



ĆWICZENIE

11

LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ I JĄDROWEJ

Wyznaczanie stosunku e/m dla elektronów
metodą kompensacji

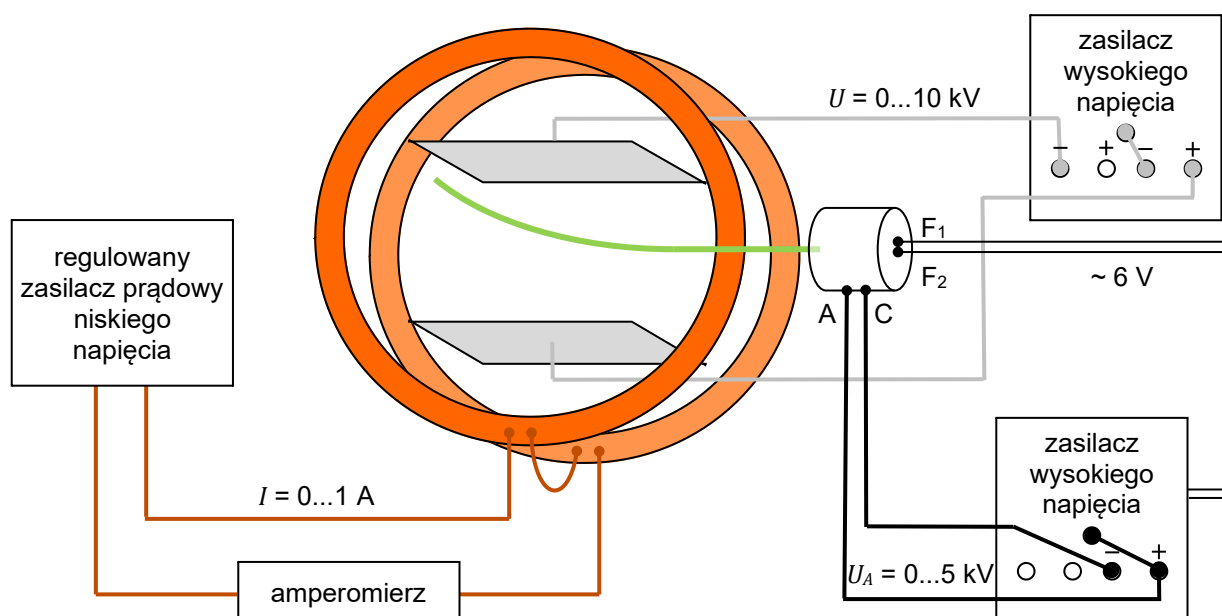
1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie wartości e/m , czyli ilorazu ładunku elektronu i jego masy. Pomiar ten zostanie wykonany w sytuacji, gdy elektrony będą poruszać się w polu elektrycznym i w polu magnetycznym, których wpływ będzie się kompensować. Wypadkowa siła działająca na elektrony będzie zerowa, więc będą one poruszać się po linii prostej.

2. Układ doświadczalny

W skład zestawu doświadczalnego wchodzi:

- lampa elektronowa Thomsona z wbudowanymi płytkami odchylającymi oddalonymi od siebie o $d = 5$ cm,
- para cewek Helmholtza, każda o promieniu $R = 6,75$ cm i liczbie zwojów $N = 320$,
- zasilacz wysokiego napięcia (do 5 kV) zasilający lampę elektronową,
- zasilacz wysokiego napięcia (do 10 kV) zasilający płytki odchylające,
- zasilacz niskiego napięcia (do 15 V) z regulowanym natężeniem prądu (do 1 A) zasilający cewki Helmholtza,
- amperomierz.



Rys. 1. Schemat układu pomiarowego.

3. Wstęp teoretyczny

1. Opis zjawiska

W polu elektromagnetycznym na cząstkę obdarzoną ładunkiem elektrycznym działa siła zwana siłą Lorentza. Część tej siły pochodzi od pola elektrycznego, a inna część od magnetycznego.

W niektórych źródłach nazwę „siła Lorentza” nadaje się tylko składowej od pola magnetycznego, która tutaj będzie oznaczana przez F_B . W przypadku elektronu, którego ładunek jest równy co do wartości ładunkowi elementarnemu e , wzór na wektor tej siły pochodzącej od pola magnetycznego ma postać:

$$\mathbf{F}_B = -e \cdot \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

gdzie $\mathbf{B}$ to wektor indukcji pola magnetycznego, a $\mathbf{v}$ to wektor prędkości poruszającego się elektronu. Ponieważ w tym wzorze występuje iloczyn wektorowy, oznacza to, że wektor siły $\mathbf{F}_B$ jest prostopadły do obu nich. Jeśli kąt pomiędzy tymi wektorami oznaczmy przez α , to wartość tej siły wynosi:

$$F_B = e \cdot v \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Z powyższego wynika, że:

- jeśli elektron nie porusza się ($v = 0$), to $F_B = 0$,
- jeśli elektron porusza się równolegle do linii indukcji pola magnetycznego ($\alpha = 0^\circ$ lub $\alpha = 180^\circ$), to $\sin \alpha = 0$ i $F_B = 0$,
- jeśli elektron porusza się prostopadle do linii indukcji pola magnetycznego ($\alpha = 90^\circ = \pi/2$), to działająca na niego siła związana z polem magnetycznym osiąga wartość maksymalną (bo $\sin \alpha = 1$) i powoduje ruch po okręgu.

Jednorodne (w przybliżeniu) pole magnetyczne można uzyskać wewnątrz tzw. cewek Helmholtza – układu dwóch jednakowych cewek ustawionych współosiowo w odległości równej ich promieniowi. Jeśli przez obie te cewki przepuści się w jednym kierunku prąd elektryczny o natężeniu I , to wartość indukcji pola magnetycznego B w środkowej części pomiędzy cewkami wynosi:

$$B = \left(\frac{4}{5}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{\mu_0 N I}{R}$$

gdzie μ_0 to przenikalność magnetyczna próżni równa $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ T/(A} \cdot \text{m)}$, N to liczba zwojów na każdej cewce, zaś R to promień cewek. Odchylenia od tak obliczonej wartości są mniejsze niż 1% w płaszczyźnie symetrii obu cewek w odległości nie większej niż ok. $1/3R$ od wspólnej osi obu cewek.

Inna składowa siły Lorentza, związana z polem elektrycznym, opisana jest wzorem:

$$\mathbf{F}_E = -e \cdot \mathbf{E}$$

gdzie $\mathbf{E}$ to wektor natężenia pola elektrycznego. Siła ta jest niezależna od sposobu, w jaki porusza się elektron i że zawsze jest równoległa do linii natężenia pola.

Jednorodne pole elektryczne można uzyskać pomiędzy dwiema równoległymi płytkami metalowymi o rozmiarach znacznie większych niż odległość między nimi (oznaczana jako d). Jeśli przyłożymy między nimi napięcie U , to natężenie pola elektrycznego pomiędzy nimi ma wartość:

$$E = U / d$$

W rzeczywistości warunek d małego w porównaniu z rozmiarami nie zawsze jest spełniony, a ponadto prawdziwa wartość natężenia pola elektrycznego jest inna blisko granic płytek ze względu na dodatkowe efekty krawędziowe na granicy płytek.

2. Hipoteza

Wyobraźmy sobie układ, w którym pola elektryczne i magnetyczne skierowane są prostopadle do siebie (pole elektryczne w kierunku góra-dół, a pole magnetyczne w kierunku prawo-lewo) – jak w układzie przedstawionym na rysunku 1. Jeśli elektron będzie poruszał się prostopadle do obu tych pól (czyli w kierunku przód-tył), to działające na niego siły pochodzące od pól elektrycznego i magnetycznego będą układać się wzdłuż tego samego kierunku góra-dół. Przy odpowiednich ustawieniach siły te mogą wzajemnie kompensować się do zera (stan równowagi) i ruch elektronu pozostanie niezmienny. Wtedy muszą być spełnione następujące warunki:

$$\begin{aligned} F_E &= F_B \\ e \cdot E &= e \cdot v \cdot B \\ E &= v \cdot B \end{aligned}$$

Widać, że równowaga następuje, gdy prędkość spełnia warunek $v = E / B$.

Prędkość elektronów można obliczyć znając napięcie przyspieszające U_A . Jeśli cząstka naładowana jest przyspieszana w polu elektrycznym bez oporów ruchu, to zgodnie z zasadą zachowania energii praca pola elektrycznego równa się energii kinetycznej uzyskanej przez cząstkę. W przypadku nierelatywistycznego elektronu wyraża się to wzorem:

$$e \cdot U_A = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2$$

Z tego można wyprowadzić wzór na stosunek e/m dla elektronu i podstawić do niego wcześniej obliczoną wartość prędkości, w której następuje równowaga:

$$\frac{e}{m} = \frac{E^2}{2 \cdot B^2 \cdot U_A}$$

Można więc spodziewać się, że jeśli w centralnej części lampy uda się uzyskać ruch elektronów po linii prostej, to będzie można obliczyć e/m znając napięcie przyspieszające elektrony U_A , natężenie pola elektrycznego E oraz indukcję pola magnetycznego B . Wielkości te można wyznaczyć przy użyciu podanych wcześniej wzorów.

4. Przebieg doświadczenia

A) Przed uruchomieniem zestawu pomiarowego sprawdzić połączenie urządzeń wedle załączonej ilustracji.

B) Sprawdzić ustawienie cewek Helmholtza. Cewki powinny być ustawione symetrycznie po obu stronach lampy Thomsona, równoległe do siebie, a odległość pomiędzy nimi powinna być równa promieniowi każdej z cewek. (Odległości należy liczyć względem środka uzwojenia cewki.)

C) Sprawdzić, czy pokręta we wszystkich zasilaczach ustawione są na zero oraz czy na zasilaczach wysokiego napięcia przełączniki są w odpowiednich pozycjach: na zasilaczu 5 kV przełącznik powinien być skierowany w prawo, na zasilaczu 10 kV ustawiony pośrodku.

D) Po uzgodnieniu z opiekunem uruchomić wszystkie urządzenia elektryczne wciskając na nich odpowiednie przyciski. We wnętrzu lampy Thomsona powinno pojawić się świecenie. Jeśli tak nie jest, powiadomić o tym pracownika laboratorium.

E) Ustawić napięcie przyspieszające U_A z zakresu od 3,0 kV do 4,5 kV. Na płytce luminescencyjnej we wnętrzu lampy Thomsona powinna pojawić się smuga pokazująca tor wiązki elektronów.

F) Ustawić natężenie prądu elektrycznego I płynącego przez cewki na wartość z zakresu od 0,1 A do 0,4 A. Tor wiązki elektronów powinien zamienić się we fragment okręgu odchylając się jednocześnie w kierunku jednej z blaszek wewnątrz lampy Thomsona.

G) Ustawić napięcie U na płytkach odchylających tak, by tor wiązki elektronów stał się ponownie linią prostą. Jeśli nie da się ustawić takiego napięcia, powiadomić pracownika laboratorium.

Uwaga! Tor wiązki elektronów nie musi być równoległy do płytek odchylających, gdyż na początku ruchu elektrony nie są jeszcze w obszarze równoważenia się sił. Ważne jest, by ich tor jak najbardziej przypominał linię prostą w środkowej części lampy, gdzie pole magnetyczne jest jednorodne.

H) Zapisać ustawione wartości U_A , U i I .

I) Pomiary z punktów od E) do H) wykonać dla pięciu różnych kombinacji U_A i I .

J) Ustawić wszystkie wartości na zero i wyłączyć zasilacze, po czym odwrócić biegunowość na zasilaczu cewek Helmholtza oraz na zasilaczu płytek odchylających. Należy to zrobić zamieniając miejscami kable podłączone do zacisków „+” i „-” na tych zasilaczach.

K) Ponownie włączyć zasilacze zgodnie z wcześniej opisaną procedurą.

L) Powtórzyć pomiary zgodnie z punktami od E) do H) dla kolejnych pięciu ustawień U_A i I . Ustawione wartości zapisywać.

M) Po zakończonych pomiarach ustawić wszystkie wartości na zero i wyłączyć wszystkie urządzenia pomiarowe.

N) Na podstawie zapisanych wartości U_A , U i I obliczyć wartość indukcji pola magnetycznego B oraz natężenia pola elektrycznego E , a potem stosunek e/m . Uśrednić obliczone wartości. Czy średnia zgadza się z wartością obliczoną teoretycznie na podstawie znanych wartości $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$ C i $m = 9,109 \cdot 10^{-31}$ kg? Jakie mogą być przyczyny ewentualnych różnic?

O) Oszacować niepewności pomiarowe. Czy niepewności wynikające z właściwości aparatury lub użytej metody wyjaśniają ewentualne rozbieżności w wynikach?