

Meno a priezvisko:

Škola:

Predmet:

Školský rok/blok:

Skupina:

Trieda:

Dátum:

Škola pre mimoriadne nadané deti a Gymnázium

Fyzika

/

Teória

Magnetické pole

Stacionárne magnetické pole

1.1.8 Častica s nábojom v magnetickom poli

Prúd vo vodiči je vytváraný nabitými časticami (elektrónmi), na ktoré tiež pôsobí magnetické pole. Magnetickú silu je možné chápať ako výslednicu síl, ktoré pôsobia na jednotlivé nosiče náboja.

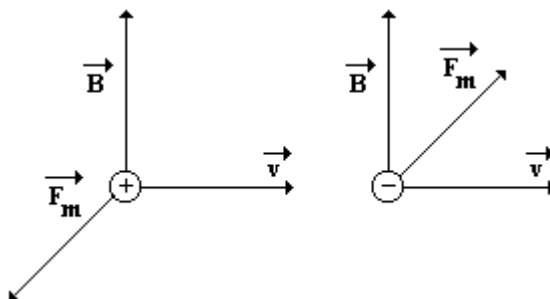
Uvažujme vodič s dĺžkou l , v ktorom je N voľných elektrónov. Celkový náboj všetkých elektrónov je $Q = -e.N$; ($e = -1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$). Ak sa tieto elektróny vo vodiči pohybujú rýchlosťou $\vec{v}$ v smere vodiča, prejdú vzdialenosť l za čas $t = \frac{l}{v}$. Za túto dobu prejde

prierezom vodiča náboj Q , ktorému zodpovedá prúd $I = \frac{|Q|}{t} = \frac{N.e.v}{l}$. Pre veľkosť magnetickej sily môžeme písať (platí v prípade, že vodič je kolmý k magnetickým indukčným čiarom):

$$F_m = B.I.l = B.N.e.v$$

Z tohoto vzťahu pre veľkosť sily pôsobiacej na jeden elektrón dostávame $F_m = B.e.v$. Tento vzťah platí nielen pre elektróny vo vodiči, ale i pre častice s nábojom mimo vodič (protóny, ióny, ...).

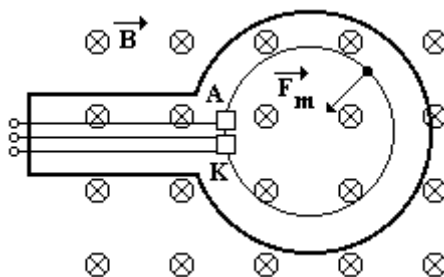
Vo všeobecnom prípade (častice sa nepohybujú kolmo k indukčným čiarom, ...) je magnetická sila daná vektorovým zápisom $\vec{F}_m = e.\vec{v} \times \vec{B}$.



Smer magnetickej sily závisí na náboji častice, čo tiež vyplýva zo vzťahu pre jej veľkosť. Vektor tejto sily je kolmý na vektor magnetickej indukcie a tiež aj na vektor rýchlosti. Kolmosť sily k vektoru magnetickej indukcie a k vektoru rýchlosti vyplýva z vektorového zápisu tejto sily.

Veľkosť magnetickej sily je maximálna v prípade, ak vektor rýchlosti a vektor magnetickej indukcie zvierajú uhol $\alpha = 90^\circ$. Pri zmenšovaní uhla sa bude veľkosť magnetickej sily zmenšovať, nulovú veľkosť bude mať v prípade, ak sa budú častice pohybovať v smere magnetickej indukcie.

Vzhľadom k tomu, že magnetická sila je kolmá na smer pohybu častice, nekoná táto sila prácu. Veľkosť rýchlosti častice (a teda aj kinetickej energie) sa v magnetickom poli nemení (Poznámka: Smer sa môže meniť!).



Pohyb elektrónov v magnetickom poli je možné pozorovať v tzv. Wehneltovej trubici. Do sklenenej baňky naplnenej vodíkom s nízkym tlakom (rádovo 1 Pa) je zatavený zdroj elektrónov. Celá trubica je umiestnená v homogénnom magnetickom poli, ktoré vytvárajú Helmholtzove cievky s veľkým priemerom. Elektróny vyletujú zo zdroja s rýchlosťou $\vec{v}$ kolmo na magnetické indukčné čiary. Na elektróny pôsobí magnetická sila $\vec{F}_m$, ktorá zakrivuje ich trajektóriu, po ktorej sa elektróny pohybujú (a tým menia i smer rýchlosti $\vec{v}$). Výsledkom je pohyb elektrónov po kružnicovej trajektórii, pretože magnetická sila sa stáva silou dostredivou. Platí:

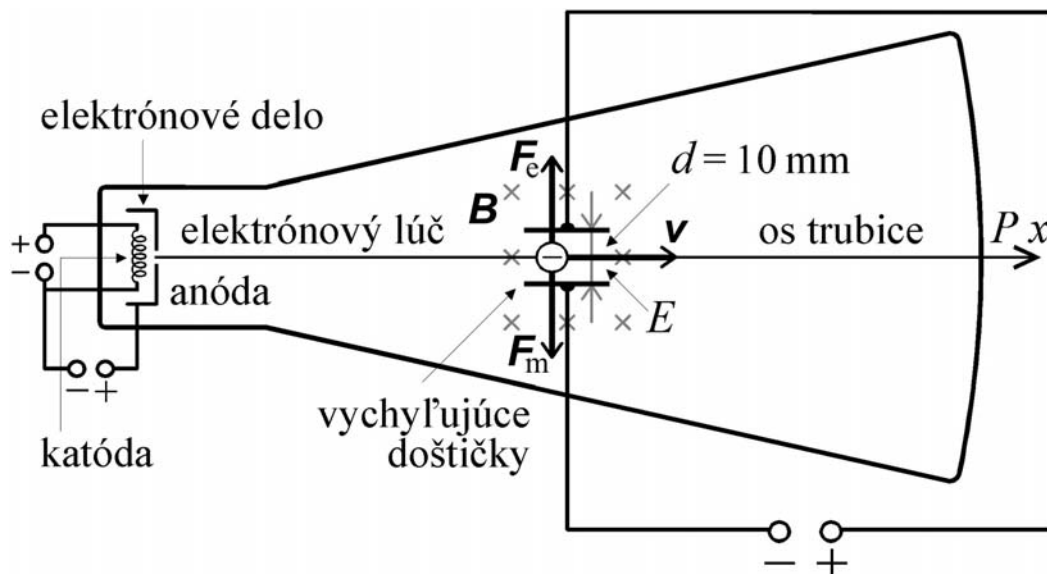
$F_m = F_d$ a teda $B.e.v = m.\frac{v^2}{r}$. Odtiaľ $r = \frac{m}{e}.\frac{v}{B}$. Podiel $\frac{m}{e}$ je pre danú časticu konštantný a je jej dôležitou charakteristikou. Pohyb častice v magnetickom poli naznačuje, ako je možné túto konštantu merať.

Pohybuje sa častica súčasne v magnetickom aj elektrickom poli, pôsobí na ňu sila elektrostatická $\vec{F}_e$ a zároveň aj sila magnetická $\vec{F}_m$. Výslednicou oboch týchto síl je sila

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

ktorá sa nazýva **Lorentzova sila**. Platí: $\vec{F}_L = e.\vec{E} + e.\vec{v} \times \vec{B}$

Pôsobenie magnetického poľa na časticu s nábojom našlo široké uplatnenie v praxi – vychyľovanie elektrónového lúča napríklad v obrazovke televízora alebo monitora.



Katódová trubica. Vo vákuovej trubici je v zadnej časti elektrónové delo – zdroj zväzku rýchlych elektrónov pohybujúcich sa rýchlosťou $\vec{v}$ v osi trubice. Elektróny možno vychýliť v

zvislom smere buď elektrickým poľom medzi doštičkami alebo magnetickým poľom, ktorého indukčné čiary sú kolmé na nákresňu. Podobnú trubicu použil v r. 1897 v Cambridgi J. J. THOMSON pri objave elektrónu.

Skúsme preto teraz uvažovať o pohybe elektrónu v magnetickom poli v jednoduchšom prostredí, v ktorom by k zrážkam s časticami prostredia nemalo dochádzať – vo vákuu.

Zdrojom rýchlych elektrónov v zadnej časti vákuovej katódovej trubice je tzv. *elektrónové delo*. Je to sústava elektród, z ktorých jedna – záporná *katóda* – elektróny emituje a cez otvor druhej – kladnej *anódy* – elektróny vyletujú von.

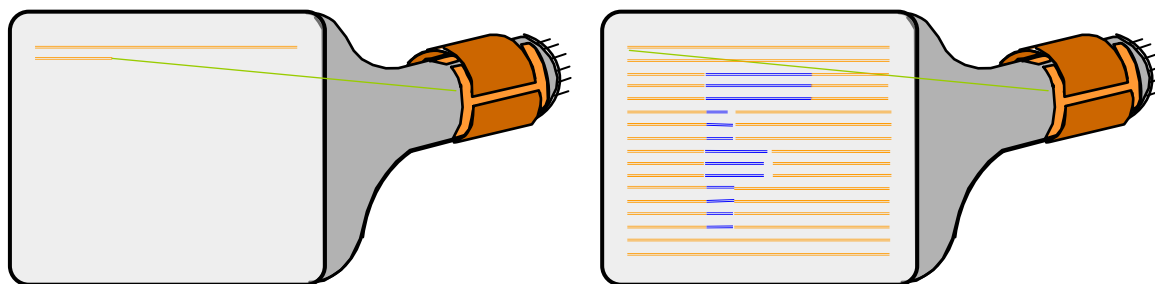
Medzi anódou a katódou je elektrické napätie U_A (anódové napätie), a preto je medzi nimi aj elektrické pole. Elektrické sily pôsobiace na elektróny v elektrónovom dele zrýchľujú ich pohyb tak, že vyletujú z otvoru anódy rýchlosťou $\vec{v}$ a letia v smere osi trubice k vnútornej stene tienidla obrazovky. Ich dopad v bode P sa prejaví ako svetlá škvrna – tienidlo svetielkuje.

Poloha bodu P, do ktorého dopadajú elektróny, sa dá posunúť zmenou napätia U_v medzi vychyľujúcimi doštičkami. Na osciloskope na tento cieľ obvykle slúži potenciometer, ovládaný otočným gombíkom na prednej strane prístroja.

Posunutie bodu P zo stredu obrazovky docielime aj magnetickým poľom, do ktorého trubicu vložíme. Ak sa o tom chceme presvedčiť, stačí priblížiť k trubici (alebo k osciloskopu) z bočnej strany stály magnet, kolmo na os obrazovky. Pretože v katódovej trubici (alebo v obrazovke osciloskopu) je vákuum, je teraz zrejmé, že magnetické pole pôsobí na letiace elektróny, ktoré sa pohybujú vo vzduchoprázdnom prostredí.

Na inej snímke je znázornená aplikácia pohybu častice s nábojom v homogénnom magnetickom poli – televízna obrazovka s vychyľovacími cievkami:

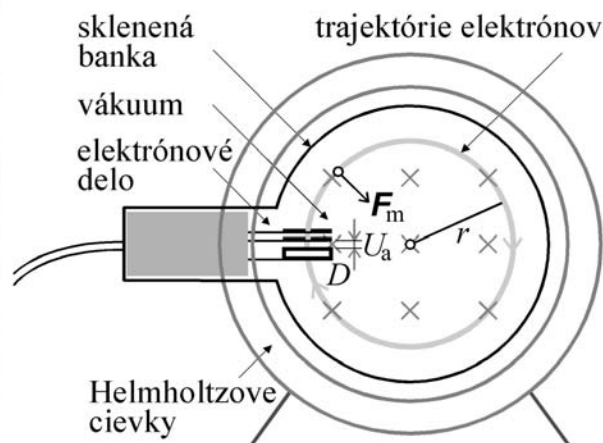
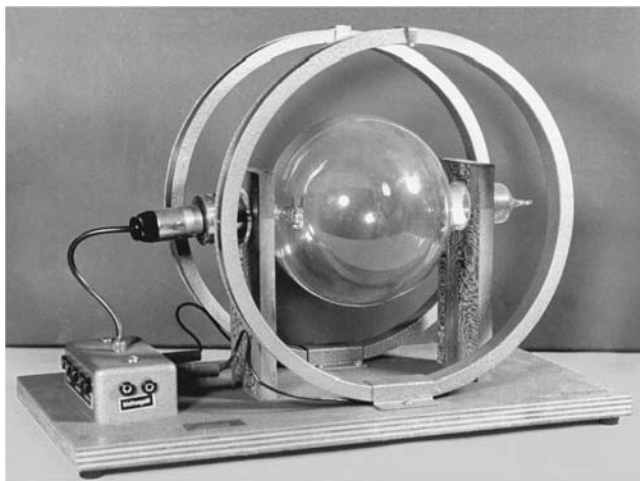
- dopadu elektrónového lúča do ľavého horného rohu obrazovky a rozsvietenia bodu dopadu lúča na obrazovke,
- postupného vytvárania obrazu na obrazovke vykresľovaním jednotlivých riadkov,
- opakovania pohybu elektrónového lúča.



Pohyb elektrónov vo vákuovej trubici – sklenenej banke

Elektrónové delo slúži ako zdroj elektrónov so začiatočnou rýchlosťou v . Dva kruhové závitky na fotografii sú Helmholtzove cievky – sústava cievok, medzi ktorými je homogénne magnetické pole. Indukčné čiary magnetického poľa cievok vstupujú do nákresne. Vo vákuu zrejme ešte ostali zvyšky molekúl plynu a pri nárazoch elektrónov svetielkujú.

Na fotografii experimentu sa môžeme presvedčiť, že elektróny, ktoré sa pohybujú vo vákuu, majú v magnetickom poli skutočne kruhové trajektórie. V elektrickom poli elektrónového dela pôsobia na jednotlivé elektróny elektrické sily a urýchľujú ich, aby získali rýchlosť v , potrebnú na udržanie pohybu po kružnici.



Aby sa častica udržala v rovnomernom pohybe rýchlosťou v na kružnici, musí na ňu pôsobiť dostredivá sila F_d s veľkosťou

$$F_d = \frac{mv^2}{r} \quad (1)$$

ktorá je v každom bode trajektórie kolmá na vektor rýchlosti v . Pri pohybe častice s elektrickým nábojom je dostredivou silou magnetická sila F_m .

Najprv určíme veľkosť magnetickej sily F_m , pôsobiacej v homogénnom magnetickom poli s magnetickou indukciou B na časticu. Častica má elektrický náboj Q a pohybuje sa rýchlosťou v po kružnici s polomerom r . Kružnica leží v rovine kolmej na indukčné čiary poľa.

Elektrická častica s nábojom Q prejde vo vákuu dráhu Δl za čas Δt rýchlosťou

$$v = \frac{\Delta l}{\Delta t}$$

Aby sme mohli vyjadriť silu, ktorá na ňu pri tomto pohybe pôsobí, nahradíme pohyb častice predstavou prúdu

$$I = \frac{Q}{\Delta t}$$

ktorý prechádza myslenným (v skutočnosti neexistujúcim) vodičom s dĺžkou Δl . Silu F_m , ktorá v magnetickom poli s magnetickou indukciou B , pôsobí na (myslený) vodič s aktívnou dĺžkou Δl , vyjadríme známym vzťahom

$$F_m = B I \Delta l \quad (2)$$

Keď pri úprave vzťahu (2) použijeme vzťahy pre rýchlosť v častice a pre prúd I , dostaneme pre magnetickú silu F_m

$$F_m = B \frac{Q}{\Delta t} \Delta l = B \frac{\Delta l}{\Delta t} Q = QvB$$

Táto magnetická sila je dostredivou silou, ktorá je príčinou pohybu častice po kružnici. Ak sa teda častica s nábojom Q pohybuje v homogénnom magnetickom poli s magnetickou indukciou B v rovine kolmej na indukčné čiary rýchlosťou v , pôsobí na ňu magnetická sila s veľkosťou

$$F_m = QvB \quad (3)$$

Veľkosť sily F_m je priamo úmerná súčinu náboja Q , veľkosti vektora v jeho rýchlosti a veľkosti vektora B magnetickej indukcie.

Smer magnetickej sily F_m závisí od znamienka náboja Q . Ak sa v magnetickom poli pohybuje častica s kladným elektrickým nábojom, na určenie jej smeru použijeme upravené Flemingovo pravidlo ľavej ruky:

Ak položíme otvorenú ľavú dlaň na trajektóriu náboja tak, aby prsty ukazovali smer rýchlosti a aby indukčné čiary vstupovali do dlane, magnetická sila pôsobiaca na náboj má smer palca.

V prípade, že sa v magnetickom poli pohybuje častica so záporným elektrickým nábojom, pôsobí na ňu magnetická sila F_m , ktorá má opačný smer ako sila, o ktorej hovorí predchádzajúce pravidlo. Tak napr. na elektrón s nábojom $Q = -e$, pôsobí v magnetickom poli sila $F_m = -evB$. Znamienko $(-)$ upozorňuje, že smer sily je opačný ako smer sily pôsobiacej na časticu s kladným nábojom a predchádzajúce pravidlo treba upraviť pre pravú ruku.

Všeobecne platí: Ak elektrická častica vletí do homogénneho magnetického poľa kolmo na indukčné čiary, jej trajektória je kružnica, ktorá leží v rovine kolmej na indukčné čiary.

Dostredivou silou, ktorá je príčinou pohybu častice po kružnici, je magnetická sila. Polomer kružnice určíme, keď porovnáme pravé strany vzťahu (1)

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

pre dostredivú silu a vzťahu (3) $F_m = QvB$ pre magnetickú silu

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

$$r = \frac{mv}{QB}$$

(4)

Príklad

Vypočítajte polomer kružnice – trajektórie elektrónu, ktorý vletel do homogénneho magnetického poľa s magnetickou indukciou $0,000\,12\text{ T}$, kolmo na indukčné čiary, rýchlosťou $3 \cdot 10^6\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

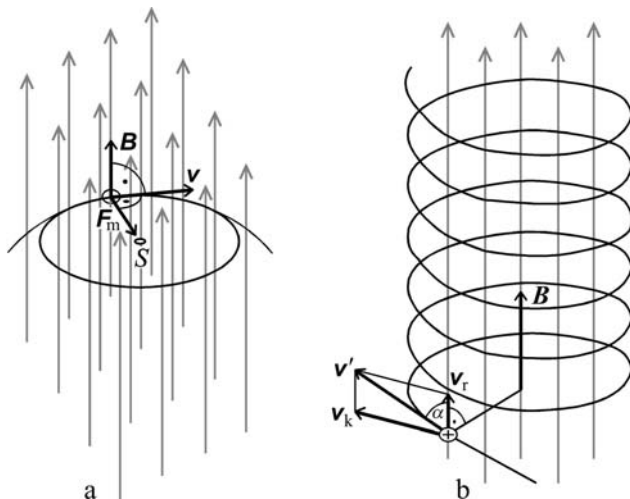
Riešenie

$B = 0,12 \cdot 10^{-3}\text{ T}$, $v = 3 \cdot 10^6\text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}\text{ kg}$, $Q = e = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{ C}$, $r = ?$

Podľa posledného zo vzťahov (4)

$$r = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 3 \cdot 10^6}{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,12 \cdot 10^{-3}}\text{ m} = 142 \cdot 10^{-2}\text{ m} \approx 0,14\text{ m}$$

Elektrón sa bude pohybovať po kružnici s polomerom približne 14 cm .



- Pohyb častice s kladným nábojom v homogénnom magnetickom poli
- a) častica vletela do magnetického poľa v rovine kolmej na indukčné čiary
 - b) rýchlosť častice zvierá s indukčnými čiarami uhol $\alpha \neq 90^\circ$, $\alpha \neq 0$

Zložitejší je pohyb častice, ktorá sa pohybuje tak, že vektor jej rýchlosti $\mathbf{v}'$ nie je kolmý na indukčné čiary, ale zvierá s nimi uhol $\alpha \neq 90^\circ$ rôzny od pravého uhla a zároveň je rôzny od nuly, $\alpha \neq 0$. Vtedy vektor rýchlosti rozkladáme na zložky $\mathbf{v}_k$, $\mathbf{v}_r$ do dvoch navzájom kolmých smerov. Častica potom súčasne koná dva navzájom nezávislé pohyby: V rovine kolmej na indukčné čiary koná rovnomerný pohyb po kružnici rýchlosťou $v_k = v' \sin \alpha$. V smere indukčných čiar sa zároveň pohybuje priamočiaro rovnomerne, rýchlosťou $v_r = v' \cos \alpha$. Výsledný pohyb je zložený z uvedených dvoch pohybov a trajektóriou častice je **skrutkovnica**.

Poznámky

Pohyb častice s elektrickým nábojom v magnetickom poli má význam nielen pre laboratórne fyzikálne experimenty. Stretávame sa s ním napr. aj pri známom prírodnom jave – *polárnej žiare*: Do stratosféry Zeme vstupuje množstvo častíc kozmického žiarenia s elektrickým nábojom. Vďaka magnetickému poľu Zeme sa len málo z nich dostane až k nám, kde by nám mohli škodiť. Väčšinu elektrických častíc magnetické pole Zeme zachytí a núti ich obiehať po kruhových trajektóriách na hranici atmosféry vo Van Allenových radiačných pásoch.

Mnohé častice kozmického žiarenia vletujú do magnetického poľa Zeme tak, že s jeho indukčnými čiarami zvierajú malé uhly. Tieto častice sa pohybujú pozdĺž indukčných čiar po skrutkovniciach až nad arktické oblasti. Tam pri zrážkach častíc s molekulami kyslíka a dusíka vzniká svetelné žiarenie, ktoré v severných oblastiach Zeme pozorujeme ako „*polárnu žiaru*“.