

Določitev osnovnega naboja po Millikanu

Bor Kokovnik

April 2024

1 Uvod

Millikanov poskus, to je opazovanje gibanja naelektrenih kapljic v gravitacijskem in električnem polju, spada med klasične poskuse zaradi zgodovinskega pomena določitve osnovnega naboja in zaradi relativne enostavnosti, ki omogoča, da poskus ponovijo študenti v laboratoriju.

Na okroglo kapljico z radijem r in gostoto ρ , ki prosto pada v zraku, deluje sila teže $mg = \frac{4\pi}{3}r^3\rho_{zr}g$, njej nasprotni pa sta sila vzgona $\frac{4\pi}{3}r^3\rho_{zr}g$ in Stokesova sila $6\pi r\eta v$, kjer je ρ_{zr} gostota zraka, η viskoznostni koeficient (viskoznost zraka pri 23 °C je 18.3 μ Pas), v pa hitrost padanja kapljice. Kapljica doseže konstantno hitrost tedaj, ko velja ravnotežna enačba

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho - \rho_{zr})g = 6\pi r\eta v. \quad (1)$$

Če torej merimo hitrost padanja kapljice v zraku in poznamo ρ , ρ_{zr} in g , lahko izračunamo radij kapljice r :

$$r^2 = \frac{9\eta v}{2(\rho - \rho_{zr})g}. \quad (2)$$

Če je kapljica naelektrena in nosi mnogokratnik osnovnega naboja e_0 , torej ne_0 , deluje nanjo v električnem polju ploščatega kondenzatorja z električno poljsko jakostjo E dodatna sila ne_0E . S spreminjanjem velikosti in smeri električnega polja torej lahko dosežemo ravnovesje med navidezno težo kapljice in električno silo. Tedaj kapljica miruje in velja

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho - \rho_{zr})g = ne_0E, \quad (3)$$

kjer je $U = dE$ napetost na kondenzatorju in d je razdalja med ploščama kondenzatorja. Če merimo hitrost kapljice pri prostem padanju skozi zrak in pa napetost, pri kateri se kapljica ustavi, lahko določimo mnogokratnik osnovnega naboja ne_0 .

Za določitev naboja pa lahko postopamo tudi drugače. Dovolj majhno kapljico premikamo z neko napetostjo $U = dE$ v smeri (+) in nasproti (−) težnostnega pospeška. Ko se hitrost ustali velja enakost sil:

$$\frac{4\pi}{3}r^3(\rho - \rho_{zr})g \pm |n|e_0E = \pm 6\pi r\eta v_{\pm}, \quad (4)$$

kjer je v_+ (v_-) hitrost premikanja v smeri (v nasprotni smeri) težnostnega pospeška. Hitrosti v_+ in v_- sta pozitivni količini in lahko izmerimo. Na njihovi podlagi določimo radij kapljice

$$r^2 = \frac{9\eta(v_+ - v_-)}{4g(\rho - \rho_{zr})}, \quad (5)$$

in absolutno vrednost večkratnika naboja n

$$|n|e_0 = \frac{3\pi r \eta}{E}(v_+ + v_-). \quad (6)$$

2 Naloga

1. Izmeri hitrosti gibanja kapljic v gravitacijskem in električnem polju.
2. Iz meritev izračunaj velikosti kapljic in njihov naboj ter določi osnovni naboj.

3 Potrebščine

- Millikanov aparat: kondenzator z razmikom $d = 5(1 \pm 0,02)$ mm, razpršilec z oljem ($\rho = 0,973 \text{ g cm}^{-3}$), LED za osvetljevanje
- mikroskop s kamero, ki je priključena na računalnik
- usmernik za 300 V
- preklopnik smeri napetosti
- voltmeter

4 Meritve

Datum opravljanja vaje: 21. 3. 2024

Odločil sem se za merjenje s prvo metodo, opisano v uvodu, kjer najdemo napetost, pri kateri se kapljica ustavi in iz posnetka določimo hitrost padanja brez električnega polja. Tako sem prišel do meritev v tabeli 1.

Končno vrednost osnovnega naboja e_0 odčitamo iz kumulativnega histograma na sliki 1. Kjer vrednost $N(e)$ hitro naraste najdemo ne_0 . Pomagamo si z ravnimi deli, ki predstavljajo razmik med sosednjimi ne_0 . Zaradi nizke natančnosti in zamudnosti meritev z izbrano metodo merjenja imam malo meritev z veliko varianco.

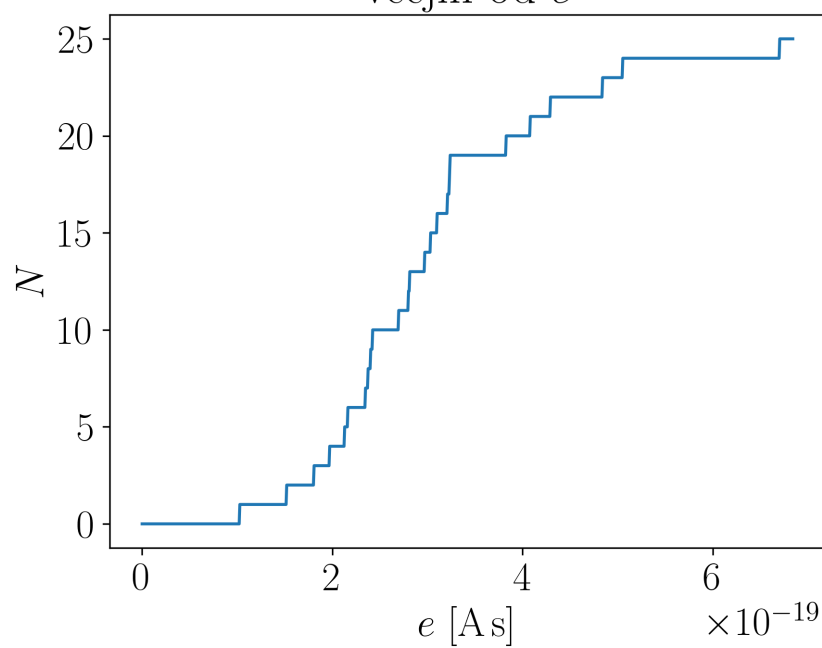
Ko si izberemo mejo za vrednosti, ki pripadajo n_1 , n_2 in n_3 izračunamo povprečno vrednost za vsako in jih med sabo odštejemo. Tako pridemo do treh vrednosti za e_0 :

$$\begin{aligned} e_{0,1} &= (2,4 \pm 0,5) \cdot 10^{-19} \text{ A s} \\ e_{0,2} &= (1,8 \pm 0,7) \cdot 10^{-19} \text{ A s} \\ e_{0,3} &= (2,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-19} \text{ A s} \end{aligned}$$

Negotovost sem določil tako, da sem za vsak nabor izračunal standardno deviacijo. Če vzamemo povprečje teh treh vrednosti, obtežen z negotovostmi, pa dobimo končno vrednost za e_0 :

$$e_0 = (2,1 \pm 0,3) \cdot 10^{-19} \text{ A s}$$

Kumulativni histogram števila kapljic,
večjih od e



Slika 1: Kumulativni histogram števila kapljic, ki so večje od e . Vidimo veliko raztrosenost meritev. Za mejo med n_1 in n_2 sem izbral večjo stopnico tik pod $4 \cdot 10^{-19}$, med n_2 in n_3 pa tisto okoli $6 \cdot 10^{-19}$.

Tabela 1: Tabela izračunanih vrednosti naboja in radija kapljic. V nadaljnjih izračunih zavržemo zadnjih nekaj vrednosti, ker enačbe dobro veljajo le za kapljice z nižjim nabojem.

e [A s]·10 ⁻¹⁹	r [m]·10 ⁻⁷
1,0	4,2
1,5	3,2
1,8	3,6
1,9	3,8
2,1	3,8
2,1	4,1
2,3	5,0
2,3	4,9
2,4	5,3
2,4	6,3
2,7	4,0
2,8	4,2
2,8	3,7
2,9	4,2
3,0	4,0
3,1	3,9
3,2	3,6
3,2	3,8
3,2	4,3
3,8	5,2
4,0	5,0
4,2	4,9
4,8	5,5
6,6	4,0
6,8	5,0
10,1	4,2

5 Analiza rezultatov

Dobljena vrednost osnovnega naboja je blizu prave vrednosti, $e_0 = 1,6 \cdot 10^{-19}$ A s, a je ne zajema znotraj intervala negotovosti. To je posledica majhnega števila meritev, saj sem velik del meritev zanemaril, ker so bile vrednosti naboja relativno velike. Prav tako je težko natančno nastaviti napetost, pri kateri se kapljica povsem ustavi, ker je njeno gibanje nekoliko naključno. Z drugo metodo, kjer merimo hitrosti kapljic pri določeni napetosti bi bila boljša, saj je meritev hitrosti relativno natančna in nam omogoči merjenje več kapljic hkrati, tako da bi lahko v enakem času pridobil več podatkov.