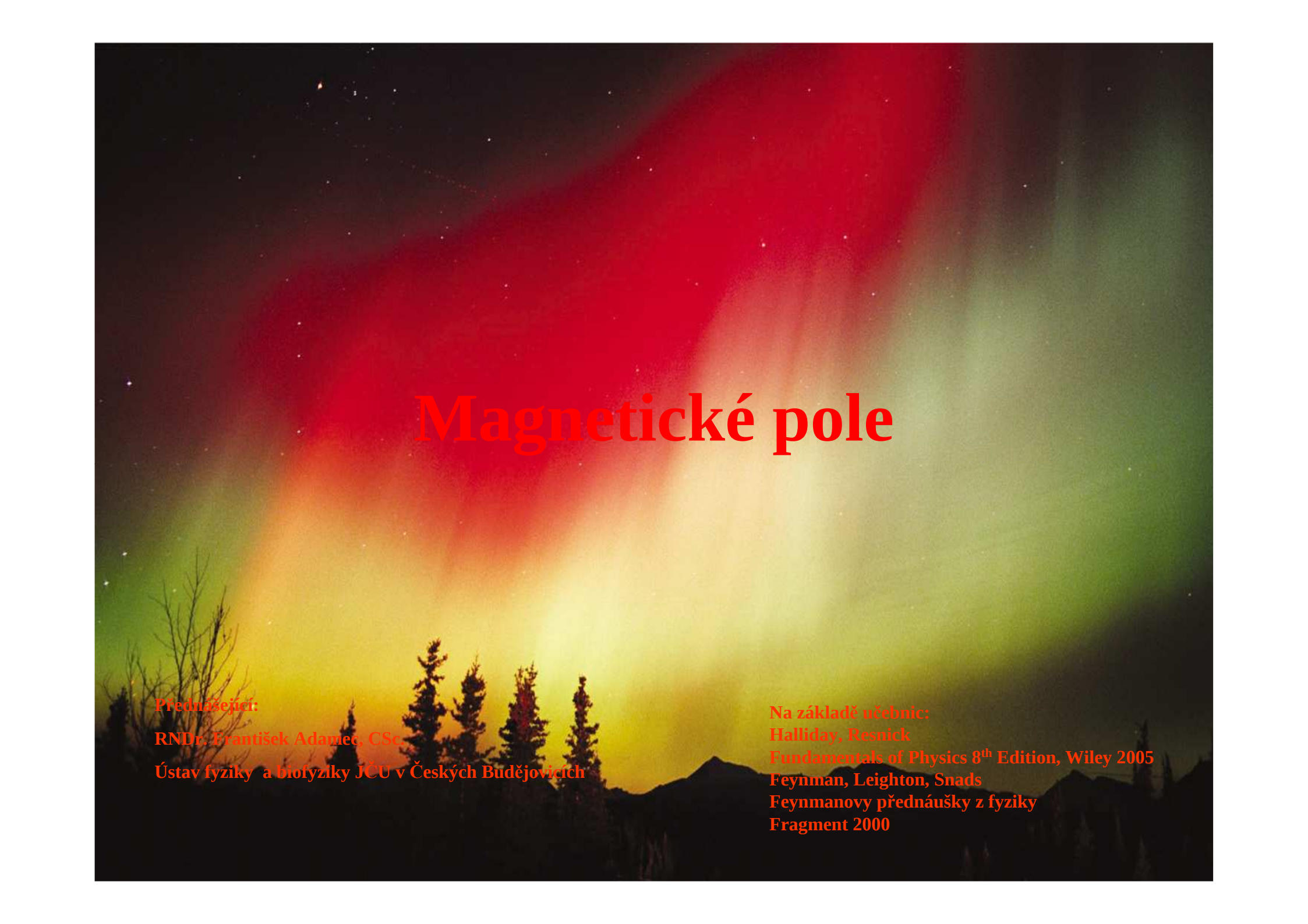


A photograph of the aurora borealis (northern lights) over a dark forest at night. The aurora displays vibrant green and yellow bands, with a prominent red band at the top. The foreground shows the dark silhouettes of evergreen trees and mountains.

Magnetické pole

Přednášející:

RNDr. František Adamec, CSc.

Ústav fyziky a biofyziky JČU v Českých Budějovicích

Na základě učebnic:

Halliday, Resnick

Fundamentals of Physics 8th Edition, Wiley 2005

Feynman, Leighton, Snads

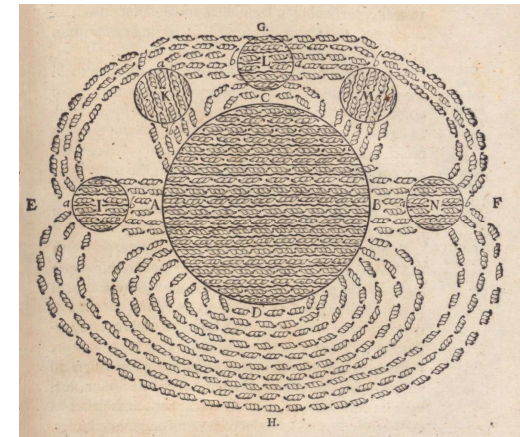
Feynmanovy přednášky z fyziky

Fragment 2000

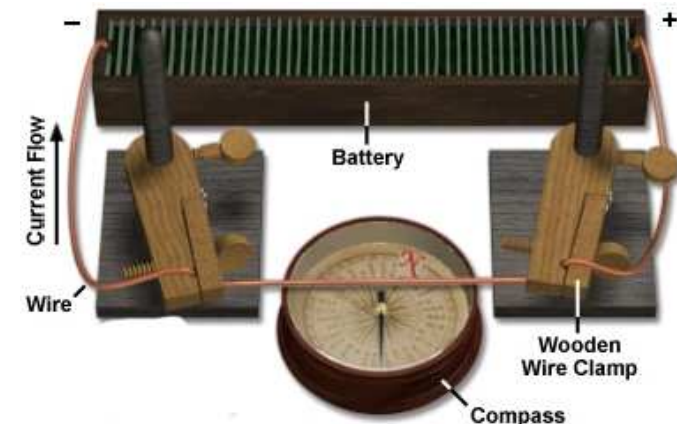
Historie.

První historicky doložená studie magnetismu látek pochází od Petra Peregrina z roku 1269 v knize: *Epistola Petri Peregrini de Maricourt ad Sygerum de Foucaucourt Militem de Magnete*. Peregrin zavedl označení **severní** a **jižní pól** magnetu ve shodě se směrem otáčení zmagnetované látky v magnetickém poli země.

René Descartes, 1644, si vysvětloval existenci magnetického pole cirkulací malých spirálovitých částic procházejících póry v magnetu.



Hans Christian Oersted, 1744, objevil vztah mezi elektrinou (elektrický proud protékající vodičem) a magnetismem (magnetickou střílkou kompasu).



Zdroje magnetického pole.



Magnetit, ostrov Ischia, Kampánské souostroví, Itálie.

Pohybující se náboje.

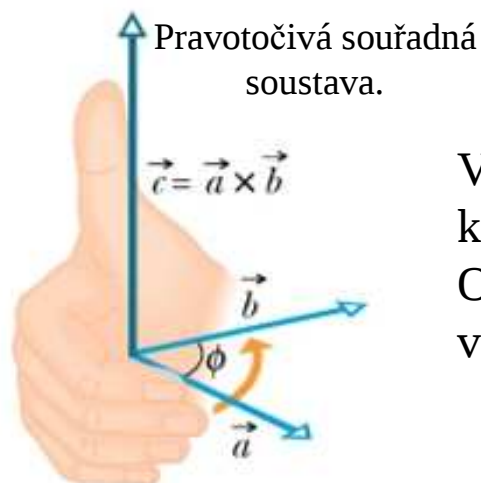
Směr silového působení závisí na směru pohybu náboje – elektrického proudu.

Pevné materiály-permanentní magnety.

Především látky, které obsahují oxidy železa (magnetit). Vždy mají dva odlišné konce – magnetické póly- severní a jižní pól. Stejné póly se odpuzují.



Vektorový součin dvou vektorů



$$\vec{c} = \vec{a} \times \vec{b}$$

Výsledkem vektorového součinu dvou vektorů **a** a **b** je vektor **c** kolmý na rovinu tvořenou vektory **a** a **b**.

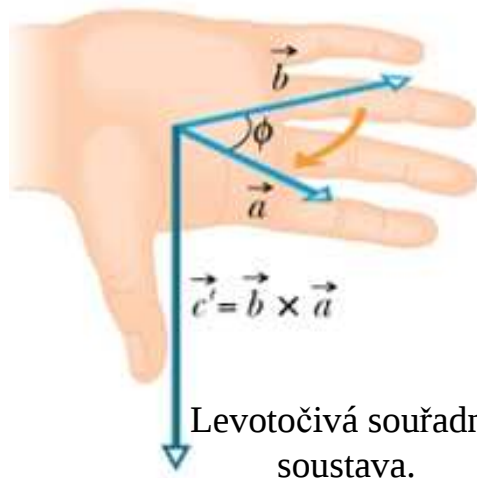
Orientace vektoru **c** je dána pravidlem pravé ruky. Velikost vektoru **c** je dána rovnicí:

$$|\vec{c}| = |\vec{a}| |\vec{b}| \sin \phi$$

Ve složkovém zápisu dostaneme pro vektory **a**, **b** a **c**:

$$\vec{a} = a_x \vec{i} + a_y \vec{j} + a_z \vec{k}, \quad \vec{b} = b_x \vec{i} + b_y \vec{j} + b_z \vec{k}, \quad \vec{c} = c_x \vec{i} + c_y \vec{j} + c_z \vec{k}$$

$$c_x = a_y b_z - a_z b_y, \quad c_y = a_z b_x - a_x b_z, \quad c_z = a_x b_y - a_y b_x$$



Vektorový součin lze zapsat ve formě determinantu:

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \hat{i} & \hat{j} & \hat{k} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix}$$

Vektorový součin není komutativní:

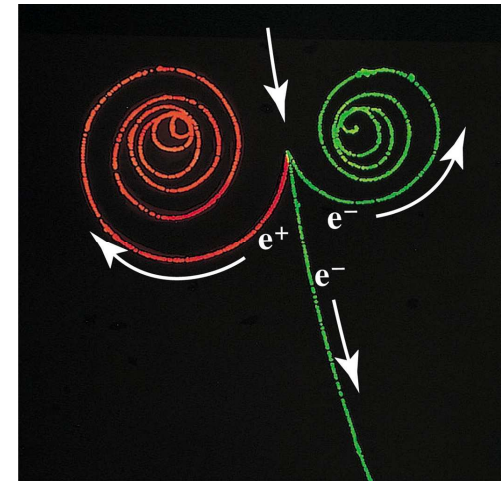
$$\vec{b} \times \vec{a} = -(\vec{a} \times \vec{b})$$

Vektor magnetická indukce $\mathbf{B}$.

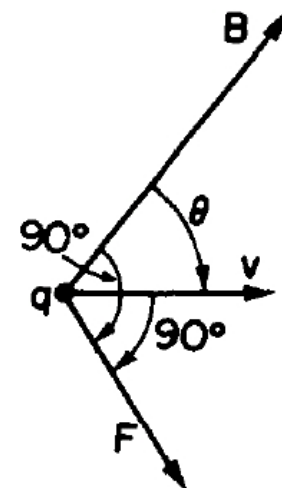
Síla působící na pohybující se náboj závisí nejen na jeho poloze v elektrickém poli, ale též na jeho rychlosti. Každý bod v prostoru je tedy charakterizován dvěma vektorovými veličinami, jež určují sílu působící na pohybující se náboj. První vektorová veličina je **intenzita elektrického pole $\mathbf{E}$** . Druhá je složka závislá na rychlosti, nazýváme ji **magnetickou silou**. Směr a velikost této magnetické síly $\mathbf{F}$ je vždy v každém okamžiku závislý na směru a velikosti vektoru rychlosti $\mathbf{v}$ pohybující se částice a je na něj kolmý. Vedle toho je tato síla vždy v libovolném bodě prostoru kolmá na pevný směr, tento význačný směr je směrem vektoru který nazýváme **indukce magnetického pole $\mathbf{B}$** . Vztah mezi těmito třemi vektory určuje rovnice která je zároveň definicí vektoru magnetické indukce $\mathbf{B}$:

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

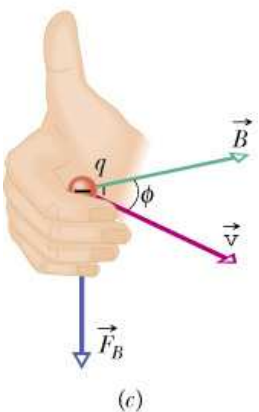
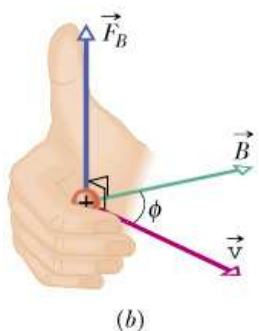
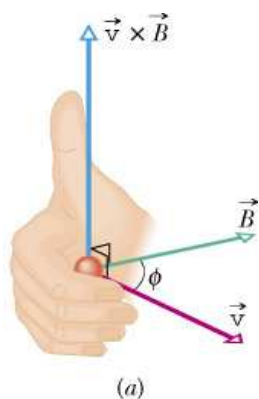
$$F_B = |q|vB \sin \theta$$



Stopy elektronu a pozitronu v bublinové komoře vložené do homogenního magnetického pole. *Lawrence Berkeley Laboratory.*



Vektor magnetická indukce $\mathbf{B}$, pravidlo pravé ruky.



Orientace vektoru síly $\mathbf{F}_B$ působící na pohybující se náboj q v magnetickém poli je dán pravidlem pravé ruky. Je-li náboj q kladný, pak síla míří nad rovinu v níž leží vektory $\mathbf{B}$ a $\mathbf{v}$, tedy ve směru palce (ostatní prsty míří ve směru pohybující se částice), naopak je-li záporný, pak síla míří pod rovinu tvořenou vektory $\mathbf{B}$ a $\mathbf{v}$, tedy na opačnou stranu než je palec.

SI jednotkou magnetické indukce je **1 Tesla, 1T**.

$$1\text{Tesla} = 1\text{T} = 1\frac{\text{N}}{\text{C ms}^{-1}} = 1\frac{\text{N}}{\text{A m}}$$

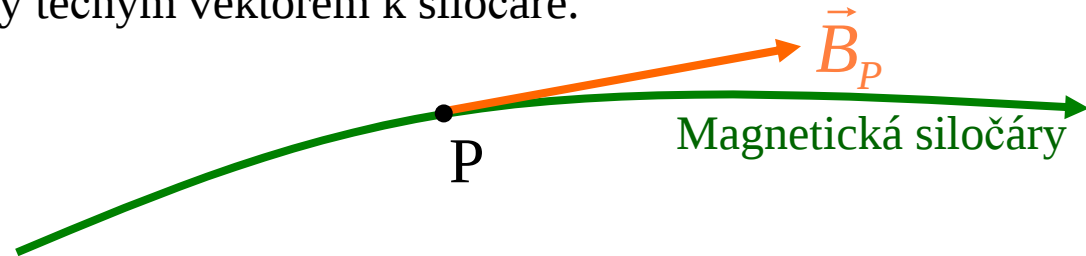
Starší jednotka magnetické indukce je **1 Gauss, 1 G**, tato jednotka není SI jednotkou. Platí, že $1\text{ Tesla} = 10^4\text{ Gausse}$.

Some Approximate Magnetic Fields

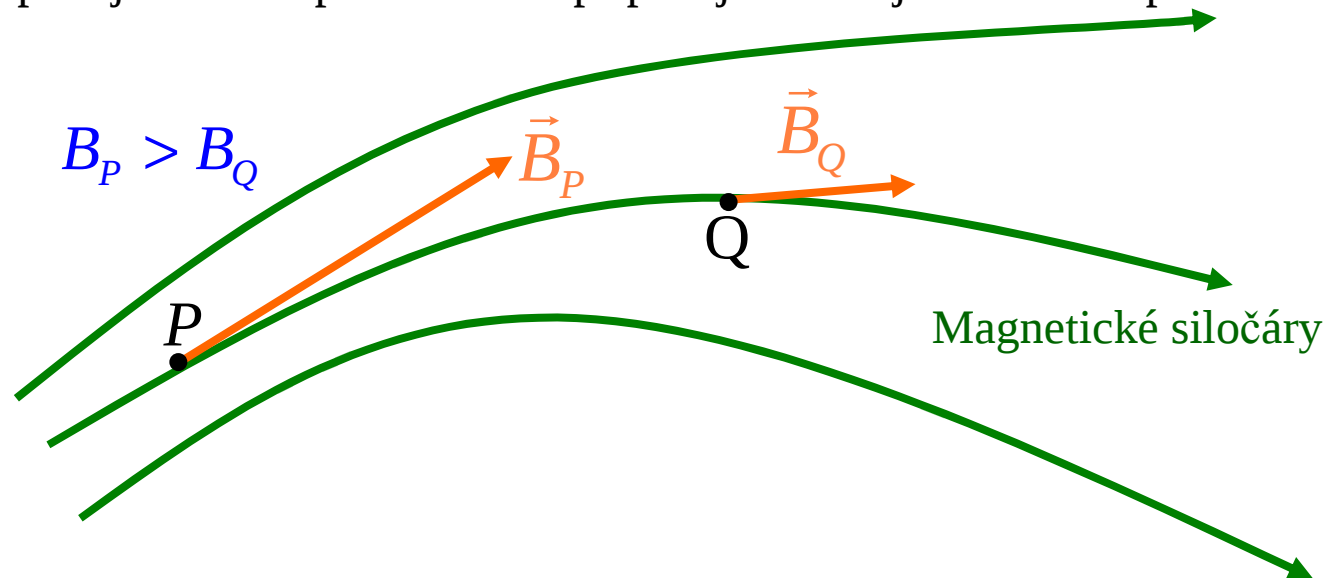
At surface of neutron star	10^8 T
Near big electromagnet	1.5 T
Near small bar magnet	10^{-2} T
At Earth's surface	10^{-4} T
In interstellar space	10^{-10} T
Smallest value in magnetically shielded room	10^{-14} T

Magnetické siločáry.

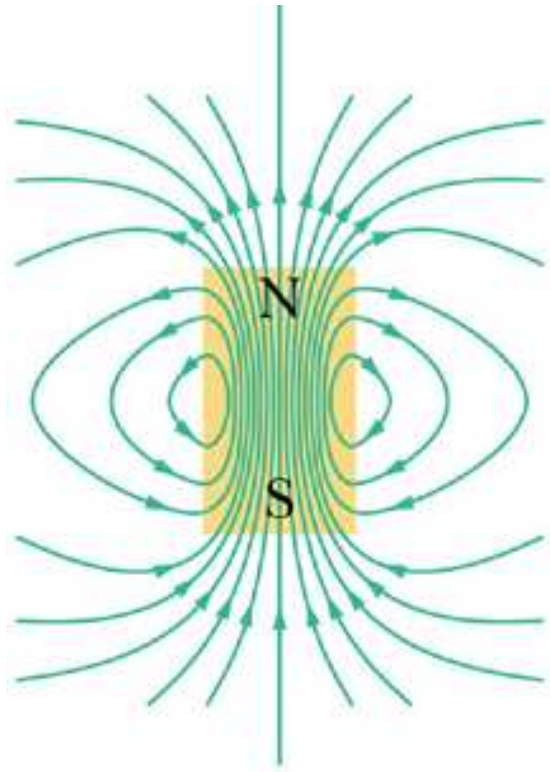
Analogicky jako v případě elektrického pole můžeme zobrazit magnetické pole pomocí **magnetických siločar**. Magnetické siločáry na rozdíl od siločar elektrického pole jsou uzavřené křivky. Vektor magnetické indukce $\vec{B}_P$ je v každém bodě P magnetické siločáry tečným vektorem k siločáře.



Hustota siločar na plochu vyjadřuje velikost vektoru magnetické indukce. Intenzita magnetického pole je úměrná počtu siločar připadajících na jednotkovou plochu.



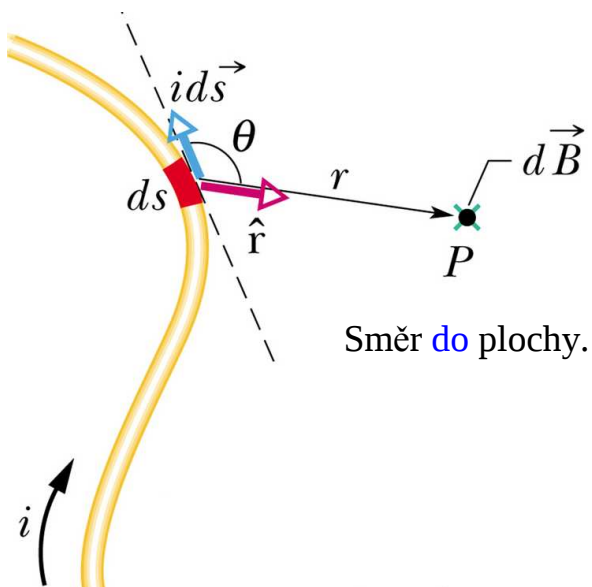
Magnetické siločáry permanentního magnetu.



Magnetické siločáry permanentního magnetu se uzavírají skrze permanentní magnet. Na rozdíl od elektrického pole, kde siločáry vycházeli z kladného náboje a končily na záporném náboji, v případě souhlasných nábojů nebo jediného náboje z nábojů vycházeli a mířili ven od nábojů.

Magnetické siločáry permanentního magnetu vychází ze **severního pólu** magnetu a uzavírají se pře **jižní pól** magnetu. Oba póly od sebe nelze oddělit, vytvářejí tedy **magnetický dipól**.

Magnetické pole vodiče protékaného elektrickým proudem - Biot-Savartův zákon.



Spočítejme magnetické pole $\mathbf{B}$ v bodě P v okolí elektrického vodiče protékaného elektrickým proudem i . Pro magnetické pole platí princip aditivity, tudíž výsledné magnetické pole v bodě P bude součtem (integrálem přes křivku opisanou vodičem) příspěvků $d\mathbf{B}$ od elementů ds vodiče:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{d\vec{s} \times \vec{r}}{r^3}$$

Velikost příspěvku dB k celkové magnetické indukci B v bodě P od elementu vodiče ds :

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{id\sin\theta}{r^2}$$

Uvedená rovnice je známa jako Biot-Savartův zákon. Konstanta μ_0 je permeabilita vakua. Její hodnota je $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ TmA}^{-1} \approx 1,26 \times 10^{-6} \text{ TmA}^{-1}$.

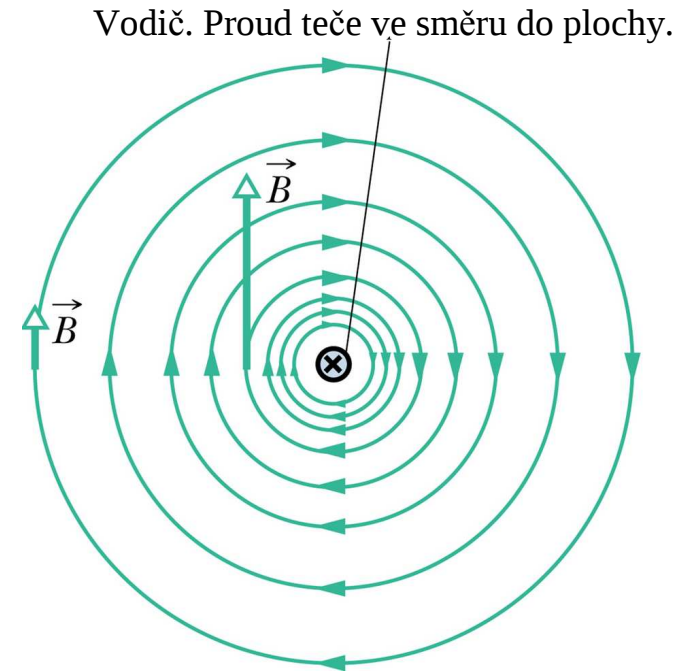
Magnetické pole přímého vodiče.



Magnetické pole v rovině kolmé k procházejícímu přímému vodiči protékanému elektrickým proudem. Železné piliny se soustředí v soustředných kružnicích obklopujících vodič.

Velikost vektoru magnetické indukce v okolí přímého vodiče:

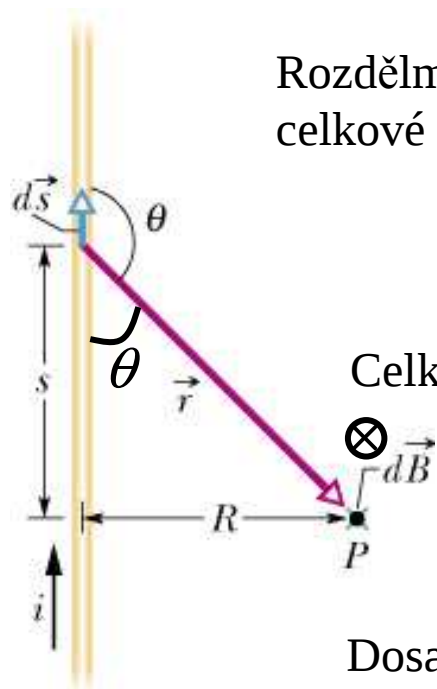
$$B = \frac{\mu_0 i}{2\pi r}$$



Vodič. Proud teče ve směru do plochy.

Magnetické siločáry obklopují přímý vodič leží v rovině kolmé k vodiči.

Výpočet velikosti vektoru magnetické indukce přímého vodiče.



Rozdělme vodič na elementární úseky ds , každý element přispívá k celkové magnetické indukci v místě P příspěvkem:

$$dB = \frac{\mu_0 i}{4\pi} \frac{ds \sin \theta}{r^2}$$

Celkovou intenzitu dostaneme postupem:

$$B = \int_{-\infty}^{\infty} dB = 2 \int_0^{\infty} dB = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{ds \sin \theta}{r^2}$$

Dosazením následujících vztahů do předchozí rovnice :

$$r = \sqrt{s^2 + R^2} \quad \sin \theta = R / r = R / \sqrt{s^2 + R^2}$$

Dostaneme vztah pro velikost vektoru magnetické indukce v bodě P vzdáleném R od přímého vodiče protékaného elektrickým proudem:

$$\int \frac{dx}{(x^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{x}{a^2 \sqrt{x^2 + a^2}} \quad B = \frac{\mu_0 i}{2\pi} \int_0^{\infty} \frac{R ds}{(s^2 + R^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 i}{2\pi R} \left[\frac{s}{\sqrt{s^2 + R^2}} \right]_0^{\infty} = \frac{\mu_0 i}{2\pi R}$$

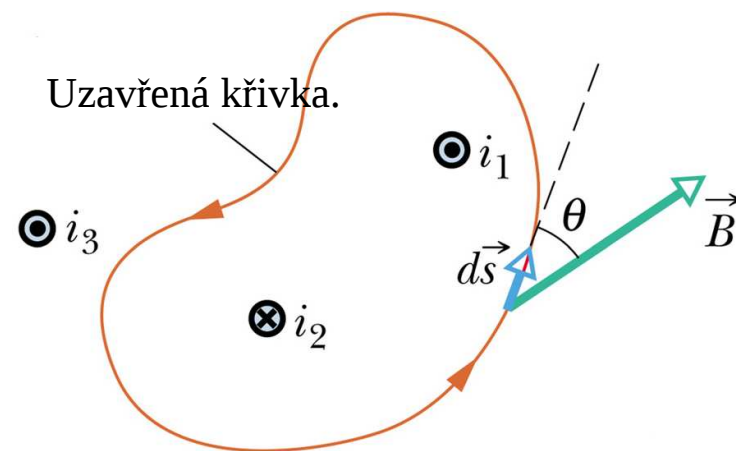
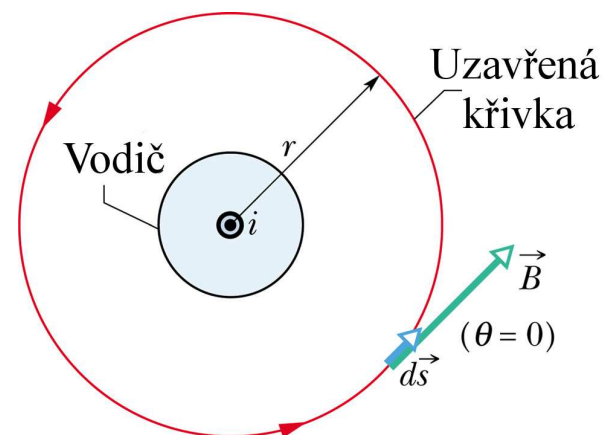
Ampérův zákon.

Vezměme libovolnou uzavřenou křivku obepínající nekonečný přímý vodič protékaný elektrickým proudem i . Vodič je kolmý k rovině v níž leží uvažovaná křivka. Pak mezi velikostí elektrického proudu i a vektorem magnetické indukce $\vec{B}$ platí vztah:

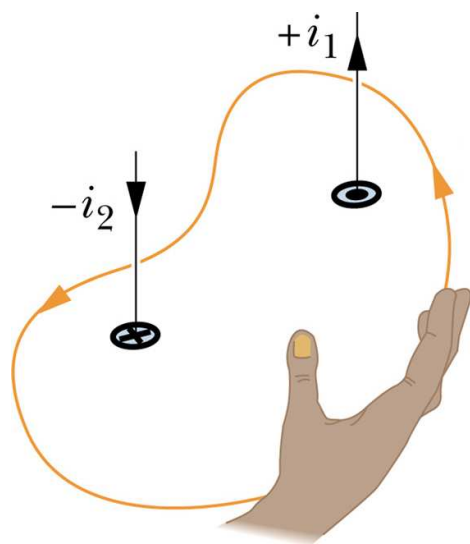
$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i$$

Tento vztah se nazývá Ampérův zákon. Obepíná-li uzavřená křivka několik vodičů, pak je třeba uvažovat celkový proud od všech vodičů (se správným znaménkem) a platí vztah:

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 i_{\text{celkový.}}$$

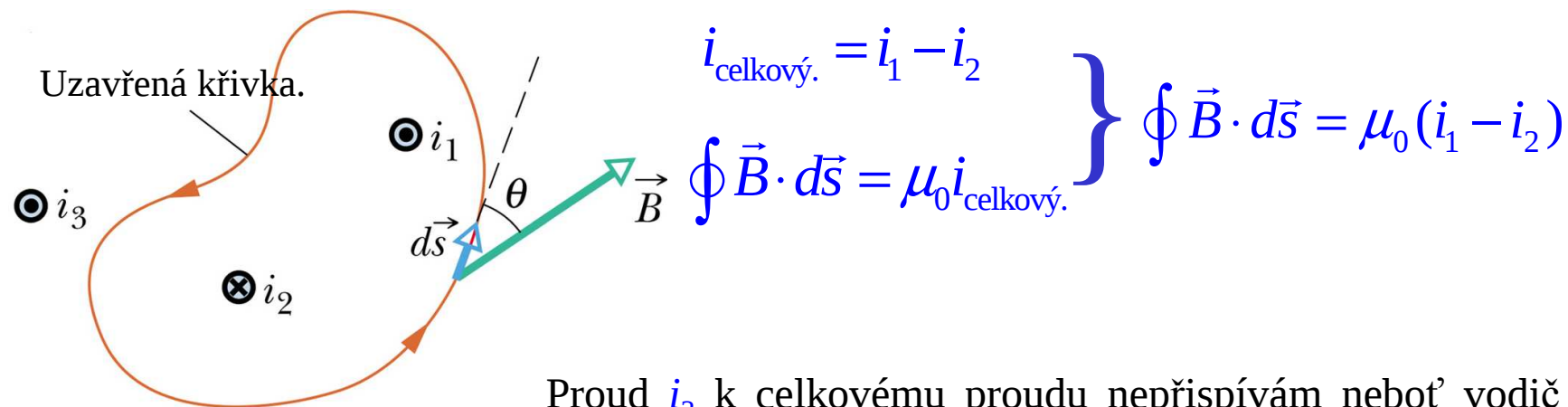


Určení znaménka celkového proudu.



Znaménko celkového proudu protékaného vodiči procházejícími uvnitř uzavřené křivky získáme užitím následujícího pravidla pravé ruky.

Pravou ruku položíme tak, aby prsty mířily ve směru integrace. Potom proudy které tečou vodičem ve směru palce mají kladné znaménko, naopak proudy, které tečou na opačnou stranu než ukazuje palec mají záporné znaménko.



Proud i_3 k celkovému proudu nepřispívám neboť vodič leží mimo uzavřenou křivku.

Princip výpočtu $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$.

Rozdělme uzavřenou křivku na malé úseky konečné velikosti: $\Delta\vec{s}_1, \Delta\vec{s}_2, \dots, \Delta\vec{s}_n$

Pak platí rovnice:

$$\sum_{i=1}^n \vec{B}_i \cdot \Delta\vec{s}_i = \sum_{i=1}^n B_i \Delta s_i \cos \theta_i$$

Přechodem k limitě dostaneme integrál magnetické indukce po uzavřené křivce obepínající elektrický vodič.

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \vec{B}_i \cdot \Delta\vec{s}_i = \oint \vec{B} \cdot d\vec{s}$$