

# Specifický náboj elektronu

**Úkol:** Na základě pohybu elektronu v homogenním magnetickém poli stanovit jeho specifický náboj.

**Potřeby:** Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

## Obecná část:

V magnetickém poli působí **na pohybující se nabitě objekty** (tělesa, částice) s elektrickým nábojem  $Q$  magnetická síla  $F_m$ , jež je dána výrazem

$$F_m = Q \cdot [v \wedge B] \quad , \quad (1)$$

jejíž velikost

$$F_m = Q v B \sin a \quad (2)$$

závisí na velikosti a směru vektoru rychlosti nabitěho objektu. Úhel  $a$  je úhel, jenž vektor rychlosti  $v$  svírá s vektorem  $B$  indukce magnetického pole. Ten pak charakterizuje v daném bodě prostoru magnetické pole právě na základě jeho silových účinků.  $Q$  je specifický náboj.

Směr magnetické síly je vždy kolmý k vektoru rychlosti  $v$  (a také k vektoru indukce  $B$ ). Magnetická síla proto nemůže měnit velikost rychlosti (nabitý objekt v magnetickém poli nelze ani urychlovat ani brzdit), mění však směr tohoto vektoru !!!

## **Z hlediska mechanických účinků je magnetická síla vlastně silou dostředivou.**

Vletí-li nabitý objekt do prostoru, v němž je homogenní magnetické pole ( $B = konst.$ ), bude se v důsledku magnetického silového působení pohybovat obecně po šroubovici; **v případě, že objekt vletí do homogenního magnetického pole kolmo ( $v \perp B$ ), bude konat rovnoměrný pohyb po kružnici o určitém poloměru  $R$**  (obojí lze na měřicí aparatuře demonstrovat).

Poloměr  $R$  kruhové trajektorie lze snadno určit na základě výše zmíněné skutečnosti, že

$$F_m = F_d \quad .$$

Musí tedy platit ( $v \perp B \Rightarrow \sin a = 1$ )

$$Q v B = \frac{mv^2}{R}$$

a odtud

$$\boxed{R = \frac{mv}{QB}} \quad . \quad (3)$$

Poměr náboje  $Q$  a hmotnosti  $m$  nabitěho objektu se nazývá **specifický náboj** a z předcházejícího vztahu plyne, že

$$\frac{Q}{m} = \frac{v}{RB} \quad . \quad (4)$$

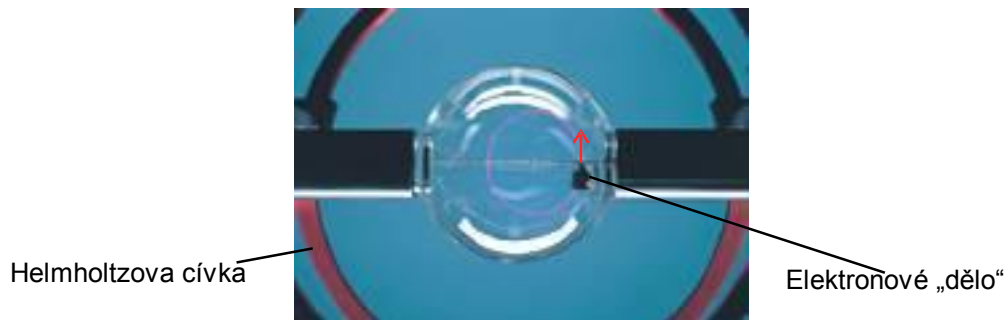
Jestliže chceme tuto veličinu určit, musíme znát nejen poloměr kruhové trajektorie, ale také velikost indukce magnetického pole a velikost rychlosti, s níž nabitý objekt do magnetického pole vstupuje.

V případě vašeho měření bude pohybujícím se nabitým objektem úzký svazek elektronů emitovaný rozžhavenou katodou a urychlený nejprve elektrickým polem mezi katodou a anodou (pro tuto elementární částici budeme nadále označovat její klidovou hmotnost  $m = m_e$  a elementární náboj, jehož je nositelem,  $Q = e$ ).

Je-li  $U_{AK}$  napětí mezi oběma elektrodami, získá každý elektron po průchodu tímto potenciálovým rozdílem kinetickou energii

$$\frac{1}{2} m v^2 = e \cdot U_{AK} \quad . \quad (5)$$

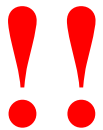
Takto urychlené elektrony pak vstupují do vyčerpaného prostoru baňky naplněné argonem o nízkém tlaku. Letící elektrony excitují při srážkách atomy tohoto inertního plynu, a ty po přechodu do základního stavu vyzařují červenofialové světlo. Tak můžeme sledovat trajektorii pohybujících se elektronů v baňce (viz obr. 1).



Obr. 1.

Není-li v baňce přítomno magnetické pole, vidíme, že se svazek elektronů pohybuje přímočaře. Necháme-li Helmholtzovými cívkami, jež obklopují baňku, procházet elektrický proud, vytvoří se v prostoru baňky prakticky homogenní magnetické pole a elektrony se začnou pohybovat po křivočaré trajektorii (šroubovici nebo kružnici). Poloměr  $R$  křivosti této trajektorie nám umožňují měřit světélkující značky uvnitř baňky.

**Pozn.:** Na aparatuře lze snadno demonstrovat zákonitosti obsažené ve vztahu (3). Při dané velikosti indukce magnetického pole poloměr  $R$  vzrůstá s rychlostí elektronů (s urychlovacím napětím  $U_{AK}$ ), naopak při dané rychlosti svazku se po zvětšení indukce magnetického pole zmenší poloměr  $R$  křivosti trajektorie svazku.



Jednoduchou úpravou vztahů (4) a (5) – proved'te si sami !!! – dostáváme pak konečný potřebný výraz pro specifický náboj elektronu

$$\boxed{\frac{e}{m_e} = \frac{2 \times U_{AK}}{(RB)^2}} \quad . \quad (6)$$

K výpočtu této důležité fyzikální veličiny schází už jen znalost velikosti  $B$  indukce magnetického pole vytvářeného průchodem proudu  $I$  Helmholtzovými cívkami. Z Biotova–Savartova–Laplaceova zákona vyplývá, že velikost indukce  $B$  magnetického pole je v takovém případě vždy úměrná proudu  $I$  procházejícímu vodičem. Platí

$$B = k \cdot I \quad , \quad (7)$$

kde veličina  $k$  závisí pouze na geometrii vodiče a magnetických vlastnostech prostředí v okolí vodiče. Tím je ale v tomto případě vzduch, jehož relativní permeabilita  $\mu_r$  je prakticky rovna jedné. Pro naše uspořádání Helmholtzových cívek pro velikost indukce  $B$  jimi vytvářeného pole platí

$$B = \frac{2\mu_0 N d^2}{\left(\sqrt{d^2 + a^2}\right)^3} \times I \quad ,$$

kde  $d$  je průměr cívek,  $N$  počet závitů v každé z nich  $a$  vzdálenost obou cívek a  $\mu_0$  permeabilita vakua ( $\mu_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$ ).

Veličina  $k$  ve vztahu (7) je tedy konstantou a je dána výrazem

$$k = \frac{2\mu_0 N d^2}{\left(\sqrt{d^2 + a^2}\right)^3} \quad .$$

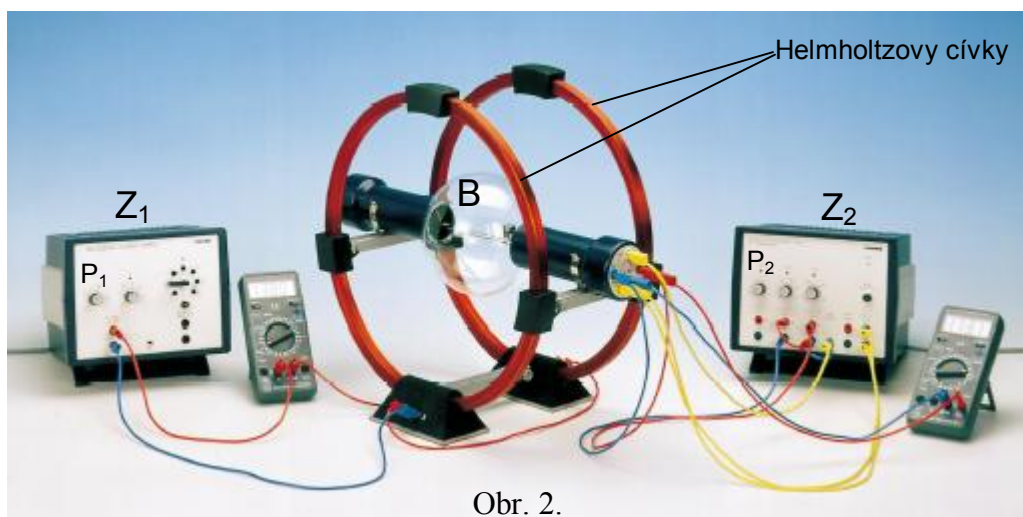
V našem případě jsou parametry Helmholtzových cívek následující:  $d = 0,4 \text{ m}$  ;  $a = 0,2 \text{ m}$  ;  $N = 154$ . Tak pro hodnotu konstanty  $k$  ve výrazu (7) dostáváme v našem případě

$$k = 6,92 \cdot 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{A}^{-1} \quad . \quad (8)$$

### Postup práce:

## **Aparatura (viz obr. 2) je již sestavena, zapojení zdrojů provede přítomný učitel !!!**

- 1) Pomocí potenciometru  $P_2$  na přední desce zdroje  $Z_2$  postupně nastavujte urychlovací napětí  $U_{AK}$  mezi katodou a anodou a tím postupně zvyšujte rychlost letících elektronů. Měření provedte postupně pro hodnoty napětí  $U_{AK} = 200 \text{ V}$ ,  $220 \text{ V}$  a  $240 \text{ V}$ . Ostatní potenciometry na zdrojích  $Z_1$  a  $Z_2$  se nastaví podle pokynů učitele.



Obr. 2.

- 2) Při každém napětí  $U_{AK}$  nastavujte pomocí potenciometru  $P_1$  na přední desce zdroje  $Z_1$  proud procházející Helmholtzovými cívkami tak, aby elektronový svazek dopadal postupně na první až čtvrtou světélkující značku v baňce  $B$ , což odpovídá poloměrům křivosti trajektorie  $R = 2$  cm, 3 cm, 4 cm a 5 cm.

**Pozor !!!** Při větších napětích  $U_{AK}$  nemusí být možné měření s nejmenšími poloměry křivosti provést!

- 3) Hodnoty napětí  $U_{AK}$  a proudů  $I$  zapisujte do následující tabulky:

Tabulka I: Pohyb elektronu v homogenním magnetickém poli

$U_{AK}$ (V)	$R = 2$ cm			$R = 3$ cm			$R = 4$ cm			$R = 5$ cm		
	$I$ (A)	$B$ (mT)	$e/m_e$ .10 <sup>-11</sup> (C.kg <sup>-1</sup> )	$I$ (A)	$B$ (mT)	$e/m_e$ .10 <sup>-11</sup> (C.kg <sup>-1</sup> )	$I$ (A)	$B$ (mT)	$e/m_e$ .10 <sup>-11</sup> (C.kg <sup>-1</sup> )	$I$ (A)	$B$ (mT)	$e/m_e$ .10 <sup>-11</sup> (C.kg <sup>-1</sup> )
200												
220												
240												

- 4) Ke každé hodnotě proudu  $I$  vypočítáme velikost indukce  $B$  magnetického pole podle vztahů (7) a (8), zapíšeme do tabulky a nakonec provedeme výpočet specifického náboje elektronu při každém měření podle rovnice (6) a rovněž zaznamenáme do tabulky. Výsledný specifický náboj stanovte jako průměrnou hodnotu všech měření s příslušnou chybou.
- 5) Vámi vypočítané hodnoty specifického náboje elektronu pak porovnejte s hodnotou tabulkovou

$$\frac{e}{m_e} \approx 1,759 \cdot 10^{11} \text{ C.kg}^{-1}$$

- 6) Na základě provedeného měření pak ověřte, že při dané rychlosti svazku elektronů je poloměr  $R$  jejich kruhové trajektorie nepřímo úměrný indukci magnetického pole vytvářeného proudem  $I$  v cívkách (viz vztah (3)). Graficky však zpracujte závislosti

$$R = f\left(\frac{1}{B}\right),$$

pro tři různá urychlovací napětí  $U_{AK} = 200$  V, 220 V a 240 V.

Tyto závislosti by vám měly vyjít jako lineární. Je totiž mnohem snazší posoudit, zda je nějaká přímka přímkou než jestli je nějaká křivka hyperbolou prvního řádu.



- 7) Ověřte rovněž skutečnost, že poloměr  $R$  kruhové trajektorie svazku elektronů je přímo úměrný jejich rychlosti  $v$ . Měření proveďte postupně pro dvě různé hodnoty indukce magnetického pole, jež odpovídají proudům  $I = 1,3$  A, a  $2,0$  A v cívkách. Naměřené a vypočítané hodnoty zapisujte do připojené tabulky, graficky pak zpracujte závislost

$$R = f(v) .$$

Tabulka II: Ověření závislosti poloměru  $R$  trajektorie na rychlosti nabitě částice

$I$ (A)	$B$ (mT)	$R = 2$ cm		$R = 3$ cm		$R = 4$ cm		$R = 5$ cm	
		$U_{AK}$ (V)	$v \cdot 10^{-6}$ (m.s <sup>-1</sup> )	$U_{AK}$ (V)	$v \cdot 10^{-6}$ (m.s <sup>-1</sup> )	$U_{AK}$ (V)	$v \cdot 10^{-6}$ (m.s <sup>-1</sup> )	$U_{AK}$ (V)	$v \cdot 10^{-6}$ (m.s <sup>-1</sup> )
1,3									
2,0									

**Po skončení měření**

**nezapomeňte vypnout digitální měřicí přístroje !!!**

# Vodič protékáný proudem v magnetickém poli

- Úkol:**
- A) Vyzkoušejte účinek magnetického pole na volně pohyblivý proudovodič s pomocí Laplaceových kolejnic.
  - B) Ověřte platnost přímé úměrnosti mezi silou působící na proudovodič v magnetickém poli, délkou vodiče a velikostí proudu. Ověřte Flemingovo pravidlo levé ruky.

**Potřeby:** Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

## Obecná část:

Sílu působící na vodič s proudem libovolného tvaru v magnetickém poli (tzv. **Ampérovu sílu**) můžeme získat integrací rovnice

$$d\mathbf{F} = I \cdot (d\mathbf{l} \times \mathbf{B}) ,$$

kde  $I$  je proud ve vodiči,  $\mathbf{B}$  magnetická indukce a  $d\mathbf{l}$  délkový element vodiče.

Sílu, kterou působí homogenní magnetické pole o indukci  $\mathbf{B}$  na úsek přímého vodiče délky  $L$  protékáný proudem  $I$  pak určuje rovnice

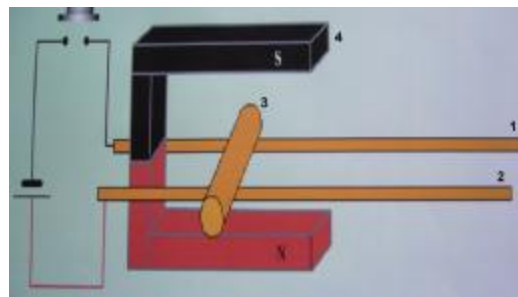
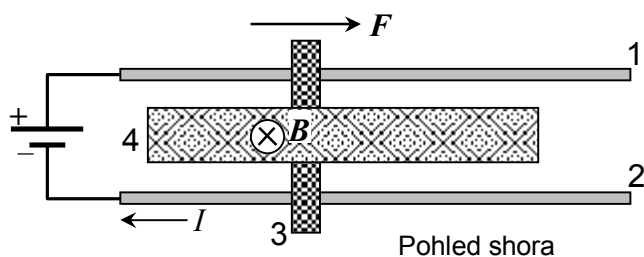
$$F = I \cdot L \cdot B \cdot \sin \alpha ,$$

kde  $\alpha$  je úhel mezi vodičem a směrem vektoru  $\mathbf{B}$  magnetické indukce.

## Postup měření:

### A) **Demonstrace účinku magnetického pole na vodič, kterým prochází elektrický proud**

Název Laplaceovy kolejnice se někdy (zvláště ve Francii) používá k označení dvou rovnoběžných vodičů (1,2), které lze připojit ke zdroji značného elektrického proudu. Přes vodiče je napříč položena volně pohyblivá elektricky vodivá kulatá tyč (3), jež uzavírá elektrický obvod. Tyč se přitom nachází mezi dvěma póly silného permanentního magnetu (4), který vytváří pole kolmo orientované k tyči.



Obr. 1. Laplaceovy kolejnice – schéma

- 1) Sestavte zařízení podle obrázku a zkontrolujte správnost připojení zdroje elektrického napětí.
- 2) Zapněte zdroj napětí a zvyšujte proud do maximální hodnoty 5 A (pozvolna, event. skokem). Pozorované účinky zaznamenejte.
- 3) Pokus opakujte s opačnou polaritou napětí i s opačným směrem vektoru  $\mathbf{B}$  magnetické indukce.
- 4) Navrhněte, k čemu by mohl být pozorovaný jev využit.



Obr. 2. Laplaceovy kolejnice se zdrojem napětí

### B) Měření velikosti síly působící na vodič s proudem v magnetickém poli

S pomocí zařízení zobrazeného na obr. 3. ověřte platnost přímé úměrnosti mezi působící Ampérovou silou a délkou vodiče, případně hodnotou proudu při konstantní magnetické indukci o velikosti  $B = 91 \text{ mT}$ .



Obr. 3. Zařízení pro zkoumání vlivu magnetického pole na proudovodič

- 1) Vodič zvolené délky připojte k nosným ramenům a vložte mezi póly magnetu umístěného na misce vah tak, aby se nacházel uprostřed.
- 2) Zapněte váhy a zaznamenejte hmotnost, kterou ukazuje displej při nulovém proudu (tento údaj odpovídá tíhové síle, již magnet právě působí na miskou vah).
- 3) Postupně zvyšujte proud až do hodnoty 5 A a zaznamenávejte údaje na displeji vah. Z rozdílů těchto hodnot a hodnoty změřené v bodě 2) pak určete příslušnou velikost Ampérovou síly.
- 4) Totéž měření proveďte s vodiči jiné délky.
- 5) Výsledky zpracujte graficky.

Ověřte platnost Flemingova pravidla levé ruky (vektor magnetické indukce směřuje od červeného pólu k bílému).

**Maximální přípustná hodnota proudu je 5 A .**