



Jméno: **Michal Červeňák** Kolega: Ondřej Glac
Kruh: **Útorok** Číslo skup.: 1
Měřeno: **14.3.2017** Zpracování: 4 h Klasifikace:

1 Pracovní úkol

1. DÚ: Odvoďte vztah (15), spočtěte β pro $U = 100$ V (dosazujte energii v jednotkách keV!) a diskutujte, zda je korektní považovat elektrony v této úloze za nerelativistické.
2. DÚ: Odvoďte vztahy (17) a (19) (stačí ponechat v domácí přípravě).
3. Změřte měrný náboj elektronu působením podélného magnetického pole. Měření proveďte pro různé hodnoty urychlovacího napětí U v rozmezí 750 až 1250 V. Pomocné napětí na A1 (Obr. 7) volte 140 V. Hodnotu e/me určete fitováním závislosti (17) s errorbary.
4. Změřte měrný náboj elektronu působením kolmého magnetického pole. Naměřte několik dvojic urychlovacích napětí U (v rozsahu do 300 V) a magnetizačního proudu I (v rozsahu do 4 A). Hodnotu e/me určete fitováním závislosti (19) s errorbary.
1. DÚ: Odvoďte vztah (10) pro výpočet náboje kapky.
2. Proveďte Millikanův experiment pro alespoň deset kapiček oleje. Výsledky zpracujte formou grafu Q na r a určete elementární náboj.
3. Z výsledků úlohy 3a (Měrný náboj elektronu) a této stanovte hmotnost elektronu, vyjádřete v jednotkách keV/c^2

2 Teória

2.1 Meranie náboja pozdĺžnym magnetickým poľom

Závislosť urychľovacieho napätia U na magnetizačnom prúde I môžeme vyjadriť ako

$$U(I^2) = \frac{z^2 e \mu_0^2 N^2}{8 m_e \pi^2 l^2} I^2, \quad (1)$$

$$U(I^2) = A I^2, \quad (2)$$
$$\frac{e}{m_e} = 8A \left(\frac{\pi^2 l^2}{z^2 \mu_0^2 N^2} \right),$$

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Wb} \cdot \text{A}^{-1}\text{m}^{-1}$ je permeabilita vákua, N je počet závitov, l je dĺžka solenoidu a A je smernica fitu.

2.2 Meranie náboja kolmým magnetickým poľom

V tomto prípade závislosť urýchľovacieho napätia U na magnetizačnom prúde I môžeme vyjadriť ako

$$U(I^2) = \frac{e8d^2\mu_0^2N^2}{125m_eR^2}I^2, \quad (3)$$

$$\frac{e}{m_e} = A \left(\frac{125R^2}{8d^2\mu_0^2N^2} \right), \quad (4)$$

kde $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{Wb} \cdot \text{A}^{-1}\text{m}^{-1}$ je permeabilita vákua, N je počet závitov, d je priemer dráhy trajektórie, R je polomer cievok a A je smernica fitu.

2.3 Millikanov experiment

Polomer častice r od jed zostupnej rýchlosti určíme zo vzťahu

$$r = \sqrt{\frac{9\eta v_k}{2g(\varrho_{\text{olej}} - \varrho_{\text{vzd}})}}, \quad (5)$$

kde ϱ_{olej} a ϱ_{vzd} sú hustoty, η je dynamická viskozita vzduchu, v_k je rýchlosť poklesu danej kvapky a g je tiažové zrýchlenie.

Po zahrnutí všetkých síl pôsobiacich na kvapku a Cunninghamovej korekcie dostávame vzťah pre výpočet náboja kvapky oleja

$$Q = E \left(\frac{6\pi\eta}{f_c^{3/2}} (v_k + v_s) r \right), \quad (6)$$

kde v_k a v_s sú rýchlosti pre zostupný a vzostupný pohyb, η je dynamická viskozita vzduchu, f_c je Cunninghamov korekčný faktor, pre ktorý platí

$$f_c = 1 + \frac{6.18 \cdot 10^{-5}}{rp},$$

kde p je atmosferický tlak v torroch a r je polomer kvapky.

2.3.1 Spracovanie chýb merania

Označme $\langle t \rangle$ aritmetický priemer nameraných hodnôt t_i , a Δt hodnotu $\langle t \rangle - t$, pričom

$$\langle t \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i, \quad (7)$$

a chybu aritmetického priemeru

$$\sigma_0 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (t_i - \langle t \rangle)^2}{n(n-1)}}, \quad (8)$$

pričom n je počet meraní.

3 Pomôcky

Regulovateľné zdroje napätí: 300 V a 2 kV, regulovateľný zdroj proudu 10 A, zdroj striedavého napätí 6,3 V, ampérmetr, voltmetr, obrazovka se solenoidem, katodová trubice, Helmholtzovy cívky, aparatura na měření průměru elektronového svazku s dřevěnými posuvnými měřidly a zástěnou, tyčový a podkovovitý permanentní magnet. Millikanův přístroj HELAGO 559 412, napájecí jednotka HELAGO 559 421, 2x elektronické stopky HELAGO 313 033, vodiče, olej.

4 Postup merania

4.1 Meranie náboja pozdĺžnym magnetickým poľom

1. Podľa obrázku Obr. 7 [1] bol zostavený obvod.
2. Žhaviace napätie boli nastavené na 1 kV
3. postupne pre hodnoty z urýchľovacieho napätia z rozsahu 100–300 V bol nájdený taký prúd aby sa obraz oproti stavu keď neprechádza žiadne prúd zrotoval. Hodnoty boli zapísané

4.2 Meranie náboja kolmým magnetickým poľom

1. Obvod bol zostavený podľa Obr. 8 [1]
2. Bolo zapojené žhaviace napätie a privedený prúd do Helmholtzových cievok
3. Bol nastavený magnetizačný prúd a urýchľovacie napätie tak aby bol zväzok viditeľný a merateľný jeho polomer.
4. postupnou zmenou napätia a prúdu sme udržiavali jeho polomer(priemer) a pri tom zaznamenávali I a U

4.3 Millikanov experiment

1. Podľa obrázku Obr. 1 a Obr. 2 [2] bol zostavený obvod.
2. Napätie bolo nevolené na $U = 500$ V
3. Do aparatury bola vháňané nabité olejové kvapky

4. Vždy bola vybraná jedna častica a pre ňu boli pozorované (stopované) 2 prechody hor a 2 dole

5 Výsledky merania

5.1 Meranie náboja pozdĺžnym magnetickým poľom

Namerané hodnoty napätia U a prúdu I sú v tabuľke Tab. 1 a vynesené do grafu Obr. 1. Z fitu z obrázku Obr. 1 dostávame hodnotu $U(I^2) = (17,7 \pm 8,0) I^2 + 4,9 \pm 95,4$, z ktorej za použitia vzťahu 1, 2 a 8 dostávame hodnotu $e/m_e = 6,8 \pm 3,3 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}$, pričom

$$\mu = 4\pi 10^{-7} \text{ Wb} \cdot \text{A}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}, N = 174[1], z = 0,381 \text{ m}[1], z = 0,249 \text{ m}[1].$$

$\frac{U}{[\text{V}]}$	$\frac{I}{[\text{A}]}$
135	3
200	3,1
275	3,3
300	3,6
225	3,7
275	4
150	3,5
125	2,9
100	—

Tab. 1: Namerané hodnoty napätia U a prúdu I , pri ktorom nastala jedna otáčka zväzku.

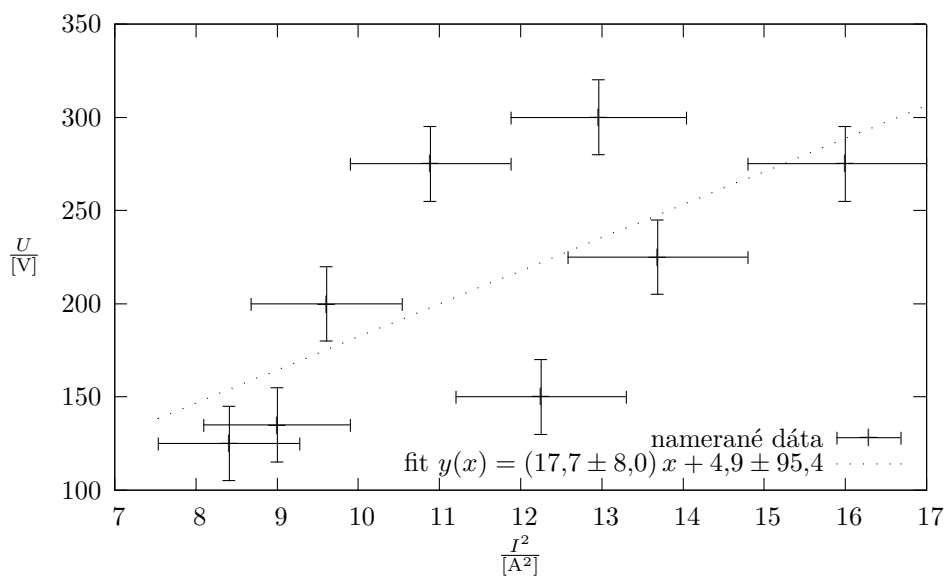
5.2 Meranie náboja kolmým magnetickým poľom

Namerané hodnoty priemeru d od napätia U a prúdu I boli vynesené do tabuľky 2. Následne boli vynesené do grafu Obr. 2 a z hodnoty fitu $U(I^2) = (94,0 \pm 3,2) I^2 + 17,1 \pm 6,7$ a pomocou vzťahov 3, 4a 8 bola vypočítaná hodnota e/m_e ,

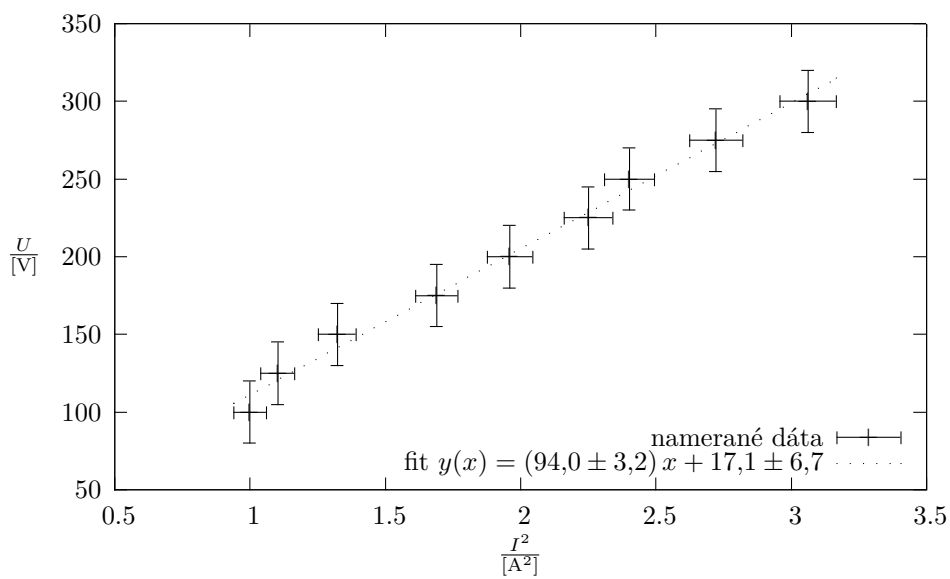
$$\frac{e}{m_e} = (1,12 \pm 0,41) \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1},$$

pričom

$$N = 130[1], R = 15 \text{ cm}[1].$$



Obr. 1: Závislosť napätia U na prúde I^2 preložená funkciou $U(I^2) = (17,7 \pm 8,0) I^2 + 4,9 \pm 95,4$



Obr. 2: Závislosť napätia U na prúde I^2 preložená funkciou $U(I^2) = (94,0 \pm 3,2) I^2 + 17,1 \pm 6,7$.

$\frac{U}{\text{[V]}}$	$\frac{I}{\text{[A]}}$	$\frac{d}{\text{[cm]}}$
100	1	$10,5 \pm 0,1$
125	1,05	$10,5 \pm 0,1$
150	1,15	$10,5 \pm 0,1$
175	1,3	$10,5 \pm 0,1$
200	1,4	$10,5 \pm 0,1$
225	1,5	$10,5 \pm 0,1$
250	1,55	$10,5 \pm 0,1$
275	1,65	$10,5 \pm 0,1$
300	1,75	$10,5 \pm 0,1$

Tab. 2: Namerané hodnoty napätia U , prúdu I a priemere dráhy elektrónu d .

5.3 Millikanov experiment

Namerané hodnoty časov stúpania t_s a klesaní t_k pre jednotlivé kvapky oleja sú v tabuľke 3. Z nich za pomoci vzťahov 5, 6 a 8 boli dopočítané hodnoty veľkosti náboja Q . Pričom boli hodnoty

$$\begin{aligned}
U &= 500 \pm 1 \text{ V} , \\
\eta &= 0,000018 \text{ Pa} \cdot \text{s}^{-1} [4] , \\
s &= 0,0001 \text{ m} [1] , \\
\rho_{\text{olej}} &= 874 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} [1] , \\
\rho_{\text{vzd}} &= 1,204 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} [4] , \\
g &= 9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2} , \\
d &= 0,006 \text{ m} [1] , \\
E &= \frac{d}{U} = 0,000012 \text{ V} \cdot \text{m}^{-1} , \\
p &= 750 \text{ torr} .
\end{aligned}$$

Pomer náboja k tabuľkovému $e = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ [3] bol vynesene ho histogrami Obr. 3.

Hmotnosť elektrónu bola stanovená na

$$m_e = \frac{m_e e}{e} = 4,07 \cdot 10^{-31} \text{ kg} = 2,24 \frac{\text{MeV}}{c^2} .$$

6 Diskusia

V prvej časti pri meraní náboja elektrónu v pozdĺžnom poli sme sa dopúšťali asi najzávažnejších chýb merania. V prvej rade bolo veľmi náročné presne určiť kedy nastala jedna otáčka zväzku, jeho „trajektória“ na clone bola špirálovitá a s pripadajúcim magnetizačným prúdom sa zväzok viac fokusoval až v niektorých prípadoch

$\frac{t_{s1}}{[s]}$	$\frac{t_{k1}}{[s]}$	$\frac{t_{s1}}{[s]}$	$\frac{t_{k1}}{[s]}$	$\frac{\langle t_{s1} \rangle}{[s]}$	$\frac{\langle t_{k1} \rangle}{[s]}$	$\frac{Q}{[C]}$	$\frac{Q/e}{[-]}$
$18,0 \pm 0,3$	$11,0 \pm 0,3$	$19,0 \pm 0,3$	$11,5 \pm 0,3$	$18,5 \pm 0,63$	$11,3 \pm 0,6$	$(4,69 \pm 0,51) \cdot 10^{-19}$	2,93
$10,0 \pm 0,3$	$15,0 \pm 0,3$	$10,0 \pm 0,3$	$11,0 \pm 0,3$	$10,0 \pm 0,5$	$13,0 \pm 0,6$	$(5,35 \pm 0,49) \cdot 10^{-19}$	3,34
$8,0 \pm 0,3$	$15,0 \pm 0,3$	$8,0 \pm 0,3$	$24,0 \pm 0,3$	$8,0 \pm 0,5$	$19,5 \pm 4,6$	$(4,23 \pm 0,38) \cdot 10^{-19}$	2,64
$5,0 \pm 0,3$	$9,0 \pm 0,3$	$6,0 \pm 0,3$	$9,0 \pm 0,3$	$5,5 \pm 0,63$	$9,0 \pm 0,6$	$(1,09 \pm 0,13) \cdot 10^{-18}$	6,80
$7,0 \pm 0,3$	$8,0 \pm 0,3$	$9,0 \pm 0,3$	$8,5 \pm 0,3$	$8,0 \pm 0,63$	$8,2 \pm 0,6$	$(9,60 \pm 1,01) \cdot 10^{-19}$	6,00
$10,5 \pm 0,3$	$15,0 \pm 0,3$	$9,0 \pm 0,3$	$5,5 \pm 0,3$	$9,8 \pm 0,57$	$10,3 \pm 0,6$	$(6,92 \pm 0,72) \cdot 10^{-19}$	4,32
$16,0 \pm 0,3$	$12,0 \pm 0,3$	$14,0 \pm 0,3$	$10,5 \pm 0,3$	$15,0 \pm 0,63$	$11,3 \pm 0,6$	$(5,10 \pm 0,52) \cdot 10^{-19}$	3,19
$2,0 \pm 0,3$	$17,8 \pm 0,3$	-	-	$2,0 \pm 0,5$	$17,8 \pm 0,5$	$(1,41 \pm 0,13) \cdot 10^{-18}$	8,78
$7,0 \pm 0,3$	$9,0 \pm 0,3$	$7,0 \pm 0,3$	$8,5 \pm 0,3$	$7,0 \pm 0,63$	$8,8 \pm 0,6$	$(9,71 \pm 0,98) \cdot 10^{-19}$	6,06
$13,0 \pm 0,3$	$15,0 \pm 0,3$	$12,0 \pm 0,3$	$12,0 \pm 0,3$	$12,5 \pm 0,63$	$13,5 \pm 0,6$	$(4,56 \pm 0,48) \cdot 10^{-19}$	2,85

Tab. 3: Namerané hodnoty času vzostupu t_s a zostupu t_k , ich priemery $\langle t_k \rangle$ a $\langle t_s \rangle$, vypočítané náboje na kvapke Q , pomer Q/e , kde e je elementárny náboj.

do jedného bodu. V takomto prípade sme zaznačili údaje pre tento bod. Špirálovitá dráha spôsobovala aj v prípade nie úplne fokusovaného zväzku problém pri určení jeho rotácie. Aj z tohoto dôvodu uvažujem pri meraní prídru chybu až 1 A.

Druhá časť merania sa ukázala presnejšia, predovšetkým s veľkou presnosťou sa nám darilo držať dráhu zväzku v dráhe s daným polomerom. o čom svedčí aj menšia chyba merania v tomto prípade pre $\Delta I = 0,2$ A.

V poslednej časti (Millikanov experiment) sa síce podarilo namerať náboj pomerne presne (vrámci chyby) ale náboj len z nameraných dát ťažko vyčítame. Dôvod je ten, že náboje nespĺňajú naše predpokladané chovanie a nemajú pomer v celočíselných násobkoch. Teda je nemožné určiť elementárny náboj.

Pre ďalšie výpočty bol použitý druhý najmenší, prvý najmenší bol vyradený, pretože mal veľmi vysokú chybu merania času.

K všetkým meraniam môžeme pristupovať nerelativisticky, pretože chyba merania je rádovo väčšia ako chyba STR.

7 Záver

Meraním náboja pozdĺžnym magnetickým poľom sme zistili pomer náboja k hmotnosti

$$\frac{e}{m_e} = 6,8 \pm 3,3 \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1},$$

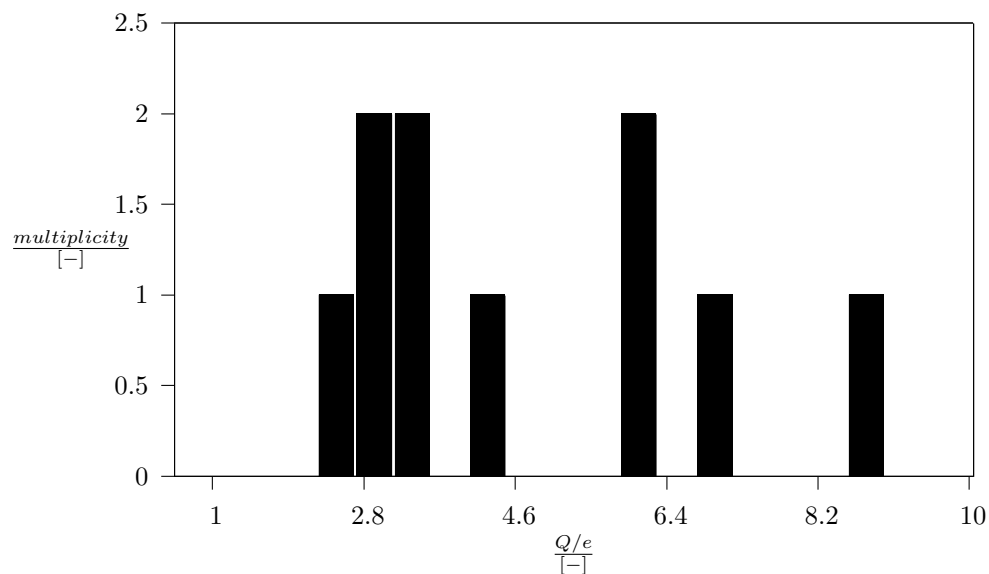
kolmým nábojom

$$\frac{e}{m_e} = (1,12 \pm 0,41) \cdot 10^{11} \text{ C} \cdot \text{kg}^{-1}.$$

Z Millikaveho experimentu bol určený náboj $(4,56 \pm 0,48) \cdot 10^{-19}$

Hmotnosť elektrónu bola stanovená na

$$m_e = 2,24 \frac{\text{MeV}}{c^2}.$$



Obr. 3: Vynesená závislost výskytu jednotlivých nábojov na ich pomere voči elementárnemu náboju.

Reference

- [1] Měrný náboj elektronu [cit. 20.03.2017]Dostupné po přihlášení z Kurz: Fyzikální praktikum II:https://praktikum.fjfi.cvut.cz/pluginfile.php/425/mod_resource/content/6/3a_Naboj_170218.pdf
- [2] Millikanův experiment [cit. 20.03.2017]Dostupné po přihlášení z Kurz: Fyzikální praktikum II:https://praktikum.fjfi.cvut.cz/pluginfile.php/6566/mod_resource/content/3/3b_Millikan_170218.pdf
- [3] Elektron [cit. 20.03.2017]Dostupné na:<https://cs.wikipedia.org/wiki/Elektron>
- [4] Vzduch [cit. 20.03.2017]Dostupné na:<http://www.converter.cz/tabulky/vzduch.htm>