

# MAGNETISMUS

## 1.1 Magnetické pole

Nabité částice vytváří kolem sebe elektrické pole, které můžeme popsat vektorem elektrické intenzity  $\vec{E}$ . Pokud částice, které vytvářejí pole, nachází se v klidu, pole nazýváme elektrostatickým. Silové působení mezi těmito částicemi můžeme popsat pomocí Coulombova zákona.

Bylo by přirozené analogicky očekávat, že existuje magnetický náboj, který vytváří ve svém okolí magnetické pole působící na jiné magnetické náboje. Ačkoli takové magnetické náboje, zvané magnetické monopoly, vystupují v některých teoriích, nebyla jejich existence experimentálně potvrzena. Magnetická pole, s nimiž se běžně setkáváme, tedy vznikají nějak jinak.

Příčinou vzniku **magnetického pole** je pohybující se elektrický náboj. Magnetické pole existuje i v okolí vodiče, kterým prochází elektrický proud. **Magnetickou silou** na sebe navzájem působí pohybující se nabitá částice i dva vodiče s proudem.

Magnetické pole se projevuje silovými účinky, tj. přitahuje železo (také kobalt, nikl a jiné slitiny), působí magnetickou silou na jiné magnety (například otáčí střílkou kompasu) i na pohybující se elektrické náboje (například na vodič s elektrickým proudem).

Původ kteréhokoli magnetického pole kolem nás můžeme vysvětlit jedním z těchto dvou mechanismů.

- Pohybující se elektricky nabitě částice, jako jsou nosiče náboje ve vodičích, vytvářejí ve svém okolí magnetické pole.
- Některé elementární částice (např. elektrony) mají kolem sebe také magnetické pole; toto pole je jejich základní charakteristikou stejně jako hmotnost či elektrický náboj.

Magnetická pole elektronů v určitých látkách se skládají a vytvářejí navenek výrazné magnetické pole. Tak je tomu u látek, z nichž jsou vyrobeny permanentní magnety. V ostatních látkách se magnetická pole všech elektronů vyruší a žádné výraznější magnetické pole jako výsledek nevznikne. To platí třeba pro látky, z nichž se skládá lidské tělo.

**Magnet** je trvale nebo dočasně zmagnetizované těleso, které je zdrojem magnetického pole. Častý typ magnetu je tvořen cívkou navinutou z drátu kolem ocelového jádra, kterou prochází elektrický proud, tzv. **elektromagnet**. Čím větší je proud, tím silnější je magnetické pole. V průmyslu se takové elektromagnety používají ke třídění železného šrotu a v mnoha dalších případech.

V každodenním životě jsou ještě běžnější **permanentní magnety**. Ty vytvářejí magnetické pole, aniž k tomu potřebují dodávat elektrický proud.

## 1.2 Magnetická indukce

Experimentálně je potvrzeno, že na nabitou částici (ať už jedinou, nebo jako jednu z mnoha, které vytvářejí elektrický proud ve vodiči) pohybující se v magnetickém poli, působí pole určitou magnetickou silou.

Magnetické pole charakterizujeme vektorovou veličinou, která se nazývá **magnetická indukce**  $\vec{B}$ .

Pohybuje-li se rychlostí  $v$  bodový náboj  $Q$  v daném místě magnetického pole určeném polohovým vektorem  $\vec{r}$ , obecně na něj působí magnetická síla  $\vec{F}_B$ , jejíž velikost závisí kromě jiného i na směru pohybu náboje.

Velikost magnetické indukce  $B$  v bodě  $\vec{r}$  lze definovat jako velikost maximální síly  $F_{\max}$  působící na tento náboj, která připadá na jednotkovou hodnotu  $Q \cdot v$ . Platí tedy

$$B = \frac{F_{B,\max}}{|Q|v}.$$

Směr vektoru  $\vec{B}$  je pak definován jako směr kolmý jak ke směru pohybu náboje, tak i k působící síle. Orientace vektoru magnetické indukce lze určit pomocí pravidla pravé ruky.

Jednotkou magnetické indukce je tesla  $[B] = \frac{\text{N}}{\text{C.m.s}^{-1}} = \text{T}$ .

## 1.3 Lorentzova magnetická síla

Síla, kterou působí magnetické pole na pohybující se náboj, má název **Lorentzova magnetická síla**

$$\vec{F}_B = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}).$$

Experimentálně bylo zjištěno, že působící síla je

- přímo úměrná velikosti náboje a rychlosti částice,
- závislá na směru vektoru rychlosti  $\vec{v}$ . Budeme-li měnit směr rychlosti nabitě částice, pak zjistíme, že existuje určitý směr, ve kterém je působící síla rovna nule (tento směr definujeme jako směr vektoru magnetické indukce  $\vec{B}$ ),
- vždy kolmá na rovinu určenou vektory  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$  (vektory  $\vec{F}_B$ ,  $\vec{v}$ ,  $\vec{B}$  tvoří pravotočivý systém),
- úměrná sinu úhlu, který svírají vektory  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$ .

Velikost Lorentzovy magnetické síly je tedy  $F_B = |Q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$ .

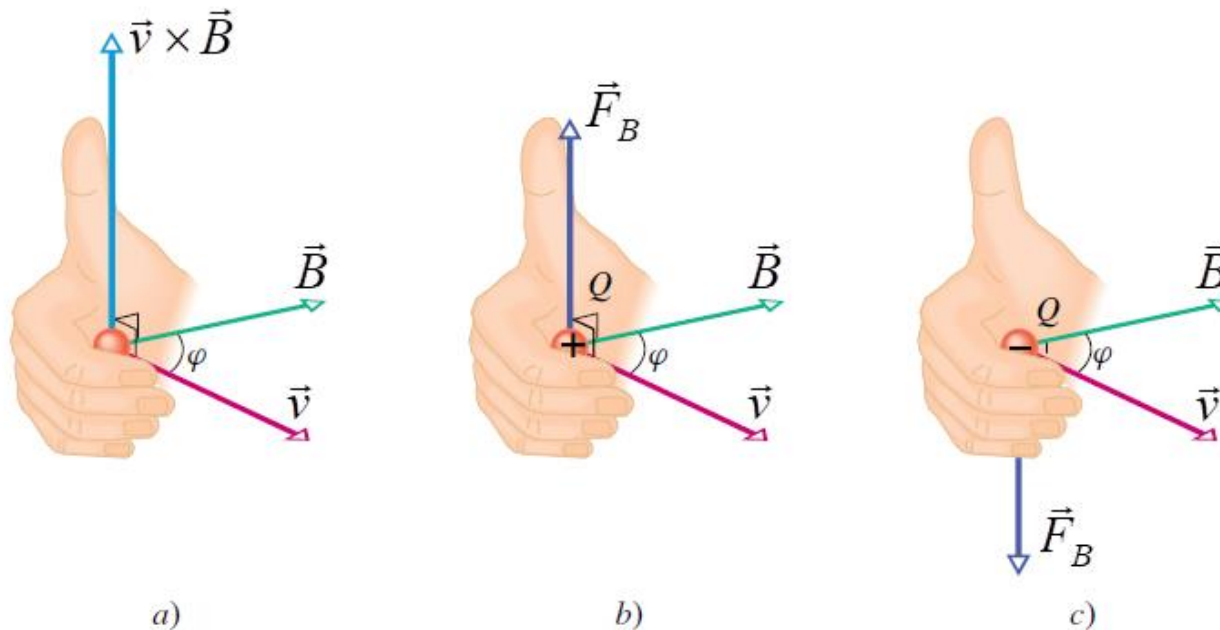
Pro **kolmý** směr vektorů  $\vec{v} \perp \vec{B}$  je úhel  $\alpha = 90^\circ$ , platí tedy, že velikost síly je **maximální**.

Pro **rovnoběžné** vektory  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$ , kde je úhel  $\alpha = 0^\circ$  (souhlasné  $\vec{v} \uparrow \uparrow \vec{B}$ ) nebo  $\alpha = 180^\circ$  (nesouhlasné  $\vec{v} \uparrow \downarrow \vec{B}$ ), platí, že je síla **nulová**.

Orientace Lorentzovy magnetické síly je dána pravidlem pravotočivého šroubu (vývrtky) nebo pravidlem pravé ruky.

### 1. způsob

Ohnuté prsty pravé ruky postupují od vektoru  $\vec{v}$  k vektoru  $\vec{B}$  ve směru menšího úhlu mezi oběma vektory, palec pak ukazuje orientaci vektoru síly  $\vec{F}_B$ .



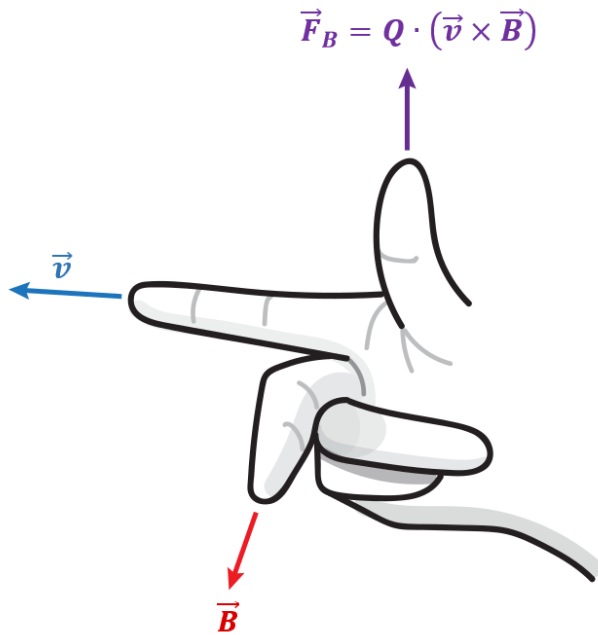
a) směr vektorového součinu obecně,

b) směr síly pro kladný náboj  $Q$ ,

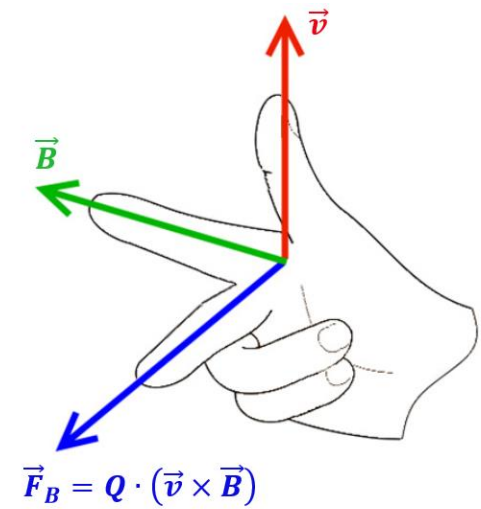
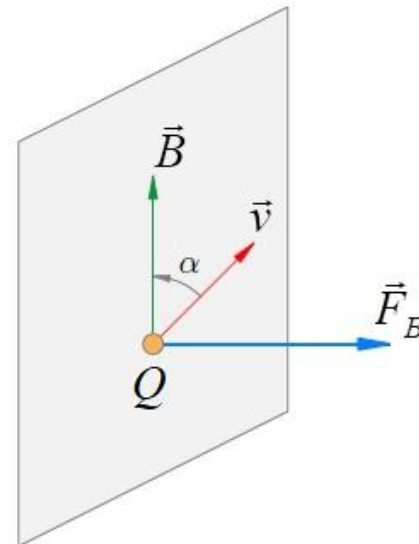
c) směr síly pro záporný náboj  $Q$ .

## 2. způsob

Jsou-li vektory  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$  znázorněny ukazovákem a prostředníkem pravé ruky, pak vektor síly  $\vec{F}_B$  má směr palce.



neboli



## Shrnutí

Lorentzova magnetická síla je rovna nule v případě, že

- náboj  $Q$  je nulový,
- částice je v klidu (rychlost  $\vec{v} = 0$ ),
- v okolí není magnetické pole ( $\vec{B} = 0$ ),
- vektory  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$  jsou rovnoběžné (souhlasné  $\vec{v} \uparrow\uparrow \vec{B}$  nebo nesouhlasné  $\vec{v} \uparrow\downarrow \vec{B}$ ).

Nenulová Lorentzova magnetická síla  $\vec{F}_B$  je vždy kolmá na  $\vec{v}$ , což znamená, že

- nemění velikost rychlosti, mění jen její směr, a tedy urychluje nabitou částici,
- nekoná práci,
- nemění kinetickou energii  $E_k$  částice.

Lorentzova magnetická síla má charakter **dostředivé síly**.



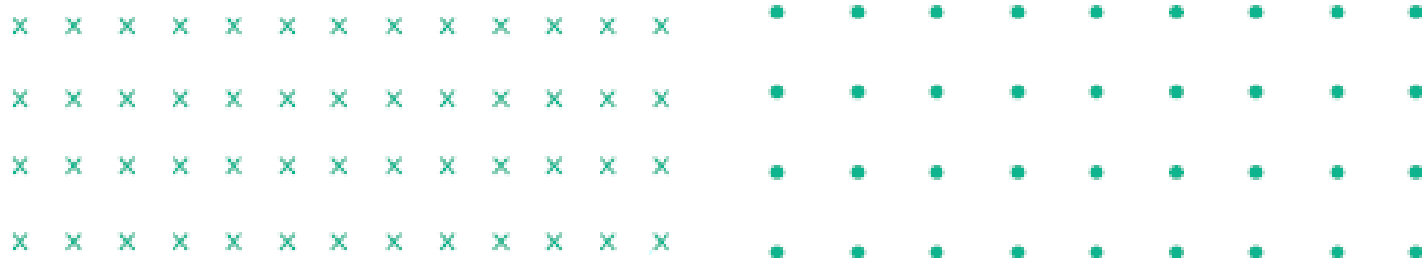
## 1.4 Indukční čáry

Podobně jako znázorňujeme elektrické pole pomocí elektrických siločár, znázorňujeme magnetické pole **magnetickými indukčními čárami**. Vytváříme je obdobně, to znamená, že v každém bodě pole platí

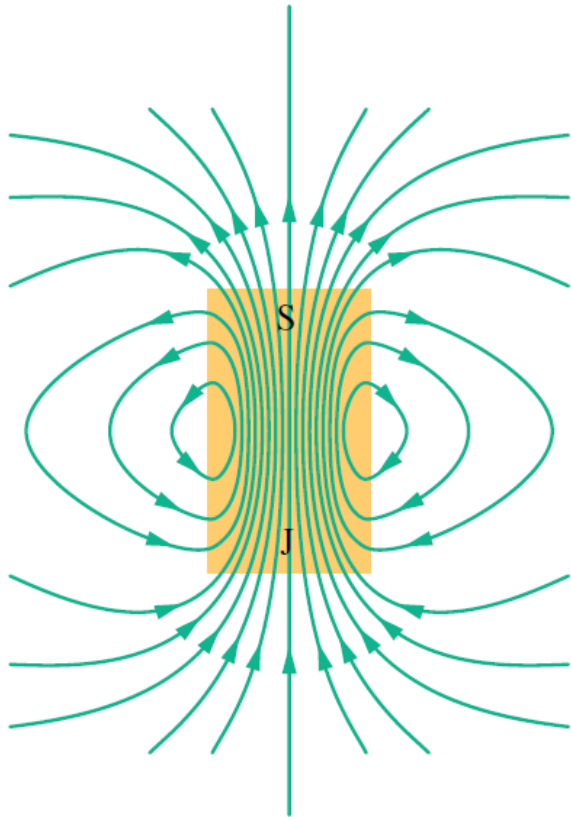
- indukční čáry tvoří orientované vždy uzavřené křivky,
- směr magnetické indukce  $\vec{B}$  je určen tečnou k indukční čáře,
- hustota indukčních čar v daném místě je úměrná velikosti vektoru magnetické indukce  $\vec{B}$ .

Pro vyznačení směru vektoru  $\vec{B}$  směřujícího za nákresnu (za papír) a kolmého na ni používáme symbol  $\times$ .

Pro vyznačení směru vektoru  $\vec{B}$  směřujícího před nákresnu (z papíru) a kolmého na ni používáme symbol  $\bullet$ .



## 1.5 Indukční čáry magnetického pole tyčového magnetu



Magnetické pole tyčového magnetu (permanentního magnetu ve tvaru tyče) lze také znázornit pomocí indukčních čar. Indukční čáry procházející magnetem vytvářejí uzavřené křivky (a to i ty čáry, které na obrázku nejsou zakresleny jako uzavřené). Vnější magnetické pole tyčového magnetu je nejsilnější poblíž jeho konců, kde jsou indukční čáry nejhustší.

Protože jsou indukční čáry uzavřené křivky, musí vycházet z jednoho konce magnetu a vcházet do druhého (a pokračovat dál uvnitř magnetu). Ten konec, ze kterého indukční čáry vycházejí, se nazývá severní pól magnetu (S). Opačný konec, kde vcházejí do magnetu, se nazývá jižní pól (J).

Póly nelze od sebe oddělit.

Opačné póly magnetu se navzájem přitahují, souhlasné se odpuzují.

Je-li v prostoru několik magnetických polí, magnetická indukce výsledného magnetického pole je určena vektorovým součtem pomocí principu superpozice

$$\vec{B} = \vec{B}_1 + \vec{B}_2 + \dots + \vec{B}_n = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i.$$

Pohybuje-li se částice s nábojem v elektromagnetickém poli, působí na tuto částici zároveň elektrická síla a magnetická síla. Výsledná síla je pak dána vektorovým součtem těchto sil

$$\vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_B = Q \cdot \vec{E} + Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}).$$

**Poznámka.** Existuje určitá nejednotnost v použití pojmu. Někdy se názvem Lorentzova síla nazývá tato výsledná síla.

## 1.6 Magnetické pole Země

Země má vlastní magnetické pole, které se vytváří elektrickým proudem vznikajícím uvnitř jádra. Svou roli v tom hrají prvky jádra.

Magnetické pole Země má převážně dipólový charakter, to znamená, že rozložení magnetických indukčních čar je podobné indukčním čarám v okolí tyčového magnetu.

Na zemském povrchu ho můžeme zjistit kompasem, jehož podstatou je střelka – tenký tyčový magnet, volně otáčivý ve vodorovné rovině.

Střelka se otočí, protože její severní pól je přitahován k Arktidě. Tedy jižní pól zemského magnetického pole se musí nacházet v oblasti Arktidy a logicky bychom ho potom měli nazývat jižním pólem. Protože však se v Arktidě nachází severní geografický pól, bylo dohodnuto užívat pro tento jižní magnetický pól termín severní geomagnetický pól.

Tedy na severní polokouli vcházejí magnetické indukční čáry zemského magnetického pole do Země směrem k Arktidě. Naopak na jižní polokouli vycházejí indukční čáry ze Země v oblasti Antarktidy z místa, které nazýváme jižním geomagnetickým pólem.

Na rozdíl od geografických pólů, které mají prakticky neměnnou polohu, se poloha magnetických pólů mění. Pomalu se mění tedy i magnetické pole Země.

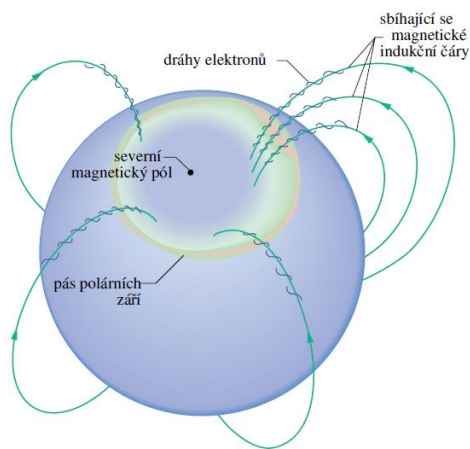
V geologických časových měřítkách ( $10^5$  až  $10^7$  let) dokonce mění magnetické pole Země i svůj směr, dochází k „přemagnetování“.

## 1.7 Polární záře

Dva hlavní faktory pro vznik polární záře jsou magnetické pole Země a sluneční vítr, který se ve velkém množství uvolňuje při slunečních erupcích.

Sluneční vítr je proud částic, který vychází ze Slunce. Zdrojem slunečního větru je sluneční korona. Sluneční vítr interaguje s magnetickými poli planet a komet. Způsobuje ionizaci zemské atmosféry, která se projevuje výskytem polární záře.

Když se sluneční vítr setká s magnetickým polem Země, nastane zde interakce, jelikož složky slunečního větru mají své vlastní magnetické pole (protony a alfa částice jsou kladné, elektrony záporné). Většina je ho tedy odražena, ale část je zachycena a stáčí se v magnetickém poli po spirálách až k atmosféře.



Pokud se konečně hrstka protonů, elektronů a alfa částic dostane skrz magnetické pole až k zemské atmosféře, jejich rychlost, potažmo energie, je stále o několik řádů větší, než energie okolních molekul ze zemské atmosféry. Částice slunečního větru se začnou srážet s molekulami atmosféry a při tom z nich vyrážejí elektrony, na jejichž místo se okamžitě obsazují jiné. Při tomto ději se emituje elektromagnetické záření, které je ve viditelném spektru.

Zelené světlo (558 nm) je emitováno atomy kyslíku a červené světlo (630 nm) molekulami dusíku. Často je však světlo tak mdlé, že je vnímáme pouze jako bílé.

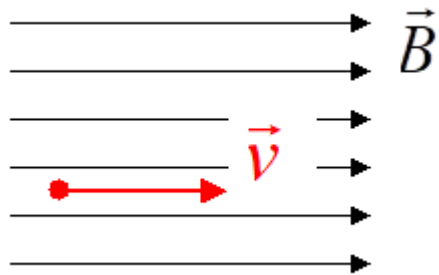
## 1.8 Působení magnetického pole na nabitou částici

Na pohybující se nabitou částici působí magnetické pole Lorentzovou silou  $\vec{F}_B = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$ , která je obecně kolmá na rovinu určenou vektory rychlosti a indukce.

V homogenním magnetickém poli jsou indukční čáry rovnoběžné, stejně od sebe vzdálené přímky a velikost magnetické indukce má konstantní hodnotu ( $\vec{B} = \text{konst.}$ ).

V závislosti na úhlu, který svírají vektor magnetické indukce a směr pohybu částice (rychlost) nastávají 3 možné situace.

- Vektory  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$  jsou rovnoběžné (souhlasné  $\vec{v} \uparrow\uparrow \vec{B}$  nebo nesouhlasné  $\vec{v} \uparrow\downarrow \vec{B}$ ).

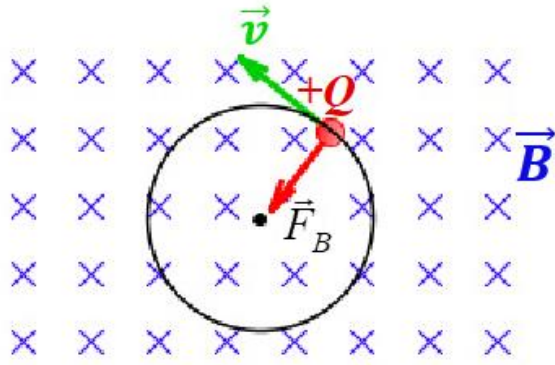


Vlétne-li částice s nábojem  $Q$  do homogenního magnetického pole rovnoběžně k vektoru magnetické indukce  $\vec{B}$ , nebude na ni působit magnetická síla.

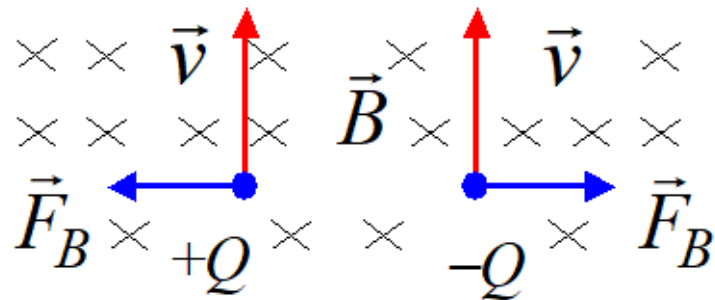
$$F_B = |Q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha = |Q| \cdot v \cdot B \cdot \underbrace{\sin 0^\circ}_0 = 0.$$

Částice se tedy pohybuje přímočaře rovnoměrně.

- Vektory  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$  jsou vzájemně kolmé ( $\vec{v} \perp \vec{B}$ ).



Vlétne-li do homogenního magnetického pole kolmo k vektoru magnetické indukce  $\vec{B}$  částice s nábojem  $Q$ , bude na ni působit kolmo na směr pohybu stálá magnetická síla  $\vec{F}_B$ . Částice se bude v tomto magnetickém poli pohybovat po kružnici. Pohyb je rovnoměrný, způsobený dostředivou silou.



Vektory rychlosti a magnetické indukce v tomto případě svírají úhel  $90^\circ$ . Pro velikost magnetické síly pak platí

$$F_B = |Q| \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha = |Q| \cdot v \cdot B \cdot \underbrace{\sin 90^\circ}_1 = |Q| \cdot v \cdot B.$$

Magnetická síla působí jako dostředivá  $\vec{F}_d = m \frac{v^2}{r}$ ,

kde  $m$  je hmotnost,  $v$  je rychlost a  $r$  je poloměr kruhové trajektorie částice.

Spojením předchozích dvou rovnic dostaneme vztah

$$|Q| \cdot v \cdot B = m \frac{v^2}{r}.$$

Měřením poloměru trajektorie částice pak lze určit její hmotnost, známe-li její náboj, rychlost a magnetickou indukci pole.

Neboli lze vyjádřit poloměr kružnice, po které se částice pohybuje,

$$r = \frac{m \cdot v}{|Q| \cdot B},$$

periodu

$$T = \frac{2\pi \cdot r}{v} = \frac{2\pi \cdot m}{|Q| \cdot B},$$

frekvenci

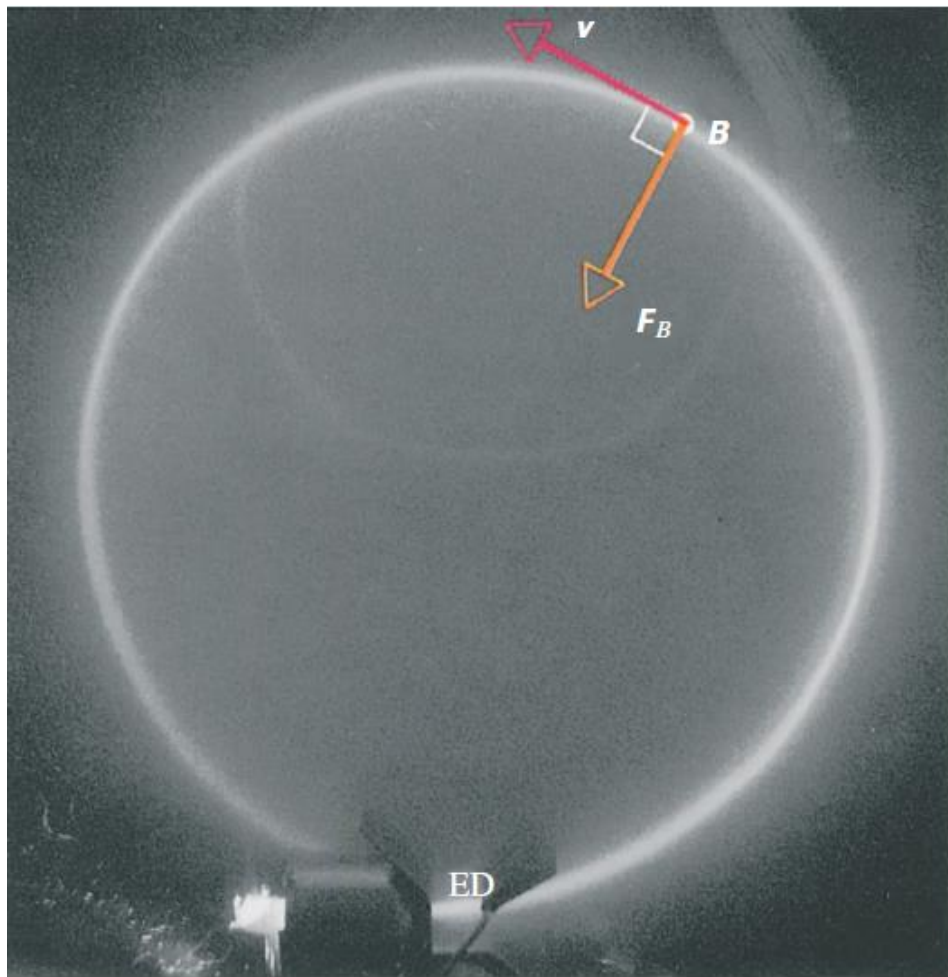
$$f = \frac{1}{T} = \frac{|Q| \cdot B}{2\pi m},$$

úhlovou frekvenci

$$\omega = 2\pi f = \frac{|Q| \cdot B}{m}.$$



## Příklad



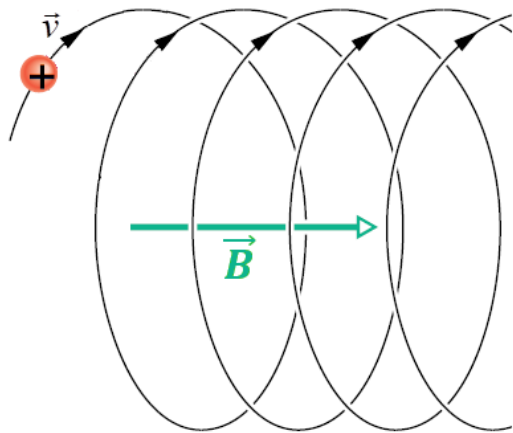
Svazek elektronů je vstřelován elektronovým dělem (ED) do měřicí komůrky. Komůrka obsahuje plyn za nízkého tlaku. Elektrony do ní vlétají v rovině obrázku rychlostí  $\vec{v}$  a dostávají se do oblasti homogenního magnetického pole o indukci  $\vec{B}$ . Magnetická indukce je kolmá k rovině obrázku a má směr k nám. Magnetické pole je homogenní v celém objemu komůrky.

Výsledkem je, že radiálně působící magnetická síla  $\vec{F}_B$  stále vychyluje elektrony, a protože vektory  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$  jsou na sebe stále kolmé, budou se elektrony pohybovat po kružnici rovnoměrným pohybem (protože síla  $\vec{F}_B$  míří stále do jejího středu).

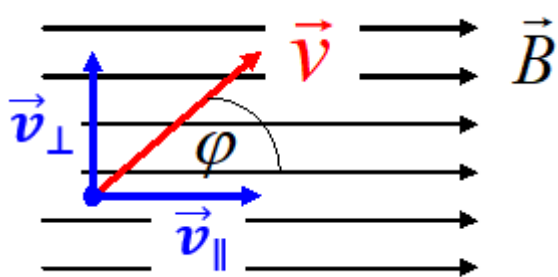
Použitím pravidla pravé ruky můžeme ověřit směr síly  $\vec{F}_B = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$  v libovolném bodě.

Stopu elektronů vidíme na fotografii, neboť atomy plynu v komůrce vyzařují světlo kdykoli se s nimi některý z letících elektronů srazí. Stopa elektronů je kruhová.

- Vektory  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$  svírají uhel  $\varphi$  ( $0 < \varphi < 90^\circ$ ).



Má-li nabitá částice letící v homogenním magnetickém poli  $\vec{B}$  nenulovou složku rychlosti ve směru  $\vec{B}$ , bude se pohybovat po **šroubovici** s osou ve směru pole.

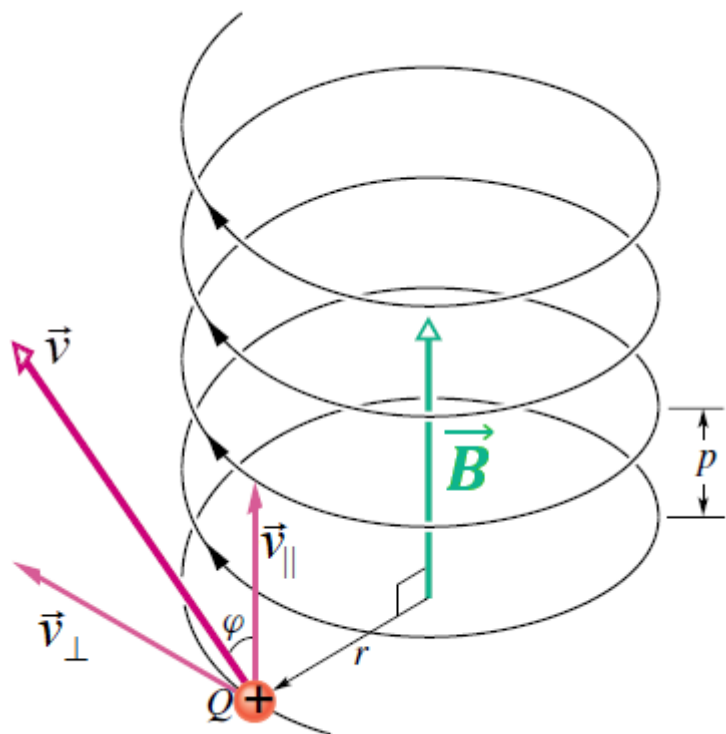


Vektor rychlosti částice  $\vec{v}$  je rozložen vzhledem ke směru  $\vec{B}$  do dvou průmětů – rovnoběžného  $\vec{v}_{\parallel}$  a kolmého  $\vec{v}_{\perp}$ , platí tedy

$$\vec{v}_{\parallel} = v \cdot \cos \varphi, \quad \vec{v}_{\perp} = v \cdot \sin \varphi.$$

Rovnoběžná složka  $\vec{v}_{\parallel} = v \cdot \cos \varphi$  není ovlivněna magnetickým polem a vyvolá rovnoměrný pohyb ve směru  $\vec{B}$ . Kolmá složka  $\vec{v}_{\perp} = v \cdot \sin \varphi$  vyvolá pohyb po kružnici.

Trajektorií částice je šroubovice o poloměru  $r$ , periodě  $T$  a stoupání  $p$ .



$$r = \frac{m \cdot v_{\perp}}{|Q| \cdot B} = \frac{m \cdot v \cdot \sin \varphi}{|Q| \cdot B},$$

$$T = \frac{2\pi \cdot m}{|Q| \cdot B},$$

$$p = v_{\parallel} \cdot T = v \cdot \cos \varphi \cdot \frac{2\pi \cdot m}{|Q| \cdot B}.$$

Rovnoběžná složka  $\vec{v}_{\parallel}$  určuje **stoupání  $p$  šroubovice**, což je vzdálenost mezi dvěma sousedními závity, a je rovno vzdálenosti, o kterou se částice posune za dobu jedné periody (jedné otočky) ve směru magnetické indukce  $\vec{B}$ .

Kolmá složka  $\vec{v}_{\perp}$  určuje **poloměr šroubovice** a je právě tou veličinou, kterou musíme dosadit za  $v$  do rovnice pro výpočet poloměru  $r$ .

## 1.9 Pohyb nabité částice v elektromagnetickém poli

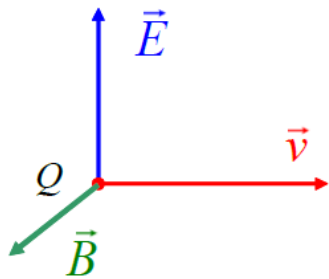
Může se stát, že na nabitou částici působí současně jak elektrické, tak i magnetické pole. Zajímavý případ nastává, když jsou pole zkřížená. To znamená, že obě pole na sebe jsou navzájem kolmá. Podobný pokus, který prováděl J. J. Thomson na Universitě v Cambridgi v roce 1897, pak vedl k objevu elektronu.

Na nabitou částici působí elektromagnetické pole elektrické intenzity  $\vec{E}$  a magnetické indukce  $\vec{B}$ . Pole jsou zkřížená (tj.  $\vec{E} \perp \vec{B}$ ) a homogenní (tedy  $\vec{E} = \text{konst.}$  a  $\vec{B} = \text{konst.}$ ).

Výsledná síla působící na částici je určena vztahem  $\vec{F} = \vec{F}_E + \vec{F}_B = Q \cdot \vec{E} + Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$ .

Jsou-li obě pole nastavena tak, že síly působící na náboj se vyruší (výsledná síla se rovná nule), dostaneme

$$Q \cdot \vec{E} = -Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B}).$$



Podmínka, která toto umožňuje, je splněna pro velikosti sil

$$F_E = Q \cdot E, \quad F_B = Q \cdot v \cdot B \cdot \underbrace{\sin 90^\circ}_1 = Q \cdot v \cdot B.$$

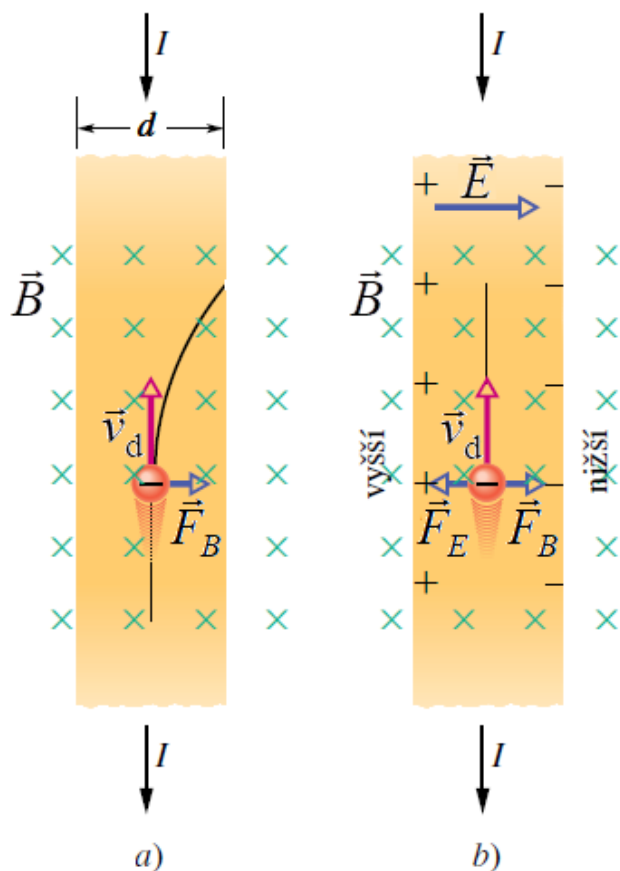
Platí tedy  $E = v \cdot B$ .

Pro zadaná pole  $\vec{E}$  a  $\vec{B}$  projdou bez odchýlení jen částice, jejichž rychlost je  $v = \frac{E}{B}$ , což umožňuje změřit rychlosti nabitých částic.

## 2. Hallův jev

Vzniká působením magnetického pole na nosiče náboje při průchodu proudu ve vodivé nebo polovodivé látce.

Tento jev, který v roce 1879 popsal Edwin H. Hall, umožňuje nejen zjistit, zda náboj nosičů proudu je kladný nebo záporný, ale můžeme s jeho pomocí změřit i počet těchto nosičů v objemové jednotce vodiče.



Proud  $I$  protéká kovovým (měděným) vodičem ve tvaru proužku o šířce  $d$  a tloušťce  $c$ . Nosiče náboje se pohybují driftovou rychlostí  $v_d$ .

Elektrony se pohybují směrem opačným, než je směr proudu  $I$ .

Vodič umístíme do magnetického pole  $\vec{B}$ .

Magnetická síla  $\vec{F}_B$  bude působit na každý elektron pohybující se driftovou rychlostí tak, že ho bude „tlačit“ k pravé straně proužku (obr. *a*).

Během jisté doby se elektrony pohybující se doprava nakupí na pravé straně proužku, takže zanechají na levé

straně proužku nevykompenzované kladné náboje. Tím vzniká elektrické pole o intenzitě  $\vec{E}$  uvnitř proužku. Toto pole má směr zleva doprava (obr. *b*), takže elektrická síla  $\vec{F}_E$  tlačí každý elektron doleva.

Během velmi krátké doby se ustaví rovnováha: elektrická síla působící na každý elektron poroste tak dlouho, až se vyrovná opačně působící magnetické síle. Tím se obě síly navzájem vyruší.

Nadále se elektrony budou pohybovat driftovou rychlostí ve směru délky proužku k jeho hornímu okraji a náboj nahromaděný na pravé straně, a tedy i pole  $\vec{E}$  jím vytvořené napříč proužku už více neporostou.

Rozdíl potenciálů vzniklý na protilehlých stranách proužku je Hallovo napětí

$$U_H = E \cdot d,$$

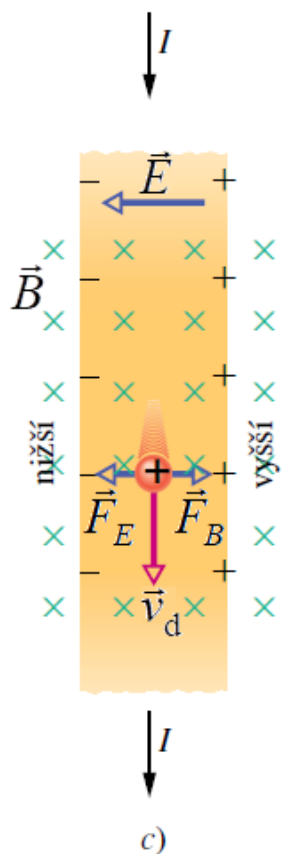
kde  $E$  je velikost intenzity elektrického pole vytvořeného posunem elektronů,  $d$  je šířka kovového proužku.

Pro velikosti sil platí  $F_E = Q \cdot E$ ,  $F_B = Q \cdot v_d \cdot B$ . Jestli  $F_E = F_B$ , lze vyjádřit Hallovo napětí pomocí vztahu

$$U_H = v_d \cdot B \cdot d.$$

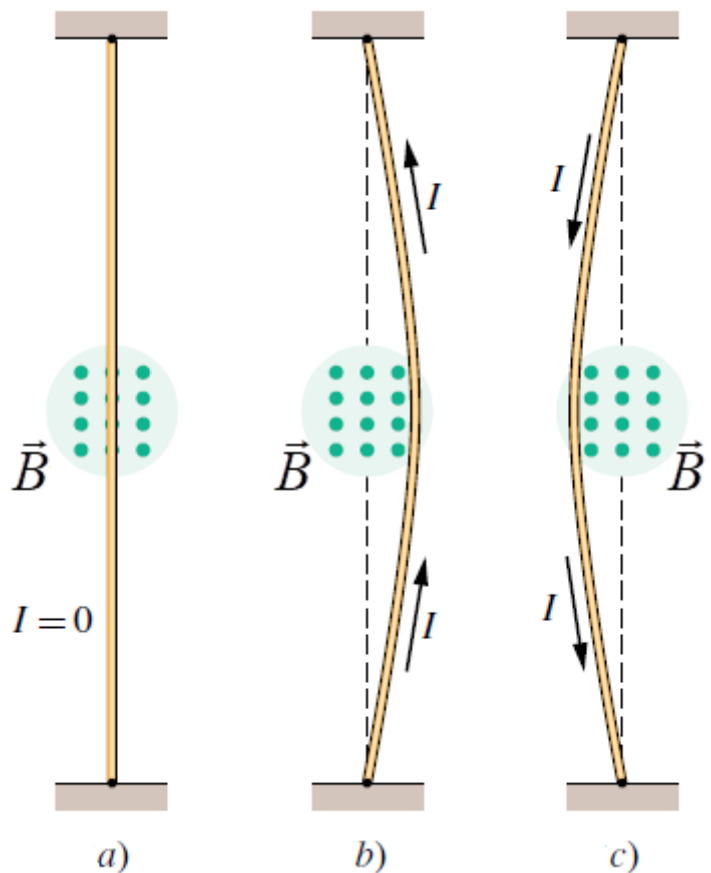
Využití:

- určení koncentrace elektronů ve vodiči  $n = \frac{B \cdot I \cdot d}{U_H \cdot S \cdot e}$ ,
- určení koncentrací nadbytečných nosičů náboje v polovodiči,
- určení driftové rychlosti  $v_d$ .



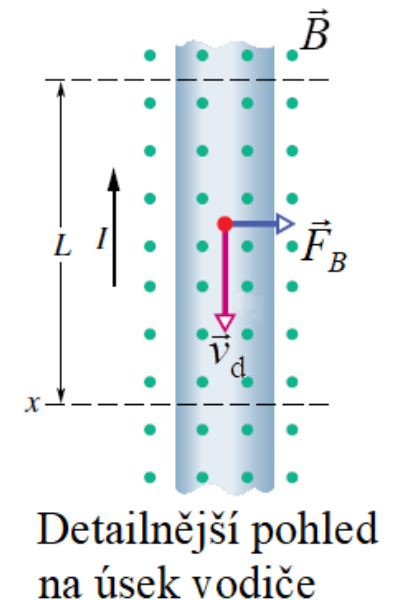
Volné kladné nosiče náboje se chovají podobně (obr. c).

### 3. Ampérova síla



Ohebný vodič je umístěn pólovými nastavci magnetu, jehož magnetické pole je kolmé k rovině obrázku a směřuje k nám.

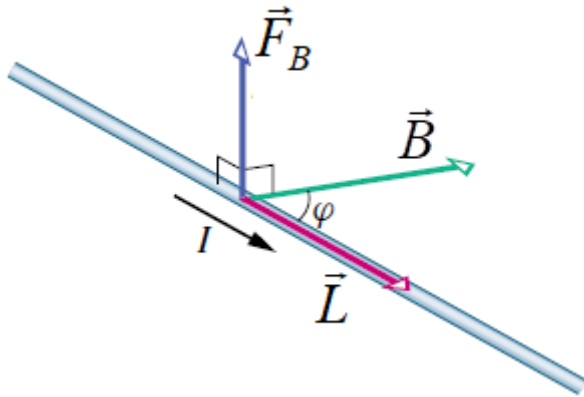
- a) Neprotéká-li vodičem proud, je vodič rovný.
- b) Teče-li vodičem proud směrem nahoru, prohne se doprava.
- c) Teče-li vodičem proud směrem dolů, prohne se doleva.





Přímým vodičem délky  $L$  protéká proud  $I$ . Vodiči přiřadíme vektor  $\vec{L}$  ve směru proudu. Svírá-li  $\vec{L}$  úhel  $\varphi$  se směrem magnetické indukce  $\vec{B}$ , pak na vodič působí **Ampérova síla**

$$\vec{F}_B = I \cdot \vec{L} \times \vec{B}.$$



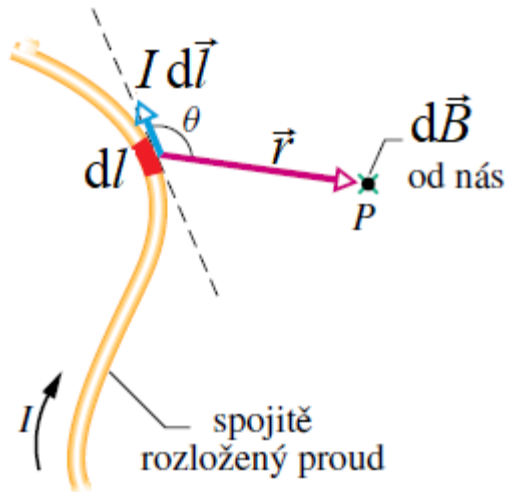
Není-li vodič přímý, můžeme jej myšleně rozdělit na infinitezimální délkové elementy  $dl$ . Na každý element vodiče  $dl$  působí element magnetické síly  $d\vec{F}_B = I \cdot d\vec{l} \times \vec{B}$ .

Výslednou sílu působící na proudovodič libovolného tvaru můžeme získat integrací

$$\vec{F}_B = \int_{(c)} d\vec{F}_B = \int_{(c)} I \cdot d\vec{l} \times \vec{B}.$$

Síla působící na vodič protékaný proudem nazýváme **Ampérova síla**.

## 4. Biotův-Savartův (Laplaceův) zákon



Vodič, kterým prochází proud, rozdělíme na délkové elementární části  $d\vec{l}$ .

Proudový element je pak vektor  $I d\vec{l}$ . Leží na tečně k vodiči a jeho orientace je dána směrem proudu.

Ve zvoleném bodě  $P$  lze indukci magnetického pole vytvořeného tímto proudovým elementem popsat jako

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

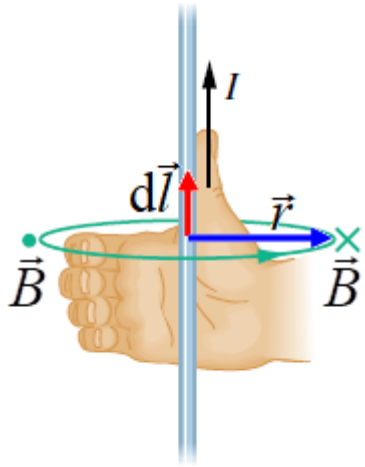
Zde  $\mu_0$  je konstanta nazývaná **permeabilita vakua** (neboli magnetická konstanta), jejíž hodnotu definujeme přesně:  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H.m}^{-1}$ .

Vektor  $\vec{r}$  je polohový vektor směřující od proudového elementu k bodu  $P$ .

Velikost magnetické indukce je tedy  $dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I dl \cdot \sin \theta}{r^2}$  a směr určujeme pomocí pravidla pravé ruky.

Magnetické pole vytvořené celým vodičem podle principu superpozice je

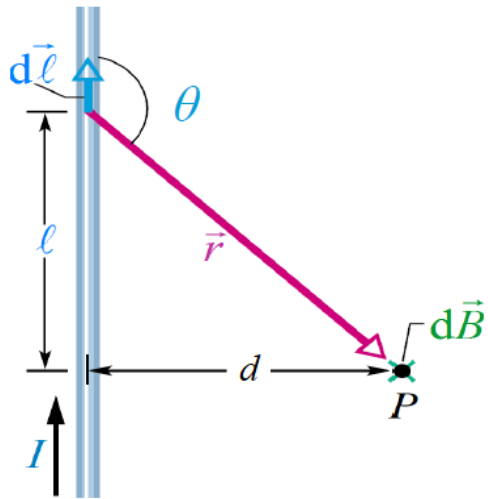
$$\vec{B} = \int_{(c)} d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{(c)} \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}}{r^3}.$$



Směr magnetické indukce je kolmý na rovinu určenou vektory  $I d\vec{l}$  a  $\vec{r}$ . Orientaci určujeme pravidlem pravé ruky: položte palec pravé ruky ve směru proudového elementu a zahnuté prsty ukazují směr magnetických indukčních čar.

Použití Biotova-Savartova zákona je nezbytné k výpočtu indukce magnetického pole v okolí vodiče, který má obecný tvar.

## 4.1 Magnetické pole dlouhého přímého vodiče



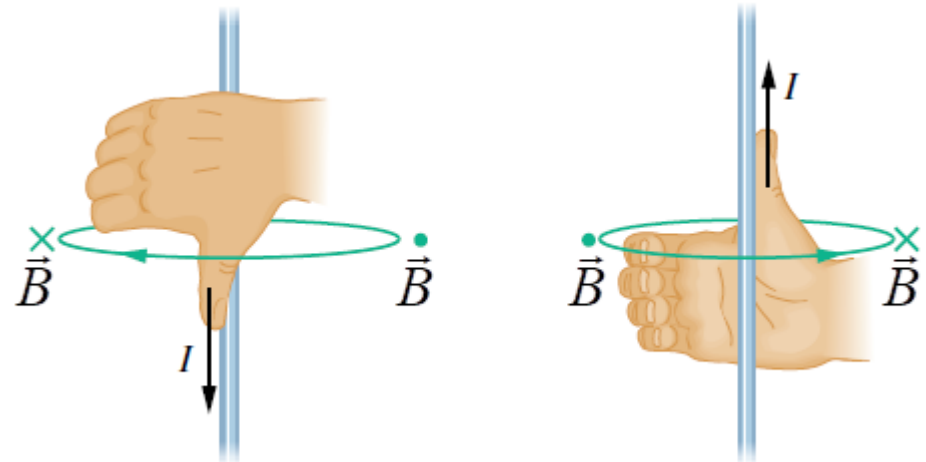
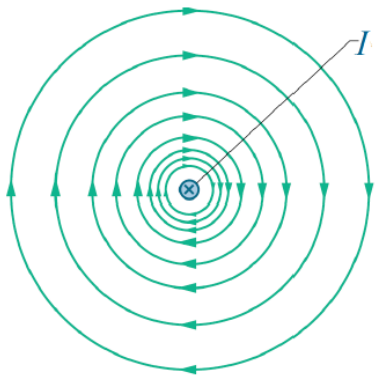
Velikost magnetické indukce je

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi d},$$

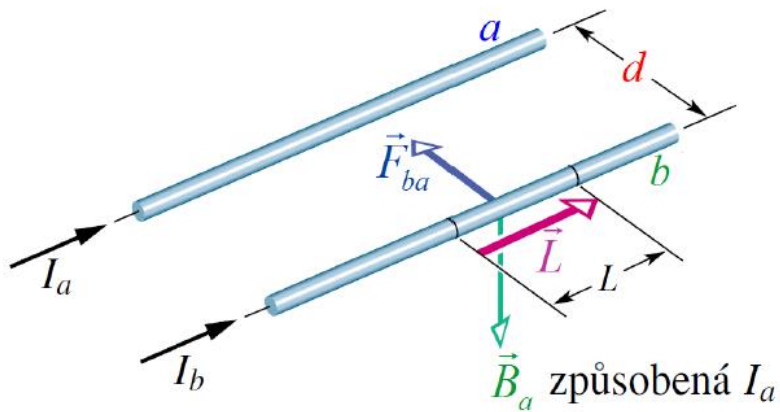
kde  $d$  je kolmá vzdálenost bodu, ve kterém určujeme  $B$ , od vodičů.

Magnetické indukční čáry v okolí přímého vodiče s proudem mají tvar soustředných kružnic.

Pohled shora na magnetické indukční čáry



## 4.2 Silové působení dvou rovnoběžných vodičů



Vodičem  $a$  protéká proud, proto se kolem něj vytváří magnetické pole. Indukce  $\vec{B}_a$  tohoto pole ve vzdálenosti  $d$  má velikost:  $B_a = \frac{\mu_0 I_a}{2\pi d}$ .

Je-li do tohoto pole  $\vec{B}_a$  vložen jiný vodič, působí na něj pole vodiče  $a$  silou.

Magnetická síla, působící na délku  $L$  vodiče  $b$ , se vypočítá podle vztahu  $\vec{F}_{ba} = I_b \cdot \vec{L} \times \vec{B}_a$ .

Vzhledem k tomu, že  $\vec{L} \perp \vec{B}_a$ , je velikost síly

$$F_{ba} = I_b \cdot L \cdot B_a \cdot \underbrace{\sin 90^\circ}_1 = I_b \cdot L \cdot B_a = I_b \cdot L \cdot \frac{\mu_0 I_a}{2\pi d}. \text{ Platí tedy } F_{ba} = F_{ab} = \frac{\mu_0 I_a I_b}{2\pi d} L.$$

Síla, kterou na sebe působí dva rovnoběžné dlouhé vodiče, je úměrná součinu proudů jimi procházejících a nepřímo úměrná vzdálenosti vodičů.

Síla je

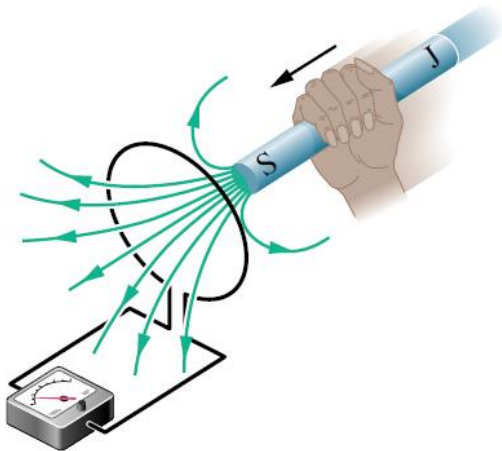
- přitažlivá, je-li směr proudů ve vodiči souhlasný,
- odpuzivá, je-li směr proudů ve vodičích nesouhlasný.

Na základě vztahu  $F = \frac{\mu_0 I_a I_b}{2\pi d} L$  je definována základní jednotka SI – **ampér** (A).

1 ampér je proud, který při stálém průtoku dvěma rovnoběžnými přímými velmi dlouhými vodiči zanedbatelného kruhového průřezu, umístěnými ve vzdálenosti 1 m od sebe ve vakuu, vyvolává mezi vodiči sílu  $2 \cdot 10^{-7}$  newtonů na 1 metr délky.

## 5. Elektromagnetická indukce

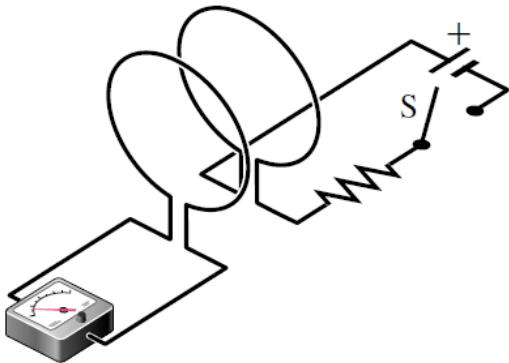
Elektrické pole může být generováno nejen náboji, ale i polem magnetickým. Takové pole dostalo název **Indukované elektrické pole**.



K tomuto poznání vedly dva Faradayovy pokusy.

- Při vzájemném pohybu tyčového magnetu a vodivé smyčky vznikne indukovaný proud. Proces vytvoření takového proudu se jmenuje elektromagnetická indukce.
- Zapnutí a vypnutí proudu spínačem **S** má stejný účinek.

V obou případech se mění magnetické pole procházející plochou, která je smyčkou obklopena.



Faradayův zákon elektromagnetické indukce:

ve smyčce se indukuje elektromotorické napětí ( $emn$ ), když se mění počet indukčních čar procházejících plochou smyčky.

## 5.1 Faradayův indukční zákon

**Magnetický indukční tok**  $\Phi_B$ , procházející plochou smyčky, je roven počtu indukčních čar, které tuto plochu kolmo protínají.

Obecně je magnetický indukční tok definován vztahem  $\Phi_B = \int_{(S)} \vec{B} \cdot d\vec{S}$ , kde směr vektoru  $\vec{S}$  je kolmý na rovinnou plochu  $S$ .

Faradayův indukční zákon:

velikost  $emf$  indukovaného ve vodivé smyčce je rovna záporně vzaté rychlosti změny magnetického indukčního toku  $\Phi_B$  procházejícího plochou této smyčky.

Pro jeden závit:

$$emf = -\frac{d\Phi_B}{dt}$$

Pro cívku s  $N$  závity:

$$emf = -N \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Magnetický indukční tok je skalární veličina, jednotkou je weber  $[\Phi_B] = \text{Wb} = \text{T}\cdot\text{m}^2$ .



## 5.2 Cívka (induktor) a indukčnost

Proud  $I$  tekoucí jedním závitem cívky vytváří uvnitř závitu magnetické pole o indukci  $\vec{B}$  a tedy i magnetický indukční tok  $\Phi_B$ , který je přímo úměrný proudu  $I$ .

Všech  $N$  závitů cívky vytvoří celkový tok  $N \cdot \Phi_B$ , který je rovněž přímo úměrný proudu.

$$N \cdot \Phi_B = L \cdot I.$$

Konstantu úměrnosti  $L$  ve vztahu nazýváme (vlastní) **indukčnost** a definujeme vztahem

$$L = \frac{N \cdot \Phi_B}{I}.$$

Její velikost závisí na tvaru a rozměrech cívky.

Jednotkou indukčnosti je henry  $[L] = \text{H} = \text{T} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{A}^{-1}$ .

Pokud není cívka ve vakuu, pak indukčnost závisí i na magnetických vlastnostech prostředí.

**Permeabilita prostředí** je  $\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ ,

kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua a  $\mu_r$  je relativní permeabilita.

**Cívka** je elektrotechnická součástka používaná v elektrických obvodech:

- k vytvoření magnetického pole elektrického proudu, které se dále využívá k působení magnetickou silou – cívka (s jádrem) slouží jako elektromagnet,
- k indukci elektrického proudu proměnným magnetickým polem – cívka slouží jako induktor (nositel indukčnosti).

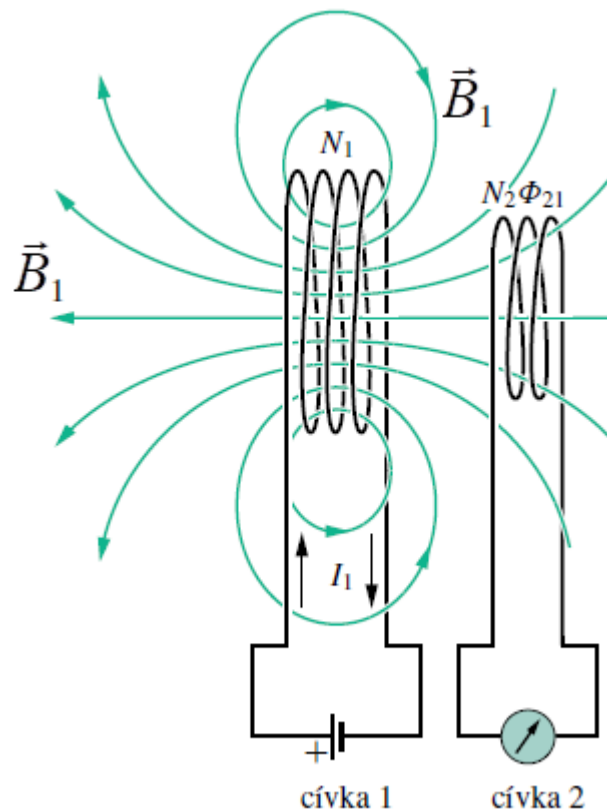
Znak, kterým znázorňujeme cívku ve schématech je 

## 5.3 Energie magnetického pole

Kondenzátor uchovává elektrickou energii. Cívka uchovává energii magnetickou.

$$E_m = \frac{1}{2} L I^2.$$

## 5.4 Vzájemná indukčnost



Jsou-li dvě cívky (označené 1 a 2) blízko sebe, pak proměnný proud v první z nich indukuje *emf* ve druhé cívce.

Konstantou úměrnosti  $M$  je tzv. **vzájemná indukčnost**, která závisí na geometrii vodičů, poloze a orientaci cívek, na magnetických vlastnostech prostředí.

Konstanty úměrnosti jsou stejné,  
tj.  $M_{21} = M_{12} = M$  (měřené v henry).

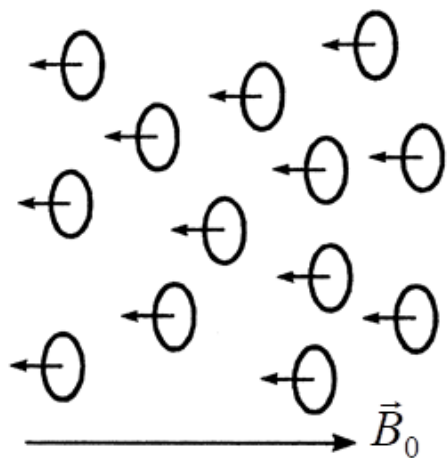
Transformátor – obsahuje dvě nebo více cívek na společném jádře.

## 6. Magnetické vlastnosti látek

Podle chování látek v magnetickém poli rozlišujeme látky na

- slabě magnetické (diamagnetické, paramagnetické) – magnetizace látky dosahuje pouze malých hodnot,
- silně magnetické (feromagnetické) – magnetizace látky po vložení do magnetického pole může vykazovat velké hodnoty.

### Diamagnetismus



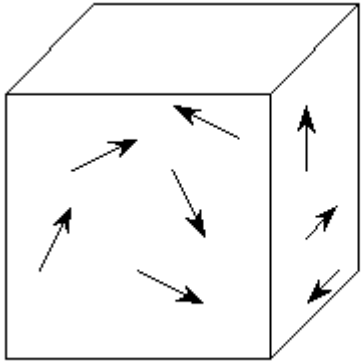
Bez přítomnosti vnějšího magnetického pole je výsledný magnetický moment atomu roven nule.

Ve vnějším magnetickém poli vznikají slabé indukované magnetické dipóly, jejichž magnetické pole má směr opačný než je směr vnějšího magnetického pole  $\vec{B}_0$ .

Vložíme-li diamagnetickou látku do vnějšího magnetického pole, dojde uvnitř látky k zeslabení magnetické indukce vnějšího pole.

Je-li vnější pole nehomogenní, pak diamagnetická látka je vytlačována z magnetického pole. Diamagnetismus vykazují všechny látky, je však slabý a ve srovnání s paramagnetismem a feromagnetismem je zanedbatelný.

## Paramagnetismus



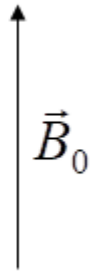
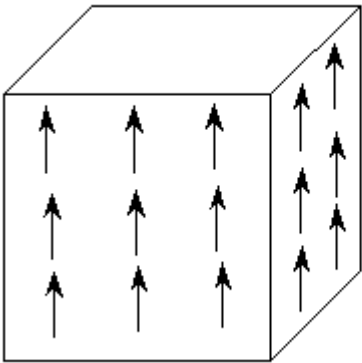
Atomy mají vlastní nenulové permanentní magnetické momenty, ale nahodile orientované.

Vložíme-li paramagnetickou látku do vnějšího magnetického pole, mají částice s permanentním magnetickým dipólovým momentem snahu orientovat se souhlasně s vnějším magnetickým polem  $\vec{B}_0$ .

Tím se toto vnější pole zesílí.

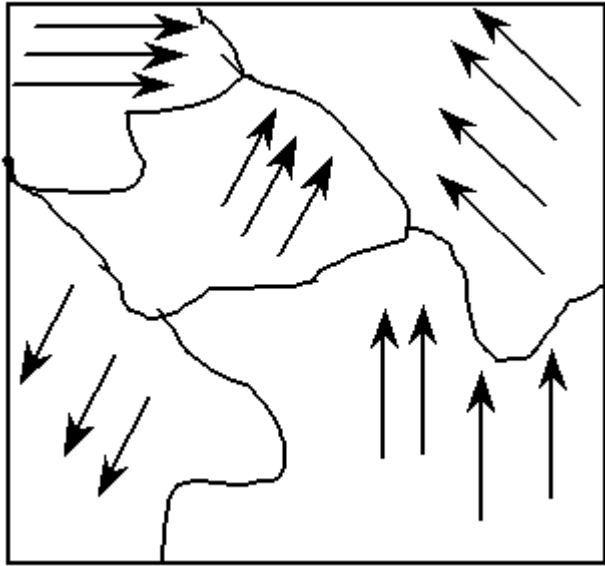
Proti uspořádání magnetických dipólů však působí neuspořádaný tepelný pohyb částic.

Proto u většiny paramagnetik závisí magnetizace na termodynamické teplotě.



V nehomogenním poli je vzorek vtahován do pole.

## Feromagnetismus



Feromagnetické materiály mají silný permanentní magnetismus (Fe, Ni, Co, slitiny). Atomy feromagnetik mají vnitřní magnetické momenty, které mají tendenci silně se navzájem ovlivňovat.

Všechny feromagnetické látky obsahují mikroskopické oblasti, tzv. **magnetické domény** (objem  $10^{-12}$  až  $10^{-8}$  m<sup>3</sup>, obsahují  $10^{17}$  až  $10^{21}$  atomů). Uvnitř domén jsou magnetické momenty orientovány souhlasně.

V nezmagnetovaných látkách jsou jednotlivé domény orientovány nahodile. Výsledná magnetizace materiálu je tedy nulová.

Vnější pole  $\vec{B}_0$  může „uspořádat“ tyto domény a vytvořit tak velký výsledný celkový magnetický dipólový moment materiálu ve směru  $\vec{B}_0$ . Tento moment může částečně přetrvávat, i když je pole  $\vec{B}_0$  odstraněno.

Je-li vnější pole  $\vec{B}_0$  nehomogenní, je látka do magnetického pole vtahována.

Tepelný pohyb atomů narušuje souhlasnou orientaci magnetických dipólů uvnitř domén. Přesáhne-li teplota vzorku tzv. Curieovu teplotu, domény se rozpadnou a materiál se stává pouze paramagnetickým.