q}{\epsilon_0}$$

Zjednodušuje řešení řady případů:

Pro nekonečný vodič: 
$$\vec{B} \cdot 2\pi r = \mu_0 I$$

$B$  uvnitř solenoidu: 
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 IN}{l}$$

$$\oint_{\Gamma} \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$$



Srov. s Biot-Savart

$N$  je počet závitů  
 $l$  je délka cívky



# Magnetické vlastnosti látek

- Je-li látka vložena do vnějšího magnetického pole  $H$ , reagují v ní přítomné elektrony (mgt. momenty) jistým způsobem a objeví se v ní **vnitřní magnetické pole**  $\vec{H}_m$ , které je dáno hustotou magnetických dipólových momentů :

“látka se zmagnetuje“

Srovnej s  $E_f$  – polarizace dielektrika

$$\vec{H}_m = \frac{\Sigma \vec{m}}{V} \quad \vec{H}_m = \vec{M} = \frac{\Sigma \vec{m}}{V}$$

Vnitřní pole se nazývá magnetizací  $\vec{M}$ , je to vlastně hustota (koncentrace) mgt. momentu

Celkové pole v daném místě je potom dáno vektorovým součtem **vnějšího a vnitřního pole**

$$\vec{H}_c = \vec{H} + \vec{M}$$

- **Celkovou** magnetickou indukci pole v látce lze potom napsat jako superpozici pole vnitřního a pole původního :

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

- Můžeme-li předpokládat **lineární** chování, platí :

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

- Materiálový parametr  $\chi_m$  je **magnetická susceptibilita**, která může být **větší i menší než nula**, to znamená, že v látce může být indukce větší i menší, než okolní indukce ve vakuu  $B_0$

- Dosadíme druhou rovnicí do první:

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi_m) \vec{H} = \mu_0 \mu_r \vec{H}_0$$

a definujeme **relativní permeabilitu**  $\mu_r$ .

- Celková (absolutní) **permeabilita** je definována jako :  $\mu = \mu_0 \mu_r$ .

**Látka s velkým  $\mu$  zesiluje magnetické pole !  
Vytváří své vlastní přídavné pole.**

Fe, Co, Ni	100 – 1000
permaloy	10000
$\mu$ -kov	25000

- Existují **tři** možné typy magnetického chování.

Vnější magnetické pole může být :

- **zeslabeno** ( $\chi_m < 0$  nebo  $\mu_r < 1$ ), tato vlastnost se nazývá **diamagnetismus**.
- **mírně zesíleno** ( $\chi_m > 0$  nebo  $\mu_r > 1$ ), tato vlastnost se nazývá **paramagnetismus**
- **výrazně zesíleno**, ( $\chi_m \gg 0$  nebo  $\mu_r \gg 1$ ) , tato vlastnost se nazývá **ferromagnetismus**.

# diamagnetismus

Všechny elektrony v látce (atomech) jsou spárované =  
mgt. moment jednotlivých atomů je nulový ( $H = 0$ ), ale  
indukuje se v nich moment vlivem vnějšího pole ( $H > 0$ ) a to  
opačného směru, než je toto pole

$$\vec{H}_c = \vec{H} + \vec{M} \quad \vec{M} < 0$$

$$\vec{H}_c < \vec{H}$$

# paramagnetismus

NE všechny elektrony v látce (atomech) jsou spárované =  
mgt. moment jednotlivých atomů (molekul) není nulový ( $H = 0$ ), vlivem vnějšího pole ( $H > 0$ ) se jejich momenty do jisté míry “stáčí“ do směru tohoto pole

$$\vec{H}_c = \vec{H} + \vec{M} \quad \vec{M} > 0$$

$$\vec{H}_c > \vec{H}$$

V tomto případě svádí mgt. síla boj s tepelným pohybem

- Při nízkých teplotách vítězí mgt. pole
- Při vysokých teplotách vítězí tepelný pohyb

# feromagnetismus

NE všechny elektrony v látce (atomech) jsou spárované =  
mgt. moment jednotlivých atomů není nulový ( $H = 0$ ), vlivem  
vnějšího pole ( $H > 0$ ) se jejich momenty do jisté míry stáčí do  
směru toto pole  $\approx$  **paramagnetismus**

Pod určitou teplotou  $T_C$  (**Curieova teplota**) se všechny  
momenty uspořádají do směru vnějšího pole bez ohledu na  
“dorážející“ tepelný pohyb, protože je to pro ně energeticky  
výhodné. Pod  $T_C$  se látka stává feromagnetickou.

To neznamená, že je navenek zmagnetovaná bez přítomnosti  
vnějšího pole, o tom rozhoduje **doménová struktura**

**Magneticky měkké a magneticky tvrdé materiály**



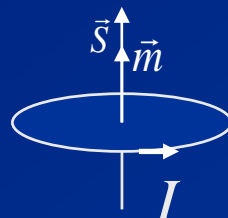
# Představa o magnetickém poli

Nehledě na zdroj mgt. pole, vždy si můžeme představit intenzitu  $H$  jako hustotu (koncentraci) mgt. momentů (dipólů), i když toto pole pochází od el. proudu  $I$

$$\vec{H} = \frac{\Sigma \vec{m}}{V}$$

Víme, že pokud jsou zdrojem nespárované spiny elektronů atomů v konkrétním materiálu je takový vektor nazýván magnetizací materiálu

$$\vec{M} = \frac{\Sigma \vec{m}}{V}$$

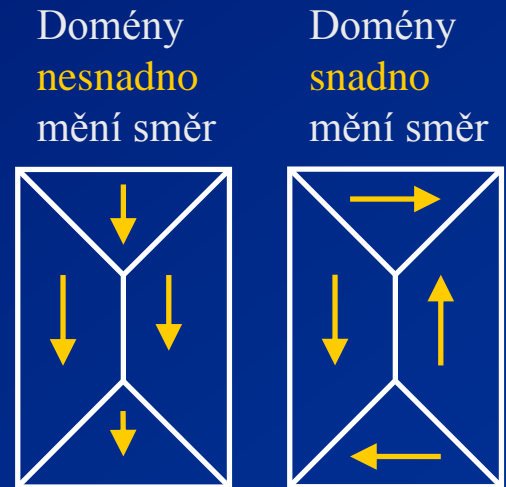


Pokud přispívají oba zdroje musíme oba příspěvky sečíst. To nemění nic na tom, že i celkové pole  $H_C$  si lze představit jako koncentraci mgt. “momentů vakua“

$$\vec{H}_C = \vec{H} + \vec{M}$$

# Magneticky měkké a magneticky tvrdé materiály

Pokud materiál zůstává magneticky orientovaný ( $M \neq 0$ ) i po vypnutí vnějšího magnetického pole nazýváme takový materiál **magneticky tvrdý**. Naopak pokud magnetická orientace materiálu **jako celku prakticky** zmizí po vypnutí vnějšího magnetického pole, nazýváme takový materiál **magneticky měkký**. Domény si samy “rozhodí” směr, ale  $M \neq 0$ .



**magneticky tvrdý a měkký materiál**

## Rekapitulace

- Elektrony mohou vytvářet magnetické pole třemi způsoby:
  1. Jako pohybující se náboje, tedy proud.
  2. Díky svému spinu.
  3. Díky své orbitální rotaci kolem jádra (nerozebírali jsme)
- Poslední dva mechanismy jsou zodpovědné za magnetické chování materiálů.

# Co je to magnetické pole?

Stejně jako u elektrického pole, magnetické pole si můžeme “osahat“ prostřednictvím interakce s nábojem. Na náboj mohou působit dvě síly:

- Elektrická síla, která je nezávislá na pohybovém stavu náboje

$$\vec{F}_e = Q \cdot \vec{E}$$

- Magnetická síla, která je ale na pohybovém stavu náboje závislá