

Ćwiczenie Nr 355. Wyznaczanie stosunku e/m dla elektronu.

I. Literatura

1. Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, część II. Praca zbiorowa pod redakcją I. Kruk i J. Typka, Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej
2. Resnick D., Holliday, Fizyka t. II, PWN, Warszawa, 1998

II. Tematy teoretyczne:

1. Ruch ładunku w polu magnetycznym, siła Lorentza, zastosowanie prawa Biota-Savarta do wyznaczenia pola magnetycznego wytworzonego przez kołowy przewód z prądem.
2. Zasada superpozycji pól magnetycznych, praktyczne wyznaczanie kierunku siły Lorentza.

III. Cel ćwiczenia:

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie stosunku e/m dla elektronu. Elektrony, które wskutek zjawiska termoemisji wydostają się z rozgrzanej katody zostają uformowane za pomocą pola elektrycznego w wąską wiązkę, przyspieszone (napięciem od 100V- 600V) i skierowane do środkowej, kulistej części lampy. Lampa umieszczona jest pomiędzy cewkami Helmholtza. Prąd płynący przez te cewki wytwarza pole magnetyczne. Elektrony w tym polu poruszają się po jednym z trzech możliwych torów: prostoliniowym (gdy wektor prędkości elektronów \vec{v} jest równoległy do linii sił wektora indukcji \vec{B}), po okręgu (gdy $\vec{v} \perp \vec{B}$) lub po linii spiralnej (gdy kąt między \vec{v} i \vec{B} jest inny). To zachowanie wynika z własności siły Lorentza działającej na poruszające się elektrony.

Pole magnetyczne wytworzone przez cewki Helmholtza jest skierowane wzdłuż osi tych cewek. Przez odpowiednie połączenie ustalamy kierunek prądu w tych cewkach tak, aby pola magnetyczne wytworzone przez obie cewki dodawały się, a nie znosiły nawzajem.

Korzystając z prawa Biota-Savarta można obliczyć wartość indukcji magnetycznej \mathbf{B} pola magnetycznego powstającego na osi cewek. Wzór ten dla dwóch pojedynczych zwojów ma postać:

$$B_z = \frac{1}{2} \mu_0 I R^2 \left\{ \left[R^2 + \left(\frac{a}{2} - z \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} + \left[R^2 + \left(\frac{a}{2} + z \right)^2 \right]^{\frac{3}{2}} \right\}$$

We wzorze tym użyto oznaczeń:

R- promień cewek Helmholtza, w tym doświadczeniu R=0,2m,

a- odległość między cewkami, w tym doświadczeniu a=0,2m,

z- współrzędna punktu na osi cewek: oś z pokrywa się z osią cewek, punkt o współrzędnej 0 leży dokładnie pośrodku cewek.,

I- natężenie prądu w cewkach Helmholtza,

$\mu_0 = 1,257 \cdot 10^{-6} \text{V} \cdot \text{s} / \text{A} \cdot \text{m}$

Każda z cewek składa się z n zwojów, w tym doświadczeniu n=154, dlatego wartość indukcji jest w rzeczywistości n razy większa. Dokładnie pośrodku między cewkami z=0 i jeśli przyjąć, że a=R wartość indukcji przyjmuje w tym miejscu wartość:

$$B = \frac{8}{5\sqrt{5}} \cdot \frac{\mu_0 \cdot n \cdot I}{R} \quad (1)$$

Jeśli ustawimy lampę tak, że elektrony będą wpadać prostopadłe do wektora indukcji \vec{B} torem ich będzie okrąg. Korzystając z tego, że siła Lorentza jest siłą dośrodkową ($e \cdot v \cdot B = \frac{m \cdot v^2}{r}$) oraz z tego, że elektrony uzyskują energię kinetyczną kosztem pracy pola elektrycznego ($\frac{m \cdot v^2}{2} = e \cdot U$) otrzymamy wzór, który posłuży nam do wyznaczenia stosunku e/m:

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

r- to promień toru elektronów

Jeśli pominiemy efekty relatywistyczne, prędkość uzyskana przez elektrony przyspieszone napięciem U można wyliczyć ze wzoru:

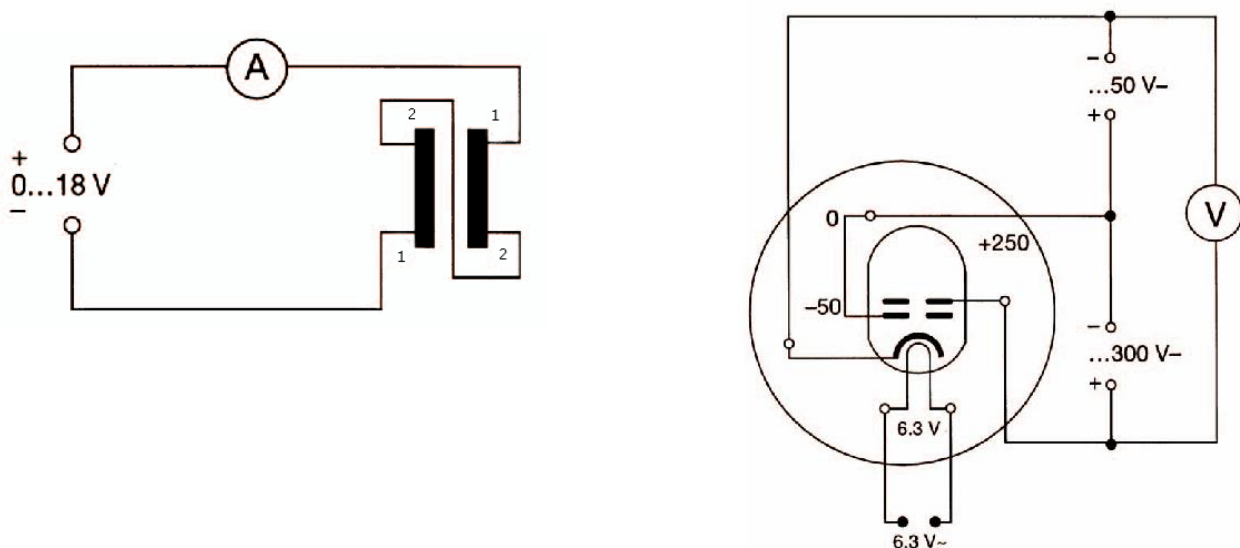
$$v = \sqrt{2U \cdot \frac{e}{m}} \quad (3)$$

IV. Wykaz przyrządów:

Wykaz przyrządów: Lampa próżniowa, cewki Helmholtza, zasilacz stałoprądowy do zasilania cewek Helmholtza wytwarzających pole magnetyczne (Constanter/Netzgerät Universal), zasilacz lampy dostarczający napięcia przyspieszającego elektrony (DC- Constanter, Geregeltetes Netzgerät 0-600V), dwa mierniki uniwersalne służące jako amperomierz oraz woltomierz (wypożyczyć w pokoju 619), przewody połączeniowe.



Rys. 1. Zestaw pomiarowy do wyznaczenia stosunku e/m



Rys. 2. Obwody cewek Helmholtza i lampy próżniowej.

V. Wykonanie ćwiczenia

1. Układ połączony jest według schematu przedstawionego na rysunkach 1 i 2. Aby skompletować ten zestaw należy:
 - Włączyć amperomierz szeregowo pomiędzy zasilacz cewek Constanter/Netzgerät Universal i cewkę Helmholtza (po lewej stronie na zdjęciu). W dalszej części zasilacz ten będzie nazywany „**zasilaczem cewek**”
 - Włączyć woltomierz równolegle do gniazd 0-300V, 50mA zasilacza lampy DC-Constanter, Geregeltes Netzgerät (na zdjęciu po prawej stronie). W dalszej części zasilacz ten będzie nazywany „**zasilaczem lampy**”

Wszystkie gałki obu zasilaczy skrócić w lewo do oporu. Poprosić prowadzącego zajęcia o sprawdzenie poprawności podłączenia.

2. Włączyć oba zasilacze (wyłączniki znajdują się na tylnych ściankach przyrządów), włączyć oba mierniki uniwersalne. Odczekać kilka minut, w czasie których ustabilizuje się temperatura włókna żarzenia lampy.
3. Środkowe pokrętło **zasilacza lampy** skrócić w prawo do oporu, a prawym pokrętłem (tym ze skalą do 300) ustawić napięcie 100V (odczyt na woltomierzu).
4. Prawe pokrętło **zasilacza cewek** ustawić na 5A (ograniczenie maksymalnego prądu).

Wyłączyć wszelkie dostępne oświetlenie i odczekać aż wzrok przyzwyczai się do ciemności.

5. Lewym pokrętłem **zasilacza cewek** zmieniać wartość pola magnetycznego i obserwować zmianę kształtu toru wiązki elektronów w lampie.
 - Przy wybranym polu magnetycznym obracać **OSTROŻNIE** lampę wzdłuż jej podłużnej osi obserwując zmianę kształtu toru wiązki elektronów od kolistego, poprzez spiralny aż do linii prostej.
6. Przy wybranym położeniu lampy i wartości pola magnetycznego wyznaczyć kierunek wektora indukcji pola magnetycznego \vec{B} korzystając z jednej z trzech metod poznanych w szkole średniej:
 - własności iloczynu wektorowego w zastosowaniu do siły Lorentza,
 - reguła trzech palców prawej (dla ładunku ujemnego) dłoni,
 - reguła prawej dłoni (dla ładunku ujemnego)

(Proszę pamiętać, że siła Lorentza jest siłą dośrodkową, stąd jej zwrot jest do środka toru)

- Sprawdzić poprawność wyznaczenia kierunku przy różnych kształtach toru wiązki elektronów.

- Zapisać efekt tych badań w formie np.:

„**Wektor \vec{B} skierowany jest poziomo, wzdłuż osi cewek, od przedniej cewki do tylnej**”. Uwaga: kierunek ten może być inny dla różnych grup studenckich, gdyż połączenia cewek z zasilaczem są okresowo zmieniane.

7. Obrócić z powrotem lampę tak, aby szczebelki drabinki z drutu widoczne wewnątrz lampy były ułożone poziomo. Zmieniając wielkość pola magnetycznego (lewa gałka na zasilaczu cewek), skorygować położenie lampy tak, aby wiązka za każdym razem trafiała dokładnie w środek każdego szczebelka. Kolejne szczebelki (poprzeczki) umieszczone są tak, że gdy wiązka trafia w ten element jej promień wynosi odpowiednio 2cm, 3cm, 4cm i 5cm.
8. Ustawić napięcie przyspieszające elektrony równe $U(V)=200$ V (na zasilaczu lampy). *Aby dokonać odczytu napięcia nie włączając zewnętrznego oświetlenia można wcisnąć przycisk podświetlający skalę woltomierza.*
9. Ustalić wartość pola magnetycznego (pokrętłem zasilacza cewek) tak, aby wiązka elektronów trafiała w pierwszy element drabinki ($r=0,02m$). Odczytać z amperomierza natężenie prądu $I[A]$. *Tu również można podświetlić skalę miernika.*
10. Zmieniać pole magnetyczne tak, aby wiązka trafiała w kolejne poprzeczki drabinki ($r=0,03m$, $r=0,04m$, $r=0,05m$) i zapisywać odpowiadające im natężenia prądu.

11. Zwiększać napięcie na zasilaczu lampy co 25V (aż do uzyskania napięcia 325 V) i przy tych napięciach powtarzać pomiary z punktów 9 i 10.

Uwaga: Niektórych kombinacji napięć U i promieni toru elektronu r ujętych w tabeli nie da się przy zastosowanych zasilaczach i cewkach uzyskać (np. $U=325V$ i $r=2cm$). Takie pola tabeli należy pozostawić niewypełnione.

12. Wyniki umieścić w tabeli:

U[V]	r= 0,02m			r= 0,03m			r= 0,04m			r= 0,05m			e/m średnie dla danego U [C/kg]	v [m/s]
	I[A]	B[T]	e/m [C/kg]	I[A]	B[T]	e/m [C/kg]	I[A]	B[T]	e/m [C/kg]	I[A]	B[T]	e/m [C/kg]		
200														
225														
250														
275														
300														
325														
Średnia wartość e/m z wszystkich pomiarów [C/kg]												---		

Zapisać niepewności maksymalne: $\Delta I = \dots\dots\dots$; $\Delta U = \dots\dots\dots$; $\Delta r = \dots\dots\dots$

13. Korzystając ze wzorów (1), (2) i (3) uzupełnić tabelę. We wzorze (3) przyjąć wartość

średnią $\left(\frac{e}{m}\right)_{sr(U)}$ dla danego napięcia U .

V. Ocena niepewności pomiarowych: (odwołania do pozycji 1 literatury)

1. Obliczyć niepewność standardową pomiaru dla każdej wartości indukcji magnetycznej B:

$$u(B) = B \cdot \sqrt{\frac{u^2(I)}{I^2} + \frac{u^2(R)}{R^2}}; \quad u(I) = \frac{\Delta I}{\sqrt{3}}; \quad u(R) = \frac{\Delta R}{\sqrt{3}} \text{ -przyjąć } \Delta R = 4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

2. Obliczyć niepewność standardową złożoną pomiaru pośredniego $u(e/m)$ dla pojedynczego pomiaru. Stosując wzór (13) z rozdziału I. 5. 2. otrzymamy:

$$u\left(\frac{e}{m}\right) = \frac{e}{m} \cdot \sqrt{\left(\frac{u(U)}{U}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot u(B)}{B}\right)^2 + \left(\frac{2 \cdot u(r)}{r}\right)^2}; \quad u(U) = \frac{\Delta U}{\sqrt{3}}; \quad u(r) = \frac{\Delta r}{\sqrt{3}}$$

3. Obliczyć średnią arytmetyczną z wszystkich pomiarów stosunku e/m i jej niepewność typu A. Korzystając ze wzoru na odchylenie standardowe średniej, równanie (2) z rozdziału I. 5. 1. otrzymamy:

$$u\left(\frac{e}{m}\right)_{sr} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{e}{m}\right)_{sr} - \left(\frac{e}{m}\right)_i \right]^2}{n \cdot (n-1)}}; \quad n - \text{liczba wyników } \left(\frac{e}{m}\right)$$

4. Obliczyć niepewność typu A stosunku $\left(\frac{e}{m}\right)_{sr(U)}$ dla danego napięcia U

$$u\left(\frac{e}{m}\right)_{sr(U)} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \left[\left(\frac{e}{m}\right)_{sr} - \left(\frac{e}{m}\right)_i \right]^2}{n \cdot (n-1)}}; \quad n - \text{liczba wyników } \left(\frac{e}{m}\right)$$

5. Obliczyć niepewność standardową pomiaru prędkości dla pięciu różnych napięć przyspieszających U:

$$u(v) = \frac{1}{v} \cdot \sqrt{\left[U \cdot u\left(\frac{e}{m}\right)_{sr(U)} \right]^2 + \left[\left(\frac{e}{m}\right)_{sr(U)} \cdot u(U) \right]^2}$$

VI. Podsumowanie i wnioski:

We wnioskach wskazane jest odniesienie się do wartości tablicowych e/m, ocena wpływu niejednorodności pola magnetycznego i zaniedbania efektów relatywistycznych w opracowywaniu wyników.