

9. Magnetické pole

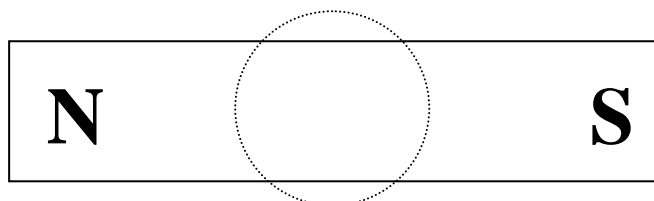
9.1 Základní poznatky o magnetismu

a) Tyč z měkké oceli ovíneme drátem, do něhož zavedeme stejnosměrný proud. Tyč nám zmagnetuje. Po přerušení proudu bude tyč nemagnetická. Nahradíme-li tyč z měkké oceli za ocel z tvrdé oceli, zůstane tyč zmagnetována i po přerušení proudu a vznikne trvalý (permanentní) magnet.

b) Volně zavěšený tyčový magnet se natočí vždy ve směru S-J (severní pól k severu, jižní k jihu).

c) zmagnetované tyče přitahují k sobě ocelové předměty.

d) **magnet**



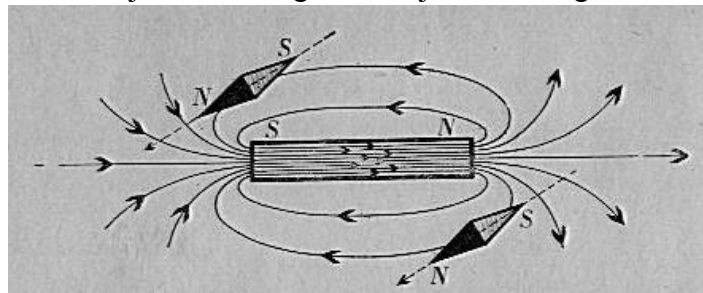
severní pól se označí N

jižní pól se označí S

Mezi nimi je netečné pásmo.

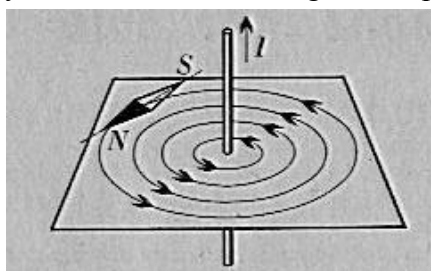
Jestliže magnet rozdělíme, opět vzniknou dva magnety. Každý magnet má opět sever i jih.

Víme, že se budou přitahovat magnety, které k sobě přiložíme a to takto: vždy se přitahuje severní a jižní část magnetu. Stejně části magnetu se odpuzují.



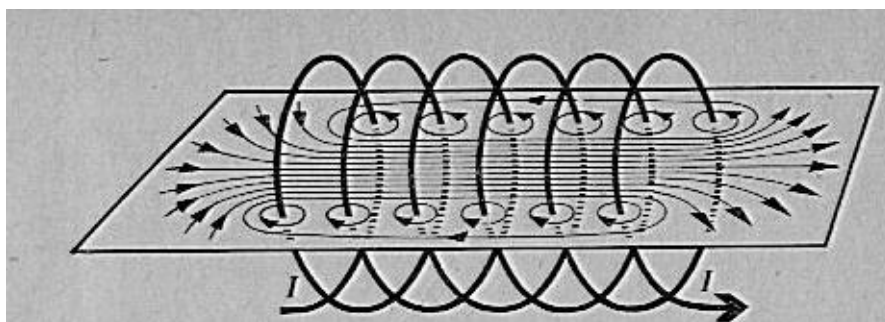
Magnetické pole magnetu znázorníme pomocí magnetických indukčních čar. Mají směr od severu k jihu a procházejí skrz magnet.

e) vodič s elektrickým proudem vyvolává kolem sebe magnetické pole (soustředné kružnice).



V cívce jdou magnetické čáry ve směru proudu a chovají se jako u trvalého magnetu.

f) magnetické pole působí na vodič s proudem silou



9.2 Magnetické pole vodičů s proudem

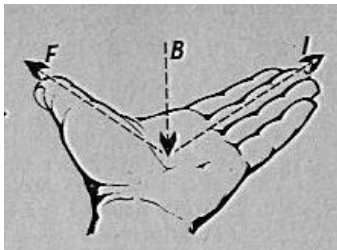
Magnetismu souvisí s pohybem el. nábojů. V okolí vodičů s proudem je magnetické pole, dokud teče proud. Orientaci indukčních čar určuje Ampérovo pravidlo pravé ruky.



Ampérovo pravidlo pravé ruky: Postavíme pravou ruku na vodič tak, aby palec ukazoval směr proudu, a pokrčené prsty ukazují orientaci indukčních čar. Indukční čáry jsou uzavřené křivky.

9.3 Silové působení magnetického pole na vodič s proudem

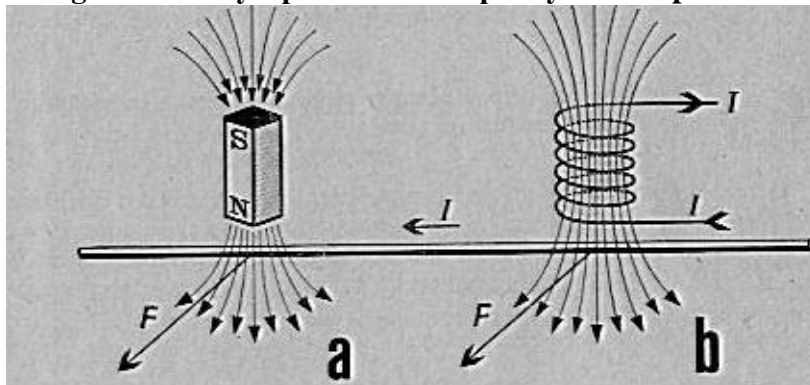
Základní vlastností magnetického pole je jeho silové působení. Vodič s elektrickým proudem se v magnetickém poli vychýlí. Směr vychýlení určuje Flemingovo pravidlo levé ruky.



Flemingovo pravidlo levé ruky:

Položíme-li otevřenou levou ruku na vodič tak, aby prsty ukazovaly směr proudu a magnetické indukční čáry vstupovaly do dlaně, ukazuje odtažený palec směr síly, kterou působí magnetické pole na vodič.

Silové působení magnetu a cívky s proudem a na přímý vodič s proudem



9.4 Magnetická indukce

Síla, která v magnetickém poli na vodič s proudem působí je úměrná velikosti proudu, dále závisí na velikosti úhlu mezi vodičem a indukčními čarami a na délce vodiče v magnetickém poli (aktivní délka vodiče).

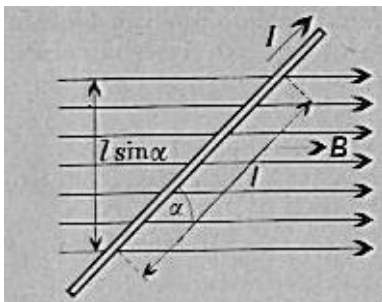
určení velikosti magnetické síly: $F = B \cdot I \cdot l \cdot \sin \alpha$

Je-li vodič kolmý k indukčním čarám: $F = B \cdot I \cdot l$

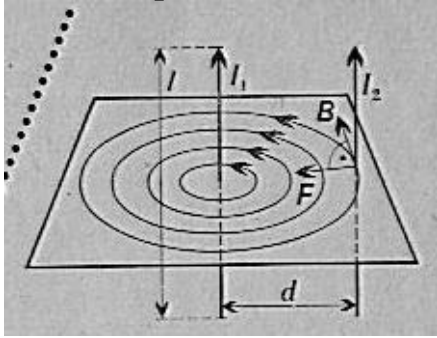
Činitel B vyjadřuje vlastnost magnetického pole a nazývá se magnetická indukce. Vztah pro magnetickou indukci:

$$B = \frac{F}{I \cdot l \cdot \sin \alpha}, \text{ případně } B = \frac{F}{I \cdot l}.$$

Určení jednotky magnetické indukce: $[B] = \frac{1N}{1A \cdot 1m} = 1T$



9.5 Silové působení mezi vodiči s proudem



Jsou-li v blízkosti sebe dva vodiče protékající proudem, vzniká mezi nimi silové působení. Jsou-li proudy souhlasné, vodiče se přitahují, jsou-li opačné tak se odpuzují. Vzájemné silové působení je zprostředkováno magnetickým polem.

Výsledná síla F vyjadřuje Ampérův zákon:

$$F = k \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{d}, \quad d - \text{vzdálenost vodičů, } l - \text{délka vodičů.}$$

Konstanta k vyjadřuje vliv prostředí na velikost síly. Tvar

konstanty k : $k = \frac{\mu}{2\pi}$, μ - permeabilita prostředí.

Permeabilitu zapíšeme jako součin poměrné permeability (pro většinu látek 1, pro Ni, Fe, Co 100 – 100000) a permeability vakua: $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$

Zavedením permeability dostane Ampérův zákon následující tvar: $F = \frac{\mu_r \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{d}$

9.6 Definice ampéru

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

9.7 Výpočet magnetické indukce polí vodičů s proudem

Dva vodiče: $F = \frac{\mu_r \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{d}$

Je to síla pole vodiče 1 na vodič 2. v místě vodiče 2 má magnetické pole vodiče 1 indukci B – působící síla: $F = B \cdot I_2 \cdot l$

porovnáme tuto sílu s ampérovým zákonem

$$B \cdot I_2 \cdot l = \frac{\mu_r \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I_1 \cdot I_2 \cdot l}{d}$$

Výsledný vztah pro magnetickou indukci nám udává jaká je magnetická indukce v daném bodě magnetického pole vodiče s proudem ve vzdálenosti d od vodiče: $B = \frac{\mu_r \cdot \mu_0}{2\pi} \cdot \frac{I}{d}$.

Vztahy pro určení magnetické indukce:

pro smyčku o dvou závitech (ve středu): $B = \mu_0 \cdot \frac{I}{2r}$, r – poloměr smyčky

pro smyčku s N závity (cívka): $B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l}$

Magnetické pole lépe charakterizuje vektor intenzity magnetického pole: $H = \frac{B}{\mu}$

Jednotka intenzity magnetického pole: $[H] = \frac{A}{m} = A \cdot m^{-1}$

9.8 Vliv látkového prostředí na magnetické pole

Existuje několik druhů látek. Můžeme je rozdělit do dvou základních skupin:

- feromagnetické látky – mezi ně patří Fe, Ni, Co, slitiny) – zesilují magnetická pole vodičů s proudem
- neferomagnetické látky – neovlivňují magnetické pole – dřevo, hliník, mosaz

9.9 Magnetické vlastnosti látek

Každá částice feromagnetické látky je malým magnetem – **elementární magnet**. V neznámé látce jsou tyto magnety neuspořádané a jejich účinek se navenek ruší. Při vložení do magnetického pole se natáčí ve směru pole – **magnetování**.

Při úplném urovnání elementárních magnetů je látka magneticky nasycena.

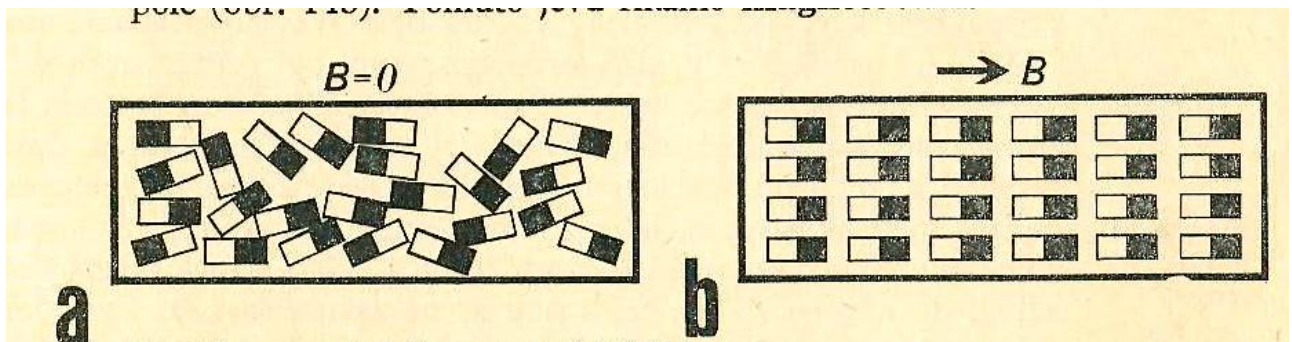
Po odstranění magnetického pole u některých látek magnetizace zmizí – magneticky **měkké látky**. Některé zůstávají nasyceny – **magneticky tvrdé** – trvalý magnet.

Podstata elementárních magnetů:

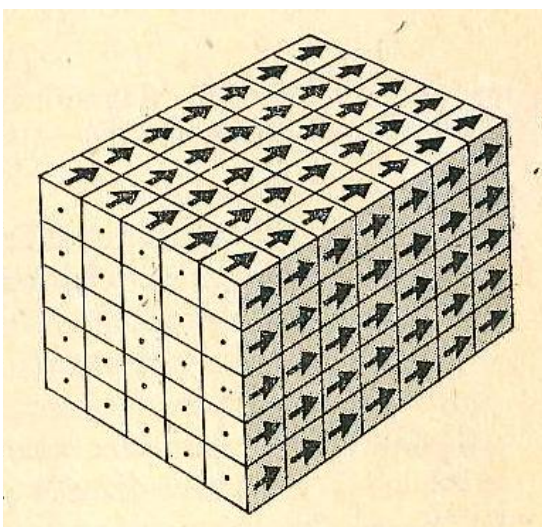
Uvnitř malých částítek tekou uzavřené proudy. Elementární magnety se chovají jako smyčky s proudem. Nelze zde oddělit N od S, neboť jsou jen střediskem svých působení proudových smyček elementárních magnetů. Každý obíhající elektron v atomu představuje proud. I samotný elektron se chová jako malý magnet (jako by se elektron otáčel kolem vlastní osy) – **spin elektronu**.

Ukazuje se, že magnetismus atomu závisí na uspořádání elektronů v obalu. Při jistém uspořádání se magnetické účinky navzájem ruší – **diamagnetické atomy**.

Pokud se částečně neruší – **paramagnetické atomy**.



Pomocí této teorie nelze vysvětlit feromagnetismus. Nejdříve byla vytvořena Weissova teorie domén.



U některých látek s paramagnetickými atomy dochází k úplnému zmagnetování atomů, takže krystal je magneticky nasycen. Toto nasycení vzniká samovolně – **spontánní magnetizace**. Látka se pak skládá z oblastí (domén), které jsou úplně zmagnetovány. Představují magnety u feromagnetických látek.

Při nezmagnetovaném stavu se účinky domén ruší.

Druhy látek:

- diamagnetické** – diamagnetické atomy, zeslabují magnetické pole $\mu_r < 1$, patří sem Cu, Bi
- paramagnetické** – paramagnetické atomy, zesilují magnetické pole $\mu_r > 1$, patří sem Al,

Pt, Mn

c) **feromagnetické** – paramagnetické atomy, které jsou ve stavu spontánní magnetizace, zesilují magnetické pole $\mu_r \in (100 - 100000)$. Přesný výklad feromagnetismu je na základě kvantové mechaniky.

Magnetizaci látek značíme I a platí: $B = \mu_0 H + I$, ve vakuu $I=0$.

I je funkcí H a můžeme psát: $I = \mu_0 \chi_m H$

χ_m – magnetická susceptibilita

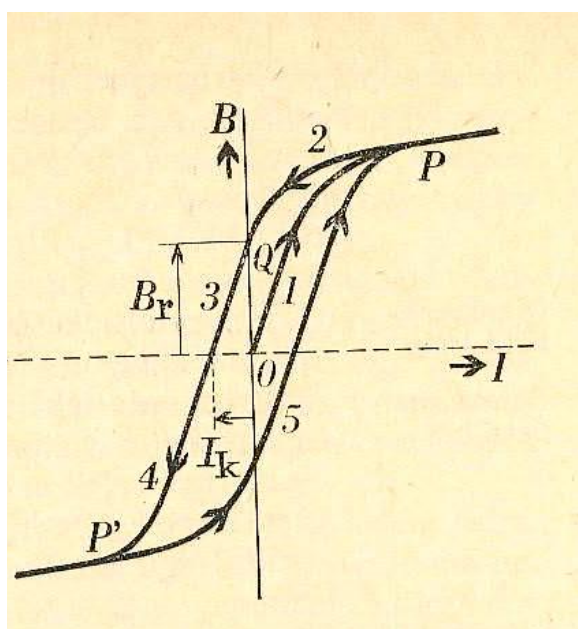
pro diamagnetické látky $\chi_m < 0$, pro paramagnetické látky $\chi_m > 0$, pro feromagnetické látky $\chi_m \gg 0$.

9.10 Magnety

Lze získat vložením feromagnetické látky do magnetického pole. U nich $\chi_m = f(H)$

$\Rightarrow \mu_1 = f(H)$

Závislost B na H je dána **hysterezní smyčkou**.



Není-li látka původně zmagnetována, je závislost B na H dána při rostoucím H křivkou OP. Zvyšování H lze dojít do stavu nasycení. Bude-li pak H klesat k nule, nevrátí se látka do původního stavu, nýbrž magnetická indukce bude mít určitou hodnotu B_r – **remanentní indukce**. Anulování B_r se podaří působením vnějšího magnetického pole o intenzitě $-H_k$ – **koercivní síla**. Pro konstrukci magnetů je třeba B_r , H_k co největší. Kvalita magnetu je dána součinem $B_r * H_k$.

9.11 Ferity

Jsou to sloučeniny Fe s oxidy kovů, které krystalují v krychlové soustavě. Mohou dosáhnout vysokých hodnot $\mu_r \in (100 - 100000)$. Z hlediska vodivosti patří mezi polovodiče s vysokým elektrickým odporem.

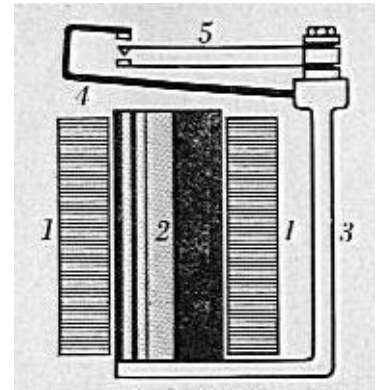
Patří sem: feroferit $FeOFe_2O_3$, ferit mědi $CuO Fe_2O_3$, ferit hořčíku $MgO Fe_2O_3$.

9.12 Užití magnetů

1) **Elektromagnetický jeřáb** – elektromagnet - cívka s jádrem z magneticky měkké oceli. Užívá se při zvedání těžkých břemen

2) **Magnetické upínání** – užívá se k upínání ocelových předmětů na některých obráběcích strojích (brusek). Broušený předmět položíme do žádané polohy a upneme zapnutím proudu.

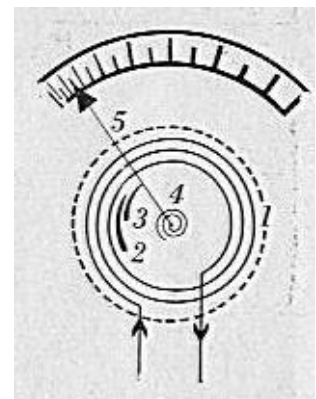
3) Spínací relé – elektromagnet složen z cívky 1, z jádra 2, rámu 3 a kotvy 4 z magneticky měkké oceli. Po zapnutí proudu do cívky přitáhne magnet kotvu. Pohyb kotvy se přenáší na kontaktní pera 5, jejichž pomocí spínáme další proudové obvody. Relé se užívají ve slaboproudé technice a v různých automatických a ovládacích zařízeních.



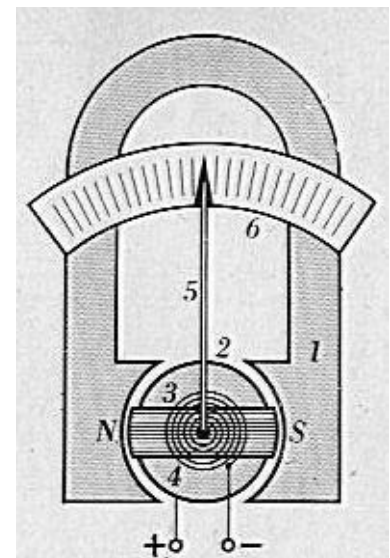
4) Elektromagnetický měřicí přístroj – se skládá z cívky 1, ze dvou segmentů 2 a 3 z měkké oceli. Segment 2 je pevný, segment 3 je otočně uložen a spojen s ručkou 5.

Princip:

Prochází-li cívkou měřený proud, zmagnetují se oba segmenty souhlasně a odpuzují se. Segment 3 se vychýlí a působí otáčivým momentem na ručku. Současně působí na ručku moment síly pružnosti natáčené pružiny, který je opačně orientován. Ručka se ustálí v poloze, v níž jsou oba momenty sil stejně velké. Přestane-li proud působit ručka se vrátí do původní polohy. Směr výchylky nezávisí na směru proudu v cívce.

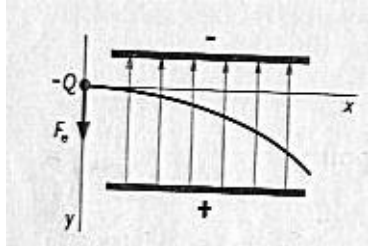


5) Měřicí přístroj s otočnou cívkou – je založen na principu silového působení magnetického pole na vodič s proudem. Jeho permanentní magnet 1. Mezi póly magnetu je umístěn trn 2 z magneticky měkké oceli tak, že mezi magnetem a trnem vzniká všude stejně široká mezera. V mezeře je cívka 3 otáčivá kolem svislé osy. Cívkou prochází měřený proud. Magnetické pole působí na cívku otáčivým momentem, který je přímo úměrný proudu. Současně působí na o otáčející se cívku moment síly pružnosti natáčené pružiny, který je opačně orientován. S cívkou je spojena ručka 5, která ukazuje na stupnici 6. Ručka se ustálí v poloze, v níž oba momenty sil působící na cívku jsou stejně velké. Přestane-li cívkou procházet proud, moment síly pružnosti stočené pružiny vrací cívku a s ní i ručku do původní polohy. Stupnice je rovnoměrná.



6) Magnetický záznam signálů – díky němuž je uchovávána zvuková či obrazová informace. Magnetický záznam je založen na trvalém zmagnetování vrstvy feromagnetika (oxidu železa), naneseného na nosiči z plastického materiálu. Nosič může mít podobu pásky, jak ho známe z kazet pro záznam zvuku nebo obrazu.

9.13 Části s nábojem v elektrickém poli



Na částici s nábojem Q v homogenním elektrickém poli o intenzitě \vec{E} působí elektrická síla: $F_e = Q \cdot E$. Určíme si směr síly \vec{F}_e . Mohou nastat dva případy:

- $Q > 0$ \vec{F}_e, \vec{E} – souhlasně orientováno
- $Q < 0$ \vec{F}_e, \vec{E} – nesouhlasně orientováno

Z hlediska využití elektrické síly jsou důležité dva případy pohybu částice s nábojem s rychlostí v homogenním elektrickém poli:

- Vektor počáteční rychlosti v_0 a má stejný směr a orientaci jako \vec{F}_e .

Částice vykonává rovnoměrně zrychlený pohyb. Projde-li částice hmotnosti m mezi dvěma místy s rozdílem potenciálů U , dojde k přírůstku kinetické energie:

$$\Delta W_k = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = Q \cdot U$$

- Vektor počáteční rychlosti \vec{v}_0 je kolmý k \vec{F}_e .

Dráha má tvar paraboly. Jedná se o složený pohyb:

pohyb v ose x : $x = v_0 \cdot t$

pohyb v ose y : $y = \frac{1}{2}a \cdot t^2$; zrychlení vyjádříme $a = \frac{F_e}{m} = \frac{Q \cdot E}{m}$

výsledný vztah: $y = \frac{1}{2} \frac{Q \cdot E}{m} \cdot \frac{x^2}{v_0^2}$

Z této rovnice je zřejmé, že výchylky částice v homogenním elektrickém poli je pro x konstantní fci kinetické energie částice.

Kinetická energie částice se vyjadřuje v jednotce zvané eV.

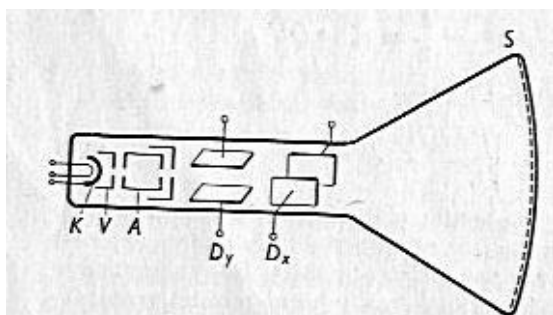
Definice eV:

Je to energie, kterou získá částice s nábojem e , jestliže projde elektrickým polem z místa A do místa B, mezi nimiž je napětí 1 V.

Hodnota eV: $1eV = 1,602 \cdot 10^{-19} J$

9.14 Osciloskop

Praktické použití pohybu částice s nábojem v elektrickém poli je osciloskop.



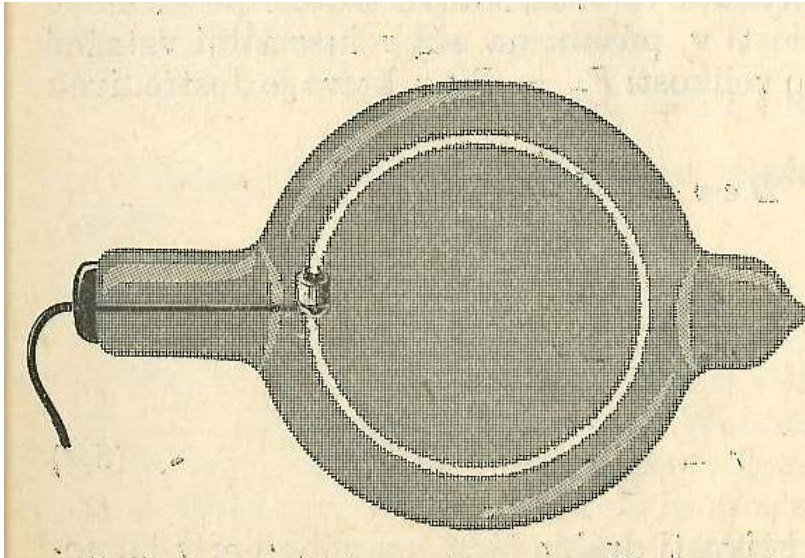
Základní částí je obrazová elektronka. Elektrony jdou z katody a jsou soustředěny do úzkého svazku pomocí Wehneltova válce (označen V, je to malý váleček, který je kolem katody a jen malým otvorem mohou procházet elektrony). Pomocí něj řídíme velikost proudu v elektronce. Elektrony jsou urychlovány soustavou anod (A), současně ovlivňují pohyb elektronů tak, aby na stínítku vznikla ostrá stopa. Dále zde jsou dva páry vychylovacích destiček $D(x)$ – vodorovný směr, $D(y)$ – svislý směr. Pak paprsek dopadá na stínítko a koná složený pohyb. $D(x)$ je průběh pilového napětí – časová základna. $D(y)$ zobrazuje studované napětí a na obrazovce vidíme jeho závislost na čase.

9.15 Částice s nábojem v magnetickém poli

Nechť částice s rychlostí \vec{v} vnikne do magnetického pole \vec{B} . Pak na ni působí Lorentzova síla $\vec{F} = Q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$ či $F = Q \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$.

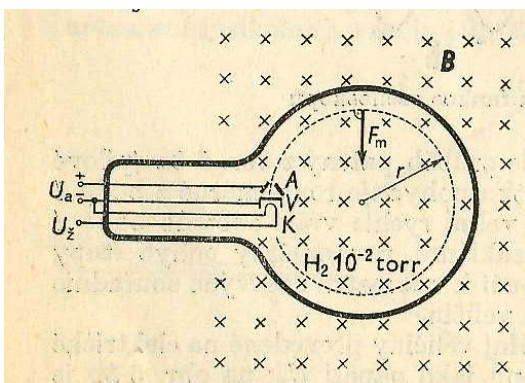
Mohou nastat dva případy:

- \vec{v} je rovnoběžné s \vec{B} síla je nulová a magnetické pole nepůsobí.
- \vec{v} je kolmé \vec{B} a pak platí vztah $F = Q \cdot v \cdot B$



Síla pak zakřivuje dráhu a je kolmá k rovině určené \vec{v} , \vec{B} . Při kolmosti těchto dvou vektorů míří stále do jednoho bodu a tím pádem se částice s nábojem pohybuje po kruhové dráze. Její orientace se určuje pravidlem levé ruky. Vše se dá dokázat ve Wehneltově trubici (viz. obrázek).

Wheneltova trubice



Elektrony vycházející z katody K jsou soustředěny Wehneltovým válcem do úzkého svazku a jsou urychlovány napětím U_a mezi anodou a katodou. V anodě je otvor, kterým elektrony pronikají do prostoru trubice s vodíkem o tlaku $p=10^{-2}$ torr. Srážkami urychlených elektronů s molekulami vodíku je vzbuzováno záření, takže elektrony zanechávají v trubici stopu ve formě zářícího vlákna. Jestliže trubici vložíme do homogenního magnetického pole, jehož \vec{v} je kolmé na \vec{B} ,

zakříví se dráha elektronů a při určité velikosti magnetické indukce magnetického pole, bude mít zářící vlákno tvar kružnice.

9.16 Měrný náboj a hmotnost částice s nábojem

Zavedeme pojem měrný náboj: $\frac{Q}{m}$. Měrný náboj slouží k charakteristice částice s nábojem.

Určení měrného náboje pomocí Wehneltovy trubice:

Pro elektron ve Wehneltově trubici musí platit:

Lorentzova síla = odstředivé síle

$$e \cdot v \cdot B = \frac{m_e \cdot v^2}{r} \text{ a z toho plyne } \frac{e}{m_e} = \frac{v}{B \cdot r} \text{ - a to je vyjádření měrného náboje}$$

$$\text{poloměr dráhy křivosti: } r = \frac{m_e v}{B \cdot e}$$

Elektrony jsou urychlovány elektrickým polem mezi katodou a anodou mezi nimiž je napětí

U_a je rychlost určena $v = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U}{m}}$ a tu dosadíme do vztahu s měrným nábojem:

$$\left(\frac{e}{m_e}\right)^2 = \frac{2 \cdot e \cdot U_a}{m_e \cdot B^2 \cdot r^2} \text{ a výsledný vtaħ: } \frac{e}{m_e} = \frac{2 \cdot U_a}{B^2 \cdot r^2}$$

Hmotnost elektronu

Měřením byla stanovena hodnota $\frac{e}{m_e} = 1,759 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$ či z toho určíme hmotnost

elektronu $m_e = 9,107 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$.

Hmotnost protonu

měrný náboj: $\frac{e}{m_p} = 9,652 \cdot 10^7 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$

Srovnáním měrných nábojů elektronu a protonu zjistíme, že jejich hmotnosti jsou v poměru:

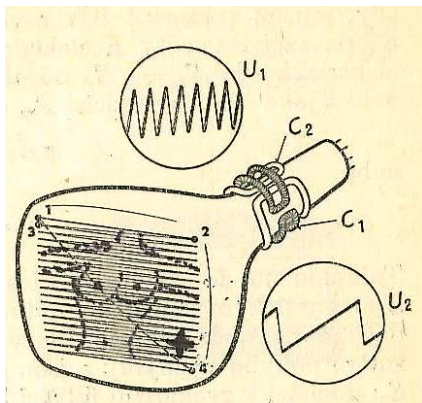
$$m_e : m_p = 1 : 1836$$

Závěr:

Hmotnost atomu je téměř úplně dána hmotností jádra.

9.17 Praktické využití pohybu částice v elektrickém a magnetickém poli

Televizní obrazovka

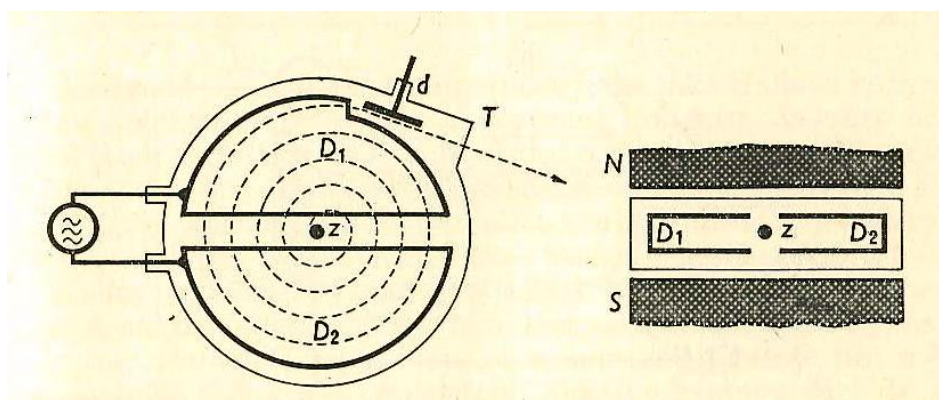


Má dva páry vychylovacích cívek C_1 , C_2 . Vektory magnetických polí těchto cívek jsou na sebe kolmé a jsou kolmé k ose obrazovky. C_1 je připojena k pilovému zdroji napětí U_1 . Napětí U_2 zobrazuje signál.

Současným působením vzniká řádkový rozklad. Obraz vzniká tak, že na řídicí elektrodu přivedeme proměnné napětí odpovídající obrazovému signálu. Vzniká obraz z bodů složených do 625 řádků.

Urychlovače částic

1) Cyklotron



Kovová krabice tvaru dutého plochého válce rozříznutého na dvě části (duanty) a je umístěna v magnetickém poli a ve vakuu. Do obou duantů jde vysoké napětí

(řádově 10 000 – 100 000 V), které generuje vysokofrekvenční generátor.

Je-li v mezeře například kladný iont je přitážen k zápornému duantu, vletí dovnitř, kde není el. pole, ale působí zde magnetické pole. Působením toto pole opíše polokružnici. Změní-li se

polarita duantů octne se ve druhém a opíše polokružnici s větším poloměrem (má vlivem urychlení větší rychlost). Urychlení probíhá v mezeře mezi duanty. Částice mají energii 100 MeV.

2) Betatron

Slouží k urychlení elektronů. Využívá se toho, že při magnetickém toku vzniká elektrické vírové pole. V tomto poli je elektron urychlován. Elektrony mají energii kolem 100 MeV.

3) Lineární urychlovače

Řada elektrod tvaru kotoučů a válců stejného poloměru s rostoucí výškou umístěné na jedné ose umístěných ve vakuu. Navzájem jsou spojeny sudé a liché válce. Elektrody jsou připojeny k vysokofrekvenčnímu generátoru a jejich délka je taková, že doba při níž ion prochází uvnitř elektrody je stejná. Změnila se fáze napětí generátoru, tím budou v mezerách získávat vždy urychlení. Při každém průletu se zvětšuje rychlost. Takto lze získat částice s energií 1 000 MeV.

9.18 Hallův jev

Lorentzovou silou je ovlivňován pohyb volných částic s nábojem ve vakuu, ale i pohyb volných nosičů náboje v látkách.

Ve vodiči bez proudu se elektrony pohybují chaoticky. Na každý elektron působí síla a mění jejich dráhu, ale hustota nábojů bude stejná.

Protéká-li proud vodičem, pak při vložení do magnetického pole se uplatní složka rychlosti ve směru usměrněného pohybu elektronů a v místech, kde existuje složka magnetické indukce kolmá ke směru rychlosti elektronů, jsou tyto elektrony vytlačovány k jedné straně. Tím se na jedné straně objeví přebytek elektronů – objeví se elektrické pole napříč vodičem. A můžeme naměřit ve vodiči napětí.

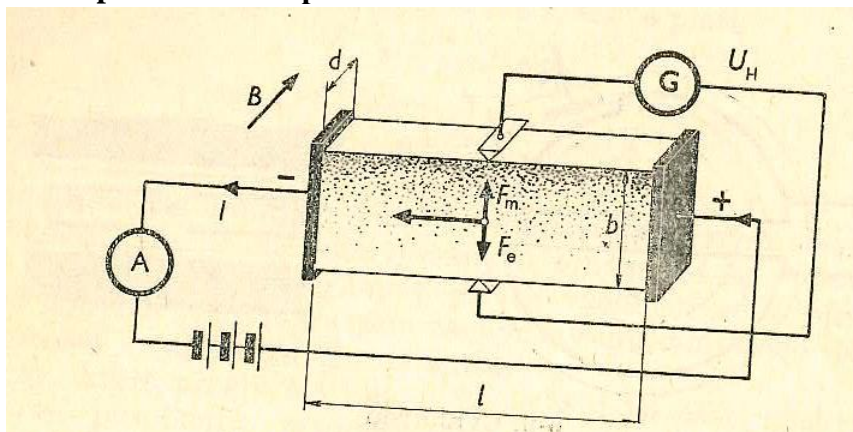
Podrobné vysvětlení:

Tenká vodivá destička, kterou protéká proud I . Kontakty ze shora a ze spoda destičky nastavíme tak, aby $U=0$.

Vytvoříme magnetické pole o magnetické indukci, která je kolmá k destičce. Proud je tvořen elektrony, které mají rychlost. Na ně pak působí síla, která je vytlačuje ke spodní straně – dojde k vytvoření náboje záporného a na horní straně dojde k vytvoření náboje kladného. Vytvořené elektrické pole působí proti účinku síly.

Ustálený stav nastane, když se výsledná síla, která působí na elektrony napříč destičkou rovná nule. Pokud změříme napětí mezi horní a spodní destičkou, naměříme jeho malého hodnoty. Toto objevil E. H. Hall. Podle něj označujeme vznik příčného napětí ve vodiči v magnetickém poli jako Hallův jev.

Vztah pro Hallovo napětí:



Jestliže bylo napětí U_H naměřeno na destičce šířky b , je velikost intenzity příčného elektrického pole

$$E = \frac{U_H}{b}$$

Nosičem náboje v látkách je nejčastěji elektron s nábojem $-e$. Označíme n počet elektronů v objemové

jednotce, pak je celkový náboj v objemu ($V=b \cdot d \cdot l$)

Náboj stanovíme: $Q = -n \cdot e \cdot b \cdot d \cdot l$, kde d – tloušťka destičky.

Víme, že musí platit rovnovážný stav v látce: $QE = BI$

Do této rovnice dosadíme vyjádřené vztahy za Q a E a vyjádříme si Hallovo napětí U_H .

$$U_H = -\frac{1}{n \cdot e} \cdot \frac{B \cdot i}{d} = R_H \frac{B \cdot I}{d}$$

R_H – je Hallova konstanta a může nabývat hodnot záporných (nosiči jsou elektrony), nebo může nabývat hodnot kladných a nosiči jsou díry (polovodič typu P).