

FYZIKÁLNÍ PRAKTIKUM

Fyzikální praktikum 3

Zpracoval: Lukáš Lejdar

Naměřeno: 29. dubna 2025

Obor: F

Skupina: Út 14:00

Testováno:

Úloha č. 3: Millikanův experiment

1. Úvod

V této úloze budu měřit náboje malých olejových kapiček. Ukáže se, že tyto náboje jsou celočíselnými násobky elementárního náboje, který je pak možné vypočítat. Tento experiment poprvé provedl Robert A. Millikan v roce 1913, za který později dostal Nobelovu cenu za Fyziku.

2. Teorie

Principem Millikanova experimentu je měření rovnovážné rychlosti kapičky oleje. Síla působící na takovou kapičku v důsledku intenzity elektrického pole E bude

$$F_e = |q| E \quad (1)$$

kde q je náboj kapičky. Mimo to bude uvnitř měřicí komory působit několik dalších sil, které je potřeba započíst. První z nich je gravitační síla

$$F_g = \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g \quad (2)$$

kde r je poloměr kapičky, ρ je hustota oleje a g je tíhové zrychlení. Potom vztlaková síla

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

kde ρ_{vz} je hustota vzduchu a odporová síla vyjádřená Stokesovým zákonem

$$F_t = 6\pi\eta r v \quad (4)$$

kde η je viskozita vzduchu a v rychlosti kapičky. Síla elektrického pole bude v experimentálním uspořádání působit buď směrem proti gravitačnímu zrychlení nebo s ním. Pokud naměříme rovnovážnou rychlost jedné kapičky v obou případech, dostaneme dvě rovnice o neznámých r a q

$$\begin{aligned} \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g + 6\pi\eta r v_1 &= |q| E + \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{vz} g \\ \frac{4}{3} \pi r^3 \rho g + 6\pi\eta r v_2 &= |q| E - \frac{4}{3} \pi r^3 \rho_{vz} g \end{aligned}$$

které z nich vyjádříme jako

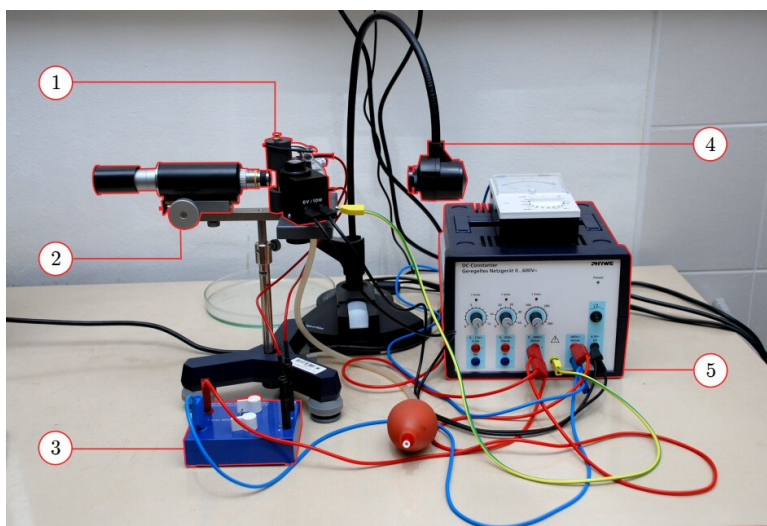
$$r^2 = \frac{9\eta(v_1 - v_2)}{4g(\rho - \rho_{vz})} \quad (5)$$

$$|q| = 3\pi\eta r \frac{v_1 + v_2}{E} \quad (6)$$

3. Postup měření

Fotka měřicí aparatury je na Obrázku (1). Základem je komůrka s kondenzátorem kam se vstříkují olejové kapičky ze skleněné nádoby pomocí gumového balónku. Některé kapky se při vstřikování nabíjejí třením, další mohou získat náboj díky připojenému zdroji α -částic (^{241}Am , 74 kBq).

Komůrka je vybavená vodováhou, osvětlovací lampou a mikroskopem pro sledování kapek. Napětí na kondenzátoru zajišťuje zdroj regulovatelného napětí v rozmezí (0-300V) a druhý zdroj zapojený do série s prvním o fixním napětí (300V). Sledovat pohyb kapek umožňuje kamera skrz zvětšovací objektiv.



Obrázek 1: Zapojení aparatury, 1 - komůrka s kondenzátorem, 2 - mikroskop, 3 - přepínač napětí, 4 - kamera, 5 - zdroj napětí

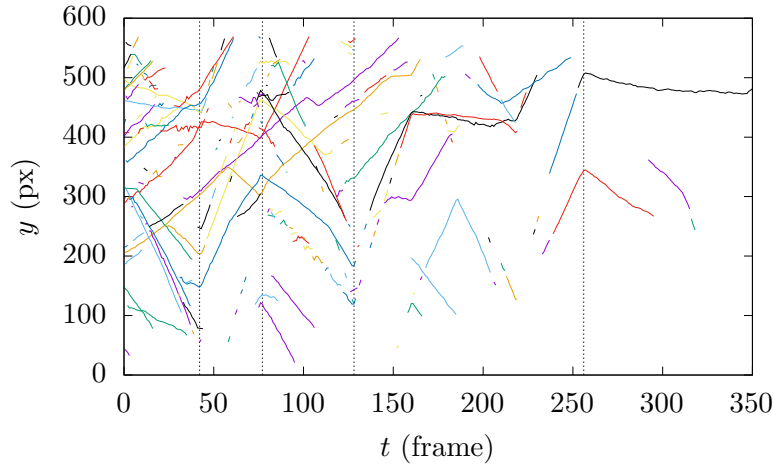
4. Zpracování měření

Celkem jsem nahrál 2 až 3 videa pro každé napětí na kondenzátoru v rozmezí (300 - 600) V po 50 Voltech. Prvním krokem při zpracování je zjistit náboj alespoň 50 kapiček z jejich rychlostí před a po změně polarity napětí. Z videí bylo potřeba nejdříve digitálně odstranit pozadí a potom v každém obrázku rozpoznat kapičky. Pro tento účel existuje v pythonu knihovna trackpy, která pomocí funkce `trackpy.locate` dokáže kapičky v každém framu najít a označit. Proces zpracování jednoho framu je uvedený na Obrázcích 2.



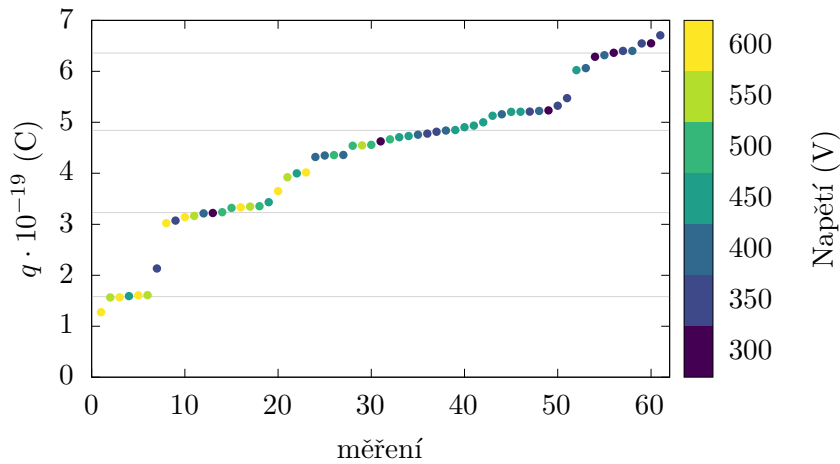
Obrázek 2: Postup zpracování každého framu z videa. Nalevo je vidět původní obrázek, uprostřed bylo odebrané pozadí a napravo je jsou anotované rozpoznané kapičky.

Rozpoznání kapek v každém jednotlivém framu ještě neumožňuje určit, která kapička odpovídá které v následujícím framu. K propojení těchto bodů do trajektorií napříč framy souží v knihovně funkce `trackpy.link`. V Grafu 3 je uveden příklad zpracovaného videa při napětí 300 V.



Graf 1: Trajektorie kapiček při napětí 300 V

V obrázku jsou jasně rozpoznatelné místa, kde několik kapek ostře změni směr letu, kvůli změně polarity napětí. Z trajektorií jsem vybíral jen ty, které jsou co nejpřímější před a po změně napětí a z lineárního fitu určil jejich rychlosti v_1 a v_2 . Tímto způsobem jsem z 15 videí získal 61 měření a podle vztahů (5) a (6) vypočítal výsledné náboje. Tyto náboje jsou ve vzestupném pořadí vykreslené do Grafu 2.



Graf 2: Zjištěné náboje kapiček, označené barevně podle napětí při kterých byli měřené.

Graf má spíš schodovitý charakter než spojitý průběh přímky. Některé body ale schodovitý tvar narušují, takže je vyřadím jako chybné měření. Zbylé hodnoty jsem rozdělil do skupiny a pro každou určil střední hodnotu, které vyšly postupně $\bar{q}_1 = 1.58$, $\bar{q}_2 = 3.23$, $\bar{q}_3 = 4.84$ a $\bar{q}_4 = 6.36$ v jednotkách 10^{-19} C. Krok mezi skupinami je přibližně 1.6, což naznačuje, že jednotlivé skupiny odpovídají celým násobkům elementárního náboje od 1 do 4. Každé hodnotě jsem tedy přiřadil počet elementárních nábojů a získal hodnoty $e_i = \frac{q_i}{n}$. Statistickým vyhodnocením pak vyšla konečná hodnota náboje

$$e = (1.61 \pm 0.03) \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad (p = 99 \%, \nu = 52) \quad (7)$$

5. Závěr

Změřil jsem rovnovážnou rychlost 60 kapiček při různých polaritách napětí v komoře a podle vztahů (5) a (6) potom určil jejich náboj. Ukázalo se, že náboje spadaly do rovnoměrně oddělených diskrétních hodnot, odpovídajících počtu nábojů v kapičkách. Z těchto dat už bylo možné vypočítat elementární náboj $e = (1.61 \pm 0.03) \cdot 10^{-19} \text{ C}$. Tabulková hodnota je $e = 1.602 \cdot 10^{-19}$. Největším zdrojem nejistoty je pravděpodobně výběr měřených kapiček. Nejlépe vycházejí ty, které letí rovnoměrně přímo dolů a pak nahoru, ale takových je v natočených videích málo.

Reference

- [1] Návod k úloze https://is.muni.cz/auth/el/sci/jaro2025/F4210/um/fp3-3_Millikan.pdf.