

Ćwiczenie 27

Wyznaczanie stosunku e/m elektronu

27.1. Zasada ćwiczenia

Elektrony przyspieszane w polu elektrycznym wpadają w pole magnetyczne, skierowane prostopadle do kierunku ich ruchu. Wyznacza się ładunek właściwy e/m elektronu na podstawie wartości przyspieszającego napięcia, indukcji pola magnetycznego i promienia orbity elektronu.

27.2. Wiadomości teoretyczne

Gdy elektron o masie spoczynkowej m i ładunku e jest przyspieszony przez napięcie U , uzyskuje on energię kinetyczną:

$$eU = \frac{mv^2}{2}, \quad (27.1)$$

gdzie v jest szybkością elektronu. Siła Lorentza, działająca na elektron poruszający się z prędkością \vec{v} w polu magnetycznym o indukcji \vec{B} , wynosi:

$$\vec{F} = e(\vec{v} \times \vec{B}). \quad (27.2)$$

Z powyższego wzoru wynika, że w przypadku, gdy pole magnetyczne jest jednorodne, elektron porusza się po spiralnym torze wzdłuż linii sił pola magnetycznego. Gdy wektory \vec{v} i \vec{B} są prostopadle, tor ten staje się okręgiem o promieniu r . Wówczas siła Lorentza wynosi:

$$F = evB \quad (27.3)$$

i jest równa sile odśrodkowej działającej na elektron:

$$F = \frac{mv^2}{r}. \quad (27.4)$$

Z porównania dwóch ostatnich wzorów otrzymujemy związek:

$$v = \frac{eBr}{m}. \quad (27.5)$$

Eliminując ze wzorów (27.1) i (27.5) szybkość v , otrzymujemy wzór określający stosunek ładunku elektronu do jego masy, czyli tzw. ładunek właściwy elektronu:

$$\frac{e}{m} = \frac{2U}{B^2 r^2}. \quad (27.6)$$

W obecnym doświadczeniu pole magnetyczne jest wytwarzane przez dwie identyczne krótkie cewki z prądem, ustawione prostopadle do osi przechodzącej przez ich środki. Korzystając z prawa Biota-Savarta-Laplace'a można obliczyć wytworzoną przez cewki indukcję pola magnetycznego na ich osi:

$$B_z = \frac{\mu_0 n I R^2}{2} \left\{ \left[R^2 + \left(z - \frac{a}{2} \right)^2 \right]^{-3/2} + \left[R^2 + \left(z + \frac{a}{2} \right)^2 \right]^{-3/2} \right\}. \quad (27.7)$$

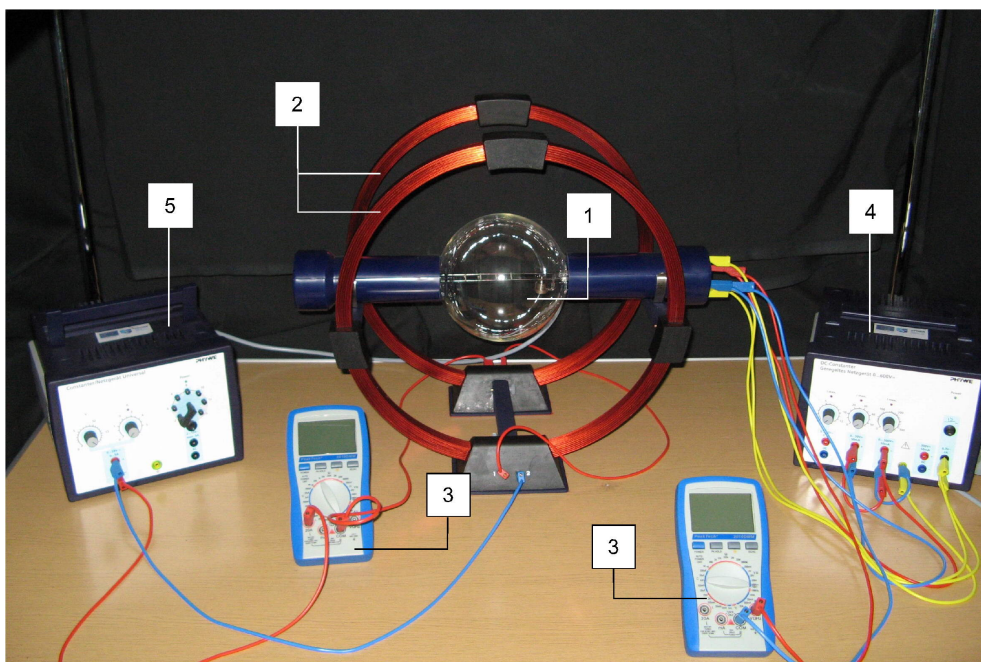
W podanym wzorze $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ T·m/A jest przenikalnością magnetyczną próżni, n oznacza ilość zwojów cewki, I — natężenie prądu płynącego przez cewkę, R — promień cewek, a — ich odległość. Odległość z jest mierzona od punktu leżącego pośrodku cewek, w odległości $a/2$ od płaszczyzny każdej cewki. Można udowodnić, że pole magnetyczne w otoczeniu punktu $z = 0$ jest najbardziej jednorodne w przypadku, gdy $a = R$ (tzw. konfiguracja Helmholtza). Ostatni wzór upraszcza się wówczas do postaci:

$$B = \left(\frac{4}{5} \right)^{3/2} \frac{\mu_0 n I}{R} = 0,7155 \frac{\mu_0 n I}{R}. \quad (27.8)$$

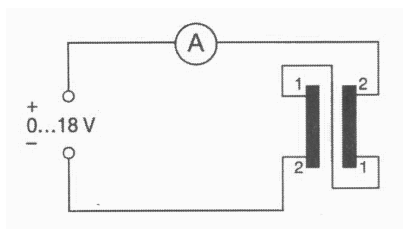
27.3. Aparatura pomiarowa

Używana w ćwiczeniu aparatura pomiarowa jest pokazana na rys. 27.1. Schematy podłączenia cewek Helmholtza i lampy elektronopromieniowej pokazują rys. 27.2 i 27.3. Dla zapewnienia jednakowego natężenia prądu i jego właściwego kierunku w cewkach Helmholtza należy je łączyć szeregowo, przy czym jeden z przewodów powinien łączyć gniazdka 1 - 1 lub 2 - 2 cewek. Maksymalne dopuszczalne natężenie prądu I płynącego przez cewki wynosi 5 A. W doświadczeniu zmienia się wartość natężenia prądu I , wartość napięcia U , przyspieszającego elektrony w lampie elektronopromieniowej i ew. koryguje wartość napięcia ogniskującego wiązkę elektronów.

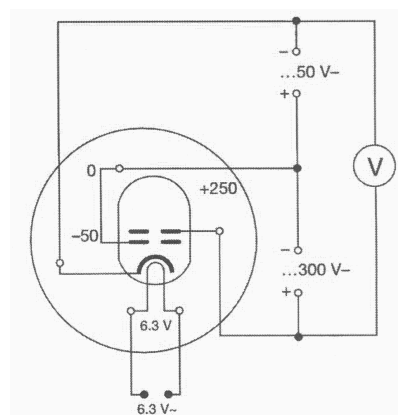
Jeżeli kierunek przepływu prądu w cewkach Helmholtza i tym samym zwrot wytworzonego pola magnetycznego są poprawne, w zaciemnionym pokoju widoczny jest świecący, kołowy ślad wiązki elektronów w lampie. Mierząc jego promień r i znając wartości I oraz U można wyliczyć ładunek właściwy elektronu. Jeżeli ślad wiązki elektronów ma kształt spirali, należy wyeliminować ten efekt, obracając lampę elektronopromieniową wokół jej podłużnej osi.



Rysunek 27.1. Aparatura do pomiaru ładunku właściwego elektronu. 1 — lampa elektronopromieniowa, 2 — cewki Helmholtza, 3 — mierniki uniwersalne, 4 — zasilacz lampy, 5 — zasilacz cewek Helmholtza



Rysunek 27.2. Schemat zasilania cewek Helmholtza



Rysunek 27.3. Schemat zasilania lampy elektronopromieniowej

27.4. Zadania

Określić ładunek właściwy elektronu (e/m) na podstawie kształtu toru wiązki elektronów w skrzyżowanych polach elektrycznym i magnetycznym o zmienianych wartościach.

27.5. Przebieg pomiarów i opracowanie wyników

Włączyć zasilacze cewek Helmholtza i lampy elektronopromieniowej (patrz rys. 27.2 i 27.3). Zmieniając prędkość elektronów (tj. napięcie U przyspieszające elektrony) oraz indukcję pola magnetycznego B (tj. natężenie prądu I w cewkach Helmholtza) należy tak dobrać promień orbity elektronów, aby padały one na jeden z poprzecznych drucików, stanowiących „szczeble drabinki” w lampie. Znaczniki te fluoryzują pod wpływem uderzeń elektronów, a ich położenie odpowiada następującym promieniom orbit: $r = 0,02, 0,03, 0,04, 0,05$ m.

Napięcie U zmieniać w zakresie od 100 V do 300 V, np. co 50 V. Dla każdego napięcia zmieniać odpowiednio natężenie prądu I , aby wiązka elektronów padała na kolejne znaczniki. Wartości I nie powinny przekraczać 3 A. Przy tej wartości natężenia prądu orbitę o promieniu $r = 0,02$ m można uzyskać tylko dla wartości napięć $U < 150$ V. Zapisać w tabelce napięcia U oraz odpowiadające im natężenia prądu I dla kolejnych promieni orbit r .

W celu obliczenia ładunku właściwego e/m elektronu sporządzić pomocniczą tabelkę, w kolumnach której zamieścić wartości $B^2 r^2 / 2$ i U , odpowiadające wszystkim promieniom orbit. Indukcję B pola magnetycznego obliczać ze wzoru (27.8). Promienie stosowanych w doświadczeniu cewek wynoszą $R = 0,2$ m, a liczba ich zwojów $n = 154$. Następnie sporządzić wykres zależności $U - B^2 r^2 / 2$. Ponieważ wzór (27.6) można przepisać jako:

$$U = \frac{e}{m} \cdot \frac{B^2 r^2}{2}, \quad (27.9)$$

zależność ta powinna przedstawiać w przybliżeniu linię prostą, określoną równaniem:

$$Y = A \cdot X + C, \quad (27.10)$$

gdzie $X = B^2 r^2 / 2$, $Y = U$, $A = e/m$ i $C = 0$. Wartości parametrów A i C prostej i ich niepewności S_A i S_C wyznaczyć metodą regresji liniowej. Narysować tę prostą na wykresie. Wyznaczone wartości A i S_A są odpowiednio równe ładunkowi właściwemu elektronu i jego niepewności, $S_A = S_{e/m}$.

27.6. Wymagane wiadomości

1. Pojęcia pola elektrycznego i magnetycznego, wielkości charakteryzujące te pola.
2. Ruch naładowanych cząstek w polu elektrycznym i magnetycznym — siła elektrostatyczna, energia potencjalna ładunku w polu elektrostatycznym, siła Lorentza, możliwe kształty torów cząstek.
3. Pole magnetyczne przewodników z prądem — prawo Biota-Savarta-Laplace’a.
4. Wyprowadzenie wzoru, określającego indukcję pola magnetycznego obwodu kołowego na jego osi, na podstawie prawa Biota-Savarta-Laplace’a.

27.7. Literatura

- [1] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker — Podstawy fizyki, t. 3, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2005.
- [2] Cz. Bobrowski — Fizyka — krótki kurs, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2005.