

Měrný náboj elektronu

Miroslav Frantes¹, Tomáš Hejda², Lukáš Mach³,
Ondřej Maršálek⁴, Michal Petera⁵

¹miro11@seznam.cz; Gymnázium Benešov,
²tohe@centrum.cz; Gymnázium Christiana Dopplera, Praha 5
³machweb@seznam.cz; Gymnázium Kladno-Sítná
⁴marsaleko@gytool.cz; Gymnázium Olomouc-Hejčín
⁵mpj@centrum.cz; Gymnázium Voděradská, Praha 10

supervizor: Marie Svobodová, FJFI ČVUT Praha

Abstrakt

Měrný náboj elektronu je jednou ze základních fyzikálních konstant a přesné určení jeho hodnoty je nutné pro mnoho fyzikálních měření. Měrný náboj elektronu je možno určit z účinků magnetického pole na pohybující se elektrony. Lze použít magnetického pole podélného či příčného ke směru pohybu elektronového svazku. My jsme zvolili populárnější metodu — příčné magnetické pole.

1 Motivace

Jak už jsme naznačili, přesná hodnota měrného náboje elektronu je důležitá z důvodu jejího dalšího použití. Např. při Millikanově pokusu je změřen náboj elektronu, což nám umožňuje určit také jeho hmotnost. Zároveň se jedná o velmi zajímavý a vizuálně poutavý pokus. Urychlené elektrony ionizují zředěný plyn, který podél trajektorie elektronu modře světélkuje.

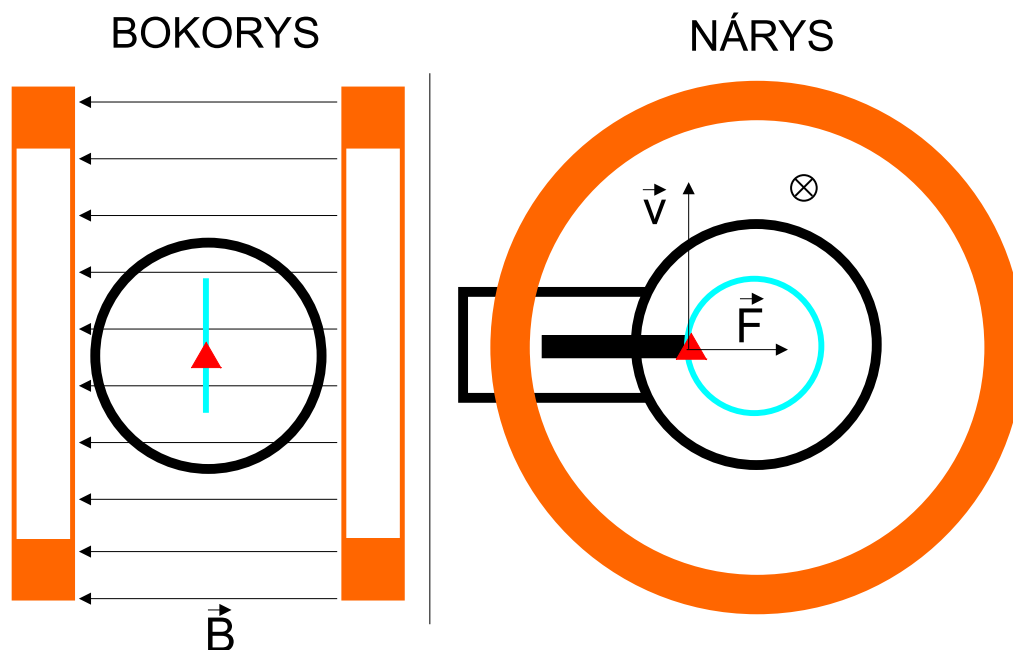
Hodnotu měrného náboje elektronu poprvé změřil J. J. Thompson roku 1897.

2 Aparatura

Při pokusu jsme použili následující vybavení.

- zdroje napětí (6,3 V \sim , 0-6 A =, 0-500 V =)
- Helmholtzovy cívky a katodová trubice vyráběné firmou Leybold-Heraeus
- měřící zařízení (zrcátko + stupnice)
- 2 tyčové magnety
- fotoaparát

Helmholtzovy cívky jsme připojili ke stabilizovanému stejnosměrnému zdroji s proudem volitelným v rozsahu od 0 do 6 A. Nepřímé žhavení katody jsme připojili ke zdroji 6,3 V. Urychlovací anodu jsme připojili ke zdroji s napětím volitelným v rozsahu od 0 do 500 V. Zapojení jsme provedli podle schématu dodaného výrobcem sady. Baňka katodové trubice je umístěna uprostřed Helmholtzových cívek tak, aby v místě pokusu bylo zajištěno homogení magnetické pole. Elektronů jsou z katody urychlovány ve směru kolmém na vektor magnetického pole cívek. Zapojení cívek je třeba volit tak, aby výsledná dostředivá síla směřovala do středu baňky.



HELMHOLTZOVY CÍVKY, TRAJEKTORIE POHYBU EL., ZDROJ ELEKTRONŮ, SKLENĚNÁ BAŇKA

Obrázek 1: Schéma aparatury

3 Teorie

Elektrony urychlované elektrickým polem získají energii

$$E = eU$$

Jedná se o kinetickou energii

$$E_k = \frac{1}{2}mv^2$$

Vzorce sloučíme a vyjádříme výslednou rychlost elektronů po urychlení

$$v = \sqrt{2U \frac{e}{m}} \quad (1)$$

Rychlost elektronů po termoemisi z katody je ve srovnání s touto rychlostí malá, a proto ji můžeme zanedbat. Zároveň je však tato rychlost řádově 2–3 % rychlosti světla, tudíž nebudeme uvažovat relativistické vztahy.

Na elektron pohybující se pouze v magnetickém poli kolmo k jeho magnetickým indukčním čarám působí síla o velikosti

$$F_L = evB$$

Tato síla působí v každém okamžiku kolmo na směr pohybu elektronů i na směr magnetických indukčních čar, působí proto jako síla dostředivá podle vztahu

$$F_d = ma_d = m \frac{v^2}{r}$$

Síla magnetická se rovná síle dostředivé a po sloučení obou vztahů a dosazení rychlosti z rovnice (1) dostaneme vztah pro hodnotu měrného náboje elektronu

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 r^2}$$

Magnetická indukce Helmholtzových cívek je přímo úměrná součinu protékajícího proudu I a konstanty k dané geometrií cívek. V našem případě je hodnota konstanty

$$k = 7,81 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{A}^{-2}$$

Výsledný vztah pro měrný náboj elektronu tedy je

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2U}{k^2 I^2 r^2}$$

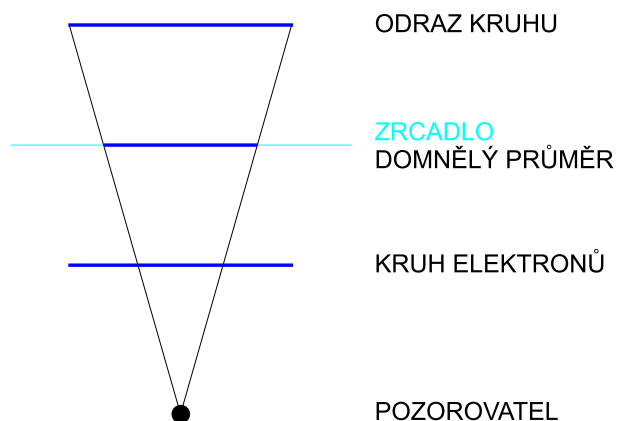
Urychlovací napětí i proud v cívkách nastavíme a průměr kruhové trajektorie elektronů změříme pomocí měřítka, které je součástí sady.

4 Měření a pozorování

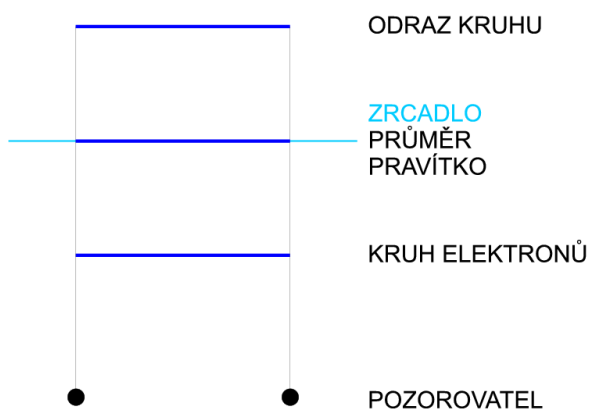
Postupně nastavujeme zvolené hodnoty proudu v cívkách (0,75–2 A) a pro každou hodnotu volíme tři různé hodnoty urychlovacího napětí (celkem v rozsahu 80–200 V). Poloměr kružnice změříme a všechny hodnoty zaznamenáme do tabulky. Pro každé tři údaje vypočítáme hodnotu e/m a vypočteme průměr všech zjištěných hodnot.

V první části pokusu jsme zvolili nesprávný postup měření průměru kruhové trajektorie, což ilustruje přiložený náčrt. Zjistili jsme však, že při pohledu z jednoho místa není možné průměr správně změřit. Proto jsme navrhli novou metodu měření průměru kružnice, která je znázorněna na druhém náčrtu.

Pokud není směr elektronů zcela kolmý k vektoru magnetické indukce, mají elektrony složku rychlosti rovnoběžnou se směrem magnetické indukce. Tato složka není magnetickým polem ovlivněna a elektrony opisují šroubovici. Pokud navíc přidáme magnetické pole tyčových magnetů z různých směrů, trajektorie elektronů může dosáhnout značně komplikovaných tvarů. Pomocí jistých konfigurací lze také dosáhnout efektu magnetického zrcadla či magnetické pasti.



Obrázek 2: Nesprávný postup



Obrázek 3: Správný postup

5 Výsledky

V první části experimentu (měření 1–60), kdy jsme používali nevhodnou metodu měření průměru kružnice, jsme získali hodnotu $e/m = 2,91 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$. Po úpravě metody měření (měření 61–72) jsme získali hodnotu

$$e/m = 1,65 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$$

což je v dobré shodě s hodnotou uváděnou v literatuře, která je $e/m = 1,76 \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$.

	$U[V]$	$I[A]$	$d_1[m]$	$d_2[m]$	$r[m]$	$e/m [10^{11} C \cdot kg^{-1}]$
1.	080	0,75	0,095	0,173	0,390	3,0659
2.	100	0,75	0,095	0,187	0,460	2,7547
3.	120	0,75	0,095	0,198	0,515	2,6373
4.	120	1,00	0,095	0,169	0,370	2,8741
5.	140	1,00	0,095	0,175	0,400	2,8690
6.	160	1,00	0,095	0,182	0,435	2,7724
7.	120	1,50	0,098	0,143	0,225	3,4543
8.	140	1,50	0,098	0,147	0,245	3,3989
9.	160	1,50	0,099	0,151	0,260	3,4492
10.	160	2,00	0,090	0,131	0,205	3,1209
11.	180	2,00	0,091	0,139	0,240	2,5616
12.	200	2,00	0,098	0,142	0,220	3,3872
13.	080	0,75	0,091	0,176	0,425	2,5817
14.	100	0,75	0,091	0,194	0,515	2,1978
15.	120	0,75	0,091	0,202	0,555	2,2709
16.	120	1,00	0,091	0,174	0,415	2,2846
17.	140	1,00	0,091	0,182	0,455	2,2173
18.	160	1,00	0,092	0,190	0,490	2,1850
19.	120	1,50	0,090	0,141	0,255	2,6893
20.	140	1,50	0,089	0,145	0,280	2,6023
21.	160	1,50	0,090	0,150	0,300	2,5907
22.	160	2,00	0,089	0,134	0,225	2,5907
23.	180	2,00	0,089	0,131	0,210	3,3458
24.	200	2,00	0,088	0,140	0,260	2,4252
25.	080	0,75	0,105	0,175	0,350	3,8067
26.	100	0,75	0,105	0,188	0,415	3,3846
27.	120	0,75	0,105	0,200	0,475	3,1002
28.	120	1,00	0,100	0,165	0,325	3,7251
29.	140	1,00	0,103	0,171	0,340	3,9709
30.	160	1,00	0,103	0,178	0,375	3,7306
31.	120	1,50	0,105	0,140	0,175	5,7101
32.	140	1,50	0,105	0,144	0,195	5,3654
33.	160	1,50	0,105	0,148	0,215	5,0441
34.	160	2,00	0,091	0,134	0,215	2,8373
35.	180	2,00	0,091	0,137	0,230	2,7892
36.	200	2,00	0,090	0,141	0,255	2,5212

	$U[V]$	$I[A]$	$d_1[m]$	$d_2[m]$	$r[m]$	$e/m [10^{11} C \cdot kg^{-1}]$
37.	080	0,75	0,097	0,174	0,385	3,1461
38.	100	0,75	0,097	0,187	0,450	2,8785
39.	120	0,75	0,097	0,198	0,505	2,7428
40.	120	1,00	0,092	0,165	0,365	2,9534
41.	140	1,00	0,092	0,172	0,400	2,8690
42.	160	1,00	0,092	0,180	0,440	2,7098
43.	120	1,50	0,097	0,145	0,240	3,0360
44.	140	1,50	0,097	0,150	0,265	2,9052
45.	160	1,50	0,097	0,153	0,280	2,9740
46.	160	2,00	0,091	0,135	0,220	2,7098
47.	180	2,00	0,091	0,137	0,230	2,7892
48.	200	2,00	0,091	0,141	0,250	2,6231
49.	080	0,75	0,097	0,176	0,395	2,9888
50.	100	0,75	0,097	0,186	0,445	2,9436
51.	120	0,75	0,102	0,200	0,490	2,9133
52.	120	1,00	0,095	0,174	0,395	2,5218
53.	140	1,00	0,095	0,180	0,425	2,5414
54.	160	1,00	0,095	0,181	0,430	2,8373
55.	120	1,50	0,094	0,142	0,240	3,0360
56.	140	1,50	0,094	0,147	0,265	2,9052
57.	160	1,50	0,094	0,151	0,285	2,8706
58.	160	2,00	0,075	0,153	0,390	0,8623
59.	180	2,00	0,072	0,158	0,430	0,7980
60.	200	2,00	0,070	0,155	0,425	0,9076
61.	200	2,00	0,089	0,152	0,315	1,6522
62.	180	2,00	0,089	0,150	0,305	1,5861
63.	160	2,00	0,089	0,146	0,285	1,6147
64.	160	1,50	0,089	0,161	0,360	1,7991
65.	140	1,50	0,089	0,160	0,355	1,6188
66.	120	1,50	0,089	0,155	0,330	1,6058
67.	160	2,00	0,089	0,145	0,280	1,6729
68.	180	2,00	0,089	0,148	0,295	1,6954
69.	200	2,00	0,089	0,153	0,320	1,6010
70.	120	1,00	0,089	0,188	0,495	1,6058
71.	100	1,00	0,089	0,180	0,455	1,5838
72.	080	1,00	0,089	0,167	0,390	1,7246

Poděkování

Chtěli bychom poděkovat organizátorům Fyzikálního týdne, zvláště pak panu Vojtěchu Svobodovi za poskytnutí počítače, práci přesčas i za motivaci k revizi postupu a k zopakování pokusu. Také bychom chtěli poděkovat našemu supervisorovi slečně Marii Svobodové.

Reference

- [1] Douglas Early and Conley Stutz: *Measurement of e/m by Measuring Radius of Path in Magnetic Field* <http://www.bradley.edu/las/phy/labs/202lab/m.html>
- [2] Kolektiv katedry fyziky: *Fyzikální praktikum II pp.127-132, Ediční středisko ČVUT, 1989*
- [3] prof. Ing. Zdeněk Janout CSc.: *přednáška pro účastníky Fyzikálního týdne 2002*