

Fyzikální praktikum 3

Úloha B Millikanův experiment

Úkoly

1. Změřte velikost elementárního náboje pomocí rychlostí padající a stoupající olejové kapičky v homogenním elektrickém poli. Proveďte měření rychlostí alespoň padesáti kapek. Výsledek srovnejte s tabulkovou hodnotou.

Před měřením si rozmyslete:

- Proč touto aparaturou nelze změřit elementární náboj pouze pomocí nepohybující se kapičky (tj. nastavením takového elektrického pole, při kterém se kapička zastaví)?
- Pokud je na deskách kondenzátoru malé napětí (do cca 250 V), nesou téměř všechny měřené kapičky velký náboj (velký násobek elementárního náboje). Vysvětlete proč.
- Jaká je výhoda a jaká nevýhoda použití radioaktivního zářiče?
- Jakým způsobem vyhodnotíte měřená data?

Historie

V roce 1887 se J.J. Thomsonovi podařilo završit několik desítek let trvající diskuze o povaze katodového záření experimentálním důkazem, že jde o proud záporně nabitych částic s extrémně velkým měrným nábojem (tj. poměrem náboje a hmotnosti). Měrný náboj těchto částic, nazvaných elektrony, bylo možné určit ze zakřivení jejich dráh v elektrickém nebo magnetickém poli, to ale samo o sobě umožňovalo pouze spekulace o absolutní velikosti náboje elektronu.¹ Hned v r. 1888 bylo provedeno první stanovení náboje elektronu měřením celkového náboje obláčku vodních kapek vzniklých kondenzací vodní páry na volných nábojích za předpokladu, že každá kapka vznikla kolem jednoho elektronu. Z nevelkého náboje vyplynulo, že elektron musí být částice s velmi malou hmotností. Metoda byla výrazně zlepšena sledováním pohybu nabitych kapek v gravitačním a elektrickém poli a následně zdokonalena Robertem Andrews Millikanem. Ten místo vypařujících se vodních kapek použil kapky hodinářského oleje s průměrem několik mikrometrů, rychlosť kapky měřil pomocí mikroskopu opatřeného měřicím okulárem, zavedl korekci na vztlak vzduchu, teplotu vzduchu (na které závisí jeho viskozita) stabilizoval vodní lázní a měřením při různých tlacích eliminoval odchylky od Stokesova vzorce pro třecí sílu. Po zpřesnění hodnoty viskozity vzduchu vedly jeho experimenty k náboji elektronu $-1,603 \cdot 10^{-19}$ C, tedy velmi blízko dnes užívané hodnoty

¹ Pojem „elementární náboj“ byl zaveden už dříve jako kladný náboj přenášený atomem vodíku při elektrolýze. Jeho velikost byla řádově správně odhadnuta pomocí měrného náboje iontu H^+ a hmotnosti vodíkového atomu určené na základě kinetické teorie plynů.

(přibližně $-1,6022 \cdot 10^{-19}$ C). Za určení náboje elektronu dostal Millikan v r. 1923 Nobelovu cenu za fyziku.

Princip metody

V Millikanově experimentu se sleduje pohyb nabité kapičky v elektrickém poli, které jednou míří směrem dolů a působí tedy ve směru těhové síly a po druhé nahoru, tedy proti těhové síle. Kapky se v původním experimentu nabíjely třením o trubičku při rozprašování oleje, ale lze je nabíjet i jinými způsoby, např. ionizujícím zářením. Na kapičku tedy působí směrem dolů těhová síla

$$F_g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho g, \quad (1)$$

kde r je poloměr kapičky, ρ hustota oleje a g těhové zrychlení. Směrem vzhůru na kapičku působí vztaková síla

$$F_{vz} = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{vz} g, \quad (2)$$

přičemž ρ_{vz} je hustota vzduchu. Proti směru pohybu působí třetí síla vyjádřená pro laminární proudění Stokesovým vztahem

$$F_t = 6\pi\eta rv, \quad (3)$$

kde η je viskozita vzduchu a v velikost rychlosti kapičky. Konečně směrem k aktuální anodě působí elektrická síla

$$F_e = |q|E, \quad (4)$$

$|q|$ je velikost náboje elektronu a E velikost intenzity elektrického pole.

Když je kapka elektrickým polem přitahovaná ke spodní elektrodě, získá rovnovážnou rychlosť v_1 splňující rovnici

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g + |q|E = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{vz} g + 6\pi\eta rv_1. \quad (5)$$

Rychlosť v_1 můžeme změřit, ale rovnice (5) obsahuje kromě neznámého náboje q také druhou neznámou, a to poloměr kapky. Proto je potřeba během měření obrátit polaritu elektrického pole. Pokud je intenzita pole dostatečně velká a kapka není příliš těžká, začne se kapka pohybovat nahoru s rovnovážnou rychlosťí v_2 splňující rovnici

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho g + 6\pi\eta rv_2 = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_{vz} g + |q|E, \quad (6)$$

takže získáme dvě rovnice se dvěma neznámými r a q .

Sečtením rovnic (5) a (6) dostaneme vztah pro poloměr kapky

$$r^2 = \frac{9\eta(v_1 - v_2)}{4g(\rho - \rho_{vz})}. \quad (7)$$

Naopak odečtením získáme hledaný náboj kapky

$$|q| = 3\pi\eta r \frac{v_1 + v_2}{E}. \quad (8)$$

Rychlosti v_1 a v_2 změříme, intenzitu elektrického pole můžeme spočítat pomocí vzdálenosti elektrod a jejich napětí.

Kapka může nést pouze celočíselný počet elektronů, takže její náboj q je celočíselným násobkem náboje elektronu. Je proto nutné měření opakovat pro dostatečné množství různých kapek. Když si naměřené hodnoty nábojů kapek uspořádáme nebo vyneseme do grafu, uvidíme, že se shlukují kolem celočíselných násobků jisté veličiny. Tato veličina je hledaným nábojem jednoho elektronu a její velikost je možné odhadnout z rozdílu náboje kapek dvou sousedních shluků.

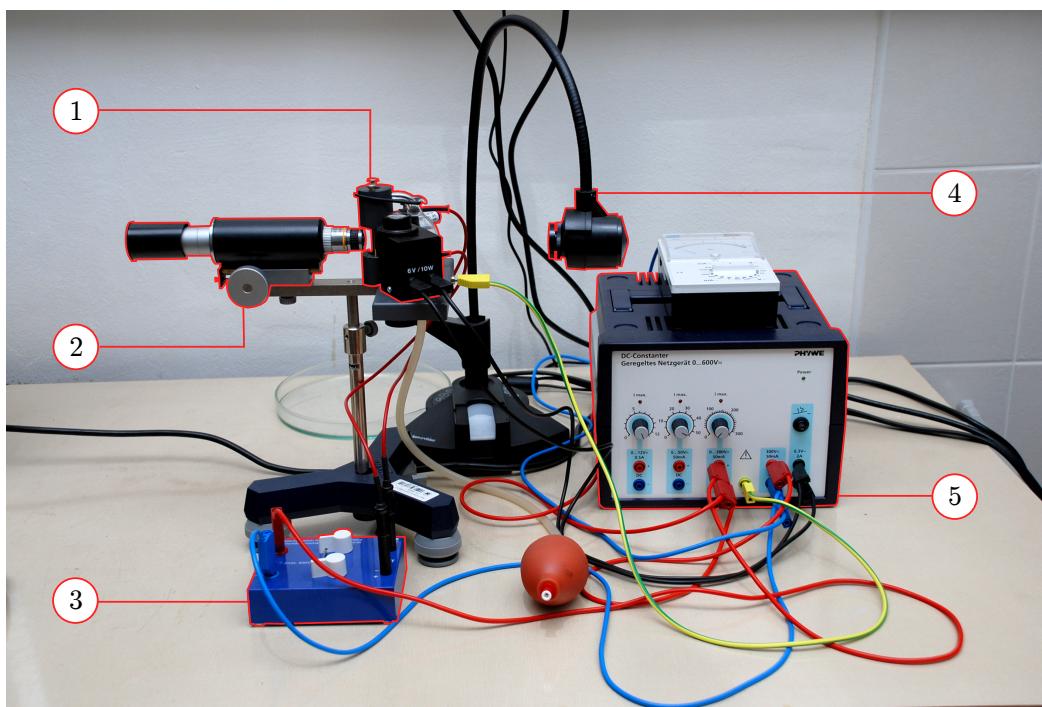
Vzít ovšem pouze jeden rozdíl průměrných nábojů kapek dvou sousedních shluků by samozřejmě nevedlo k příliš přesnému výsledku. Zprůměrování všech naměřených rozdílů ale také ne pomůže. Představme si, že máme n sousedících shluků kapek s průměrnými náboji q_i . Můžeme sice spočítat $n - 1$ rozdílů průměrného náboje kapek dvou sousedních shluků ($q_{i+1} - q_i$), ale po zprůměrování těchto rozdílů dostáváme

$$\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} (q_{i+1} - q_i) = \frac{q_n - q_1}{n-1},$$

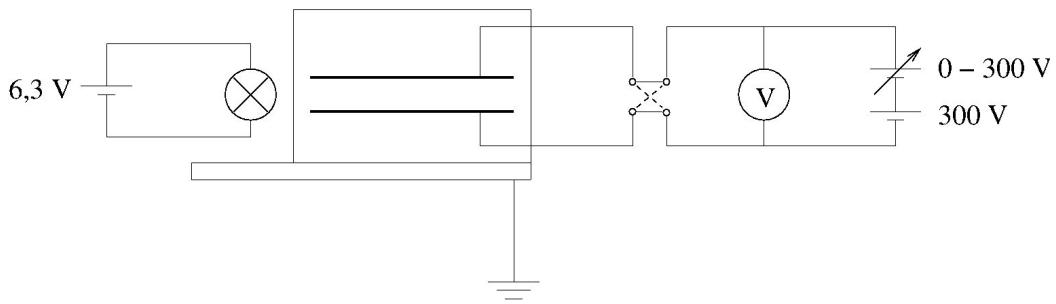
takže jsme vlastně z výpočtu vyloučili téměř všechna naměřená data s výjimkou nábojů kapek příslušejících dvěma krajním shlukům. Před praktikem si proto rozmyslete i vhodný způsob zpracování naměřených dat.

Aparatura

Aparatura používaná k měření náboje elektronu je vyfocená na obr. 1. Srdcem aparatury je komůrka s kondenzátorem, mezi jehož elektrody se pomocí gumového balónku vstřikují ze skleněné nádobky kapičky oleje. Vzdálenost mezi elektrodami kondenzátoru je 2,5 mm, hustota vstřikovaného oleje 1030 kg.m^{-3} . Komůrka je opatřena vodováhou, lampou a mikroskopem pro sledování kapek. Některé kapky se při vstřikování nabíjejí třením, dále může být ke komůrce připojený i radioaktivní zdroj α -částic (^{241}Am , 74 kBq), který zvyšuje počet nabitých kapek a jejich náboj. Kondenzátor se nabíjí zdrojem stejnosměrného napětí s několika výstupy 0 – 300 V. Zapojení dvou výstupů do série umožnuje pracovat s napětím přes 300 V. Polaritu napětí je možné měnit přepínačem, velikost napětí se měří multimetrem. Zdroj dodává také střídavé napětí 6,3 V pro žárovku lampy. Pohyb kapek lze sledovat nejenom očima, ale také kamerou připojenou k počítači, který umožňuje pohyb kapek zaznamenat a uložit.



Obrázek 1: Měřící aparatura. 1 - komůrka s kondenzátorem, 2 - mikroskop, 3 - přepínač napětí, 4 - kamera, 5 - zdroj napětí.



Obrázek 2: Schéma elektrického zapojení.

Postup měření

1. Aparaturu zapojte podle obr. 1 a 2 a vyčkejte na kontrolu.
 2. Spusťte počítač a v něm program AverTV.
 3. V Nastavení (symbol nářadí) si ve složce Praktikum vytvořte složku s vlastním pojmenováním, čímž nastavíte cestu pro uložení videí.
 4. Zapněte kameru a několikrát zmáčkněte balónek vstřikovadla oleje a sledujte pohyb kapek.
 5. Pro napětí v rozsahu 300–600 V nahrajte pohyb kapek. Zaměřte se vždy na jednu kapku, která se pohybuje rovnoměrně přímočáre a pokud možno kolmo na pomocnou stupnice. Pomocí přepínače měňte polaritu napětí a tím i směr pohybu kapky. Během zaznamenávání pohybu kapky může dojít ke změně jejího náboje a tím i rychlosti. V těsném okolí této změny, dokud kapka nedosáhla nové rovnovážné rychlosti, nemá smysl její rychlosť počítat. Takto změřte alespoň 50 kapiček.
 6. Po nahrání se soubor s videem automaticky uloží do Vaší složky na pracovní ploše počítače.
 7. Po skončení měření si záznamy přehrajte a změřte rychlosti vybraných kapek. Ještě v praktiku můžete využít nainstalovaných freeware programů Avidemux a MousePos. Jinou možností je např. freeware program BS.Player (s možností zpomalení přehrávaného videa).
 8. Spočítejte náboje jednotlivých kapek a ukažte, zda velikosti těchto nábojů tvoří shluky. Určete velikost elementárního náboje i jeho nejistotu a srovnajte jej s tabulkovou hodnotou. Při výpočtu **NEVYUŽÍVEJTE** znalosti hodnoty velikosti elementárního náboje!
- Při měření budete pracovat s napětím okolo 600 V, proto dbejte na vlastní bezpečnost.
 - Nemanipulujte se zdrojem α částic. Těhotné ženy měří úlohu bez tohoto zdroje.