

## 5. Fyzikálne polia



Ako sa orientuje pri lete poštový holub?

<b>5.1</b>	<b><a href="#">Fyzikálne pole</a></b>	<b>3</b>
<b>5.2</b>	<b><a href="#">Gravitačné pole</a></b>	<b>4</b>
<b>5.3</b>	<b><a href="#">Elektrostatické pole</a></b>	<b>8</b>
<b>5.4</b>	<b><a href="#">Elektrický prúd</a></b>	<b>15</b>
<b>5.5</b>	<b><a href="#">Stacionárne magnetické pole</a></b>	<b>17</b>
<b>5.6</b>	<b><a href="#">Elektromagnetické pole</a></b>	<b>23</b>

V tejto kapitole sa budeme zaoberať silovým pôsobením prostredníctvom poľa. Vysvetlíme, čo je to fyzikálne pole a rozdelíme polia podľa typu interakcií. Uvedieme zdroje jednotlivých polí, zdefinujeme a odvodíme veličiny, ktoré tieto polia popisujú.

## Použité symboly a označenia v texte:

Podfarbením je uvedená slovná definícia veličiny, vzorec pod podfarbeným textom je matematickým vyjadrením definovanej veličiny.

V zdôraznenom rámečku sa nachádza odvodený vzťah (matematický zápis a slovná formulácia).

**Aplet** *Odkaz na aplet*



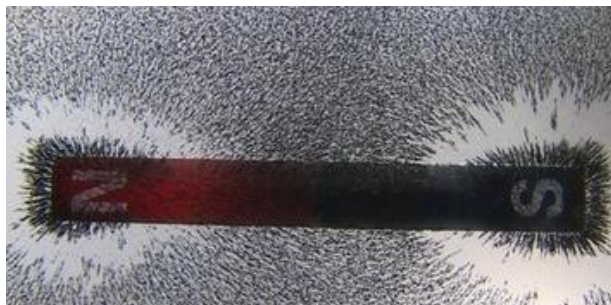
*Odkaz na video*



*Upozornenie na úpravy v texte a iné dôležité informácie.*

## 5.1 Fyzikálne pole

V dynamike hmotného bodu bola sila definovaná ako veličina, ktorá je mierou silového pôsobenia (interakcie) medzi dvoma hmotnými bodmi alebo telesami. Toto silové pôsobenie sa môže diať prostredníctvom vzájomného dotyku (napríklad auto pôsobí na vozovku silou a vozovka na jeho kolesá) alebo prostredníctvom poľa (napríklad magnet priťahuje železné piliny).



Doteraz sme sa zaoberali vzájomným silovým pôsobením. V tejto časti si priblížime pôsobenie prostredníctvom poľa preto najprv zadefinujeme fyzikálne pole.

Pod **fyzikálnym polom** rozumieme oblasť v určitom priestore, kde v každom bode tejto oblasti je definovaná veličina, ktorá ho charakterizuje (napr. vieme popísať smer a veľkosť gravitačnej sily v každom bode poľa). Reálne existuje, fyzikálne pole je objektívna realita, má svoju energiu a hmotnosť (podľa Einsteinovho vzťahu  $E = mc^2$ ). Prejavom každého fyzikálneho poľa je silové pôsobenie.

O existencii poľa sa presvedčíme tak, že do neho vložíme skúšobný objekt, ktorým môže byť teleso alebo hmotný bod a pozorujeme silové pôsobenie poľa na neho (napríklad magnet pôsobí silou na špendlíky a ich priťahuje). Pri pôsobení prostredníctvom poľa nepozorujeme vzájomný dotyk medzi telesami. Pole pôsobí na teleso v určitom priestore a na určitú vzdialenosť. Lopta, ktorú v určitej výške uvoľníme z ruky, začne padať k zemi v dôsledku pôsobenia gravitačného poľa Zeme. Zem pôsobí na loptu bez dotyku prostredníctvom poľa.

Rozoznávame štyri **základné interakcie (vzájomné silové pôsobenia)**:

*Silná a slabá interakcia* – existujú v mikrosvete, pôsobia na malú vzdialenosť, hovoríme, že sú krátkeho dosahu (na úrovni rozmerov jadra, rádovo  $10^{-15}$  m), preto tieto interakcie nepovažujeme za interakcie prostredníctvom poľa.

*Gravitačná a elektromagnetická interakcia* – pôsobia na veľké vzdialenosti, hovoríme, že sú nekonečného dosahu, preto tieto silové pôsobenia nazývame polia.

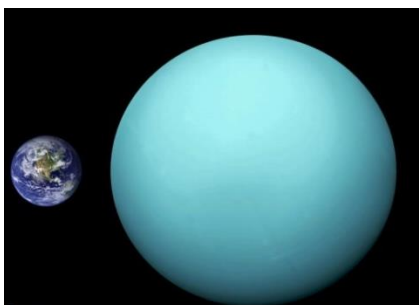
Na základe tohto delenia môžeme povedať, že poznáme dve polia: gravitačné pole a elektromagnetické pole. Špeciálnym prípadom elektromagnetického poľa sú elektrostatické pole a stacionárne magnetické pole, ktoré existujú za určitých podmienok.

## 5.2 Gravitačné pole

Medzi fyzikálne polia patrí gravitačné pole, s ktorého silovým pôsobením máme vlastnú skúsenosť, pretože gravitačné pole Zeme na nás pôsobí neustále. Vďaka tomuto pôsobeniu môžeme na našej zemeguli existovať.

**Gravitačné pole** definujeme ako časť priestoru, kde sa prejavuje silové pôsobenie telesa na iné teleso bez vzájomného dotyku. Zdrojom gravitačného poľa je každého telesa ktoré má hmotnosť.

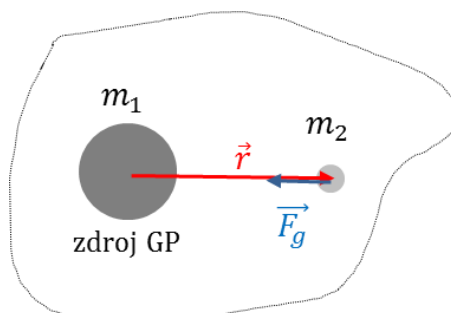
Zdrojom gravitačného poľa môže byť hmotný bod, teleso alebo sústava hmotných bodov. Napríklad Zem a Pluto, strom, mačka, kameňok. Gravitačné pole existuje v okolí protónu a elektrónu ( $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$  kg,  $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$  kg).



Na základe týchto poznatkov je zrejmé, že zdrojom gravitačného poľa je aj človek. Bude nás preto zaujímať, akou veľkou silou pôsobí človek na iného človeka, ktorý je vo vzdialenosti 30 cm od neho. Aby sme vedeli odpovedať na túto otázku, musíme vedieť, od čoho gravitačná sila závisí.

Touto problematikou sa zaoberal *Isaac Newton*, ktorý v roku 1665 objavil gravitáciu. Na základe pozorovania pohybov planét, tretieho pohybového zákona a tretieho Keplerovho zákona odvodil vzťah pre gravitačnú silu. Pre nás tento vzťah bude predstavovať definíciu gravitačnej sily.

Nech teleso o hmotnosti  $m_1$  je zdrojom gravitačného poľa (obr. 5.1), do ktorého vložíme teleso s hmotnosťou  $m_2$ . Jeho polohu popíšeme vzhľadom na zdroj pomocou polohového vektora  $\vec{r}$ , ktorého veľkosť  $|\vec{r}| = r$ . Prejavom poľa je silové pôsobenie, preto zdroj začne pôsobiť na teleso s hmotnosťou  $m_2$  silou, ktorá ho bude priťahovať ( $\vec{F}_g \uparrow \downarrow \vec{r}$ ).



Obr. 5.1

**Gravitačná sila (Newtonov gravitačný zákon)** je daná

$$\vec{F}_g = -\kappa \frac{m_1 m_2}{r^3} \vec{r}, \quad (16)$$

kde  $\kappa$  je *gravitačná konštanta*, ktorej hodnotu experimentálne určil *Cavendish* v roku 1789 pomocou torzných váh. Jej súčasná hodnota je  $\kappa = 6,6726 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ .



*V literatúre sa gravitačná konštanta označuje aj písmenom G.*

Podľa tretieho Newtonovho pohybového zákona aj druhé teleso s hmotnosťou  $m_2$  pôsobí na zdroj rovnako veľkou gravitačnou silou opačného smeru.

Potom **Newtonov gravitačný zákon** hovorí, že dve telesá (hmotné body) s hmotnosťami  $m_1$  a  $m_2$ , ktoré sa nachádzajú vo vzájomnej vzdialenosti  $r$ , pôsobia na seba príťažlivými silami, spadajúcimi do ich spojnice.

Z tohto zákona vyplýva, že gravitačná sila je len príťažlivá sila, čo je vo vzťahu (16) zdôraznené znamienkom mínus.

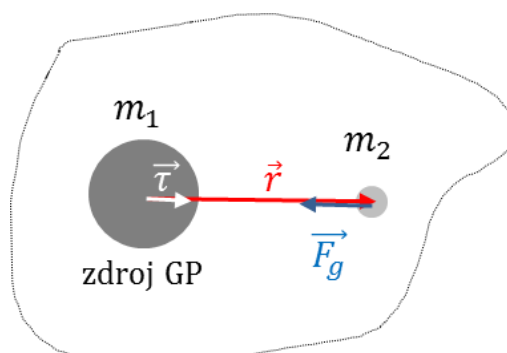
Pre vyjadrenie veľkosti gravitačnej sily použijeme jednotkový vektor  $\vec{\tau}$  (obr. 5.2), ktorý bude mať smer polohového vektora  $\vec{r}$ . Pomocou neho vyjadríme gravitačnú silu a polohový vektor ako súčin ich veľkosti a jednotkového vektora

$$\vec{F}_g = -F_g \vec{\tau}, \quad (17)$$

$$\vec{r} = r \vec{\tau}. \quad (18)$$



*Vo vzťahoch (17) a (18) znamienkami je naznačený smer jednotlivých vektorov vzhľadom na jednotkový vektor  $\vec{\tau}$ .*



Obr. 5.2

Dosadením (17) a (18) do (16)

$$-F_g \vec{\tau} = -\kappa \frac{m_1 m_2}{r^3} r \vec{\tau}$$

---

a úpravou pre **veľkosť gravitačnej sily**

$$F_g = \kappa \frac{m_1 m_2}{r^2}, \quad (19)$$

podľa ktorého, dve telesá (hmotné body) pôsobia na seba silou, ktorej veľkosť je úmerná ich hmotnostiam a nepriamoúmerná kvadrátu ich vzdialenosti.

---

Pomocou vzťahu (19) vieme vypočítať silu, ktorou pôsobia na seba dva ľubovoľné objekty rôznej veľkosti.

Potom sila, ktorou pôsobia na seba dvaja ľudia s hmotnosťami  $m_1 = 70$  kg a  $m_2 = 80$  kg vo vzdialenosti  $r = 30$  cm je

$$F_g = 6,6726 \cdot 10^{-11} \frac{70 \cdot 80}{0,3^2} = 4,15 \cdot 10^{-6} \text{ N.}$$

Sila ktorou pôsobia na seba dvaja ľudia je malá. Sila, ktorou pôsobí Zem na človeka s hmotnosťou 70 kg je 685 N. Naopak Slnko a Zem pôsobia na seba silou je  $3,5 \cdot 10^{22}$  N. Z týchto výsledkov vyplýva, že gravitačná sila je dôležitou silou vo vesmíre. Čím je hmotnosť vesmírnych telies väčšia, tým medzi nimi pôsobí väčšia gravitačná sila (napr. hmotnosť Slnka je  $2,01 \cdot 10^{30}$  kg). Môžeme povedať, že gravitačná sila drží pohromade vesmír.

O pôsobení gravitačného poľa Zeme na všetky objekty sa dozvedáme na základe dôsledkov, ako je napríklad príliv a odliv. Gravitačná sila je zodpovedná za formovanie pohorí, ktoré počas roka menia svoju výšku a tvar.



Gravitačná sila ovplyvňuje aj našu telesnú výšku počas dňa, v dôsledku pôsobenia na naše platničky v chrbtici. Ráno sme o 2,3 cm vyšší ako večer. Napriek tomu, že naša Zem pôsobí na všetky objekty na zemi a ich priťahuje malou silou, je toto pôsobenie dostatočné na to, aby ich udržalo na zemi a súčasne neobmedzovalo pri ich fungovaní, raste či pohybe.

**Kontrolka:**

Zdrojom gravitačného poľa je teleso s hmotnosťou  $M$ , ktoré pôsobí na tri telesá silou. Prvé teleso je hmotnosti  $m$  a nachádza vo vzdialenosti  $R = r/2$  od zdroja. Druhé má hmotnosť  $2m$  a je vzdialenosti  $r$ . Tretie teleso má hmotnosť  $3m$  a je vzdialenosti  $r/2$ . Vyberte správnu odpoveď. Gravitačné pole pôsobí najväčšou gravitačnou silou

- a) na prvé teleso,
- b) na druhé teleso,
- c) na tretie teleso.

## 5.3 Elektrostatické pole

Elektrostatické pole je špeciálnym prípadom elektromagnetického poľa.

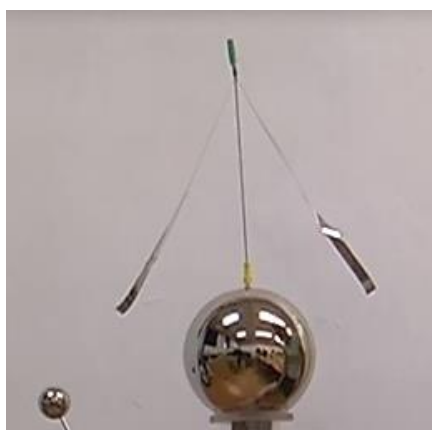
**Elektrostatické pole** je časť priestoru, kde sa prejavuje silové pôsobenie elektrického náboja na iný elektrický náboj bez vzájomného dotyku. Zdrojom elektrostatického poľa je elektrický náboj, ktorý je v pokoji (preto statické pole).

**Elektrický náboj** je skalárna veličina, ktorá slúži na charakterizovanie elektrických vlastností telies, ktoré sa prejavujú silovými účinkami na iné elektricky nabité teleso. Jednotkou náboja je coulomb, ( $Q$ ) = C.

Náboj neexistuje samostatne, je viazaný na elementárne častice ako napr. protón a elektrón. Ak sa elektrický náboj prenáša z jedného telesa na druhé, tak len prostredníctvom týchto častíc. Existujú dva druhy náboja, ktoré *Benjamin Franklin* nazval kladný a záporný. Pravdepodobne na základe podobnosti so súčtom dvoch čísel s rovnakou absolútnou hodnotou, ale opačnými znamienkami, ktorých súčet je nulový. To isté platí v prípade, ak je na telese umiestnený rovnaký náboj opačných znamienok. Výsledný náboj je nulový.

Nositeľom kladného náboja je protón a nositeľom záporného je elektrón. Náboj protónu a elektrónu je rovnaký a rovný  $p = e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  C.

Dva rovnaké náboje (dva kladné alebo dva záporné) sa odpudzujú a dva rôzne náboje sa priťahujú. Na nasledujúcich obrázkoch sa dva rovnako nabité staniolové pásiky a rovnako nabité vlasy dieťaťa navzájom odpudzujú.



Na druhy elektrického náboja pozrite video zo zdroja:

<http://www.fch.vut.cz/lectures/video/> - video: P10a\_Elektricky\_naboj.mpg

Všetky telesá pozostávajú z protónov a elektrónov. Preto náboj na nich môže byť rozložený v rôznom množstve ako násobok *elementárneho elektrického náboja*, ktorým je náboj elektrónu  $1,602 \cdot 10^{-19}$  C.





Náboj hodnoty  $q = 1C = 6,24 \cdot 10^{18}$  protónov.

Ak je kladný a záporný náboj v rovnakom množstve na telese, potom celkový náboj na telese je nulový. Takéto teleso nazývame *teleso elektricky neutrálne*.

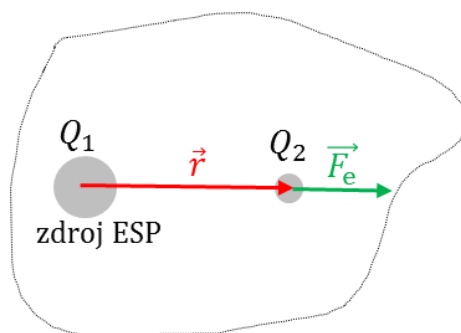
*Teleso elektricky nabité* je teleso, ktoré má voľný náboj (prebytok náboja), ktorý môže interagovať s inými telesami.

Telesá je možné zelektrizovať napr. trením ebonitovej tyče kožušinou, na tyč preniesieme záporný náboj. Podobne v zime pri obliekaní pulóvra, sa jeho trením o naše telo preniesie časť voľného náboja z tela na pulóver. Náboj na pulóvri má opačné znamienko ako náboj na našom tele, preto sa začnú navzájom priťahovať, pulóver sa na naše telo „nalepí“. Vo všeobecnosti pod *zelektrizovaním telies* rozumieme prenos voľného náboja na teleso.

**Aplet** Na elektrizovanie telies pozrite aplet zo zdroja:  
<http://people.tuke.sk/zuzana.gibova/aplet8.htm>

V úvode bolo spomenuté, že prejavom elektrostatického poľa je silové pôsobenie na elektricky nabité telesá (častice). Vzťah pre elektrostatickú silu odvodil *Ch. A. Coulomb* v roku 1785 na základe mnohých experimentov.

Nech teleso s nábojom  $Q_1$  je zdrojom elektrostatického poľa (obr. 5.3), do ktorého vložíme teleso s nábojom  $Q_2$ . Jeho polohu popíšeme vzhľadom na zdroj pomocou polohového vektora  $\vec{r}$ , ktorého veľkosť  $|\vec{r}| = r$ . Nech náboje oboch telies sú kladné.



Obr. 5.3

Prejavom poľa je silové pôsobenie, preto zdroj začne pôsobiť na teleso s nábojom  $Q_2$  **elektrostatickou silou (Coulombov zákon)**, ktorá je daná

$$\vec{F}_e = k \frac{Q_1 Q_2}{r^3} \vec{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^3} \vec{r}, \quad (20)$$

kde  $k$  je *elektrická konštanta*, ktorá vyjadruje elektrické vlastnosti prostredia, v ktorom sa  $Q_1$  a  $Q_2$  nachádzajú. V prípade, že sú náboje umiestnené vo vákuu, je elektrická konštanta daná pomocou *permitivity vákuu*  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ s}^4 \text{ A}^2 / \text{kg m}^3$ .



*Elektrické vlastnosti vzduchu sú podobné ako vákuu, preto permitivitu vzduchu nahradzame permitivitou vákuu.*

Z tretieho Newtonovho pohybového zákona vyplýva, že aj  $Q_2$  pôsobí na  $Q_1$  rovnakou veľkou silou opačného smeru, preto vzťah (20) vyjadruje vzájomnú silu, ktorou na seba náboje pôsobia.

**Coulombov zákon** potom znie - dve telesá s nábojmi  $Q_1$  a  $Q_2$  (dva bodové náboje), ktoré sa nachádzajú vo vzájomnej vzdialenosti  $r$  vo vákuu, pôsobia na seba silami, ktorých smer závisí od znamienka jednotlivých nábojov.



*Bodový náboj = častica alebo hmotný bod s nábojom.*

Na rozdiel od gravitačnej sily, ktorá je len príťažlivá, elektrostatická sila môže byť príťažlivá a aj odpudivá. Pri popise sily, ktorou pôsobí  $Q_1$  na  $Q_2$  bude elektrostatická sila príťažlivá (Obr. 5.4 a), ak sú oba náboje opačného znamienka a jej smer bude opačný ako smer polohového vektora ( $\vec{F}_e \uparrow \downarrow \vec{r}$ ). Ak náboje budú mať rovnaký náboj, potom sila od prvého náboja bude odpudivá (Obr. 5.4 b) a bude mať rovnaký smer ako polohový vektor ( $\vec{F}_e \uparrow \vec{r}$ ).



Obr. 5.4

**Veľkosť elektrostatickej sily** je

$$F_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 Q_2}{r^2}, \quad (21)$$

ktorá je úmerná súčinu veľkosti nábojov, ktoré na seba navzájom pôsobia touto silou vo vákuu a nepriamoúmerná kvadrátu ich vzdialenosti.

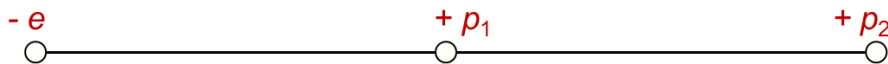


Pri odvodení veľkosti elektrostatickej sily bol použitý rovnaký postup ako pri odvodení gravitačnej sily (pozri vzťahy 17-19). Odvodenie je ponechané na čitateľa.

Z porovnania veľkosti elektrostatickej sily, ktorou pôsobia na seba protón a elektrón v atóme vodíka s ich gravitačnou silou vyplýva, že elektrostatická sila je  $10^{39}$  väčšia ako ich vzájomná gravitačná sila. V dôsledku veľkých elektrostatických síl medzi stavebnými časticami pevných látok sa tieto látky nerozpadnú, ale si zachovávajú svoj tvar a objem.

### Kontrolka:

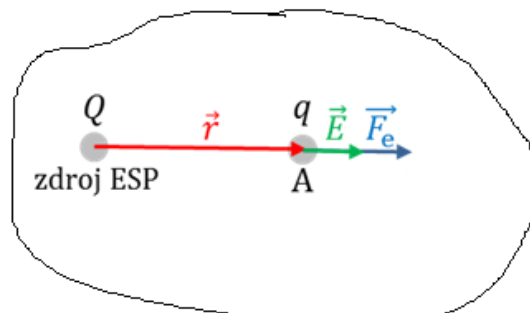
Obrázok zobrazuje dva protóny  $p_1, p_2$  a jeden elektrón  $e$  ležiace na jednej priamke.



Určte smer:

- elektrostatickej sily, ktorou pôsobí  $e$  na  $p_1$ ,
- elektrostatickej sily, ktorou pôsobí  $p_2$  na  $p_1$ ,
- výslednej sily, ktorá pôsobí na  $p_1$ ? Aká bude jej veľkosť vzhľadom na situáciu po a)?

Pri definovaní fyzikálneho poľa bolo spomenuté, že o existencii poľa sa presvedčíme tak, že do neho vložíme skúšobný objekt. Ak ho do poľa nevložíme, nevieme potvrdiť jeho existenciu a súčasne nevieme povedať, akou veľkou silou pole na neho pôsobí. Je preto výhodne definovať veličinu, ktorá by v prípade elektrostatického poľa, nezávisela od náboja skúšobného objektu.



Obr. 5.5

Nech náboj  $Q$  je zdrojom elektrostatického poľa (obr. 5.5). Na vyjadrenie veľkosti poľa v určitej vzdialenosti (v bode A), vložíme do tohto bodu skúšobný objekt s nábojom  $q$ .

Jeho polohu popíšeme vzhľadom na zdroj pomocou polohového vektora  $\vec{r}$ , ktorého veľkosť  $|\vec{r}| = r$ . Nech oba náboje sú kladné.

Zdroj pôsobí na  $q$  elektrostatickou silou  $\vec{F}_e$ . Ak pôsobiacu silu predelíme nábojom  $q$  dostaneme novú veličinu - intenzitu, ktorá nebude závisieť od náboja zdroja.

**Elektrická intenzita** je daná ako podiel elektrostatickej sily a náboja, na ktorý táto sila pôsobí

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}_e}{q}. \quad (22)$$

Je to vektorová veličina, ktorá charakterizuje pole, slúži na kvantitatívny popis poľa (jeho veľkosti a tvaru). Jej jednotkou je N/C alebo V/m.

Intenzita sa číselne rovná sile pôsobiacej na jednotkový náboj. Jej smer je daný smerom sily, závisí od hodnoty náboja zdroja.

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené veľkosti rôznych elektrostatických polí vyjadrených pomocou intenzity.

Elektrostatické pole	$E$ (V/m)
medený vodič v elektrických rozvodoch v domácnosti	$10^{-2}$
dolná vrstva atmosféry	$10^2$
v blízkosti plastového hrebeňa	$10^3$
v blízkosti valca kopírky	$10^5$
na povrchu jadra uránu	$3 \cdot 10^{21}$

Tab. 5.1

Ak je zdrojom elektrostatického poľa bodový náboj, je možné pomocou vzťahu (22) odvodiť intenzitu jeho poľa. Silu, ktorou pôsobí bodový náboj  $Q$  na náboj  $q$  (obr. 5.5) vyjadríme pomocou Coulombovho zákona

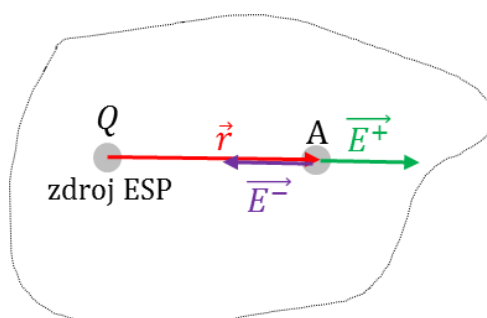
$$\vec{F}_e = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^3} \vec{r}$$

a dosadíme do definície intenzity (22).

Potom **intenzita bodového náboja** je daná

$$\vec{E} = \frac{\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Qq}{r^3} \vec{r}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^3} \vec{r}. \quad (23)$$

Z tohto vzťahu vyplýva, že ak je zdroj poľa kladný, tak potom intenzita má rovnaký smer ako polohový vektor  $\vec{r}$ . Ak je náboj zdroja záporný, bude mať intenzita opačný smer ako polohový vektor (obr. 5.6).



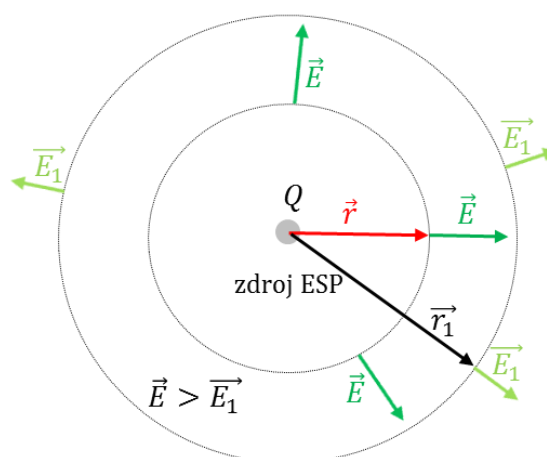
Obr.5.6

**Veľkosť intenzity bodového náboja** je daná

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}, \quad (24)$$

z ktorého vyplýva, že intenzita elektrostatického poľa vo vzdialenosti  $r$  od zdroja (bodového náboja)  $Q$  je nepriamoúmerná tejto vzdialenosti na druhú.

Je zrejme, že intenzita poľa bodového náboja  $Q$  so zväčšujúcou sa vzdialenosťou klesá, pričom v rovnakej vzdialenosti od zdroja má rovnakú hodnotu (obr. 5.7).

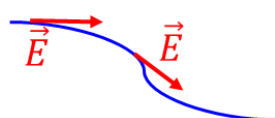


Obr. 5.7

Intenzita bodového náboja nezávisí od náboja  $q$  skúšobného objektu, iba od náboja zdroja  $Q$ . Čím je hodnota náboja zdroja väčšia, tým je pole v jeho okolí väčšie.

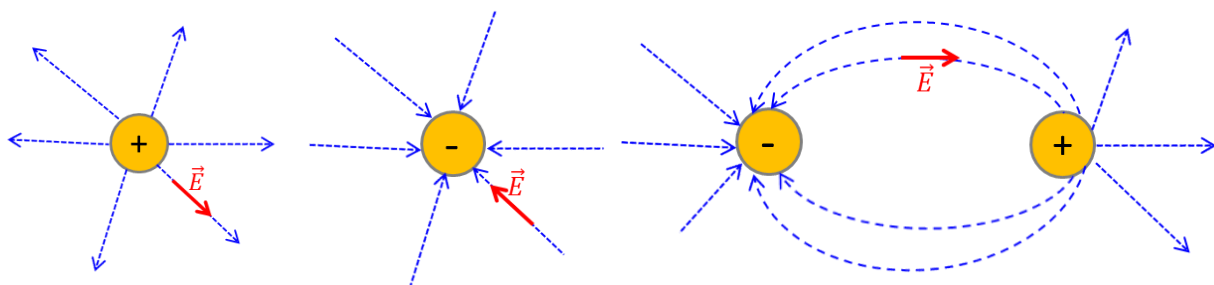
Intenzita súvisí s elektrickými siločiarami, pomocou ktorých možno zobrazit' tvar poľa.

**Elektrické siločiar** sú myslené orientované čiary, ku ktorým vedená dotyčnica v danom bode určuje smer vektora intenzity  $\vec{E}$  (obr. 5.8).



Obr. 5.8

Siločiar začínajú na kladných nábojoch a končia na záporných nábojoch (obr. 5.9).



Obr. 5.9

**Aplet** Na siločiar v okolí rôznych nábojov pozrite aplet zo zdroja:  
<http://people.tuke.sk/zuzana.gibova/aplet9.htm>

**Kontrolka:**

Vyberte správne tvrdenie:

- a) intenzita elektrostatického poľa záporného náboja, v bode vo vzdialenosti  $r$  od neho, má rovnaký smer ako polohový vektor  $\vec{r}$ ,
- b) intenzita elektrostatického poľa kladného náboja sa so zväčšujúcou vzdialenosťou nemení,
- c) intenzita elektrostatického poľa kladného náboja, v bode vo vzdialenosti  $r$  od neho, má rovnaký smer ako polohový vektor  $\vec{r}$ ,
- d) intenzita elektrostatického poľa kladného náboja nezávisí od náboja zdroja.

## 5.4 Elektrický prúd

Zdrojom elektrostatického poľa je nepohybujúci sa náboj. Ak sa elektrický náboj pohybuje, vzniká elektrický prúd. Elektrický prúd tečie v látkach, v ktorých sa môže časť náboja voľne pohybovať (napr. voľné elektróny, ióny). Takéto látky nazývame **vodiče** (kovy, roztok NaCl, ionizovaný plyn).



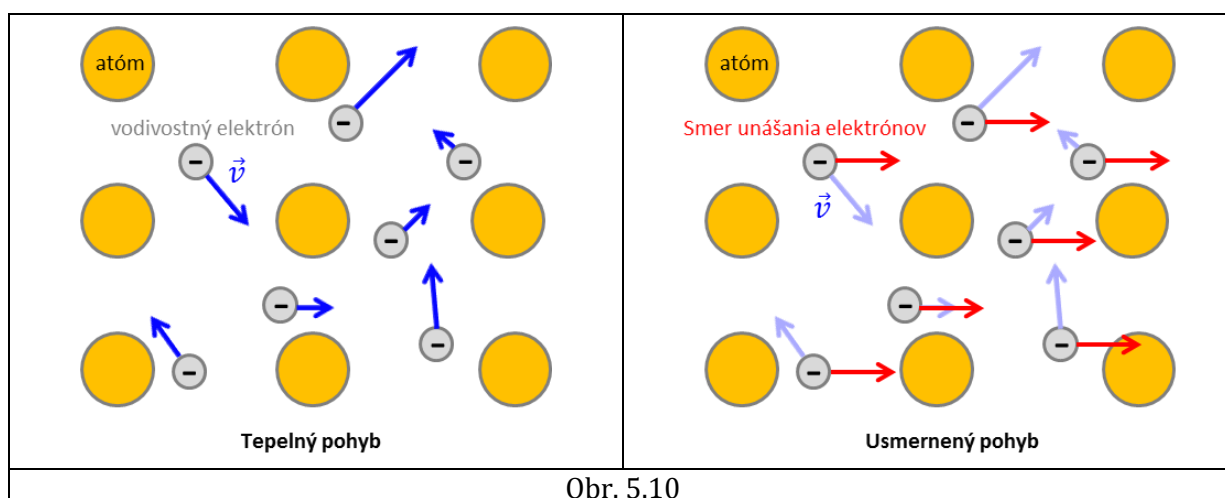
*V kovových vodičoch tečenie prúdu zabezpečujú voľné (vodivostné) elektróny.*

Voľné elektróny sa vo vodičoch pohybujú medzi ich stavebnými časticami (atómami) všetkými možnými smermi rôznymi rýchlosťami, mimo atómov, nie sú v nich viazané. Tento pohyb nazývame **tepelný pohyb**. Napríklad rýchlosť tepelného pohybu v medenom vodiči je  $10^6$  m/s. Tento pohyb nedefinujeme ako elektrický prúd.

Aby vodičom tiekol elektrický prúd, musí byť pripojený na zdroj napätia. V takomto prípade voľné častice budú unášané jedným smerom vplyvom elektrickej sily zdroja (obr. 5.10). Vykonávajú **usmerný pohyb**. Tečenie prúdu si možno predstaviť ako roj komárov, ktorý je v lete unášaný vánkom. Jednotlivé komáre letia svojimi smermi, ale súčasne sú unášané v smere pôsobenia vánku. Napríklad rýchlosť usmerného pohybu vodivostných elektrónov v medenom vodiči je  $10^{-5}$  m/s.

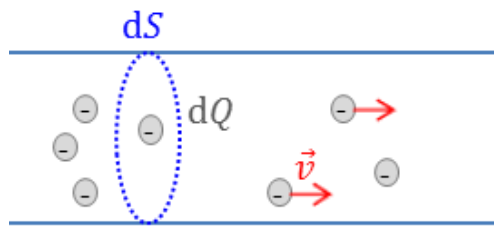
**Elektrický prúd** je usmerný pohyb elektrických nabitých častíc. Je to skalárna veličina.

Pri jednosmernom elektrickom prúde sa jeho smer nemení, ale veľkosť prúdu sa meniť môže.



Obr. 5.10

Pri definovaní okamžitej hodnoty prúdu uvažujeme elementárne množstvo voľného náboja  $dQ$ , ktoré bude prechádzať elementárnym prierezom vodiča  $dS$  (obr. 5.11).



Obr. 5.11

**Okamžitý elektrický prúd** je definovaný ako podiel elementárneho množstva elektrického náboja  $dQ$ , ktorý prejde prierezom vodiča za elementárny čas  $dt$

$$I = \frac{dQ}{dt}, \quad (25)$$

jednotkou prúdu je ampér,  $I = (A)$ .



## 5.5 Stacionárne magnetické pole

Špeciálnym prípadom elektromagnetického poľa je stacionárne magnetické pole. Je to pole, ktoré sa nemení s časom (preto stacionárne).

Existujú dva zdroje stacionárneho magnetického poľa:

1. elektricky nabité častice, ktoré sa pohybujú - tieto pohyblivé častice sú zdrojom prúdu, preto v okolí vodiča s konštantným prúdom vznikne magnetické pole (napr. elektromagnet),
2. nepohybujúce sa nabité častice, ktoré majú vlastný spinový magnetický dipólový moment, ktorý vyjadruje magnetické vlastnosti materiálu.

**Vlastný spinový magnetický dipólový moment**  $\vec{\mu}_s$  je základnou charakteristikou častíc (elektrónov, protónov, neutrónov), v okolí ktorých existuje magnetické pole. Štruktúra látok a rozloženie ich stavebných častíc určujú magnetické vlastnosti látok, ktoré môžu byť slabé alebo silné. Napríklad permanentný magnet má silné magnetické pole, ktoré vznikne skladaním magnetických polí od jednotlivých elektrónov. V magneticky slabých látkach sa magnetické pole od všetkých elektrónov vyruší a žiadne výraznejšie pole nevznikne, platí to aj pre látky z ktorých sa skladá ľudské telo.



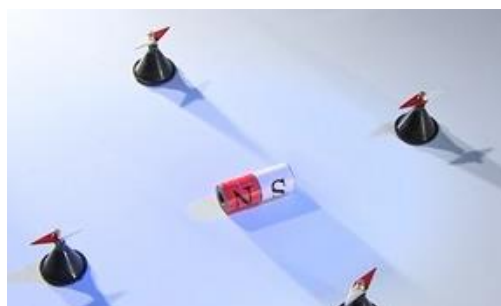
Na rôzne magnetické vlastnosti látok pozrite video zo zdroja:  
<http://web.tuke.sk/feikf/video/magneticke-vlastnosti-latok.html>

Stacionárne magnetické pole je časť priestoru, kde sa prejavuje silové pôsobenie na pohybujúci sa nabitý náboj bez vzájomného dotyku. Existuje v okolí vodiča s konštantným prúdom alebo v okolí permanentných magnetov.

O existencii magnetického poľa v okolí vodiča s prúdom alebo magnetu je možné sa presvedčiť pomocou kompasu (skúšobné teleso), ktorého strelka sa vychýli z pôvodnej polohy, keď začne vodičom pretekať prúd (obr. 5.11 a). Rovnako to platí v prípade magnetu (obr. 5.11 b).



a)



b)

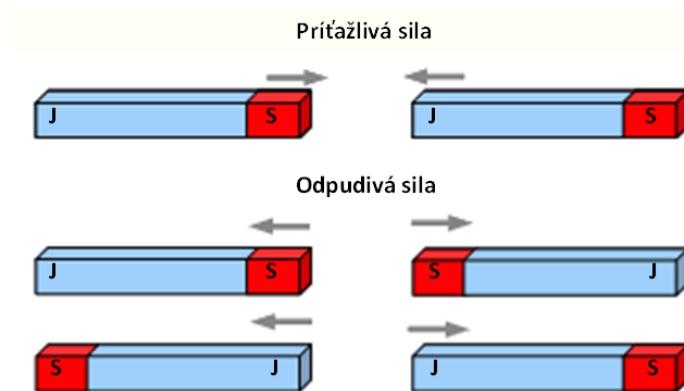
Obr. 5.11



Na pokusy s kompasom pozrite video zo zdroja:

<http://web.tuke.sk/feikf/video/neodelite-nos--polov-magnetu.html>

Tyčový magnet má dva póly, severný a južný pól, ktoré sú nedeliteľné. Ak by sme magnet delili postupne na menšie časti, vždy by sme na nich našli severný a južný pól. Zo skúsenosti vieme, že dva rovnaké póly sa odpudzujú a dva rôzne sa priťahujú (obr. 5.12).



Obr. 5.12



Na nedeliteľnosť pólů magnetu pozrite videá zo zdroja:

<http://web.tuke.sk/feikf/video/neodelite-nos--polov-magnetu.html>

Podobne ako pri elektrostatickom poli aj v magnetickom stacionárnom poli je definovaná veličina analogická k elektrickej intenzite.

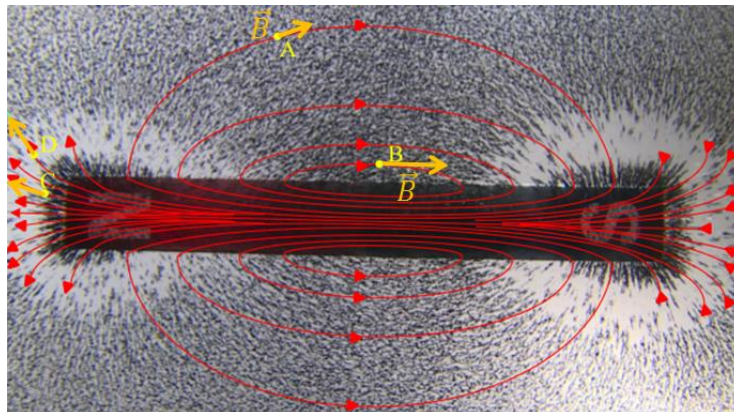
Je to vektorová veličina, ktorú nazveme **magnetická indukcia**  $\vec{B}$ . Slúži na kvantitatívny popis magnetického poľa (popis jeho veľkosti a tvaru). Jej jednotkou je tesla;  $(B) = T$ .

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené veľkosti rôznych magnetických polí vyjadrených pomocou indukcie.

Magnetické stacionárne pole	$B$ (T)
Povrch neutrónovej hviezdy	$10^8$
Supravodivé magnety	9 - 20
V blízkosti veľkého elektromagnetu	1,5
V blízkosti malého tyčového magnetu	$10^{-2}$
Na povrchu Zeme	$10^{-4}$
V medzihviezdnom priestore	$10^{-10}$
Najnižšia hodnota v magnetickej tienenej miestnosti	$10^{-14}$

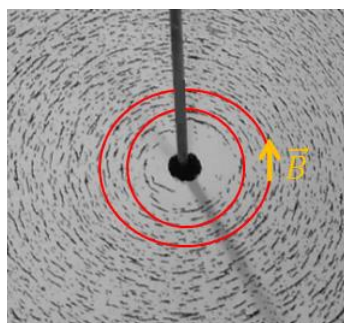
Tab. 5.2

Magnetická indukcia súvisí s magnetickými indukčnými čiarami, pomocou ktorých možno zostrojiť tvar poľa. **Magnetické indukčné čiary** sú myslené orientované čiary, ku ktorým vedená dotyčnica v danom bode určuje smer vektora indukcie  $\vec{B}$ . Na rozdiel od elektrických siločiar sú magnetické indukčné čiary uzavreté krivky, ktoré nikde nekončia ani nezačínajú (obr. 5.13).



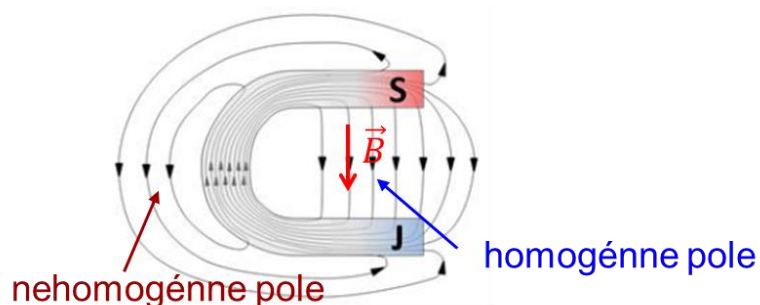
Obr. 5.13

V okolí magnetov majú magnetické indukčné čiary eliptický tvar, v okolí priameho vodiča s prúdom sú magnetické indukčné čiary sústredné kružnice (obr. 5.14).



Obr. 5.14

Ak v každom bode magnetického poľa je veľkosť magnetickej indukcie rovnaká a je rovnaký aj jej smer, nazývame takéto pole **homogénne magnetické pole**. Napríklad za homogénne pole môžeme pokladať časť poľa, medzi pólmi magnetu tvaru písmena U (obr. 5.15). Magnetické indukčné čiary sú v tejto časti poľa rovnobežné, pričom tvoria uzavreté krivky, ktoré prechádzajú magnetom.



Obr. 5.15

**Nehomogénne magnetické pole** je pole, v ktorom v každom bode má indukcia rôznu veľkosť a rôznu smer, je to premenné pole ako na obr. 5.13 - 5.15.

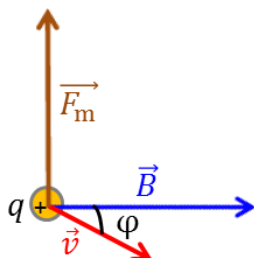
Na základe týchto poznatkov môžeme odpovedať na otázku z úvodu kapitoly ako sa orientujú poštové holuby pri svojom lete.



Na určenie polohy a navigáciu letu poštové holuby používajú magnetické pole Zeme, ktoré dokážu vnímať. Ich nervové bunky, ktoré sa nachádzajú v kožovitom útvare pri koreni ich zobáka, obsahujú malé množstvo čistočiek magnetitu, ktoré fungujú ako kompas. Pomocou neho registrujú silu magnetického poľa v mieste, kde sa práve nachádzajú.

Vedci sa domnievajú, že okrem toho, dokážu holuby vidieť magnetické indukčné čiary pomocou receptora svetla - cryptochromu v ich očnej sietnici. Pomocou neho si dopĺňajú informáciu o smere, potrebnú na navigáciu letu. Ich magnetický zmysel však nie je neomylný. Búrky alebo slnečné vetry môžu ich zmysel krátkodobo tak narušiť, že holuby zabúdia.

Prejavom magnetického stacionárneho poľa je silové pôsobenie na pohybujúcu sa nabitú časticu. Nech do magnetického poľa s indukciou  $\vec{B}$  vletí nabitá častica s nábojom  $q$  (obr. 5.16).



Obr. 5.16

### Potom **magnetická sila**

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \times \vec{B}. \quad (26)$$

Je to sila, ktorou pôsobí magnetické pole o indukcii  $\vec{B}$  na nabitú časticu s nábojom  $q$ , ktorá sa v magnetickom poli pohybuje rýchlosťou  $\vec{v}$ .

Ak uhol  $\varphi = \sphericalangle(\vec{v}, \vec{B})$ , potom pre veľkosť magnetickej sily platí

$$F_m = qvB \sin \varphi. \quad (27)$$



**Veľkosť magnetickej sily vyplýva z veľkosti vektorového súčinu  $|\vec{a} \times \vec{b}| = ab \sin \varphi$ .**

Smer magnetickej sily tiež vyplýva z vektorového súčinu. Magnetická sila  $\vec{F}_m$ , ktorou pôsobí pole s indukciou  $\vec{B}$  na nabitú časticu pohybujúcu sa rýchlosťou  $\vec{v}$ , je vždy kolmá na rovinu vektorov  $\vec{v}$  a  $\vec{B}$  a smeruje na tú stranu roviny, z ktorej sa stotožnenie prvého vektora  $\vec{v}$  s druhým vektorom  $\vec{B}$  javí po kratšej ceste proti smeru hodinových ručičiek.



*Ak má častica záporný náboj, potom bude magnetická sila mať opačný smer ako v prípade kladného náboja.*

Zo vzťahu (27) vyplýva, že magnetické pole pôsobí silou len na pohybujúcu sa časticu. Zdrojom magnetického poľa je aj magnet, preto v prípade dvoch magnetov, by sa mohlo zdať, že to neplatí. Navonok dva magnety na seba pôsobia silou, ale sa nepohybujú. Napriek tomu, v magnetoch dochádza k pohybu na atomárnej úrovni (vznikajú v nich elementárne prúdy).



V dôsledku pohybu nabitých častíc v magnetickom poli Zeme a ich zrážok s atómami a molekulami kyslíka a dusíka vzniká polárna žiara.

### **Kontrolka:**

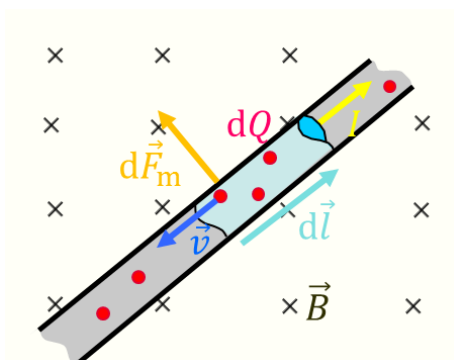
Vyberte správne tvrdenie. Častica s nábojom  $q$  vletí do magnetického poľa rovnobežne s vektorom magnetickej indukcie  $\vec{B}$ . Na časticu bude pôsobiť magnetická sila veľkosti

a)  $F = qvB$ ,

b)  $F = 0$ ,

c)  $F = \frac{qvB}{2}$ .

Magnetické pole pôsobí silou aj na vodič, ktorým preteká prúd. Nech sa priamy vodič nachádza v homogénnom magnetickom stacionárnom poli, ktorého magnetické indukčné čiary smerujú do roviny, v ktorej sa vodič nachádza (v obr. 5.16 sú označené krížikmi). Vodičom tečie prúd, jeho tečenie zabezpečujú vodivostné elektróny, ktoré sa pohybujú s rýchlosťou  $\vec{v}$ .



Obr. 5.16

Zvoľme úsek vodiča  $\vec{dl}$ , ktorým preteká prúd  $I$ , tzv. *elementárny prúdovodič* (prúdový element vodiča)  $I\vec{dl}$ . Vodivostné elektróny v elementárnom prúdovodiči predstavuje elementárne množstvo náboja  $dQ$ , ktorý vieme vyjadriť z definície okamžitého prúdu (25) v tvare  $dQ = Idt$ .

Potom na zvolený úsek vodiča bude pôsobiť elementárna magnetická sila  $\vec{dF}_m$ , ktorú vyjadríme zo vzťahu (26) v tvare  $\vec{dF}_m = dQ\vec{v} \times \vec{B}$ . Dosadením za elementárne množstvo náboja do prechádzajúceho vzťahu pre silu dostaneme  $\vec{dF}_m = Idt\vec{v} \times \vec{B}$ , kde výraz  $d\vec{l} = dt\vec{v}$ . Potom úpravou dostaneme zákon, ktorý vyjadruje magnetickú silu pôsobiacu na vodič s prúdom.

---

**Ampérov zákon sily (magnetická sila)** vyjadruje silu, ktorou pôsobí magnetické pole na dĺžkový element vodiča, ktorým tečie konštantný prúd a je rovná vektorovému súčinu elementárneho prúdovodiča a magnetickej indukcie

$$\vec{dF}_m = I\vec{dl} \times \vec{B}. \quad (28)$$


---



**Vodič sa nachádza v magnetickom poli a súčasne v ňom vznikne vplyvom tečenia prúdu ďalšie magnetické pole, ktorého magnetické indukčné čiary budú mať tvar sústredných kružníc.**

## 5.6 Elektromagnetické pole

Elektromagnetické pole pozostáva z dvoch polí, elektrického a magnetického poľa. Tieto polia navzájom súvisia, pričom zmena jedného vyvolá vznik druhého a naopak.

Zdrojom elektromagnetického poľa sú:

1. vodič v pokoji, ktorým preteká premenný prúd – v jeho okolí vznikne magnetické pole,
2. vodič v pokoji, ktorý sa nachádza v premennom magnetickom poli,
3. vodič, ktorý sa pohybuje v homogénnom magnetickom poli.

V prvom prípade zmena prúdu vyvolá vznik premenného magnetického poľa. Zdrojom premenného elektrického poľa je vodič s premenným prúdom. V druhom prípade zmena magnetického poľa vyvolá vznik premenného elektrického poľa v nepohybujúcom sa vodiči. V treťom prípade pohyb vodiča (premenné elektrické pole) vyvolá vznik premenného magnetického poľa. Týmto spôsobom vznikne elektromagnetické pole v spomenutých prípadoch.

**Elektromagnetické pole** je časť priestoru, kde sa prejavuje silové pôsobenie na pohybujúcu sa elektricky nabitú časticu bez vzájomného dotyku. Vznikne, ak sa mení magnetické pole s časom (ktoré má za dôsledok vznik elektrického poľa) alebo, ak sa mení elektrické pole s časom (ktoré má za dôsledok vznik magnetického poľa).

S elektromagnetickým poľom sa stretávame pri reproduktoroch, indukčných varných doskách, zesilňovačoch na elektrických gitarách alebo generátore striedavého prúdu.



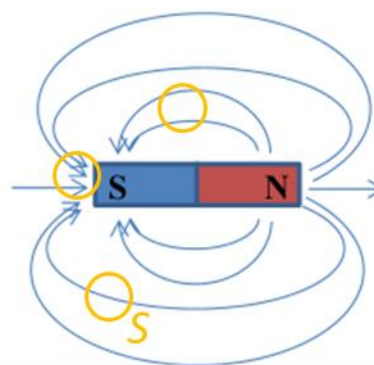
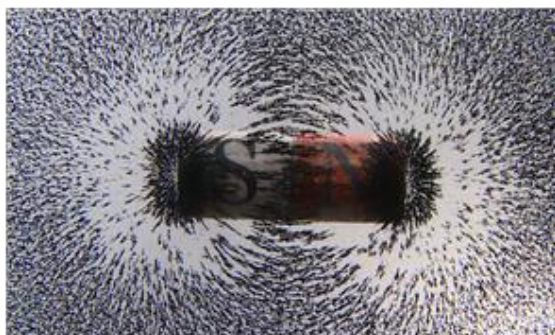
### Aplet

Na generátor striedavého prúdu pozrite aplet zo zdroja:  
[http://www.walter-fendt.de/html5/phsk/generator\\_sk.htm](http://www.walter-fendt.de/html5/phsk/generator_sk.htm)

Elektromagnetické pole je premenné pole v čase. Ak sa jedno z polí nemení v čase alebo je nulové, potom vzniknú špeciálne prípady tohto poľa, ktoré sme spomínali v predchádzajúcich kapitolách. Tieto polia sú nemenné v čase.

V prípade elektrostatického poľa je magnetická zložka elektromagnetického poľa nulová. Magnetické stacionárne pole vznikne, ak sa elektrické pole nemení v čase (konš. prúd vo vodiči) alebo ak je nulové.

Vznik elektromagnetického poľa súvisí s javom elektromagnetickej indukcie. Skôr ako sa ním budeme zaoberať zdefinujeme novú veličinu, ktorú nazveme **magnetický indukčný tok**. Na nasledujúcom obrázku je vidieť, že rozloženie železných pilín v okolí magnetu (magnetické indukčné čiary) nie je rovnaké. Viac ich je na koncoch magnetu.



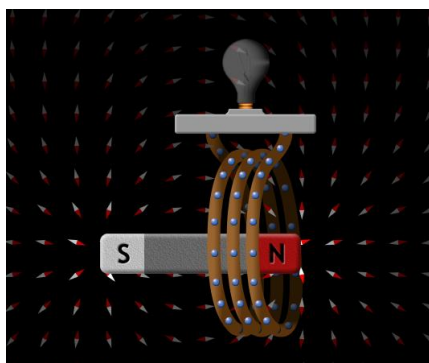
Ak zvolíme ľubovoľnú plochu  $S$ , ktorú umiestnime do rôznych bodov magnetického poľa magnetu, je zrejmé, že počet magnetických indukčných čiar ňou prechádzajúcich je rôzny.

**Magnetický indukčný tok  $\Phi$**  vyjadruje množstvo magnetických indukčných čiar prechádzajúcich ľubovoľnou plochou  $S$  v okolí magnetu (plochou cievky alebo plochou uzavretého vodiča).



*Hustota magnetických indukčných čiar vyjadruje veľkosť magnetického poľa, ktoré je v prípade tyčového magnetu najväčšie na koncoch magnetu.*

Ak budeme do dutiny cievky, ktorá nie je pripojená na zdroj napätia, zasúvať (vysúvať) magnet, bude sa meniť množstvo magnetických indukčných čiar, ktoré plochou dutiny cievky prechádzajú (obr. 5.17).



Obr. 5.17



Inak povedané mení sa magnetický indukčný tok v čase, resp. sa mení magnetické pole. Ak táto zmena bude veľmi rýchla, žiarovka, ktorá je pripevnená k cievke bude svietiť. Vplyvom tejto zmeny magnetického poľa sa v cievke bude indukovať *elektromotorické napätie* a vznikne *indukovaný prúd* (v dôsledku pohybu elektrónov v cievke, ktoré vyvolá indukované napätie), preto bude žiarovka svietiť. Proces vzniku indukovaného prúdu nazývame *elektromagnetická indukcia*.

#### Aplet

Na Faradayov zákon pozrite aplet zo zdroja:

<https://phet.colorado.edu/en/simulation/legacy/faraday>

Podobné pokusy uskutočnil *Michael Faraday*, ktorý zistil, že

- vznik indukovaného prúdu je viazaný na relatívny pohyb (ak sa magnet nepohybuje prúd nevzniká),
- rýchlejší pohyb spôsobí väčší prúd,
- pohyb magnetu ku cievke bez prúdu, vyvolá prúd tečúci jedným smerom a od cievky tečúci opačným smerom,
- v pokusoch so cievkou (kruhový závitom) vzniká indukovaný prúd, ak plochou cievky (závitu) prechádza premenné magnetické pole.

Tieto poznatky sú zhrnuté v zákone, ktorý nazývame **Faradayov zákon elektromagnetickej indukcie**, ktorý hovorí, že veľkosť indukovaného elektromotorického napätia v uzavretom vodiči sa rovná rýchlosti zmeny magnetického indukčného toku prechádzajúceho plochou ohraničenou vodičom

$$U_{ei} = -\frac{d\Phi}{dt}. \quad (29)$$

Vo všeobecnosti tento zákon hovorí, že indukované napätie vzniká všade tam, kde sa v čase mení magnetický indukčný tok.



Na Faradayov zákon pozrite video zo zdroja:

<http://web.tuke.sk/feikf/video/faradayov-zakon.html>

Znamienko mínus vo vzťahu (29) je možné vysvetliť tak, že indukovaný prúd, ktorý vznikne vplyvom elektromotorického napätia má taký smer, že magnetické pole ním vyvolané sa snaží zachovať pôvodné magnetické pole (bráni sa zmene, ktorá ho vyvolala).

**Kontrolka:**

Vyberte správne tvrdenie. Elektromagnetické pole vzniká

- a) v okolí vodiča s konštantným prúdom,
- b) ak kruhovým vodičom v pokoji prechádza magnetické pole, ktoré je konštantné,
- c) ak sa pohybuje cievka v magnetickom poli,
- d) v okolí magnetu.

Na pohybujúci sa náboj v elektromagnetickom poli pôsobí sila, ktorá pozostáva z dvoch zložiek, z magnetickej sily (vzťah 26) a elektrickej sily, ktorá vyplýva z definície intenzity elektrostatického poľa (22)

$$\vec{F} = \vec{F}_m + \vec{F}_e,$$

ktorú nazývame **Lorentzova sila**.

**Potom *elektromagnetická sila***

$$\vec{F} = (q\vec{v} \times \vec{B}) + q\vec{E}. \quad (30)$$

Je to sila, ktorou pôsobí elektromagnetické pole na nabitú časticu s nábojom  $q$ , ktorá sa v elektromagnetickom poli pohybuje rýchlosťou  $\vec{v}$ , kde  $\vec{B}$  je indukcia magnetického poľa a  $\vec{E}$  je intenzita elektrického poľa.

### **Použitá literatúra:**

Červeň, I. 2007. Fyzika po kapitolách. Elektrický prúd. 1.vydanie. Bratislava. Vydavateľstvo STU v Bratislave. 2007. ISBN 978-80-227-2671-9.

Červeň, I. 2007. Fyzika po kapitolách. Elektrostatické pole. 1.vydanie. Bratislava. Vydavateľstvo STU v Bratislave. 2007. ISBN 978-80-227-2670-2.

Červeň, I. 2007. Fyzika po kapitolách. Magnetické pole. 1.vydanie. Bratislava. Vydavateľstvo STU v Bratislave. 2007. ISBN 978-80-227-2672-6.

Červeň, I. 2007. Fyzika po kapitolách. Elektromagnetické pole. 1.vydanie. Bratislava. Vydavateľstvo STU v Bratislave. 2007. ISBN 978-80-227-2673-3.

Haliday D., Resnick R., Walker J. 2000. Fyzika, Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. vyd. Brno: Vutium, 2000. ISBN 80-214-1868-0

<http://obrazky.4ever.sk/>

<https://phet.colorado.edu/en/simulations/category/physics>

<http://web.tuke.sk/feikf/video/index.html>

<http://www.fch.vut.cz/lectures/video/>

<http://www.walter-fendt.de/html5/phsk/>

časopis Quark