

Ćwiczenie 47

Doświadczenie Millikana

Cel ćwiczenia

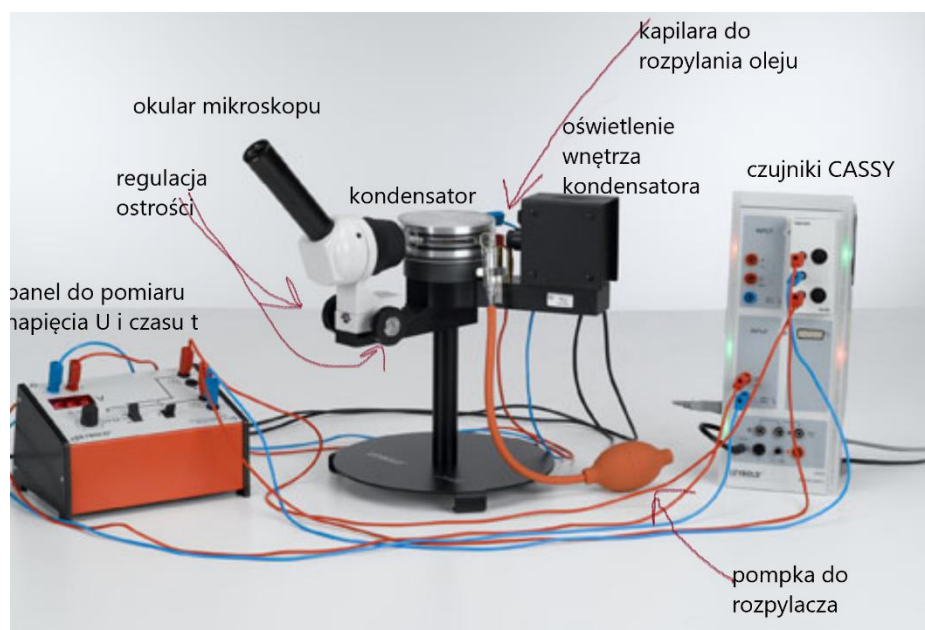
Próba odtworzenia eksperymentu Millikana i wyznaczenia ładunku elementarnego e .

Wprowadzenie

Doświadczenie Millikana przyniosło odpowiedź na zasadnicze pytania : czy ładunek elektryczny zmienia się w sposób ciągły? Czy można go dzielić w nieskończoność na coraz mniejsze porcje? A może istnieje podstawowa, elementarna porcja ładunku, której podzielić już się nie da?

W 1909 roku Robert A. Millikan przeprowadził eksperyment, w którym badał ruch drobinek(aerozolu) oleju rozpylonych w powietrzu między okładkami kondensatora płaskiego, który pokazał, że ładunki jakie wiązały się z drobinami były zawsze wielokrotnością pewnej podstawowej wartości, a co za tym idzie, ładunek pojedynczego elektronu jest stały. Początkowo wyznaczono jego wartość na $1,33 \cdot 10^{-19} \text{C}$ (w 1910r) a następnie na $1,592 \cdot 10^{-19} \text{C}$ (w 1914r) – obecnie przyjmuje się $1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{C}$ (od 2019r)

W oryginalnym eksperymencie Millikan rozpylał olej w postaci aerozolu drobinek, a niektóre z nich elektryzowały się w powietrzu i wpadały do komory pomiarowej, pomiędzy dwie równoległe płyty kondensatora, w pionowe pole elektryczne. Przez mikroskop obserwowano ruch kropelek oleju. Kropelki aerozolu opadały na skutek grawitacji, pokonując siłę Stokes'a oporu powietrza, a napięcie w kondensatorze dodatkowo sterowało ruchem kropelek w zależności od tego jak naładowane były okładki i jakiego znaku ładunek przenoszony był przez kropelki. Mierząc ich prędkości przy znanym napięciu na okładkach kondensatora można było wyznaczyć ładunek jakim naelektryzowana była wybrana kropelka.



Rys.1. Zestaw służący do wykonania eksperymentu w pracowni studenckiej.

Rysunek 1 przedstawia zestaw służący do wykonania ćwiczenia. Na stojaku umieszczone są okrągłe płyty aluminiowe będące okładkami płaskiego kondensatora. Napięcie U między okładkami kondensatora można regulować pokrętelem potencjometru na panelu pomiarowym. Kondensator jest izolowany pleksiglasową osłoną z otworami – jeden przy rurce z kapilarą do rozpylania aerozolu i drugi naprzeciw układu optycznego celem umożliwienia obserwacji bezpośredniej wnętrza kondensatora. Zawieszona z boku kondensatora rurka z kapilarą jest wypełniona olejem i połączona z pompką - ma za zadanie rozpylić olej z końcówki kapilary (bardzo drobne kropelki) i umożliwić kropelkom wędrówkę wewnątrz kondensatora. Te kropelki, które naelektryzowały się na drodze pomiędzy kapilarą a wnętrzem kondensatora będą widoczne w okularze mikroskopu jako poruszające się inaczej niż cząstki nie naładowane. W konfiguracji na stanowisku płyta dolna jest na potencjale dodatnim i kropelki niosące ładunek ujemny będą się poruszać w dół szybciej niż te, które opadają jedynie pod wpływem pola grawitacyjnego.

Kiedy kropla oleju o promieniu r_0 opada z prędkością $-v_1$, działa na nią opór Stokesa, który powoduje skierowaną do góry siłę:

$$F_1 = 6\pi\eta r_0 v_1 \quad (1)$$

gdzie η to lepkość powietrza. Gdy kropla oleju unosi się z prędkością v_2 w zewnętrznym polu elektrycznym E , skierowana w dół siła wynikająca z oporu Stokesa wynosi:

$$F_2 = -6\pi\eta r_0 v_2 \quad (2)$$

Różnica między tymi dwiema siłami równa się dokładnie sile $q_0 \cdot E$, wywieranej przez przyłożone pole elektryczne E , czyli:

$$q_0 E = q_0 \frac{U}{d} = F_1 - F_2 = 6\pi\eta r_0 (v_1 + v_2) \quad (3)$$

Stąd ładunek q_0 można wyrazić jako:

$$q_0 = \frac{6\pi \cdot \eta \cdot r_0 \cdot d \cdot (v_1 + v_2)}{U} \quad (4)$$

Aby określić ładunek q_0 , potrzebny jest jedynie promień r_0 rozważanej kropli oleju. Promień ten można łatwo obliczyć z równowagi sił w przypadku opadającej kropli. Wtedy całkowita siła grawitacyjna:

$$F = -V\Delta\rho g \quad (5)$$

równoważy się z siłą oporu Stokesa F_1 , gdzie $\Delta\rho$ to różnica gęstości oleju i powietrza.

Zatem mamy:

$$0 = F + F_1 = -\frac{4}{3}\pi r_0^3 \Delta\rho g + 6\pi\eta r_0 v_1 \quad (6)$$

lub

$$r_0 = \sqrt{\frac{9\eta v_1}{2\Delta\rho g}} \quad (7)$$

Aby dokładniej określić ładunek q , należy uwzględnić, że opór Stokesa wymaga korekcji dla bardzo małych promieni r , ponieważ są one wówczas rzędu średniej drogi swobodnej cząsteczek powietrza. Skorygowany wzór na siłę Stokesa, który uwzględnia zależność od ciśnienia powietrza p , wygląda następująco:

$$F = \frac{6\pi\eta r v}{1 + \frac{b}{rp}} \quad (8)$$

gdzie b jest stałe i równe $b=80 \mu\text{m}\cdot\text{hPa}$.

Z użyciem oznaczenia $A=b/p$, skorygowany promień r wyraża się wzorem:

$$r = \sqrt{r_0^2 + \frac{A^2}{4}} - \frac{A}{2} \quad (9)$$

a poprawiony ładunek q wynosi:

$$q = \frac{q_0}{\left(1 + \frac{A}{r}\right)^{1.5}} \quad (10)$$

Metoda unoszenia (Floating method)

W tej wersji eksperymentu napięcie U na kondensatorze płytowym jest regulowane tak, aby określona kropla oleju unosiła się, tzn. jej prędkość wznoszenia wynosi $v_2=0$. Prędkość opadania v_1 jest mierzona po wyłączeniu napięcia U na kondensatorze.

Ponieważ $v_2=0$, powyższe wzory są nieco uproszczone. Jednak z fundamentalnych powodów nie można bardzo precyzyjnie ustawić $v_2=0$. W związku z tym metoda unoszenia prowadzi do większych błędów pomiarowych i szerszego rozrzutu danych w rozkładzie częstości niż w przypadku metody opisaną poniżej.

Metoda opadania/wznoszenia (Falling/rising method)

W drugiej wersji eksperymentu mierzone są prędkości v_1 (lub v_2) oraz napięcie U . Ta metoda umożliwia uzyskanie bardziej precyzyjnych wyników pomiarów w porównaniu z metodą unoszenia, ponieważ w tym przypadku prędkość v_1 jest mierzona bezpośrednio.

Wykonanie ćwiczenia

Sprawdź elementy zestawu, włącz panel pomiarowy i czujniki CASSY (włącz do gniazdka zasilacza lub podepnij z tyłu lub boku obudowy przewody zasilaczy), włącz komputer.

- Uruchom aplikację Aparat – obsługuje kamerę stojącą na statywie.
- Uruchom z pulpitu program CASSYlab2 – obsługuje czujniki CASSY, które mierzą czas t i napięcie U . Program ma także zaimplementowane wzory wyliczające ładunek q , przy założeniu, że droga jaką przebywa kropelka jest zawsze $s = 20$ podziałek co odpowiada 1mm, i pomiar zawsze jest wykonywany mierząc czas, w którym kropelka pokonuje 20 podziałek.
- Z uwagi na ograniczony czas trwania ćwiczeń laboratoryjnych oraz trudność w „zobaczeniu” pola pomiarowego i kropelek, pomiary będą wykonywane metodą „floating” dla kropelek naładowanych ujemnie, opadających w polu grawitacyjnym z uwzględnieniem opóźniającej siły oporu Stokesa.

Przebieg pomiarów

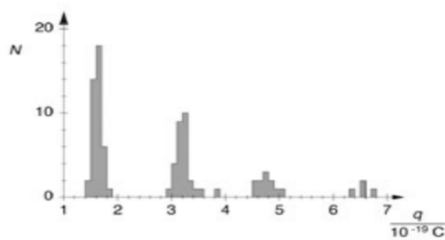
Metoda unoszenia (Floating method)

Ustawienia pomiarowe:

1. Ustaw mikrometr okularowy pionowo - sprawdź czy wyraźnie widać pionową skalę z podziałką (jeśli nie to obracaj uchwytem soczewki okularu (końcówką bliżej oka), aż wyraźnie zobaczysz skalę mikrometru). Ostrość obrazu reguluje się kręcąc pokrętkami regulacji ostrości po bokach okularu.
2. Na ekranie komputera ustal podział pół na pół pomiędzy oknem programu CASSYlab2, który będzie pokazywał uzyskane wyniki, a aplikacją Aparat, jeżeli używana będzie kamera.
3. Zlokalizuj potencjometr do zmiany wartości napięcia na kondensatorze, oraz przełączniki do pomiaru napięcia U i czasu t na panelu pomiarowym. Na panelu wyświetlać się będzie aktualne napięcie, ale jego dokładniejsza wartość wyświetlana będzie w oknie programu CASSYlab2
4. Jeżeli używasz kamery to ustaw ją tak aby na monitorze widzieć opadające kropelki aerozolu (kamera nie ma ustawień ostrości i powiększenia). Światło, w przypadku gdy jest używana kamera, powinno być zgaszone, aby dodatkowe odbicia nie zakłócały obrazu. Oś okularu i oś kamery powinny być równoległe, a kamera powinna być jak najbliżej okularu. Aby widzieć kropelki aerozolu, należy co jakiś czas ścisnąć pompkę rozpylacza, by rozpylić nową porcję kropelek.

Następnie:

- a) Najpierw ustaw przełączniki U i t w pozycji dolnej.
- b) Włącz napięcie na kondensatorze za pomocą przełącznika U i wyreguluj je potencjometrem obrotowym (400-600 V), obserwując krople na ekranie bądź w okularze tak, aby wybrana, wypatrzona kropla oleju opadała z prędkością około 1-2 podziałek skali na sekundę. Następnie zmniejsz napięcie, patrząc czy kropla przestanie spadać.
- c) Wyłącz napięcie na kondensatorze przełącznikiem U .
- d) Kropla zacznie spadać. Gdy znajdzie się na wysokości wybranej podziałki skali, rozpocznij pomiar czasu przełącznikiem t .
- e) Gdy kropla oleju opadnie o 20 podziałek skali (co odpowiada 1 mm), zatrzymaj pomiar czasu przełącznikiem t i ponownie włącz napięcie na kondensatorze przełącznikiem U .
- f) Wprowadź zmierzone wartości czasu opadania t_i i napięcia U_i do komputera za pomocą przycisku ze znacznikiem stopera (*Single set measurement*) w pasku zadań u góry, ładunek q zostanie obliczony automatycznie i wprowadzony na wykres. W trakcie kolejnych pomiarów wykres będzie automatycznie uzupełniany dla kolejno zmierzonych wartości ładunku. Wykres, na którym wprowadzane będą dane pomiarowe, wybieramy z rozwijanego *Menu* programu CASSYlab2 → *New data measurements*. Wykres ten jest histogramem przeskalowanych wartości ładunku, tj. na osi poziomej ma wartość $q_{\text{zmierzone}}/e_{\text{tablicowe}}$, a na osi pionowej liczbę wystąpień danej wartości z przedziału histogramu. Udany eksperyment powinien pokazywać wyraźne maksima ilości wystąpień dla wartości 1, 2, 3, ... itd.



Rys.2. Przykładowy histogram z danymi pomiarowymi (na osi poziomej wyliczone wartości ładunku, nie skalowane do ładunku elementarnego)

- g) Powtórz pomiar dla innych kropelek oleju. Aby można było wyciągnąć z doświadczenia jakieś wnioski należy wykonać 20-30 pomiarów dla różnych kropli.

Uwagi:

- Jeśli zostaną wybrane krople oleju o małym ładunku, istotność statystyczna zostanie osiągnięta szybciej. Krople oleju przenoszące mały ładunek są identyfikowane przez ich mały rozmiar i wolniejszy ruch w polu elektrycznym, niż istotnie szybki ruch kropelek niosących większy ładunek. Będą widoczne jako ostro zarysowane, lśniące punkciki wyraźnie poruszające się na tle wolno opadających, nie niosących ładunku kropelek aerozolu
- Bardzo wolno opadające i nie reagujące krople, to krople obojętne (nie naładowane) nie ma sensu wykonywać pomiarów, bo rezultat będzie bliski zeru
- Nie zaleca się mierzenia szybko poruszających się, ale mocno rozmazanych kropelek – są to krople których droga widziana w okularze jest mocno zniekształcona przez elementy optyczne i jako taka niemiarodajna.
- Jeśli lokalne ciśnienie powietrza różni się znacznie od 1013 hPa, ciśnienie powietrza należy odpowiednio zmienić we wzorze definiującym parametr korekcji A. Jednak wyświetlane przykładowe wartości (liczone dla powyższego ciśnienia) będą wówczas niedokładne.
- Jeśli podczas zajęć nie ma wystarczająco dużo czasu na obserwację około 20-30 kropelek oleju, można wprowadzić przykład (z zasobów programu *CASSYlab2*), ze zmierzonymi wartościami (ok.20) zamiast samych ustawień, a nowe zmierzone wartości pojawiają się następnie na histogramie jako uzupełniające czerwone znaczniki, potwierdzając i uzupełniając w ten sposób wcześniejsze pomiary.
- Należy pamiętać aby zapisać dane pomiarowe w formacie odczytywalnym poza programem *CASSYlab2*

Opracowanie

Podczas opracowania na podstawie zebranych danych wyznaczyć średnie wartości w zmierzonym rozkładzie częstotliwości występowania określonych wartości ładunku i sprawdzić, czy potwierdza się zależność $q = n \cdot e$ (przy $e = 1,6022 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

Omów trudności napotkane w trakcie pomiarów. Zastanów się, jakie współczesne urządzenia, lub mierniki, mogłyby znacząco poprawić uzyskiwane wyniki pomiarów.