

# Určení měrného náboje elektronu z trajektorie ve zkřížených polích

## 1. Úvod

Měrným nábojem elektronu  $e/m_e$  rozumíme poměr absolutní hodnoty jeho náboje  $e$  a hmotnosti  $m_e$ . Jde o důležitou veličinu, kromě jiného například i pro určení hmotnosti elektronu, která se neměří přímo; je však možné ji z měrného náboje  $e/m_e$  jednoduše určit při znalosti velikosti náboje  $e$ . Problematika přímého měření náboje elektronu má přitom svou specifickou historii (viz například [1]); dnešní užívaná hodnota (podle adjustace z r. 1986 [2]) činí  $e = 1,602\,177\,33(49) \cdot 10^{-19}$  coulombu.

Klasické metody pro měření měrného náboje elektronu vycházejí ze studia pohybu elektronu v elektrickém a magnetickém poli. První spolehlivou hodnotu  $e/m_e = 1,7 \cdot 10^{11}$  C/kg získal roce 1897 objevitel elektronu J. J. Thomson na zařízení velmi podobném dnešní obrazovce, kombinující elektrické a magnetické vychylování elektronového svazku. Metody založené na studiu pohybu volných elektronů v elektrickém a magnetickém poli byly dále zdokonalovány a v prvních desetiletích 20. století přinesly značné zpřesnění výsledku.

## 2. Princip určení $e/m_e$ v tomto uspořádání

Tato aparatura pro studium dráhy elektronového svazku ve zkřížených polích je založena na možnosti sledovat dráhu elektronového svazku ve zředěném plynu. Experimentální prostor, tvořený skleněnou baňkou o průměru přibližně 170mm, byl po vyčerpání na vysoké vakuum naplněn argonem pod tlakem přibližně 0,1 Pa. Tento zředěný inertní plyn plní významnou úlohu při fokusaci a zviditelnění elektronového svazku, který se na své dráze sráží s molekulami plynu, ionizuje je a argon při následné rekombinaci vydává luminiscenční záření. Přitom většina pomalých iontů vytváří vlákno podél dráhy elektronového svazku a svým kladným nábojem významně přispívá k jeho fokusaci.

Ve středu baňky jsou na nosnících připevněny příčky. Jejich vzdálenosti od ústí zdroje elektronového svazku jsou 40, 60, 80 a 100mm a na příčkách jsou naneseny fluorescenční vrstvy, které při dopadu elektronového paprsku světélkují.

Na elektron, pohybující se rychlostí  $\mathbf{v}$  v magnetickém poli s indukcí  $\mathbf{B}$  působí síla

$$\mathbf{F} = e \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

V naší aparatuře pro studium dráhy elektronového svazku ve zkřížených polích je magnetické pole tvořeno Helmholtzovými cívkami, které poskytují dostatečně homogenní magnetické pole se směrem, rovnoběžným s osou cívek. Elektrony, emitované žhavenou katodou, jsou urychleny napětím  $U$  na rychlost  $v$  (počáteční energii elektronů při opuštění katody přitom zanedbáváme), pro niž ze zákona zachování energie plyne:

$$\frac{1}{2} m_e v^2 = eU \quad (1)$$

Odtud lze vyjádřit rychlost  $v$  :

$$v = \frac{\sqrt{2eU}}{\sqrt{m_e}} \quad (2)$$

Urychlovací napětí  $U$  je součtem dvou nezávisle nastavitelných napětí  $U_1$  a  $U_2$ , přivedených na fokusační elektrody. Při vhodném poměru napětí  $U_1$  a  $U_2$  je na výstupu

elektronového zdroje úzký zkolimovaný paprsek, kolmý na magnetické pole. Síla, která pak na elektronový svazek působí, má velikost

$$F = e v B \quad (3)$$

a je kolmá na vektor rychlosti i magnetického pole. Svazek elektronů proto zakřivuje po kruhové dráze s poloměrem  $r$  :

$$F = m_e \frac{v^2}{r} \quad (4)$$

Ze vztahů (2) a (3) dostáváme

$$v = \frac{e}{m_e} B r \quad (5)$$

Porovnáním (2) a (5) dostaneme

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2 U}{r^2 B^2} \quad (6)$$

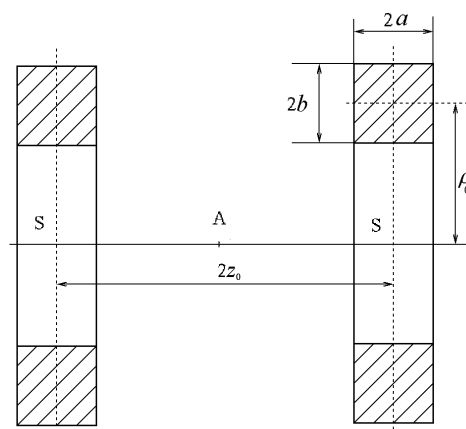
Pro určení specifického náboje elektronu tedy potřebujeme určit urychlující napětí  $U$  potřebné k tomu, aby v magnetickém poli o indukci  $B$  byl poloměr kruhové dráhy elektronového svazku  $r$ .

### 3. Vlastnosti použitého zdroje magnetického pole.

Tímto zdrojem je dvojice stejných cívek protékaných proudem  $I_{\text{mag}}$  v souhlasném směru. Ve známém Helmholtzově uspořádání, kdy vzájemná vzdálenost rovin symetrie obou cívek  $2z_0$  je rovna střednímu poloměru  $\rho_0$  jejich vinutí (viz obr. 1), vytváří cívky pozoruhodně homogenní pole v okolí středového bodu „A“ na jejich společné ose za předpokladu, že rozměry  $a$ ,  $b$  vinutí jsou zanedbatelné proti poloměru  $\rho_0$ . Pro magnetickou indukci  $B$  v bodě „A“ pak platí vztah

$$B = \frac{8\mu_0}{5\sqrt{5}} \frac{N I_{\text{mag}}}{\rho_0}, \quad (7)$$

v němž  $N$  značí počet závitů jedné cívky. Homogenita pole Helmholtzových cívek v okolí středového bodu „A“ ve směru jejich společné osy je diskutována např. v [2]. Z údajů zde uváděných plyne, že v intervalu délky  $0,1 \rho_0$  symetricky položeném vůči středovému bodu „A“, se magnetické pole liší o méně než o 0,01 % hodnoty v bodě „A“, určené podle vzorce (7)!



Obr. 1: Parametry magnetizačních cívek

Pro použité provedení cívek lze rozměry  $a$ ,  $b$  proti poloměru  $\rho_0$  zanedbat. Výpočet, který k těmto rozměrům přihlíží, je uveden např. ve studijním textu k úloze A13 [3].

Obě shodně navinuté cívky jsou zkonstruovány tak, aby bylo možné snadno určit počet jejich závitů. Každá z cívek je navinuta z měděného drátu ve 14 vrstvách po 11 závitěch, celkem tedy je počet závitů  $N = 154$ .

Střední poloměr  $\rho_0$  je 200 mm, indukce při maximálním proudu  $I_{\text{mag}} = 5\text{ A}$  dosahuje 3,5 mT.

### **Literatura**

- [1] J. Brož, V. Roskovec: Základní fyzikální konstanty, SPN, Praha 1980
- [2] J. Brož a kol.: Základy fyzikálních měření I, SPN, Praha 1983
- [3] [http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt\\_413.pdf](http://physics.mff.cuni.cz/vyuka/zfp/txt_413.pdf)

Úloha byla vybudována s podporou projektu 992/2009 FRVŠ.