

Laboratórna úloha č. 31

Špecifický náboj elektrónu

Úloha: Určiť pomer veľkosti elektrického náboja a hmotnosti elektrónu, meraním polomeru jeho trajektórie v magnetickom poli.

Teoretický úvod

Pohyb nabitej častice v magnetickom poli závisí od pomeru jej náboja q a hmotnosti m . Je to zrejmé z pohybovej rovnice nabitej častice v magnetickom poli

$$m \frac{d\vec{v}}{dt} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (1)$$

kde \vec{v} je rýchlosť častice a \vec{B} indukcia magnetického poľa. Pomer

$$\left| \frac{q}{m} \right|$$

voláme *špecifický náboj* častice. Na jeho určenie využijeme sledovanie pohybu častice v homogénnom magnetickom poli. Keď vletí nabitá častica do takéhoto poľa, veľkosť jej rýchlosti sa nemení, lebo magnetické pole nemení kinetickú energiu častice. Mení len smer pohybu častice. Zvoľme si začiatočný smer rýchlosti $\vec{v} \perp \vec{B}$. Potom sa častica pohybuje rovnomerne po kružnici s polomerom R a z rovnice (1) dostaneme pre jej dostredivé zrýchlenie vzťah

$$\frac{v^2}{R} = \left| \frac{q}{m} \right| vB \quad (2)$$

Časticu sme urýchlili z pokoja na rýchlosť v elektrostatickým poľom s rozdielom potenciálov U_a . Zo zákona zachovania energie dostaneme rovnicu pre kinetickú energiu častice urýchlenej potenciálovým rozdielom U_a :

$$\frac{1}{2}mv^2 = |qU_a| \quad (3)$$

Spojením rovníc (2) a (3) dostaneme vzťah pre špecifický náboj častice

$$\left| \frac{q}{m} \right| = \frac{2U_a}{B^2 R^2} \quad (4)$$

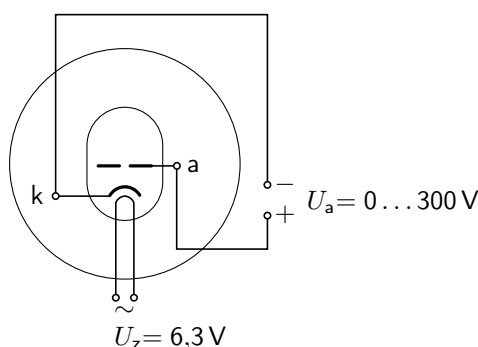
Znamená to, že na určenie špecifického náboja elektrónu treba poznať urýchlňujúce napätie U_a , veľkosť indukcie B magnetického poľa a polomer kružnice R , po ktorej sa elektrón pohybuje. Absolútnu hodnotu náboja elektrónu označujeme e .

Metóda merania a opis aparátúry

Jednoduchý vzťah (4) pre výpočet špecifického náboja vyžaduje meraciu aparátúru, ktorá

- vytvorí zväzok elektrónov, urýchlených v elektrickom poli,
- vytvorí v dostatočne veľkom priestore homogénne magnetické pole,
- umožní pozorovanie zväzku elektrónov pohybujúcich sa v magnetickom poli.

Aparátúra má dve podstatné časti. Prvou je sklená banka naplnená argónom s veľmi nízkym tlakom ($p = 10^{-1}$ Pa), čo umožňuje elektrónom pohybovať sa v banke po pomerne dlhej dráhe bez zrážok s atómami plynovej náplne, na druhej strane pri zrážke sa plyn ionizuje a pri prechode do pôvodného stavu vyžaruje svetlo. Takýmto spôsobom možno nepriamo pozorovať trajektóriu elektrónového zväzku. Vedľajším priaznivým vplyvom plynovej náplne je fokusácia elektrónového zväzku v dôsledku vytvorenej stopy kladných iónov plynu. Stopu elektrónového zväzku, vytvorenú ionizovaným plynom, možno dobre pozorovať pri zatemnení trubice. Banka je konštruovaná tak, aby poskytovala dostatok elektrónov



Obr. 1: Zjednodušená schéma elektrického zapojenia meracej aparátúry: a - anóda, k - katóda, U_a - potenciál anódy voči katóde, U_z - napätie žeraviaceho obvodu katódy. Kružnica v schéme symbolizuje Helmholtzove cievky.

na zviditeľnenie celej kruhovej trajektórie elektrónov. Elektróny vyletujú zo žeravenej katódy a sú urýchľované elektrickým poľom k anóde. Koncovú rýchlosť elektrónového zväzku riadime veľkosťou anódového napätia U_a , čo je rozdiel potenciálov medzi anódou a katódou. Zväzok elektrónov sa dá zaostriť nastavením vhodného napätia U_g medzi katódou a mriežkou umiestnenou medzi anódou a katódou. V súčasnej konfigurácii je však táto možnosť deaktivovaná, keďže neposkytovala adekvátne zlepšenie. Formálne to znamená, že budeme pracovať pri $U_g = 0$ a mriežka ani nie je v schéme na obrázku zakreslená.

Druhou podstatnou časťou aparátúry sú Helmholtzove cievky vytvárajúce magnetické pole v priestore banky. Podrobne sú opísané v návode k laboratórnej úlohe č. 25. Veľkosť magnetickej indukcie B možno meniť prúdom I_H v cievkach:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 I_H N}{R_H} \equiv G I_H \quad (5)$$

kde N je počet závitov v jednej cievke a R_H je polomer cievok. Symbolom G sme si označili konštantu, ktorej hodnota je daná len polomerom a počtom závitov Helmholtzových cievok:

$$G = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 N}{R_H} \quad (6)$$

Postup práce

Môžeme definovať a použiť niekoľko základných režimov meraní:

1. Meranie pri *konštantnom anódovom napätí* U_a . Po nastavení tohto napätia meníme len prúd I_H v Helmholtzových cievkach a sledujeme, ako sa mení priemer trajektórie elektrónov $2R$.
2. Meranie pri *konštantnom priemere* trajektórie $2R$. Po voľbe konkrétnej hodnoty tohto priemeru meníme napätie U_a a prúd I_H tak, aby sme zachovávali konštantné $2R$.
3. Meranie pri *konštantnom prúde* I_H (teda pri konštantnej indukcii magnetického poľa B). Pri tomto meraní po nastavení zvolenej hodnoty I_H meníme napätie U_a a sledujeme, ako sa mení priemer $2R$.

Experimentovanie s meraním v týchto režimoch ukazuje, že najpresnejšie výsledky dostávame pri najvyšších urýchľovacích napätiach. Tento poznatok nie je prekvapujúci, pretože pri vysokých urýchleniach sa stáva relatívny vplyv rôznych nežiadúcich faktorov (nezahrnutých do teoretického popisu) menší. Preto budeme merať v *režime konštantného anódového napätia*¹, teda v režime 1. Zvolíme si dostatočne vysokú hodnotu, napr. jednu z intervalu 150 – 200 V. Prúd v Helmholtzových cievkach meníme s krokom 0,1 – 0,2 A. Pri každej hodnote prúdu I_H zmeriame priemer $2R$ trajektórie elektrónu. Merané hodnoty zapisujeme do tabuľky. Celkový počet meraní má byť 10 – 20.

Meranie v režime konštantného urýchľovacieho napätia môžeme zopakovať aj pri inej hodnote U_a , tentoraz napr. z intervalu 250 – 300 V; v protokole je miesto na zápis meraní pre dve rôzne hodnoty U_a .

Zo vzťahov uvedených v odsekoch vyššie vyplýva, že medzi priemerom trajektórie $2R$ a prevrátenou hodnotou prúdu I_H platí lineárna závislosť

$$2R = k \frac{1}{I_H} \quad (8)$$

¹Pokiaľ učiteľ nevyžaduje inak. Alternatívou k postupu uvedenom v hlavnom texte je napr. meranie pri udržiavanom konštantnom priemere trajektórie elektrónov $2R$ (režim 2). Takéto meranie robíme pri desiatich napätiach U_a v intervale 100 – 300 V. Špecifický náboj elektrónu potom vypočítavame zo vzťahu

$$\mathcal{S} \equiv \frac{e}{m} = \frac{2U_a}{G^2 I_H^2 R^2} \quad (7)$$

alebo ešte vhodnejšie pomocou lineárnej regresie závislosti $U_a(I_H^2)$. Tento postup môžeme zopakovať pre niekoľko rôznych hodnôt priemeru $2R$.

kde smernica k má vyjadrenie

$$k = \frac{2}{G} \sqrt{\frac{2U_a}{\mathcal{S}}} \quad (9)$$

Symbolom \mathcal{S} sme si označili hľadaný špecifický náboj, teda $\mathcal{S} = e/m$. Namerané usporiadané dvojice $(1/I_H, 2R)$ získané v režime 1 spracujeme lineárnou regresiou typu $y = kx$. Regresia lineárnej závislosti $2R$ od $1/I_H$ nám poskytne hodnotu k , z ktorej potom vyjadríme hľadaný špecifický náboj:

$$\mathcal{S} \equiv \frac{e}{m} = \frac{8U_a}{(kG)^2} \quad (10)$$

Ak sme v režime 1 merali pri dvoch rôznych urýchľovacích napätiach U_a , tak je potrebné spraviť dve lineárne regresie spomenutého typu. Výsledky týchto regresíí (smernica k , smerodajná odchýlka smernice s_k , koeficient determinovanosti $\mathcal{R}_{\text{det}}^2$) je potrebné bez zaokrúhľenia (apoň 5 platných číslic) zapísať do grafu. Smernice k zapíšeme aj do prvej tabuľky v protokole.

Pre výpočty budeme potrebovať polomer Helmholtzových cievok, ktorý je $R_H = 0,15$ m a počet závitov jednej cievky $N = 130$. Permeabilita vákua, ktorá tiež do vzťahov vstupuje, je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ V} \cdot \text{s} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$.

Meno:

Kružok:

Dátum merania:

Protokol laboratórnej úlohy č. 31

Špecifický náboj elektrónu

Stručný opis metódy merania

Vzťahy, ktoré sa používajú pri meraní

Prístroje a pomôcky

Zhrnutie výsledkov a porovnanie s tabuľkovou hodnotou

Hlavný výsledok merania	$\frac{e}{m} =$
Tabuľková hodnota špecifického náboja elektrónu	$\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{tab}} = 1,759 \cdot 10^{11} \text{ C/kg}$
Relatívna chyba merania	$\frac{\frac{e}{m} - \left(\frac{e}{m}\right)_{\text{tab}}}{\left(\frac{e}{m}\right)_{\text{tab}}} \cdot 100 \% =$

Prílohy

- graf podľa inštrukcií učiteľa

Zhodnotenie výsledkov**Dátum odovzdania protokolu:****Podpis študenta:****Hodnotenie a podpis učiteľa:**