

Millikanov pokus

Michal Zajaček

Historický úvod

Robert Andrews Millikan sa narodil v roku 1868 v Morrison, Illinois, USA. V štúdiách pokračoval na Oberlin College, kde získal bakalársky titul. Doktorát získal na Kolumbijskej univerzite v roku 1895. V poslednom desaťročí 19. storočia získal miesto na novozaloženej University of Chicago, pričom Katedru fyziky viedol A. A. Michelson¹.

Počas prvého desaťročia 20. storočia Millikan napísal pokrokové učebnice na svoju dobu. Dôraz v nich kládol na analýzu daného problému. Na konci každej kapitoly sa nachádzali príklady, pri ktorých však bolo treba porozmýšľať, nestačilo len dosadiť do vzorca. Prelom 19. a 20. storočia bol bohatý na vedecké objavy. J.J. Thomson objavil elektrón, Max Planck naštartoval kvantovú revolúciu, Albert Einstein uviedol špeciálnu teóriu relativity, fyzikálne objasnil fotoelektrický efekt a Brownov pohyb, ktorý bol experimentálne overený Jean Baptistom Perrinom, čím potvrdili atómovú teóriu Johna Daltona². Millikan však ako 40-ročný k týmto objavom neprispel a začínal sa preto o svoju vedeckú kariéru obávať. Rozhodol sa následne určiť náboj elektrónu.

Určenie náboja elektrónu

V roku 1896 J.J. Thomson ukázal, že katódové lúče sú nabité (reakcia na elektrické a magnetické pole) a majú konštantný pomer náboja a hmotnosti. Tým bol v podstate objavený elektrón a bolo ukázané, že i atómy majú vnútornú štruktúru. Úlohou bolo zmerať priamo buď hmotnosť alebo náboj elektrónu³. Spočiatku sa náboj elektrónu pokúšal určiť sám Thomson a jeho kolegovia. Merali pritom rýchlosť pádu obláčiku vodných kvapiek, ktoré sa vytvorili na iónoch v hmlovej komore, v závislosti od veľkosti elektrického poľa. Keďže najvyššie položené kvapôčky boli najmenšie, dalo sa predpokladať, že ich náboj je rovný elementárnemu náboju e .

Tento experiment bol i východiskom pre Millikana s tým, že aplikoval väčšie elektrické polia. Pri pozorovaní však vyplynulo, že kvapôčky s rôznym nábojom sa vplyvom takýchto polí rozplynú, zostalo len niekoľko s takým nábojom, pri ktorom dochádza k približnému vyrovnaniu elektrostatickej a gravitačnej sily. Millikan v tom videl potenciál novej metódy, pri ktorej by sa meral náboj na jednotlivých kvapôčkach.

Voda sa však vyparuje príliš rýchlo, preto hľadal Millikan so svojím doktorandom Harvey Fletcherom iné kvapaliny s menšou mierou vyparovania, napr. ortuť, glycerín a olej.

Fletcher skonštruoval prvú meraciu aparaturu, pričom použil olej, ktorý rozprašoval pomocou parfúmového rozprašovača. Prvé, čo Fletchera a Millikana zaujalo pri pohľade cez okulár ďalekohľadu, bol neustály, chaotický pohyb kvapôčok oleja. Bol to jasný príklad Brownovho pohybu: molekuly vzduchu s chaotickým pohybom vrážajú do olejových kvapôčok.

¹Známy predovšetkým pre Michelson-Morleyho experiment spochybňujúci éter

²John Dalton(1766-1844) bol anglický polyhistor. Okrem atómovej teórie popísal aj barvosleposť - *daltonismus*.

³Zo známeho pomeru sa dá elementárne určiť hmotnosť zo známeho náboja et vice versa.

Millikan sa ihneď pustil do vylepšovania meracej aparatúry a metódy merania. Po určitom čase mala spoločná práca Millikana a Harvey Fletchera dva hlavné výsledky:

- **Určenie elementárneho náboja** e na základe miery zostupu a vzostupu olejových kvapôčok za pôsobenia elektrostatickej sily, gravitačnej sily a tretej sily (viskozita vzduchu).
- **Určenie súčinu Avogadrovej konštanty a elementárneho náboja** $N_A e$ z pozorovania Brownovho pohybu.

Po vzájomnej dohode si rozdelili Millikan a Fletcher výsledky tak, aby mohli napísať každý samostatné práce. Millikan napísal prácu na určenie elementárneho náboja a Harvey Fletcher napísal dizertačnú prácu na Brownov pohyb [1]. Hoci v súčasnosti mnohí túto dohodu vnímajú negatívne z hľadiska vedeckej etiky, skutočnosť je taká, že Millikan a Fletcher mali dobrý vzťah do konca svojho života⁴ a ich dohoda mala praktický význam⁵.

Millikanovi stála k získaniu Nobelovej ceny ešte jedna prekážka v ceste. V roku 1910 publikoval svoju prácu o meraní elementárneho náboja, no vzápätí sa dostal do konfliktu s videnským fyzikom Felixom Ehrenhaftom. Ten totiž viackrát zmeral na podobne navrhnutéj aparatúre elementárny náboj menší ako Millikan⁶. Aby si Millikan obhájil svoje predchádzajúce závery, uskutočnil novú sériu meraní, pričom výsledky publikoval v článku v roku 1913. V ňom je stanovená hodnota e s veľkou presnosťou - relatívna neistota dosahovala asi 1%. Po spochybnení Ehrenhaftových výsledkov Millikanovi už nič nebránilo k získaniu Nobelovej ceny v roku 1923.

Po Millikanovej smrti sa objavili náznaky a dôkazy, že svoje dáta vyberal zámerne tak, aby potvrdil svoju hypotézu. Viacerí vedci a novinári jeho výsledky rázne odsúdili, pretože jeho postup bol v rozpore so súčasným ponímaním vedeckej etiky. Súčasne sa objavili obhajoby jeho práce a výsledkov [1].

Nech už je pravda akákoľvek, určite môžeme prehlásiť, že Robert A. Millikan sa zaslúžil o presné stanovenie hodnoty elementárneho náboja.

Fyzikálna podstata určenia elementárneho náboja

Na obrázku 1 je schéma Millikanovej aparatúry na určenie elementárneho náboja.

Pri odvodzovaní vzťahov budeme uvažovať pôsobenie síl v jednej dimenzii. Millikan najprv uskutočnil merania pri vypnutom elektrickom poli, teda pri elektrickej intenzite $E = 0$. Na základe týchto meraní mohol určiť polomer r kvapôčok.

Smerom nadol pôsobila na kvapôčky gravitačná sila:

$$\downarrow: F_g = mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_o g \quad (1)$$

kde ρ_o je hustota oleja a g je tiažové zrýchlenie. Smerom nahor pôsobila vztlaková sila vzduchu:

$$\uparrow: F_v = V \rho_v g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_v g \quad (2)$$

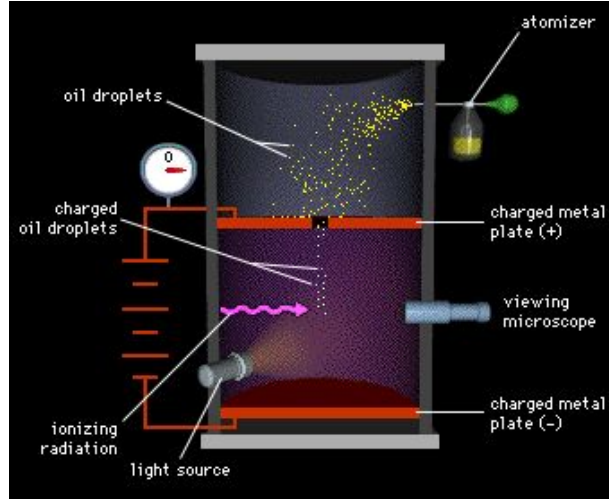
kde ρ_v je hustota vzduchu. Na kvapôčky pri pohybe nadol takisto pôsobí i trecia sila vzduchu vyjadrená Stokesovým zákonom smerom nahor, ktorá má svoj pôvod v jeho viskozite:

$$\uparrow: F_t = 6\pi\eta r v \quad (3)$$

⁴Fletcher, H: *My work with Millikan on the oil-drop experiment*. Physics Today, June, 1982, p. 43

⁵Millikan tým získal vedeckú reputáciu a Fletcher mal dobrú tému na dizertačnú prácu.

⁶Millikan vymyslel na to špeciálny termín -subelektróny



Obr. 1: Schéma Millikanovej aparatúry [3]

kde η je dynamická viskozita⁷.

Po istom čase sa rýchlosť kvapôčok ustáli, pohybujú sa rovnomerným priamočiarym pohybom tzv. terminálnou rýchlosťou v_D smerom nadol. Inými slovami sily pôsobiace smerom nahor (vzťahy 3 a 2) a nadol (vzťah 1) sa vyrovnávajú:

$$F_g = F_v + F_t \quad (4)$$

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_o g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_v + 6\pi\eta r v_D \quad (5)$$

$$r^2 \frac{4}{3}g(\rho_o - \rho_v) = 6\eta v_D \quad (6)$$

Po vyjadrení pre polomer olejových kvapiek platí:

$$r = \sqrt{\frac{9}{2} \frac{\eta v_D}{g(\rho_o - \rho_v)}} \quad (7)$$

Millikan uskutočnil ďalšiu sériu meraní s nenulovým elektrickým poľom $E \neq 0$. Elektrostatická sila pôsobila pri Millikanovom usporiadaní dosiek kondenzátora smerom nahor:

$$\uparrow: F_E = QE \quad (8)$$

kde Q je náboj olejovej kvapky a E je intenzita elektrostatického poľa medzi doskami kondenzátora. Nech je ich vzdialenosť d a napätie medzi nimi U , potom pre veľkosť intenzity platí: $E = U/d$. Keďže kvapky sa pri nenulovom elektrostatickom poli pohybovali smerom nahor, trecia sila vzduchu F_t pôsobí smerom nadol.

Opäť sa po istom čase vyrovnávajú sily pôsobiace smerom nahor (vzťahy 8 a 2) a nadol (vzťahy 1 a 3), kvapky sa pohybujú rovnomerne priamočiario smerom nahor rýchlosťou v_H . Teda platí:

$$F_E + F_v = F_g + F_t \quad (9)$$

$$QE + \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_v g = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_o g + 6\pi\eta r v_H \quad (10)$$

Po vyjadrení pre náboj olejovej kvapky Q platí:

$$Q = \frac{1}{Ud} \left(\frac{4}{3}\pi r^3 g(\rho_o - \rho_v) + 6\pi\eta r v_H \right) \quad (11)$$

⁷Jednotka Nsm^{-2}

Ako je známe, Millikan neskôr zistil, že každý náboj sa dá napísať ako celočíselný násobok elementárneho náboje, resp. náboja elektrónu: $Q = Ne$, kde e je elementárny náboj a $N \in \mathbb{N}$.

Hodnota e mu však vyšla o niečo menšia ako súčasná hodnota $e = 1,602176487(40) \cdot 10^{-19}C$ ⁸.

Millikan spravil chybu pri použití Stokesovho vzťahu a dynamickej viskozity η , ktorá pre malé kvapky neplatí. Stokesov zákon sa dá aplikovať v prípade nekonečnej viskóznej tekutiny. V Millikanovom pokuse sa však nedá úplne zanedbať vzdialenosť molekúl vzduchu s rozmermi kvapiek.

Opravená hodnota dynamickej viskozity η_{kor} musela byť experimentálne zistená podľa vzťahu:

$$\eta_{kor} = \frac{\eta}{1 + A\frac{\lambda}{r}} \quad (12)$$

kde koeficient A má približne hodnoty $A \approx 1$.

Literatúra

- [1] Goostein, David: *In the case of Robert Andrews Millikan*. American Scientist, Jan-Feb 2001, pp.54-60.
- [2] http://en.wikipedia.org/wiki/Robert_Andrews_Millikan
- [3] <http://millikan.nbaoh.com/1.htm>

⁸Millikanova hodnota prezentovaná počas nobelovskej prednášky $e = 1,5924(17) \cdot 10^{-19}C$