

1 Doświadczenie Millikana - e-doświadczenie Pole Elektryczne

W 1897 roku, J. J. Thomson¹ odkrył elektron, jedną z podstawowych cząstek, z których zbudowane są atomy. Kolejnym wyzwaniem było określenie właściwości tej nowej cząstki. Pomiar masy elektronu bez znajomości ładunku nastęczał wiele trudności. Przełom nastąpił w 1909 roku, kiedy to Millikan² zaproponował i przeprowadził oryginalne doświadczenie umożliwiające wyznaczenie wartości ładunku elektronu (zwanego ładunkiem elementarnym) bez znajomości jego masy, za pomocą mikroskopu optycznego.

Doświadczenie Millikana

Doświadczenie polega na wpuszczaniu kropeł oleju pomiędzy dwie naładowane przeciwnym ładunkiem okładki kondensatora. Okładki te wytwarzają jednorodne pole elektryczne. Pole elektryczne działa tylko na cząstki obdarzone ładunkiem. W tym celu krople oleju są jonizowane³ poprzez oświetlanie lampą rentgenowską⁴, co powoduje przyciąganie ich przez okładki kondensatora. Dzięki temu część kropli zaczyna się unosić. Ruch kropli obserwuje się za pomocą mikroskopu optycznego. Schemat aparatury pomiarowej znajdziesz w e-doświadczeniu po wybraniu „Ciekawostki” i naciśnięciu „POKAŻ SCHEMAT” w panelu dolnym.

Millikan odkrył, że wartości ładunków kropełek oleju są wielokrotnością ładunku elementarnego oraz udowodnił, iż ładunek elementarny jest najmniejszą możliwą „porcją” ładunku. Wyznaczona przez niego wartość ładunku elementarnego to $e = 1,5924(17) \cdot 10^{-19}$ C. Obecnie jako wartość ładunku elementarnego przyjmujemy $e = 1,602176565(35) \cdot 10^{-19}$ C. Jak widać, udało mu się wyznaczyć wartość bardzo zbliżoną do tych, uzyskiwanych obecnie.

Swobodnie spadająca kropla

Przedstawmy teraz ideę tego doświadczenia. Załóżmy na razie brak pola elektrycznego, czyli wpuszczamy kropelki pomiędzy nienaładowane okładki kondensatora. Opadająca kropelka porusza się pod wpływem działania siły grawitacji $Q = mg$ (gdzie m to masa kropli, a g to przyspieszenie grawitacyjne). Ruch spadającej kropelki jest hamowany

¹Sir Joseph John Thomson (1856—1940) – brytyjski fizyk; laureat nagrody Nobla; zajmował się badaniem atomów (za odkrycie elektronu i badania nad przewodnictwem elektrycznym gazów został nagrodzony nagrodą Nobla w 1906 r.), odkrywaniem izotopów oraz spektrometrią masową (wynalazł i zaprezentował pierwszy spektrometr masowy).

²Robert A. Millikan (1868—1953) – amerykański fizyk, laureat nagrody Nobla; zajmował się głównie elektrycznością, optyką i fizyką molekularną; najbardziej znany z badań ładunku elektronu i zjawiska fotoelektrycznego (za co dostał nagrodę Nobla w 1923 r.); autor i publicysta.

³Jonizacja to proces, który powoduje że obojętny elektrycznie atom (lub cząsteczką) zamienia się w jon dodatni (lub czasami ujemny) na skutek wybicia elektronu z powłoki atomowej. By zaszła jonizacja, trzeba dostarczyć energii do atomu zdolnej wybić elektron, np. pod postacią promieniowania rentgenowskiego.

⁴Lampa rentgenowska to źródło promieniowania rentgenowskiego, sztucznie wytwarzanego poprzez przyłożenie bardzo wysokiego napięcia do dwóch elektrod umieszczonych w zamkniętej szklanej bańce. Na skutek przyłożonego napięcia jedna z elektrod jest bombardowana cząsteczkami, które w momencie uderzenia w drugą elektrodę emitują promieniowanie rentgenowskie.

siłą wyporu⁵ F_w działającą w powietrzu na kroplę. Siła wyporu, zgodnie z prawem Archimedesesa, ma postać:

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

gdzie r to promień, ρ_p to gęstość powietrza, a g to przyspieszenie ziemskie.

Dodatkowym czynnikiem hamującym ruch kropli jest siła oporu Stokesa F_o , wynikająca z lepkości powietrza:

$$F_o = 6\pi\eta r v_o, \quad (2)$$

gdzie η to współczynnik lepkości powietrza, r to promień kropli, a v_o to prędkość opadania kropli.

Lepkość

Lepkość to opór wewnętrzny płynu (pod pojęciem płynu rozumiemy ciecz lub gaz). W życiu codziennym z lepkością spotykamy się na przykład pływając w basenie, kiedy to trzeba użyć pewnej siły aby przezwyciężyć opór stawiany przez wodę. Analogicznie, należy przezwyciężyć opór powietrza poruszając się na przykład samochodem. Lepkość określa się również jako wewnętrzne tarcie warstw płynu względem siebie.

W doświadczeniu Millikana kropla porusza się ruchem jednostajnym, gdyż siła ciężkości jest równoważona przez siłę wyporu i siłę Stokesa. Możemy to wyrazić wzorem:

$$Q = F_w + F_o. \quad (3)$$

Po podstawieniu wzorów (1) i (2) otrzymujemy:

$$mg = \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_p g + 6\pi\eta r v_o. \quad (4)$$

Do wzoru (4) można podstawić wyrażenie na masę kropli:

$$m = \rho_o V = \rho_o \frac{4}{3}\pi r^3, \quad (5)$$

gdzie ρ_o to gęstość oliwy, a V objętość kropli. Wówczas wzór (4) przybiera postać:

$$\frac{4}{3}\pi r^3 \rho_o g - \frac{4}{3}\pi r^3 \rho_p g = 6\pi\eta r v_o. \quad (6)$$

Prędkość opadania kropli

Przekształcając wzór (6), można obliczyć prędkość opadania kropli v_o :

$$v_o = \frac{2}{9} \frac{gr^2}{\eta} (\rho_o - \rho_p). \quad (7)$$

Ze względu na bardzo małe rozmiary kropeł wprowadza się tzw. poprawkę do wzoru Stokesa (2). Wzór wtedy przyjmuje postać:

$$v_o = \frac{2}{9} \frac{gr^2}{\eta} (\rho_o - \rho_p) \left(1 + \frac{b}{Pr}\right), \quad (8)$$

⁵Siła wyporu kojarzy się przeważnie z cieczami. Ale powietrze jest mieszaniną gazów, a dla gazów obowiązują te same zasady i prawa mechaniki płynów co dla cieczy.

gdzie b to współczynnik korygujący, a P to ciśnienie atmosferyczne. Ponieważ gęstość powietrza jest znacznie mniejsza od gęstości oliwy, możemy pomijać gęstość powietrza w dalszych rozważaniach. Współczynnik korygujący b wyznacza się metodą analizy graficznej, opracowanej dla tego doświadczenia przez Millikana.

Promień kropli

Promień kropli można wyznaczyć przekształcając wzór (8). We wzorze pominięto gęstość powietrza ρ_p :

$$r = \sqrt{\left(\frac{b}{2P}\right)^2 + \frac{9\eta v_o}{2\rho_o g}} - \frac{b}{2P}, \quad (9)$$

gdzie b to współczynnik korygujący, P to ciśnienie atmosferyczne, η to lepkość powietrza, ρ_o to gęstość oliwy, g to przyspieszenie ziemskie, zaś v_o to prędkość opadania kropli. Prędkość opadania kropli można wyznaczyć doświadczalnie, mierząc drogę przebytą przez kroplę oraz czas potrzebny na pokonanie tej drogi. Prędkość liczymy dzieląc drogę przez czas.

Ruch kropli w polu elektrycznym

Rozpatrzmy teraz ruch kropli w polu elektrycznym. Gdy przyłożymy napięcie do okładek kondensatora między którymi porusza się kropla oleju, to wytworzone pole elektryczne spowoduje wznoszenie się tej kropli między okładkami lub opadanie kropli w dół z prędkością większą, niż w przypadku braku pola. Zależy to od zwrotu wektora natężenia pola elektrycznego, a co za tym idzie i zwrotu siły elektrycznej działającej na kroplę. W przypadku ruchu kropli w górę, siła elektryczna będzie równoważona przez ciężar kropli i siłę oporu Stokesa, co można przedstawić wzorem:

$$F = mg + 6\pi\eta r v_w, \quad (10)$$

gdzie E to natężenie pola elektrycznego, q to ładunek kropli, m to masa kropli, g to przyspieszenie ziemskie, a v_w to prędkość wznoszenia się kropli. Prędkość wznoszenia kropli można zmierzyć doświadczalnie. W powyższym wzorze zaniedbaliśmy siłę wyporu (dla porównania patrz wzór 4) działającą na kroplę w powietrzu z uwagi na to, iż gęstość powietrza jest dużo mniejsza od gęstości oliwy, a co za tym idzie i masa wypartego powietrza przez kroplę jest dużo mniejsza od masy kropli oliwy.

Wzór (10) można zapisać w uproszczonej formie, zastępując parametry, które nie ulegają zmianie przez stałą k :

$$Eq = mg + kv_w. \quad (11)$$

W nieobecności pola elektrycznego po zaniedbaniu siły wyporu mieliśmy:

$$mg = kv_o. \quad (12)$$

Podstawiając (12) do (11) otrzymamy:

$$Eq = kv_o + kv_w = k(v_o + v_w), \quad (13)$$

dzieląc stronami przez E otrzymujemy:

$$q = \frac{k(v_o + v_w)}{E}. \quad (14)$$

Ładunek kropli

Korzystając ze wzoru (12) jesteśmy w stanie wyrazić współczynnik k jako stosunek ciężaru do prędkości opadania, co po podstawieniu do powyższego wzoru (14) da nam postać:

$$q = \frac{mg}{E} \frac{(v_o + v_w)}{v_o}. \quad (15)$$

Natężenie pola elektrycznego w kondensatorze płaskim możemy wyrazić jako:

$$E = \frac{U}{d}, \quad (16)$$

gdzie U to wartość napięcia między okładkami, a d to odległość między okładkami. Zatem wzór na ładunek kropli przyjmuje ostatecznie postać:

$$q = \frac{mgd}{U} \frac{(v_o + v_w)}{v_o}, \quad (17)$$

gdzie m to masa kropli, g to przyspieszenie ziemskie, v_o to prędkość opadania przy braku pola elektrycznego, a v_w to prędkość wznoszenia kropli w polu elektrycznym.

Teraz jesteśmy w stanie obliczyć wartość ładunku dowolnej, zmierzonej kropli oleju. Masę kropli liczymy ze wzoru (5) (wykorzystując wzór na promień kropli (9)), wartość przyspieszenia ziemskiego jest znana, podobnie odległość między okładkami kondensatora, napięcie ustalamy sami, a prędkości opadania i wznoszenia mierzymy doświadczalnie.

W „Tablicach fizycznych” znajdziesz wszystkie potrzebne parametry do obliczenia wartości ładunku kropli.

Wyznaczanie ładunku elementarnego

- ✓ Wybierz zakładkę „Ciekawostka”.
- ✓ Możesz wybrać opcję POKAŻ SCHEMAT, by dokładniej obejrzyć i zapoznać się z aparaturą pomiarową.
- ✓ Podłącz końcówki przewodów pod zasilacz poprzez przeciągnięcie ich myszą i upuszczenie w odpowiednim gnieździe. Zalecamy podłączenie przewodów zgodnie z kolorystyką gniazd, czyli czerwony kabel pod gniazdo „+”, a czarny przewód pod gniazdo „-”. W przypadku odwrotnego połączenia, otrzymamy inny kierunek przepływu prądu między okładkami kondensatora płaskiego.
- ✓ Włącz zasilanie, ale zostaw zerowe napięcie.
- ✓ Do tego eksperymentu będziesz potrzebował stopera, więc zalecamy wybranie go z paska narzędzi.
- ✓ By ułatwić pomiary, w tabeli umieszczono szablon, który automatycznie obliczy potrzebne wartości. By go uruchomić, z paska narzędzi wybierz „Tabele”, a następnie kliknij przycisk MILLIKAN. Pierwsze pięć kolumn będziesz wypełniał sam wynikami z pomiarów, dlatego zalecamy, by to okno było cały czas otwarte w trakcie pomiarów. Po wypełnieniu pól, z szablonu w „Tabeli” będziesz mógł odczytać prędkość opadania i prędkość wznoszenia kropli, promień i masę kropli oraz wartość zgromadzonego na niej ładunku.

- ✓ Uruchom doświadczenie poprzez kliknięcie przycisku URUCHOM. Jak zapewne zauważyłeś stoper zaczął mierzyć czas, ale nie przejmuj się – w każdej chwili możesz wyzerować go poprzez kliknięcie przycisku WYZERUJ.
- ✓ Korzystając z atomizera wpuść porcję kropli do układu (poprzez wciśnięcie przycisku oznaczonego symbolem kropli).
- ✓ Poobserwuj ruch kropli w układzie. Podziałki, opisane cyframi na ekranie, znajdują się co 1 mm.
- ✓ Zastanów się czemu niektóre krople opadają szybciej, a niektóre wolniej? Od czego może to zależeć?
- ✓ Gdy wszystkie krople wyjdą poza obszar mikroskopu, wpuść kolejną porcję.
- ✓ Wybierz jedną kroplę do obserwacji i zmierz jej czas opadania pomiędzy wybranymi przez Ciebie liniami. Najłatwiej to zrobić poprzez wyzerowanie stopera w momencie gdy wybrana przez Ciebie kropla mija np. linię oznaczoną „2”, a następnie zatrzymania doświadczenia (poprzez kliknięcie przycisku ZATRZYMAJ) gdy mija np. linię oznaczoną „3”. Mogą to być dowolne, wybrane przez Ciebie linie.
- ✓ Zmierzony czas opadania odczytaj ze stopera i wpisz do tabeli w kolumnie oznaczonej „to”. W kolumnie „so” wpisz jaką drogę pokonała badana przez ciebie kropla podczas opadania (dla powyższego przykładu będzie to 1 mm czyli 0,001 m – ponieważ tyle wynosi odległość między sąsiednimi podziałkami na ekranie). Pamiętaj o zachowaniu odpowiednich jednostek!
- ✓ Wyzeruj stoper i ustaw wartość napięcia na zasilaczu. Zalecamy zaczenie od wartości 300 V. Wybraną przez siebie wartość wpisz do tabeli w kolumnie oznaczonej „U”.
- ✓ Uruchom ponownie doświadczenie.
- ✓ Obserwując dalej tą samą kroplę, zmierz jej czas wznoszenia się między wybranymi przez Ciebie liniami. Pomiar przeprowadź analogicznie jak przy mierzeniu czasu opadania (mogą to być te same linie).
- ✓ Zmierzony czas wznoszenia odczytaj ze stopera i wpisz do tabeli w kolumnie oznaczonej „tw”. W kolumnie „sw” wpisz jaką drogę pokonała badana przez ciebie kropla podczas wznoszenia (dla powyższego przykładu będzie to 1 mm czyli 0,001 m). Pamiętaj o zachowaniu odpowiednich jednostek!
- ✓ Odczytaj z tabeli wartość ładunku mierzonej kropli q . Czy zmierzony przez ciebie ładunek jest wielokrotnością ładunku elementarnego?
- ✓ Powtórz pomiary dla przynajmniej 5 różnych kropli.
- ✓ Oblicz jaka jest wartość ładunku elementarnego.
- ✓ Aby to zrobić, znajdź przybliżony największy wspólny dzielnik z otrzymanych ładunków kropli.
- ✓ Porównaj otrzymany wynik z wartościami z „Tablic fizycznych”.

Sprawozdanie w dowolnym formacie w wersji elektronicznej przesyłamy na płatwormie e-nauczanie.

W sprawozdaniu należy ująć krótki opis i przebieg doświadczenia, tabele pomiarowe lub/i obliczenia, krótką dyskusję otrzymanego wyniku.

Za skorzystanie z gotowej tabeli przygotowanej w e-doświadczeniach - max 15p.

Za własne obliczenia - max 20p.