

WS5
WYZNACZENIE STAŁEJ PLANCKA
ORAZ STOSUNKU ŁADUNKU ELEKTRONU DO JEGO MASY

I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie dwóch wielkości fizycznych: stosunku ładunku elektronu do jego masy, a także stałej Plancka. W tym celu wykonane zostaną pomiary odpowiednio wpływu zmiany indukcji pola magnetycznego na tor ruchu elektronu, a także pomiar zewnętrznego efektu fotoelektrycznego.

II. Podstawy teoretyczne

II.1. Stosunek ładunku do masy elektronu

Elektron jest cząstką elementarną obdarzoną ładunkiem ujemnym oznaczanym jako e . Jest on niepodzielny, zaś jego wartość wynosi $1,6 \cdot 10^{-19}$ C. Po raz pierwszy została ona wyznaczona w 1910 roku przez Roberta Millikana. Zauważył on słusznie, że wielkość ta jest równa ładunkowi elementarnemu ładunku elektrycznego. Co prawda kwarki cechują się ładunkiem ułamkowym, jednak nigdy nie występują w stanie swobodnym przez co ich łączny ładunek jest równy wielokrotności ładunku elementarnego. Masa elektronu m_e jest niewielka w porównaniu do masy pozostałych nukleonów i wynosi $9,11 \cdot 10^{-31}$ kg. Pierwszego oszacowania wielkości masy elektronu dokonano wraz z doświadczeniem Millikana wyznaczenia ładunku elementarnego. W tym celu posłużono się wykonywanymi już od 1890 roku pomiarami stosunku ładunku elektronu do jego masy. W tym właśnie roku Arthur Schuster zmierzył odchylenie promieni katodowych w polu magnetycznym. Zjawisko to opiera się na występowaniu siły Lorentza danej wzorem:

$$\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}, \quad (1)$$

gdzie v to prędkość elektronów, a B to indukcja magnetyczna. Jeśli wektor prędkości jest prostopadły do wektora indukcji magnetycznej, elektrony zaczynają poruszać się po okręgu o promieniu r . Zaczyna na nie działać siła dośrodkowa. W tym przypadku siła Lorentza wyraża się wzorem:

$$F = evB = \frac{m_e v^2}{r}. \quad (2)$$

Po przekształceniu równania (2) uzyskujemy prędkość elektronu:

$$v = \frac{e}{m_e} Br. \quad (3)$$

Z drugiej strony, prędkość elektronów możemy obliczyć posługując się wzorem na energię kinetyczną. Energia kinetyczna zależy od natężenia rozpędzającego cząstki pola elektrycznego. Źródłem pola elektrycznego jest napięcie przyspieszające U . Zakładając, że elektrony początkowo nie poruszają się, przyłożenie napięcia U generuje pole elektryczne, którego praca przyspiesza je do prędkości v . Można to opisać wzorem:

$$E_k = \frac{m_e v^2}{2} = eU. \quad (4)$$

Zatem:

$$v = \sqrt{2U \frac{e}{m_e}}. \quad (5)$$

Łącząc wzory (3) i (5) uzyskujemy zależność postaci:

$$2U = \frac{e}{m_e} \cdot B^2 r^2 \quad (6)$$

Na podstawie pomiaru promienia ruchu elektronów r , indukcji pola magnetycznego B i napięcia przyspieszającego U można zatem wyznaczyć wartość stosunku ładunku elektronu do jego masy.

II.2. Zjawisko fotoelektryczne

Pod koniec XIX wieku badacze odkryli, że oświetlenie metalu światłem o krótkiej długości fali powoduje wybite z metalu elektrony. Później dla innych materiałów zaobserwowano podobny efekt. Na gruncie klasycznej elektrodynamiki nie udało się wyjaśnić czemu w przypadku oświetlania próbek światłem o częstotliwości mniejszej niż częstotliwość graniczna f_{gr} , niezależnie od natężenia padającego światła, efekt ten nie zachodzi. Wynik ten pokazał, że ważniejsza od natężenia padającego światła jest jego częstotliwość. Zjawisko to wyjaśnił w 1905 roku Albert Einstein na gruncie teorii kwantowej. Założył on, że elektron pochłania energię światła w postaci kwantów o energii równej $E = hf$, gdzie h jest stałą Plancka wiążącą ze sobą energię kwantu światła z jego częstotliwością. Wprowadził ją Max Planck w 1900 r. w celu opisanego widma promieniowania ciała doskonale czarnego, dokonał też pierwszego oszacowania tej wartości. Precyzyjniejsze pomiary wykazały, że stała Plancka jest równa $6,626 \cdot 10^{-34}$ Js. Ponadto, do wybitia elektronu niezbędne jest wykonanie pracy zwanej pracą wyjścia W . Wartość W zależy od tego jaki materiał jest oświetlany, zazwyczaj przyjmuje wartość rzędu kilku elektronowoltów ($1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$). W konsekwencji, zjawisko fotoelektryczne opisuje równanie:

$$hv = W + E_k, \quad (7)$$

gdzie E_k to energia kinetyczna elektronu. Równanie (7) zakłada, że dla energii fotonu mniejszej od W efekt fotoelektryczny nie zachodzi. Jeśli energia padającego fotonu przekracza wartość pracy wyjścia, natężenie fotoprądu zależy od natężenia światła padającego. Natomiast, energie wybitych elektronów nie zależą od natężenia padającego światła. Energię E_k można zmierzyć badając jak duży potencjał hamujący fotoelektrony obniży natężenie fotoprądu do zera.

III. Wykonanie ćwiczenia

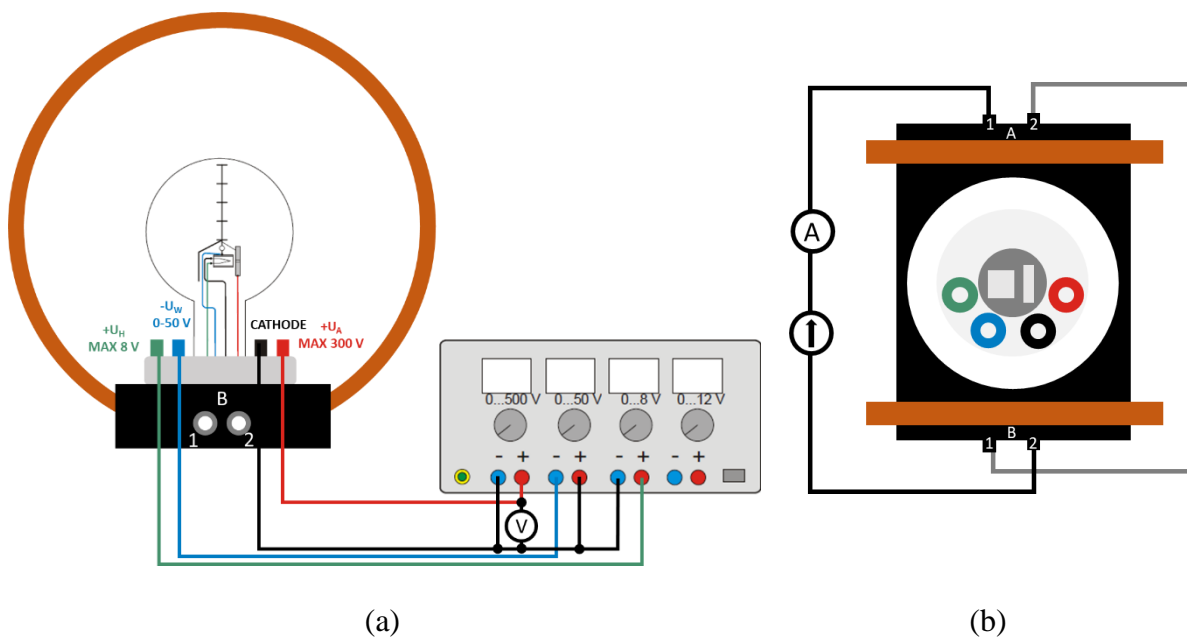
III.1. Układ pomiarowy do wyznaczenia stosunku ładunku do masy elektronu

Masz do dyspozycji:

- elektronową lampę próżniową z wiązką elektronów 3B Scientific 1024633
- zasilacz lampy 3B Scientific U33000
- woltomierz cyfrowy Rigol DM3058 do pomiaru napięcia przyspieszającego elektrony
- cewki Helmholtza

- zasilacz cewek Helmholtza MCP M10-QS305
- miernik cyfrowe Brymen BM 805 do pomiaru natężenia prądu płynącego przez cewki Helmholtza.

Sercem układu doświadczalnego (rys. 1a) jest lampa próżniowa wypełniona argonem o ciśnieniu 0,1 Pa. Znajdujący się w środku żarnik jest źródłem elektronów, zaś znajdujące się przy nim pierścienie metalowe służą wygenerowaniu pola elektrycznego, które nadaje elektronom energię kinetyczną. Wypełnienie lampy gazem pozwala zaobserwować smugę elektronów z uwagi na lokalną jonizację gazu. Do zasilania lampy służy zasilacz 3B Scientific U33000 wyposażony w cztery wyjścia zasilania o różnych parametrach (po prawej stronie od lampy na rys. 1a). Prędkość elektronów można regulować zmianą napięcia przyspieszającego w układzie zasilającym lampę. Do odczytu napięcia służy podłączony do układu woltomierz.



Rysunek 1. (a) Układ do wyznaczenia stosunku ładunku do masy elektronu wraz ze schematem podłączenia zasilania lampy, (b) widok z góry układu wraz ze schematem podłączenia zasilania cewek Helmholtza.

Źródłem pola magnetycznego są cewki Helmholtza. Na dwie cewki o promieniu około 20 cm nawinięto 154 zwoje drutu. Cewki połączone szeregowo ze sobą i ze źródłem prądu (rys. 1b). Do pomiaru prądu płynącego przez cewkę służy multimetr. Pole magnetyczne cewek Helmholtza zależy od odległości d od nich, natężenia prądu I , liczby zwojów n oraz od promienia cewek R i wyraża się wzorem:

$$B = \frac{\mu_0 n I R^2}{2(R^2 + d^2)^{3/2}}, \quad (8)$$

gdzie μ_0 to przenikalność magnetyczna próżni równa $1,256 \cdot 10^{-6} \text{ TmA}^{-1}$

Równanie (8) po uwzględnieniu geometrii układu można zapisać w postaci:

$$B = 0,715 \cdot \mu_0 \frac{nI}{R}. \quad (9)$$

III.2. Przebieg pomiaru stosunku masy do ładunku elektronów.

Przed rozpoczęciem pomiarów upewnij się, że aparatura jest podłączona zgodnie z rys. 1. Jeśli uważasz, że nie jest, skonsultuj się z asystentem.

Przed włączeniem zasilaczy, obróć wszystkie pokręta w pełni przeciwnie do ruchu wskazówek zegara, aby początkowe napięcia wyjściowe wynosiły zero. Włącz oba zasilacze.

Powoli zwiększaj napięcie żarnika (zielone gniazdo lampy oznaczone jako U_H , podłączone do gniazda zasilacza 0 - 8 V) do ok. 7,5 V. Obserwuj świecący żarnik podczas tego procesu.

Ustaw przyspieszające elektrony napięcie na anodzie (czerwone gniazdo lampy oznaczone jako U_A , podłączone do gniazda zasilacza 0 - 500 V) na 300 V. Powinna być widoczna wiązka elektronów wychodząca z działa elektronowego i poruszająca się po linii prostej.

Ustaw napięcie na cylindrze skupiającym (niebieskie gniazdo lampy oznaczone jako U_W , podłączone do gniazda zasilacza 0 - 50 V) tak, aby wiązka elektronów była najostrzejsza. **Podczas zmiany napięcia przyspieszającego lub napięcia żarnika, napięcie skupiające powinno być każdorazowo dostosowane.**

Zwiększ napięcie na zasilaczu podłączonym do cewek Helmholtza. Wiązka elektronów powinna zakrzywiać się w górę. Jeśli zakrzywia się w dół, odwróć polaryzację napięcia na cewkach. Zwiększ natężenie prądu, aż średnica orbity elektronów wyniesie 10,0 cm, co odpowiada najwyższemu szczebelkowi metalowej drabinki umieszczonej w lampie (dwie drabinki służą do eliminacji paralaksy, szczebelki w drabince są odległe od siebie o 2 cm). Zanutuj napięcie przyspieszające, średnicę wiązki elektronów i natężenie prądu płynącego w cewkach.

Zwiększ pole magnetyczne, tak aby było możliwe odczytanie kolejnej średnicy wiązki elektronów i spisuj kolejny zestaw danych pomiarowych. Dla każdego promienia wykonaj dwa pomiary podchodząc do szczebla drabiny od dołu i od góry. Powtarzaj tę procedurę, aż osiągniesz najniższy szczebelek drabinki lub pole magnetyczne nie będzie wystarczająco silne, aby zakrzywić wiązkę elektronów do średnicy odpowiadającej kolejnemu szczebelkowi na drabince.

Całą procedurę powtórz dla kilku mniejszych napięć anody (np. 250 V, 200 V).

Na koniec zmierz średnicę cewki Helmholtza.

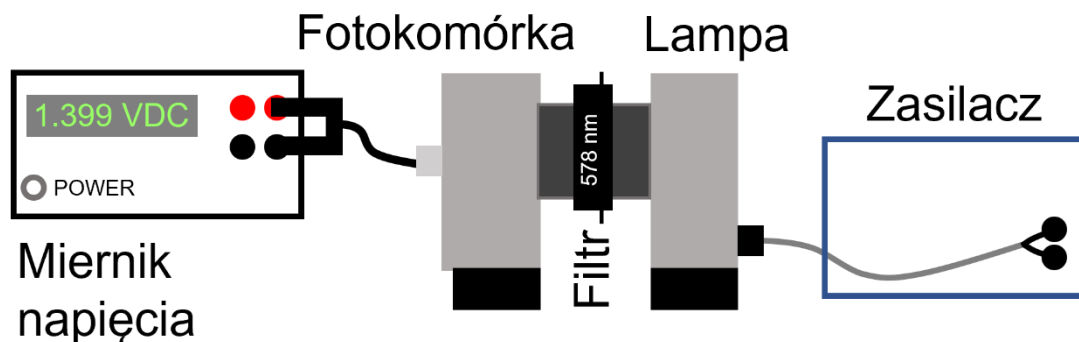
III.3. Układ pomiarowy do wyznaczenia wartości stałej Plancka

Masz do dyspozycji:

- lampę spektralną PHYWE 11615.05
- zasilacz lampy PHYWE 1366297e
- fotokomórka PHYWE 06778.00
- woltomierz KEITHLEY 2000
- zestaw pięciu filtrów interferencyjnych

Schemat układu pomiarowego został przedstawiony na rysunku 2. W układzie znajduje się lampa podłączona do zasilacza PHYWE model 1366297e, a także fotokomórka. Fotokomórka jest podłączona do miernika napięcia KEITHLEY 2000. Pomiędzy lampą i fotokomórką

znajduje się miejsce na filtr monochromatyczny. Do użycia dostępnych jest 5 filtrów interferencyjnych, które przepuszczają długości fali (λ): 366 nm, 405 nm, 436 nm, 564 nm, 578 nm. W fotokomórce znajdują się dwie elektrody: anoda i katoda, pomiędzy które przykładane jest niewielkie napięcie φ .



Rysunek 2, schemat układu do pomiaru efektu fotoelektrycznego.

Promieniowanie generowane przez lampę przechodzi przez filtr po czym pada na katodę. Skutkuje to wybiciem elektronów, które podążają w stronę anody i ładują ją ujemnie. Po około 30 sekundach zostaje osiągnięty stan równowagi. W katodzie nie ma już elektronów o energii tak wysokiej, aby pokonały siłę pola elektrostatycznego i dotarły do anody. Potencjał anody U staje się miarą energii kinetycznej elektronów. W konsekwencji równanie (7) ulega modyfikacji:

$$\frac{hc}{\lambda} = W - \varphi + eU. \quad (10)$$

III.4. Przebieg pomiaru wartości stałej Plancka

Po włączeniu zasilacza lampy i miernika napięcia należy odczekać chwilę aż lampa rozgrzeje się. Następnie po włożeniu filtra pomiędzy lampę a fotokomórkę należy odczekać aż wskazanie miernika przestanie rosnać. Po osiągnięciu stanu nasycenia należy zapisać napięcie wskazywane przez woltomierz podłączony do fotokomórki odpowiadający długości fali filtra. Pomiar należy powtórzyć dla pozostałych filtrów.

IV. Analiza wyników pomiarów

Pomiar stosunku ładunku elektronu do jego masy:

- 1) Wykorzystując równanie (9) oblicz indukcję pola magnetycznego dla każdego pomiaru wraz z jej niepewnością. Wyznacz wartości niepewności również dla promienia wiązki oraz napięcia przyspieszającego elektrony.
- 2) Zaproponuj postać zmiennych w zależności (6), które pozwolą Ci wyznaczyć stosunek e/m . Określ, która zmienna jest zmienną zależną, a która niezależną. Narysuj stosowny wykres dla różnych napięć przyspieszających (na jednym wykresie).
- 3) Wykonaj dopasowania zależności (6) dla serii danych zebranych dla różnych wartości napięcia przyspieszającego. Na ich podstawie wyznacz wartość stosunku ładunku elektronu do jego masy oraz niepewność tej wartości.

- 4) Porównaj otrzymaną wartość z wartością literaturową, przedyskutuj źródło niepewności.

Pomiar stałej Plancka:

- 1) Oblicz niepewności zmierzonych wartości napięcia fotokomórki. Wykonaj wykres zależności obu zmierzonych napięć potencjału anody od odwrotności długości fali.
- 2) Przeanalizuj dopasowanie zależności zmierzonego napięcia od odwrotności długości fali światła, wyznacz na tej podstawie wartość stałej Plancka oraz jej niepewność.
- 3) Porównaj wyznaczoną wartość stałej Plancka z wartością literaturową.
- 4) Przedyskutuj źródła niepewności pomiaru.

Jeśli na którymś z etapów analizy danych prowadzisz dopasowanie zależności modelowej metodą najmniejszych kwadratów, obowiązkowo podaj postać dopasowywanej funkcji oraz określ przyjęte niepewności. Podaj uzasadnienie wyboru zmiennej niezależnej, za wyjątkiem sytuacji, w których ona jest z góry narzucona. Przeprowadź walidację modelu uwzględniającą zasadność przyjętych niepewności pomiarowych. Jako wynik dopasowania podaj estymaty dopasowywanych parametrów wraz z ich niepewnościami. W uzasadnionych przypadkach przedyskutuj istotność dopasowywanych parametrów. Do dobrej praktyki należy również w przypadku dopasowania funkcji opisanej więcej niż jednym parametrem podanie kowariancji i współczynników korelacji parametrów a także wykresu reszt z tego dopasowania oraz jego dyskusja.

Pamiętaj też, że najczęściej używana metoda najmniejszych kwadratów wymaga wyników pomiarowych, z których każdy uzyskany jest w niezależnym akcie pomiarowym. **Nie mają takiego charakteru wielkości uzyskane np. w wyniku odejmowania jednej ustalonej wartości od wszystkich wyników pomiarów, jeśli wartość odejmowana pochodzi z pomiaru.**

V. Dodatkowe uwagi odnośnie do raportu

Nim przygotujesz raport, zaznajom się z uwagami zawartymi w [wymaganiach dotyczących raportu](#) zamieszczonymi na stronie pracowni. Absolutnie zalecane jest także świadome przyjrzenie się redakcji tekstu, a także tabel, rysunków i wzorów, sposobów ich numerowania, tytułowania i opisywania w dowolnym, ale wydanym przez uznane wydawnictwo, akademickim podręczniku do fizyki, jak również zajrzenie do kilku publikacji w różnych czasopismach naukowych, co może ułatwić podjęcie decyzji co do podziału Twego raportu na części.

W raporcie **obowiązkowo** zamieść wszystkie surowe wyniki pomiarów tak, aby sięgając jedynie do raportu i bez potrzeby odwoływania się do protokołu z doświadczenia można było wykonać pełną i niezależną analizę Twych danych. Pamiętaj, że w niektórych przypadkach uzasadnione jest przeniesienie tych danych do Suplementu. W przypadku bardzo dużej liczby danych pomiarowych (np. zebranych komputerowo) dopuszczalne jest umieszczenie danych nie w formie tabel, ale w formie wykresów. Wówczas oryginalne dane należy dołączyć do raportu w formie cyfrowej (np. w wiadomości email do prowadzącego).

VI. Pytania i zadania definiujące wymagania do ćwiczenia

- 1) Od czego zależy wartość siły Lorentza?
- 2) Narysuj tor ruchu elektronu, który wleciał w pole magnetyczne pod kątem Θ równym:
 - a) 0° ,
 - b) 45° ,

- c) 90° .
- 3) Narysuj jak w porównaniu do wiązki elektronów wyglądałby tor wiązki protonów, które wleciałyby w układ z rysunku nr 1 bez zmiany napięcia przyspieszającego U .
 - 4) Opisz podstawy fizyczne efektu fotoelektrycznego.
 - 5) Jak dobrać próbkę, w której można wygenerować duże natężenie fotoprądu?

Opracowanie: J. Kierdaszuk, wrzesień 2022 r.