

Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Facultas Rerum
Naturalium. Mathematica-Physica-Chemica

Jaroslav Pospíšil; Jiří Záhorský

Měření specifického náboje elektronu Thomsonovou a Busch-Wolfovou metodou

Acta Universitatis Palackianae Olomucensis. Facultas Rerum Naturalium. Mathematica-Physica-Chemica, Vol.
7 (1966), No. 1, 195--204

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/119847>

Terms of use:

© Palacký University Olomouc, Faculty of Science, 1966

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

*Katedra experimentální fyziky a metodiky fyziky
Vedoucí katedry: prof. dr. Josef Fuks*

MĚŘENÍ SPECIFICKÉHO NÁBOJE ELEKTRONU THOMSONOVOU A BUSCH—WOLFOVOU METODOU

JAROSLAV POSPÍŠIL A. JIŘÍ ZÁHEJSKÝ

(Došlo dne 20. května 1965)

1. Úvod

V článku je popsán princip Thomsonovy a Busch—Wolfovy metody měření specifického náboje elektronu s jejich teoretickým zdůvodněním. Dále je popsán přístroj k měření specifického náboje elektronu uvedenými metodami, zkonstruovaný pro účely fyzikálního praktika na vysoké škole.

2. Principy metod

2.1. Thomsonova metoda

Thomsonova metoda měření specifického náboje elektronu je založena na působení příčného elektrického a magnetického pole na pohybující se elektron. Ze dvou možných modifikací této metody budeme se zabývat měřením specifického náboje metodou kompenzace vlivů elektrického a magnetického pole na pohybující se elektron.

Pro zjištění specifického náboje elektronu je třeba vyjít ze vztahů pro výchylky elektronu v elektrickém a magnetickém poli.

Předpokládejme, že v okamžiku $t = 0$ má rychlost elektronů směr osy x , tj. pro $t = 0$ platí $v = v_x$, $v_y = v_z = 0$. Nechť časově konstantní magnetické pole má směr osy y a je obecně nehomogenní. Pak $B = B_y$, $B_x = B_z = 0$. Označme x vzdálenost, do které působí magnetické pole a l_1 vzdálenost, ve které je umístěno fluorescenční stínítko S (obr. 1), na kterém můžeme měřit odchylku elektronového paprsku od osy x . Pro odchylku $z = z_1$ platí

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{e}{m} \frac{dx}{dt} B. \quad (1)$$

Abychom mohli provést integraci, upravíme rovnici (1) na tvar

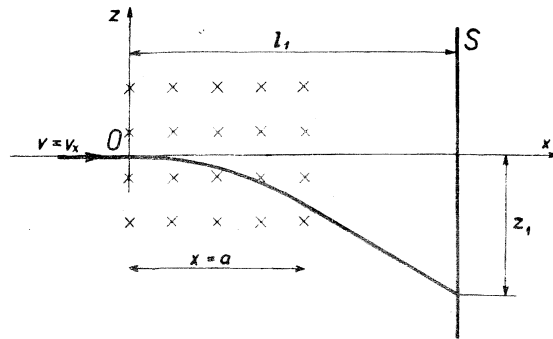
$$\frac{d}{dx} \left(\frac{dz}{dx} \frac{dx}{dt} \right) \frac{dx}{dt} = \frac{e}{m} \frac{dx}{dt} B.$$

Odtud dostaneme

$$\frac{d}{dx} \left(\frac{dz}{dx} \right) = -\frac{e}{mv} B.$$

Hledanou odchylku $z = z_1$ dostaneme dvojnásobnou integrací.

$$z_1 = -\frac{e}{mv} \int_0^{l_1} B(l_1 - x) dx.$$



Obr. 1. Chod elektronu příčným magnetickým polem.

Integrál $\int_0^{l_1} B(l_1 - x) dx$ je pro dané B a l_1 konstantou C_1 . Pro homogenní magnetické pole, které sahá od $x = 0$ do $x = a$ a v intervalu $x = a$ až $x = l_1$ je rovno nule, má konstanta C_1 hodnotu

$$C_1 = B \cdot a \left(l_1 - \frac{a}{2} \right).$$

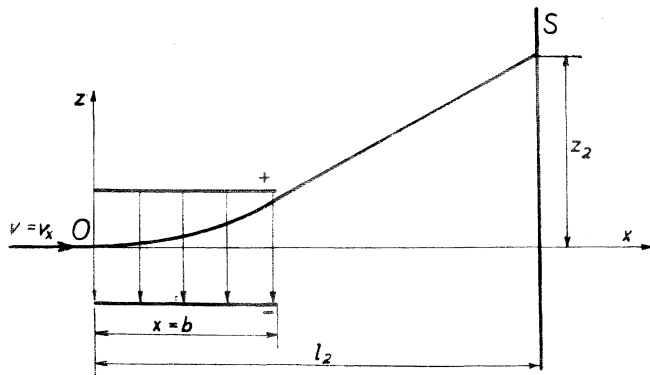
Odchylku elektronového paprsku lze pak vyjádřit vztahem

$$z_1 = C_1 \frac{e}{mv}. \quad (2)$$

Určíme nyní odchylku elektronového paprsku v příčném elektrickém poli. Nechť se elektron pohybuje ve směru osy x a v okamžiku vstupu do prostoru mezi desky kondenzátoru necht' má rychlost $v = v_x$. Elektrické pole kondenzá-

toru nechť má směr osy z (obr. 2). Platí tedy, že v čase $t = 0$ je $v = v_x$, $v_y = v_z = 0$ a $E = E_z$, $E_x = E_y = 0$. Označme x oblast ve které působí elektrické pole a l_2 vzdálenost ve které je umístěno fluorescenční stínítko. Pro odchylku $z = z_2$ elektronového paprsku od osy x lze psát

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{e}{m} E. \quad (3)$$



Obr. 2. Chod elektronu přičným elektrickým polem.

Levou stranu rovnice (3) upravíme na tvar

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{d}{dx} \left(\frac{dz}{dx} \frac{dx}{dt} \right) \frac{dx}{dt} = v^2 \frac{d^2z}{dx^2}.$$

Rovnici (3) lze nyní napsat ve tvaru

$$\frac{d^2z}{dx^2} = \frac{e}{mv^2} E.$$

Hledanou odchylku z_2 zjistíme dvojnásobnou integrací, čímž dostaneme

$$z_2 = C_2 \frac{e}{mv^2}, \quad (4)$$

kde $C_2 = \int_0^{l_2} E(l_2 - x) dx$ je pro dané E a l_2 konstantou. Je-li elektrické pole homogenní a je-li délka desek kondenzátoru rovna b , je

$$C_2 = E \left(l_2 - \frac{b}{2} \right) b.$$

Abychom získali vzorec pro výpočet specifického náboje elektronu, budeme integrovat vztah (3):

$$\frac{dz}{dt} = \int_0^t \frac{e}{m} E dt = \frac{e}{m} Et = \frac{e}{m} E \frac{b}{v}, \quad (5)$$

kde $t = \frac{b}{v}$ je doba, po kterou částice prochází mezi deskami kondenzátoru. Zavedeme-li veličinu $\text{tg } \beta$ vztahem

$$\text{tg } \beta = \frac{dz}{dx} = \frac{dz}{dt} \frac{dt}{dx},$$

lze po dosazení vztahu (5) za $\frac{dz}{dt}$ psát

$$\text{tg } \beta = \frac{e}{m} E \frac{b}{v} \frac{dt}{dx} = \frac{e}{m} E \frac{b}{v^2}. \quad (6)$$

Vykompenzujeme-li vliv elektrického pole na elektronový paprsek polem magnetickým, pak platí, že $z_1 = z_2$. Užitím vztahů (2) a (4) lze vypočítat rychlost elektronů mezi deskami kondenzátoru. Platí

$$v = \frac{Eb \left(l_2 - \frac{b}{2} \right)}{Ba \left(l_1 - \frac{a}{2} \right)}. \quad (7)$$

Dosazením vztahu (7) do (6) a po úpravě dostaneme pro specifický náboj elektronu výraz

$$\frac{e}{m} = \frac{Eb}{B^2 a^2} \left(\frac{l_2 - \frac{b}{2}}{l_1 - \frac{a}{2}} \right)^2 \text{tg } \beta, \quad (8)$$

kde

$$\text{tg } \beta = \frac{z_2}{l_2 - \frac{b}{2}}$$

a

$$E = \frac{U}{d}.$$

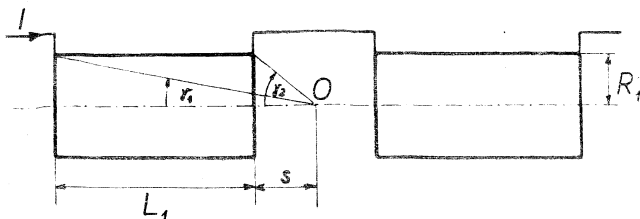
U je stejnosměrné napětí mezi deskami kondenzátoru a d je jejich vzdálenost. Magnetickou indukcí B příčného magnetického pole, buzeného dvěma sériově zapojenými cívkami, lze vyjádřit vztahem

$$B = \mu_0 \frac{N_1 I}{L_1} (\cos \gamma_1 - \cos \gamma_2),$$

kde μ_0 je permeabilita vakua, I je stejnosměrný proud protékající cívkami, N_1 je počet závitů jedné cívky a L_1 je její délka. Pro $\cos \gamma_1$ a $\cos \gamma_2$ platí (viz obr. 3):

$$\cos \gamma_1 = \frac{s + L_1}{\sqrt{(s + L_1)^2 + R_1^2}}$$

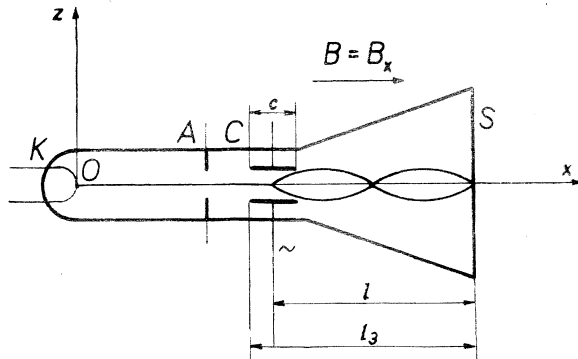
$$\cos \gamma_2 = \frac{s}{\sqrt{s^2 + R_1^2}}$$



Obr. 3. Schematický náčrt pro výpočet $\cos \gamma_1$ a $\cos \gamma_2$ k stanovení magnetické indukce ve středě mezi dvěma sériově zapojenými cívkami při Thomsonově metodě.

2.2. Busch—Wolfova metoda

Busch—Wolfova metoda měření specifického náboje elektronu je založena na fokusování elektronů podélným homogenním magnetickým polem. Princip metody je patrný z obr. 4.



Obr. 4. Zjednodušené naznačení dráhy elektronů při působení podélného magnetického pole.

Elektrony emitované žhavou katodou K , umístěnou uvnitř vyčerpané trubice, procházejí otvorem v anodě A . Mezi anodou A a katodou K je urychlující anodové napětí U_a , které udílí elektronům rychlost $v = v_x$ danou vztahem

$$v = \sqrt{\frac{2eU_a}{m}}. \quad (9)$$

Svazek elektronů projde mezi deskami kondenzátoru C , mezi nimiž je proměnné elektrické pole. Účinkem tohoto pole se elektrony v různých časových okamžicích odchýlí o různý úhel φ od osy x . Mezi koncem kondenzátoru C a fluorescenčním stínítkem S se budí podélné homogenní magnetické pole cívkou, do jejíž dutiny se trubice vkládá. K složce rychlosti v_x , kterou elektron získá vlivem proměnného elektrického pole, bude magnetické pole kolmé a způsobí, že se elektron začne pohybovat po kružnici s poloměrem r daným vztahem

$$r = \frac{m v_x}{e B}.$$

Vlivem složky v_x se budou elektrony pohybovat rovnoměrně ve směru osy x . Složením obou pohybů vznikne pohyb po šroubovici. Doba potřebná k tomu, aby elektron opsal jeden závit této šroubovice je

$$T = 2\pi \frac{m}{e} \frac{1}{B}.$$

Doba T nezávisí na velikosti a směru rychlosti elektronu. Proto se elektrony po čase T fokusují do jednoho bodu na ose x . Po čase nT , kde n je přirozené číslo, dosáhnou elektrony vzdálenosti l podél osy x a fokusují se do středu fluorescenčního stínítka S (obr. 4). Vzdálenost l je dána vztahem

$$l = v_x nT = 2\pi \frac{m}{eB} n v_x.$$

Použitím vztahu (9) a po úpravě dostaneme vzorec pro specifický náboj elektronu ve tvaru

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U_a}{l^2 B^2} n^2, \quad (10)$$

kde n udává násobek fokusace a B je magnetická indukce podélného homogenního magnetického pole, vytvořeného cívkou poloměru R_2 , délky L_2 o N_2 závitů, kterou protéká stejnosměrný proud I . Magnetická indukce B je dána vztahem

$$B = \mu_0 \frac{N_2 I}{\sqrt{L_2^2 + 4R_2^2}}.$$

3. Popis přístroje

Hlavní částí přístroje je obrazovka 12 QR 50, která je zapojena podle obr. 5. K zaostření stopy na stínítku obrazovky slouží potenciometr P_1 , potenciometrem P_2 se mění potenciál na pomocné anodě A_1 a tím i jas obrazu na stínítku obrazovky. Vychylovací systém obrazovky, tvořený destičkami D_3 a D_4 , slouží k vertikálnímu vychylování elektronového paprsku, destičky D_1 a D_2 vychylují elektronový paprsek v horizontálním směru. Potenciometrem P_3 lze regulovat velikost střídavého napětí přiváděného na vychylovací destičky D_1 , D_2 při Busch—Wolfově metodě. K regulování velikosti stejnosměrného napětí na destičkách D_3 , D_4 při Thomsonově metodě slouží potenciometr P_4 . K vytvoření vhodných stejnosměrných napětí pro elektrody obrazovky slouží násobič napětí se selénovými usměrňovači V_1 až V_6 a kondenzátory C_1 až C_6 . Kondenzátory C_7 až C_9 a odpor R_8 působí jako vyhlazovací filtr. Elektrody obrazovky jsou napájeny z děliče tvořeného potenciometry P_1 , P_2 a odpory R_1 až R_7 .

Úkolem souosé cívky c_1 , navinuté na obrazovce, je vytvořit stejnosměrným proudem podélné homogenní magnetické pole při Busch—Wolfově metodě. Příděné magnetické pole, potřebné při Thomsonově metodě, se vytvoří stejnosměrným proudem v sériově zapojených cívkách c_2 .

V tabulce I uvádíme hodnoty použitých součástek.

Tabulka I

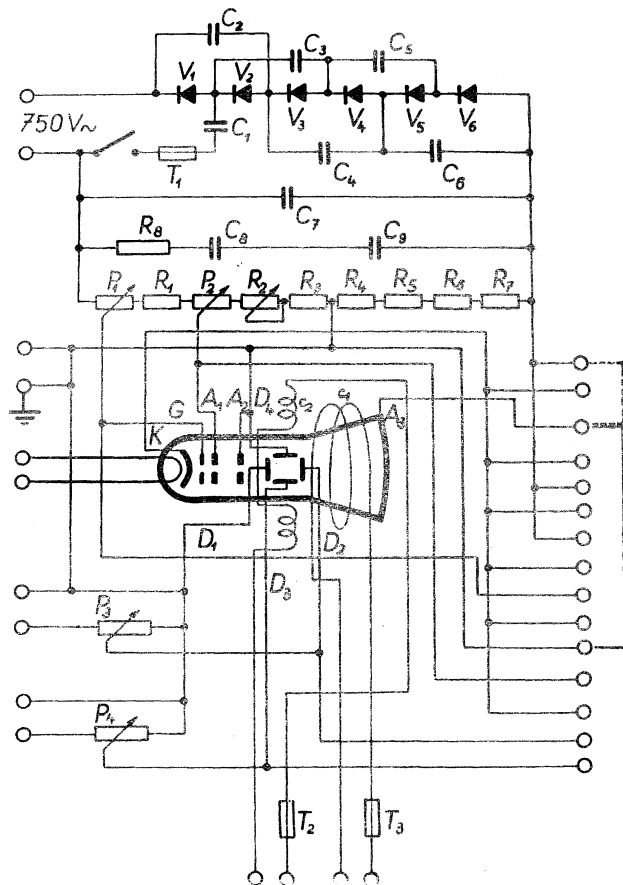
Odpory	Potenciometry	Kondenzátory
R_1 100 k Ω	P_1 0,5 M Ω	C_1 — C_9 0,15 μ F/1000 V
R_2 2,5 M Ω	P_2 2,5 M Ω	C_7 0,5 μ F/3500 V
R_3 — R_6 100 k Ω	P_3 5 M Ω	C_8 2 μ F/2000 V
R_7 5 M Ω	P_4 5 M Ω	C_9 2 μ F/1500 V
R_8 100k Ω		*

4. Výsledky měření

4.1. Thomsonova metoda

Přístroj má tyto parametry: $a = 0,046$ m, $b = 0,025$ m, $d = 0,003$ m, $l_1 = 0,291$ m, $l_2 = 0,306$ m, $N_1 = 240$, $L_1 = 0,024$ m, $R_1 = 0,023$ m, $s = 0,033$ m.

Anodové napětí přiložené na pomocnou anodu A_2 je $U_a = 1750$ V. Hodnoty specifického náboje elektronu, zjištěné pro různé intenzity E příčného elektrického pole a jim příslušejícím výchylkám z jsou uvedeny v tabulce II. Ve čtvrtém sloupci tabulky je uveden proud I k buzení příčného kompenzačního magnetického pole.



Obr. 5. Schéma přístroje pro měření specifického náboje elektronu Thomsonovou a Busch-Wolfovou metodou.

Tabulka II

Číslo měření	$E \cdot 10^{-3}$ [V/m]	$z \cdot 10^3$ [m]	I [A]	$e/m \cdot 10^{-11}$ [C/kg]
1	5,333	7	0,070	1,729
2	7,500	11	0,1042	1,725
3	8,133	12	0,115	1,675
4	8,733	13	0,124	1,676
5	10,333	15	0,142	1,743
6	10,833	16	0,148	1,796
7	11,333	17	0,161	1,687
8	12,500	18	0,170	1,767
9	13,666	20	0,192	1,683
10	14,066	21	0,198	1,710

Aritmetický průměr $\frac{\bar{e}}{m} = 1,719 \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$.

Zjištěná hodnota $\frac{e}{m} = (1,72 \pm 0,07) \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$.

Relativistickou korekci přepočtená hodnota $\frac{e}{m_0}$ se liší od uvedených hodnoty až na třetím desetinném místě.

4.2. Busch—Wolfova metoda

Přístroj má tyto parametry: $l_3 = 0,2415 \text{ m}$, $c = 0,018 \text{ m}$, $l = l_3 - \frac{c}{2} = 0,2235 \text{ m}$, $N_2 = 340$, $L_2 = 0,272 \text{ m}$, $R_2 = 0,065 \text{ m}$.

Anodové napětí mezi katodou a pomocnou anodou A_2 je $U_a = 1450 \text{ V}$, střídavé napětí na horizontálních vychylovacích destičkách je 85 V .

V tabulce III jsou uvedeny hodnoty specifického náboje elektronu zjištěné desetkrát pro první fokusaci elektronů ($n = 1$). I je příslušný proud k buzení podélného magnetického pole.

Tabulka III

Číslo měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
I [A]	2,570	2,545	2,570	2,545	2,570	2,560	2,520	2,570	2,570	2,520
$\frac{e}{m} \cdot 10^{-11}$ [C kg ⁻¹]	1,727	1,761	1,727	1,761	1,727	1,740	1,796	1,727	1,727	1,796

Aritmetický průměr: $\frac{\bar{e}}{m} = 1,749 \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$.

Zjištěná hodnota: $\frac{e}{m} = (1,75 \pm 0,04) \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$.

Relativistická korekce na klidovou hmotu se opět projeví až na třetím desetinném místě.

5. Závěr

V [3] je udána velikost specifického náboje elektronu pro urychlující napětí 100 V : $\frac{e}{m} = 1,759 \cdot 10^{11} \text{ C kg}^{-1}$. Porovnáme-li hodnoty specifického náboje elektronu získané Thomsonovou a Busch—Wolfovou metodou s hodnotou uvedenou v [3], zjistíme, že v případě Thomsonovy metody je odchylka 2 % a při použití Busch—Wolfovy metody 0,3 %. Měření Busch—Wolfovou metodou se u použitého přístroje ukázalo přesnější.

Přístroj, zhotovený B. Píalou pod vedením autorů, je svou konstrukcí a přesností vhodný pro běžná laboratorní měření ve fyzikální praktiky na vysoké škole. Přesnějšímu určení specifického náboje elektronu brání nehomogenita magnetických a elektrických polí na jejich okrajích, dále málo vhodný tvar vychylovacích destiček obrazovky 12 QR 50, který nelze ani početně vyloučit. Též tolerance parametrů použitého přístroje a omezená přesnost odčítání velikostí výchylky nebo fokusace elektronů na stínítku obrazovky zvětšují chybu určení specifického náboje elektronu. Tolerance parametrů přístroje byly u obou uvedených metod vzaty v úvahu při výpočtu pravděpodobné chyby.

LITERATURA

- [1] Špolskej, E. V.: Atomová fyzika I, SNTL, Praha, (1957), 21—32.
- [2] Horák, Z.: Úvod do molekulové a atomové fyziky, SNTL, Praha, (1955), 89—91.
- [3] Horák, Z., Krupka, F., Šindelář, V.: Technická fyzika, SNTL, Praha, (1962), 1635.
- [4] Harnwell, G. P., Livingood J. J.: Experimental Atomic Physics, New York and London, (1933), 42—45.
- [5] Weizel, W.: Elektronen, Atome, Moleküle, Berlin/Leipzig, (1950), 25—27.

РЕЗЮМЕ

ИЗМЕРЕНИЕ СПЕЦИФИЧЕСКОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ ТОМСОНА И БУШ-ВОЛЬФА

ПРОСЛАВ ПОСНИЩЕЛ И ПРЖИ ЗАГЕЙСКИ

В статье объясняют вопрос об измерении специфического заряда электрона методом Томсона и Буш-Вольфа.

Дальше, в статье описан прибор для измерения специфического заряда электрона приведенными методами подходящими для измерения на физическом практикуме в вузах. В заключении работы даются результаты измерения специфического заряда электрона с помощью этого прибора и сравниваются со значением приведенными в литературе.