

# Ćwiczenie: A2

## Tytuł ćwiczenia: Wyznaczenie stosunku $e/m$ dla elektronu

---

### I. Cel ćwiczenia

Celem ogólnym ćwiczenia jest zapoznanie studenta ze zjawiskiem ruchu cząstki naładowanej w polach elektrycznym i magnetycznym, nauczenie zasad działania urządzeń wykorzystujących takie pola (oscylloskop, magnetron) oraz poznanie technik pomiarowych umożliwiających wyznaczenie ładunku właściwego elektronu,  $e/m$ .

### II. Zakres ćwiczenia (zadania do wykonania)

Ćwiczenie polega na wyznaczeniu ładunku właściwego elektronu, czyli stosunku ładunku elektronu do jego masy spoczynkowej,  $e/m$ , korzystając z dwóch metod eksperymentalnych:

1. metody pola podłużnego
2. metody magnetronu.

### III. Zagadnienia do kolokwium

1. Pole elektryczne: natężenie pola, linie sił pola, potencjał pola, pole elektryczne ładunku punktowego, dipola, kondensatora, kuli, walca, prawo Gaussa [1,2,6].
2. Pole magnetyczne: linie sił pola, natężenie pola magnetycznego, indukcja magnetyczna i strumień indukcji pola magnetycznego, prawo Ampera, prawo Biota-Savarta, pole magnetyczne magnesu sztabkowego i prostych układów z prądem (prostoliniowego i kołowego przewodnika, solenoidu) [1,2,6]
3. Ruch cząstki naładowanej w polu elektrycznym i magnetycznym, tory ruchu elektronu, linia śrubowa, reguła Fleminga [1,2,6].
4. Metody wyznaczania  $e/m$ :
  - metoda pola podłużnego z wyprowadzeniem wzoru na  $e/m$  [3,5]
  - metoda magnetronu z wyprowadzeniem wzoru na  $e/m$  [4,5]

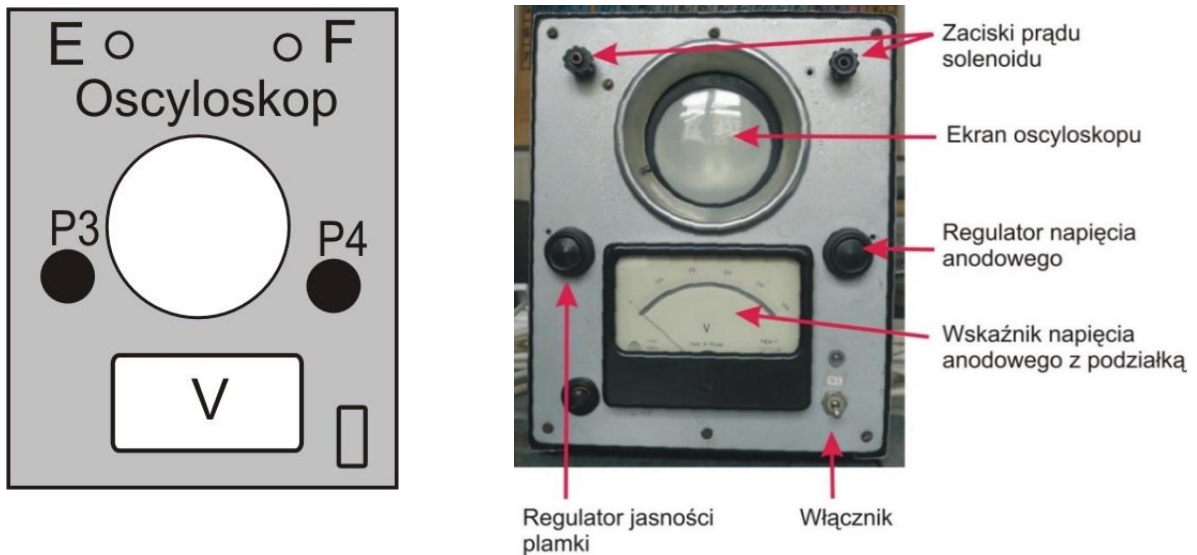
Zagadnienia dodatkowe:

Metoda magnetronu z uwzględnieniem skończonego rozmiaru katody [5], inne metody wyznaczania stosunku  $e/m$  [3,4,5], magnetyzm jako zjawisko relatywistyczne [2], względność pól elektrycznego i magnetycznego [6].

### IV. Opis urządzeń i przyrządów używanych w eksperymencie

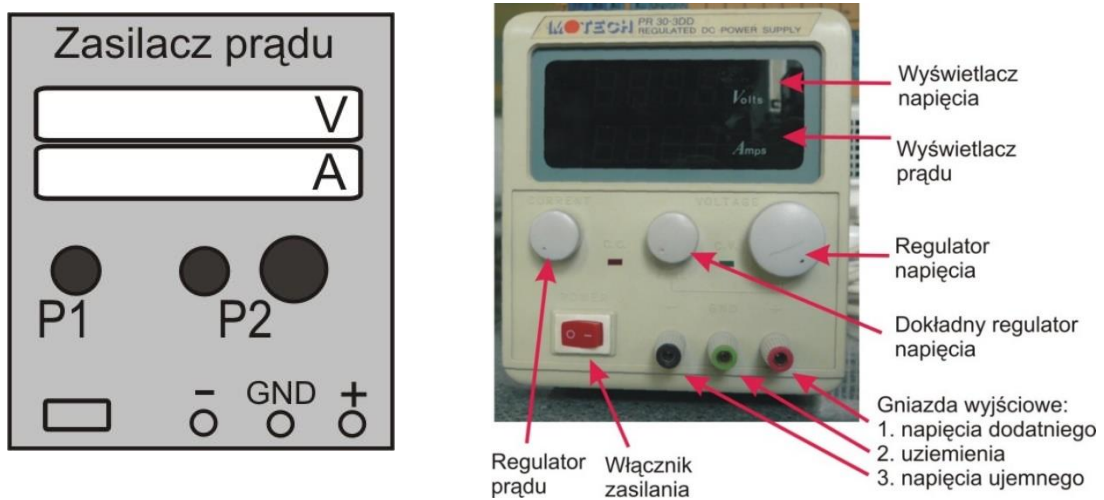
**Stanowisko do pomiaru ładunku właściwego metodą pola podłużnego składa się z następujących elementów:**

- a) oscylloskopu z cewką magnetyczną (rys. 1) – konstrukcji IF UMCS.  
Oscylloskop używany do pomiaru metodą pola podłużnego zawiera lampę oscylloskopową umieszczoną wewnątrz solenoidu, zasilanego zewnątrz przez zaciski E i F. Elektrony emitowane z katody lampy oscylloskopowej poruszają się wzdłuż osi solenoidu, co umożliwia ich ogniskowanie w polu magnetycznym. Pokrętko P3 służy do regulacji jasności plamki na ekranie, zaś P4 do ustalania wartości napięcia anodowego przyspieszającego elektrony. Odczyt napięcia anodowego umożliwia zainstalowany woltomierz wychyłowy, V.



Rys. 1. Schemat i zdjęcie oscyloskopu do pomiaru metodą pola podłużnego – widok ścianki przedniej.

- b) zasilacza prądu PR30-3DD – instrukcja fabryczna dostępna w laboratorium. Stabilizowany zasilacz prądu PR30-3DD pozwala na uzyskanie prądów w zakresie 0-3A przy maksymalnym napięciu 30V. Do regulacji natężenia prądu służy pokrętko P1 (current), natomiast do zgrubej i dokładnej regulacji napięcia pokrętko P2 (voltage). Zasilacz posiada cyfrowy wyświetlacz wartości napięcia (wyświetlacz napięcia) i natężenia prądu (wyświetlacz prądu).



Rys. 2. Schemat i zdjęcie zasilacza prądu PR30-3DD.

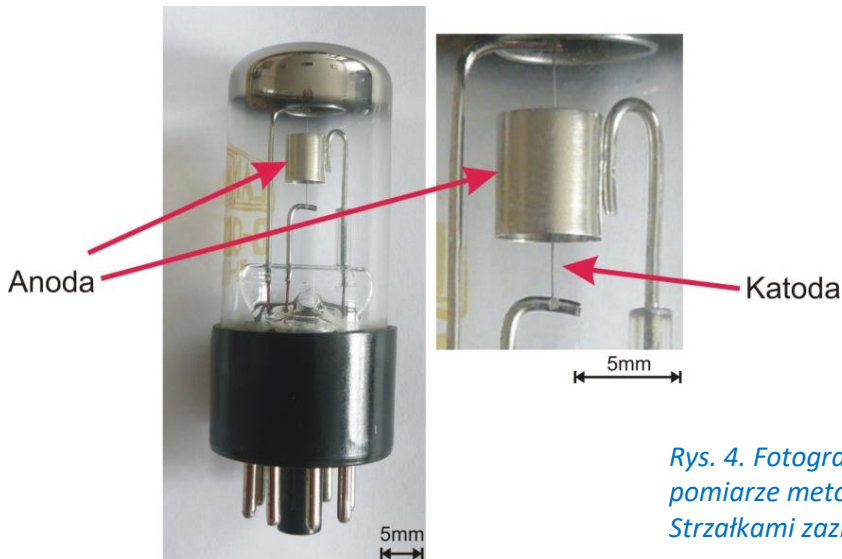
- c) amperomierza wskazówkowego (Rys. 3). Do pomiaru natężenia prądu płynącego przez cewkę magnetronu w metodzie pola podłużnego używany jest amperomierz LM-1 firmy ERA, który pozwala na pracę w zakresie natężenia prądu: 3A, 1,5A lub 0,75A.



Rys. 3. Fotografia amperomierza LM-1.

Stanowisko do pomiaru ładunku właściwego metodą magnetronu składa się z:

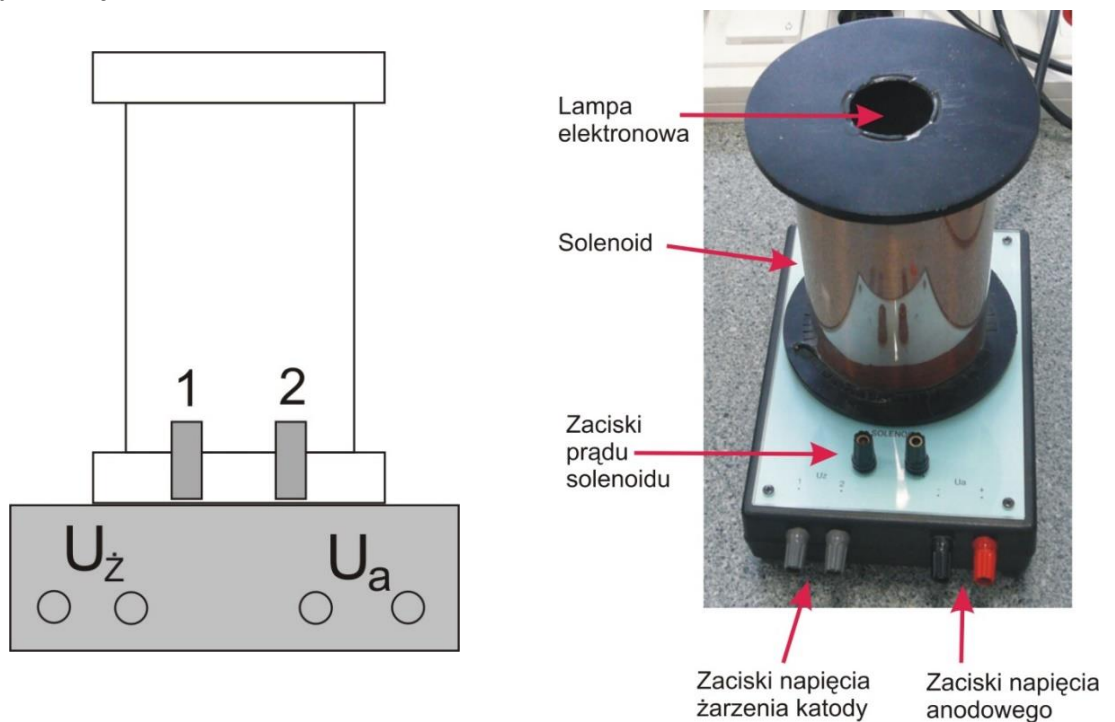
- a) magnetronu - zbudowany na bazie lampy elektronowej LAMINA L14, Rys. 4. Magnetron używany do pomiaru stosunku  $e/m$  zbudowany został w IF UMCS. Główną częścią magnetronu jest lampa elektronowa, która w wyniku zjawiska termoemisji emituje elektrony z katody (cienki drucik) do anody (cylinder). Zdjęcie użytej w doświadczeniu lampy przedstawia poniższa fotografia (lampa firmy LAMINA L14 D-0001).



Rys. 4. Fotografia lampy elektronowej używanej w pomiarze metodą magnetronu, LAMINA L14 D-0001. Strzałkami zaznaczono anodę i katodę lampy.

Lampa elektronowa znajduje się we wnętrzu solenoidu i zasilana jest zewnętrznym zasilaczem napięcia poprzez zaciski  $U_a$  (napięcie anodowe) i  $U_z$  (napięcie żarzenia), Rys. 5. Prąd płynący przez uzwojenie solenoidu (dostarczony z zasilacza prądowego poprzez zaciski 1 i 2) wytwarza stałe pole magnetyczne we wnętrzu solenoidu i powoduje zakrzywienie toru ruchu elektronów emitowanych z katody lampy elektronowej.

Magnetron nie posiada żadnych przycisków regulacji. Nie wolno wyjmować lampy elektronowej umieszczonej we wnętrzu solenoidu!



Rys. 5. Magnetron używany do pomiarów  $e/m$  (schemat i fotografia).

b) zasilacza prądu DF1760SL – instrukcja fabryczna dostępna w laboratorium.

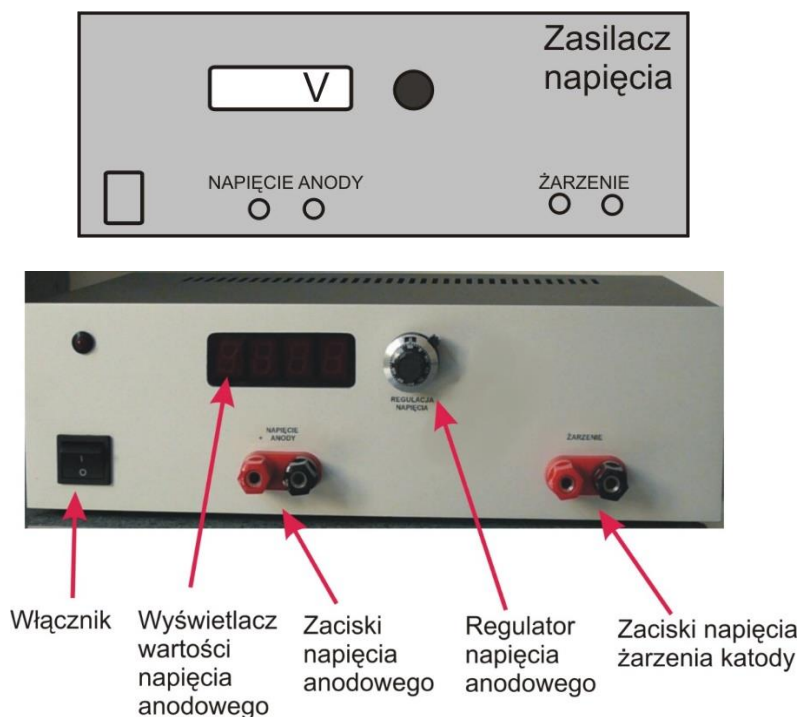
Zasilacz prądu DF1760SL, Rys. 6, służy do zasilania cewki magnetronu (solenoidu) i pozwala na uzyskanie maksymalnych wartości natężenia prądu do 3A przy napięciu 60V. Posiada dwa cyfrowe wyświetlacze wartości napięcia i wartości natężenia prądu oraz pokrętki zgrubnego (coarse) i dokładnego (fine) nastawiania tych wartości.



Rys. 6. Schemat i fotografia zasilacza prądu DF1760SL

c) zasilacza napięcia anodowego i żarzenia katody – konstrukcji IF UMCS.

Zasilacz napięcia anodowego (Rys. 7) pozwala na uzyskanie napięć przyspieszających elektrony pomiędzy katodą i anodą lampy elektronowej rzędu 120V. Posiada regulator napięcia i cyfrowy wyświetlacz. Ponadto, wbudowane ma zaciski,  $U_z$ , służące do żarzenia katody lampy elektronowej.



Rys. 7. Schemat i fotografia przedniej ścianki zasilacza napięcia magnetronu.

d) mikroamperomierza wskazówkowego.

Do pomiaru natężenia prądu płynącego między katodą a anodą lampy elektronowej wykorzystywany jest mikroamperomierz LM-3 firmy ERA, Fot. 8.



Rys. 8. Fotografia mikroamperomierza do pomiaru natężenia prądu anodowego.

## V. Wykonanie ćwiczenia i opracowanie wyników

(sposób postępowania, uwagi dotyczące obsługi aparatury i BHP)

### 1. Opis pomiarów właściwych - pomiar metodą pola podłużnego.

Metoda pola podłużnego wyznaczania ładunku właściwego wymaga zogniskowania wiązki elektronów w lampie oscyloskopowej przy pomocy pola magnetycznego. Pole to wytwarzane jest przez prąd płynący przez cewkę znajdującą się wewnątrz oscyloskopu. W tej części eksperymentu należy wyznaczyć wartość natężenia prądu, który ogniskuje wiązkę elektronową przy zadanym napięciu anodowym przyspieszającym elektrony w oscyloskopie.

#### **Instrukcje zmontowania (zestawienia) zestawu pomiarowego metodą pola podłużnego**

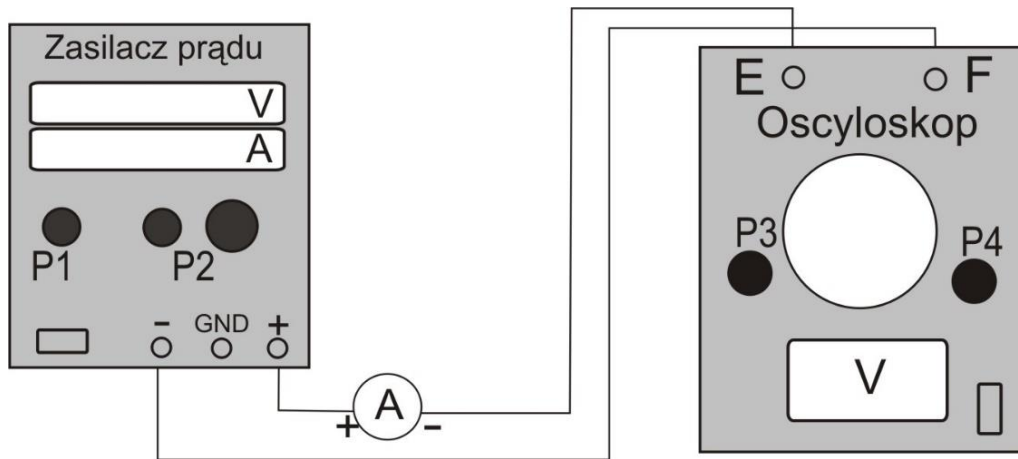
Układ doświadczalny należy podłączyć zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 9 i Rys. 10. Po zmontowaniu układu, w pierwszej kolejności należy włączyć oscyloskop a następnie zasilacz prądu.

**Włączenie i wyłączenie oscyloskopu:** Przed włączeniem przycisku zasilania (włącznika) ustawić pokrętki regulacji P3 i P4 maksymalnie w lewo a następnie włączyć przycisk zasilania (zaświeci się biała lampka nad przyciskiem zasilania). Przed wyłączeniem oscyloskopu ustawić pokrętki P3 i P4 w pozycjach maksymalnie w lewo i wyłączyć przycisk zasilania (włącznik).

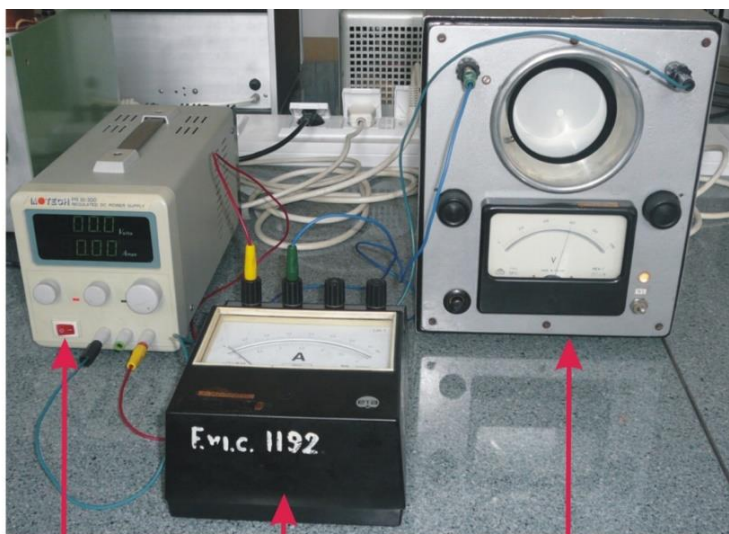
**Włączenie i wyłączenie zasilacza:** Przed włączeniem urządzenia ustawić wszystkie pokrętki regulacji prądu i napięcia maksymalnie w lewo a następnie włączyć przycisk zasilania. Praca urządzenia ze stabilizacją prądu (czyli jako zasilacz prądowy) wymaga ustawienia pokręteł napięcia P2 w prawe skrajne położenie (obrót w prawo zwiększa wartość napięcia). W tym trybie pracy świeci się mała czerwona lampka znajdująca się przy pokrętle regulacji prądu – pokrętko P1. Regulatorem prądu można ustawić żadaną wartość natężenia prądu. Przed wyłączeniem zasilacza prądu ustawić pokrętki P1 i P2 w pozycjach maksymalnie w lewo i wyłączyć przycisk zasilania (włącznik).

Zaciski „-” i „+” zasilacza prądu należy połączyć z zaciskami E i F oscyloskopu. W celu zmierzenia rzeczywistej wartości natężenia prądu płynącego przez cewkę (solenoid) w oscyloskopie, w układzie umieszczamy amperomierz, Rys. 9, jak pokazuje schemat (używamy maksymalnego zakresu pracy amperomierza tj. 3A).

**Uwaga:** W celu ustabilizowania pracy urządzeń należy odczekać ok. 15 minut od chwili ich włączenia do czasu rozpoczęcia pomiarów właściwych.



Rys. 9 Schemat układu do pomiaru  $e/m$  metoda pola podłużnego.



Zasilacz prądu      Amperomierz      Oscyloskop

Rys. 10. Fotografia zmontowanego układu do pomiaru  $e/m$  metodą pola podłużnego.

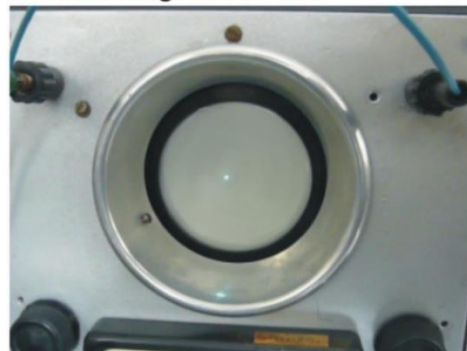
### Przeprowadzenie pomiarów i ich wyniki

Po włączeniu oscyloskopu ustawiamy początkową wartość napięcia przyspieszającego  $U_a$  pokrętką P4 na 600 V oraz ustalamy jasność plamki pokrętką P3. Następnie ogniskujemy na ekranie plamkę zwiększając natężenie prądu  $I_s$  w solenoidzie (pokrętką P1), odczytujemy jego wartość na amperomierzu, a następnie rozogniskowujemy ostrą plamkę aby zapobiec uszkodzeniu luminoforu. Przykładowe zdjęcia plamki przed i po zogniskowaniu przedstawia Rys. 11.

Plamka przed zogniskowaniem



Plamka zogniskowana



Rys. 11. Obraz plamki elektronowej na ekranie oscyloskopu przed i po zogniskowaniu.

Pomiar należy powtórzyć co najmniej 30 razy dla różnych wartości napięcia anodowego, w zakresie 600-800 V.

**Uwaga:** Podczas pomiaru nie należy zmieniać ustawienia pokrętki P3!

Wyniki należy zapisywać w tabeli zawierającej: numer pomiaru, napięcie anodowe,  $U_a$  oraz wartość natężenia prądu solenoidu ogniskującego plamkę,  $I_s$ . Student powinien również zanotować jednostki mierzonych wielkości fizycznych oraz dokładności ich odczytu. Wartość  $e/m$  oblicza się ze wzoru:

$$\frac{e}{m} = \frac{8\pi^2 U_a}{L^2 B^2}, \quad [1]$$

gdzie:  $L = 0,192$  m - długość drogi elektronu w lampie oscyloskopowej,

$U_a$  - napięcie przyspieszające elektrony,

$B$  - indukcja magnetyczna we wnętrzu solenoidu .

Indukcję magnetyczną wewnątrz solenoidu,  $B$ , znajdujemy w oparciu o wzór:

$$B = n \mu_0 I, \quad [2]$$

gdzie  $n = 1000$  zw/m jest gęstością zwojów solenoidu użytego w eksperymencie,  $\mu_0$  - przenikalnością magnetyczną próżni a  $I$  natężeniem prądu płynącego przez solenoid.

Przykładowa tabela do obliczeń wartości  $e/m$  przedstawiona jest poniżej.

Nr.	$U_a$ [V]	$I_s$ [A]	$B$ [T]	$e/m$ [ $10^{11}$ kg/C]
1	600	2,05		
.				
.				
30				

Tabela 1: Przykładowa tabela do obliczeń  $e/m$  - metoda pola podłużnego.

### Niepewność pomiarowa:

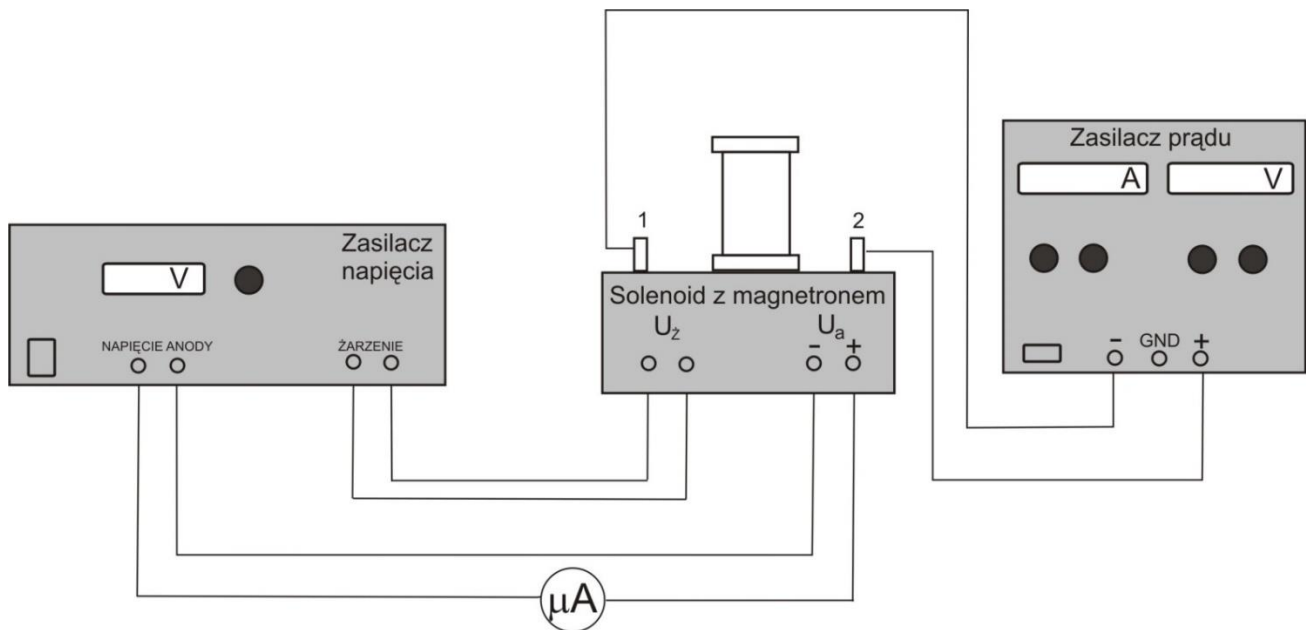
Ocenę niepewności pomiaru  $e/m$  należy przeprowadzić metodą Gaussa podając: wartość średnią  $e/m$ , odchylenie standardowe, wskaźnik precyzji oraz wyliczoną postać funkcji Gaussa. Należy także sporządzić wykres otrzymanej funkcji Gaussa względem obliczonych wartości  $e/m$  oraz zaznaczyć na wykresie odchylenie standardowe i punkty pomiarowe. Wynik końcowy wartości ładunku właściwego  $e/m$  należy podać z obliczoną niepewnością (odchyleniem standardowym).

## 2. Opis pomiarów właściwych - pomiar metodą magnetronu.

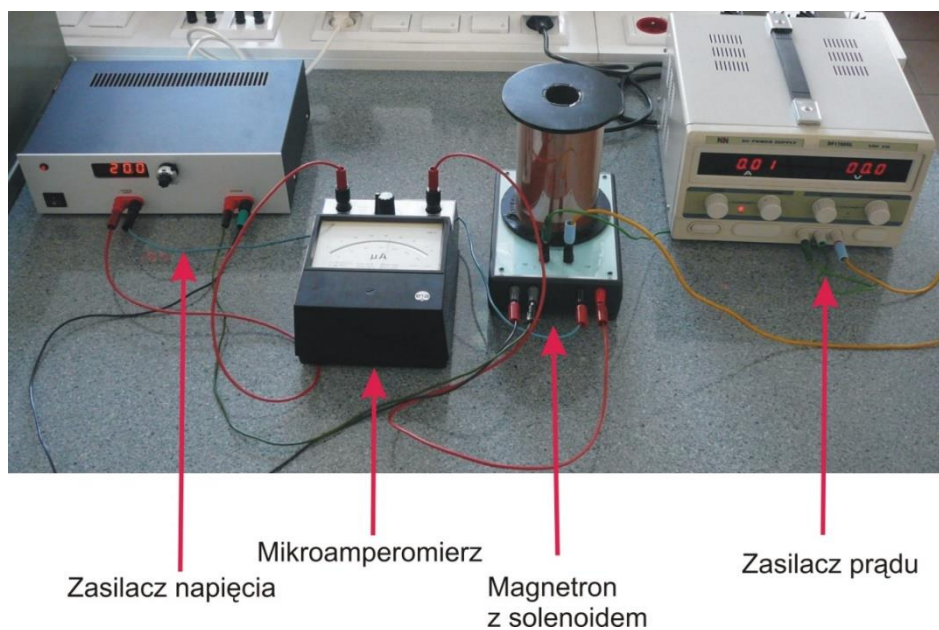
Metoda magnetronu wyznaczenia ładunku właściwego wymaga znalezienia krytycznej wartości natężenia prądu płynącego przez cewkę magnetronu (a tym samym krytycznej wartości natężenia pola magnetycznego), dla której prąd anodowy w lampie elektronowej przestaje płynąć. Celem tej części ćwiczenia jest wykreślenie co najmniej trzech charakterystyk zależności prądu anodowego od prądu cewki magnetronu dla różnych wartości napięcia anodowego.

### Instrukcje zmontowania zestawu pomiarowego metodą magnetronu

Układ powinien być zmontowany według schematu blokowego z Rys. 12 i 13. Do układu należy włączyć mikroamperomierz, który służy do pomiaru prądu anodowego w lampie elektronowej.



Rys. 12. Schemat układu do pomiaru  $e/m$  metodą magnetronu.



Rys. 13. Fotografia układu do pomiaru  $e/m$  metodą magnetronu.



Po zmontowaniu układu należy włączyć zasilacz napięcia anodowego (który dostarcza również napięcie żarzenia katody) oraz zasilacz prądu cewki magnetronu. W celu ustabilizowania pracy urządzeń (głównie rozgrzania katody lampy elektronowej w magnetronie) należy odczekać ok. 30 minut od chwili ich włączenia do czasu rozpoczęcia pomiarów właściwych.

**Włączenie i wyłączenie zasilacza prądu (Rys. 6):** Przed włączeniem urządzenia ustawić pokrętła regulacji prądu maksymalnie w lewo natomiast pokrętła regulacji napięcia maksymalnie w prawo (praca urządzenia ze stabilizacją prądu, czyli jako zasilacz prądowy, wymaga ustawienia pokręteł regulacji napięcia w prawe skrajne położenie). Następnie włączyć przycisk zasilania. W tym trybie pracy świeci się mała czerwona lampka znajdująca się przy pokrętkach regulacji prądu a na wyświetlaczach wyświetlają się zerowe wartości prądu i napięcia. Regulatorem prądu (zgrubnym lub dokładnym) można ustawić żadaną wartości prądu pomiędzy 0–3A. Przed wyłączeniem zasilacza ustawić pokrętła regulacji napięcia i prądu w pozycjach maksymalnie w lewo i wyłączyć przycisk zasilania.

**Włączenie i wyłączenie zasilacza napięcia anodowego (Rys. 7):** Przed włączeniem przycisku zasilania ustawić pokrętło regulacji napięcia (potencjometr 10-cio obrotowy, helipot) maksymalnie w lewo a następnie włączyć przycisk zasilania (zaświeci się lampka nad przyciskiem zasilania). Minimalne napięcia anodowe wyświetlane na zasilaczu wynosi ok. 17V. Pokrętłem regulacji napięcia ustawić żądane napięcie przyspieszające elektrony (z przedziału 20-120V). Przed wyłączeniem zasilacza ustawić pokrętło regulacji napięcia w pozycji maksymalnie w lewo i wyłączyć przycisk zasilania.

### **Przeprowadzenie pomiarów i ich wyniki**

Po włączeniu zasilacza napięcia ustawiamy wartość początkową napięcia anodowego z zakresu pomiędzy 60-120V (według zaleceń prowadzącego ćwiczenia). Wartość prądu anodowego dla tego zakresu napięć powinna mieścić się w przedziale 400-650 $\mu$ A. Następnie pokrętłem regulacji prądu cewki magnetronu (zasilacz prądu DF1760SL) zwiększamy wartość prądu od 0 do 2.5A (do momentu gdy natężenie prądu anodowego spadnie poniżej 10 $\mu$ A). W celu szczegółowej rejestracji momentu spadku wartości prądu anodowego należy użyć dokładnego pokrętła regulacji prądu (pokrętło 'fine').

Pomiary należy powtórzyć co najmniej trzykrotnie dla wartości napięć anodowych wskazanych przez prowadzącego ćwiczenia.

Wyniki pomiarów należy zapisywać w tabelach (osobnych dla różnych wartości napięcia anodowego,  $U_a$ ) zawierających: wartość natężenia prądu cewki magnetronu  $I_s$  (wskazywanego przez zasilacz prądu) i wartość natężenia prądu anodowego,  $I_a$  (wskazywanego przez mikroamperomierz). Przykładowa tabela do zapisywania wyników przedstawiona jest poniżej.

<b><math>U_a = 60V</math></b>	
<b><math>I_s</math> [A]</b>	<b><math>I_a</math> [<math>\mu</math>A]</b>
0,0	440,0
...	...
2,5	5,0

Tabela 2: Przykładowa tabela wyników do pomiaru metodą magnetronu.

Następnie dla każdej wartości napięcia anodowego należy sporządzić wykresy zależności natężenia prądu anodowego,  $I_a$ , od natężenia prądu płynącego przez solenoid,  $I_s$ .

Dla każdej charakterystyki magnetronu określamy krytyczną wartość natężenia prądu solenoidu,  $I_{s_{kr}}$ , dla której natężenie prądu anodowego lampy oscyloskopowej maleje do połowy wartości maksymalnej. Wartość maksymalną natężenia prądu anodowego znajdujemy dla zerowej wartości prądu solenoidu. Na przykładzie tabeli 2 wartością maksymalną prądu anodowego jest  $I_a = 440 \mu\text{A}$ , natomiast krytyczna wartość natężenia prądu solenoidu  $I_{s_{kr}}$  odpowiadać będzie wartości prądu  $I_s$  dla  $I_a = 220 \mu\text{A}$  ( $I_{s_{kr}}$  znajdujemy w oparciu o wykres  $I_s$  od  $I_a$ , tj. należy odczytać z wykresu wartość prądu  $I_s$  dla  $I_a = 220 \mu\text{A}$ ). Otrzymane charakterystyki wraz z zaznaczonymi wartościami prądu  $I_{s_{kr}}$  należy opisać i zamieścić w opracowaniu do ćwiczenia.

Wartość indukcji pola magnetycznego wewnątrz solenoidu znajdujemy w oparciu o równanie:

$$B = a I_s , \quad [3]$$

gdzie  $I_s$  jest natężeniem prądu płynącego przez solenoid a współczynnik proporcjonalności wynosi:  $a = (224,0 \pm 1,7) \text{ Gs/A}$ . Podstawiając  $I_s$  (lub  $I_{s_{kr}}$ ) w amperach otrzymujemy wartości indukcji pola magnetycznego  $B$  (lub  $B_{kr}$ ) w gaussach. Wartość  $e/m$  oblicza się ze wzoru:

$$\frac{e}{m} = \frac{8U_a}{B_{kr}^2 r_a^2} , \quad [4]$$

gdzie  $U_a$  jest napięciem anodowym,  $r_a = 0,0025 \text{ m}$  jest promieniem anody magnetronu, a  $B_{kr}$  – krytyczną wartością indukcji magnetycznej solenoidu obliczonej dla  $I_{s_{kr}}$ .

### Niepewność pomiarowa:

Ocenę niepewności pomiaru  $e/m$  należy przeprowadzić metodą różniczkową osobno dla każdego napięcia anodowego. Wielkościami obciążonymi niepewnościami są  $U_a$  oraz  $B_{kr}$ . Na wartość niepewności krytycznej pola magnetycznego,  $B_{kr}$ , wpływają: niepewność parametru  $a$  oraz niepewność natężenia prądu solenoidu,  $I_s$  (niepewność miernika oraz błąd odczytu wartości krytycznej  $I_s$  z wykresu).

Uzyskane wyniki należy porównać z danymi literaturowymi i omówić przyczyny ich ewentualnej niezgodności.

### Literatura

- [1] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker, *Podstawy fizyki*, t. III, PWN, Warszawa, 2003.
- [2] I. W. Sawieliew, *Wykłady z fizyki*, t. 2, PWN, Warszawa, 1989.
- [3] F. Kaczmarek (red), *Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki dla zaawansowanych*, PWN, Warszawa, 1982.
- [4] H. Szydłowski, *Pracownia fizyczna*, PWN, Warszawa 1999.
- [5] Z. Jabłoński (red), *Pracownia fizyczna dla zaawansowanych*, Uni. Łódzki, wyd. II, Łódź, 1986 (podręcznik dostępny w laboratorium).
- [6] R.P. Feynman, R.B. Leighton, M. Sands, *Wykłady z fizyki*, t. 2, cz. 2, PWN, Warszawa 2001