

## EKSPERYMENT RUTHERFORDA

### I. Cel ćwiczenia

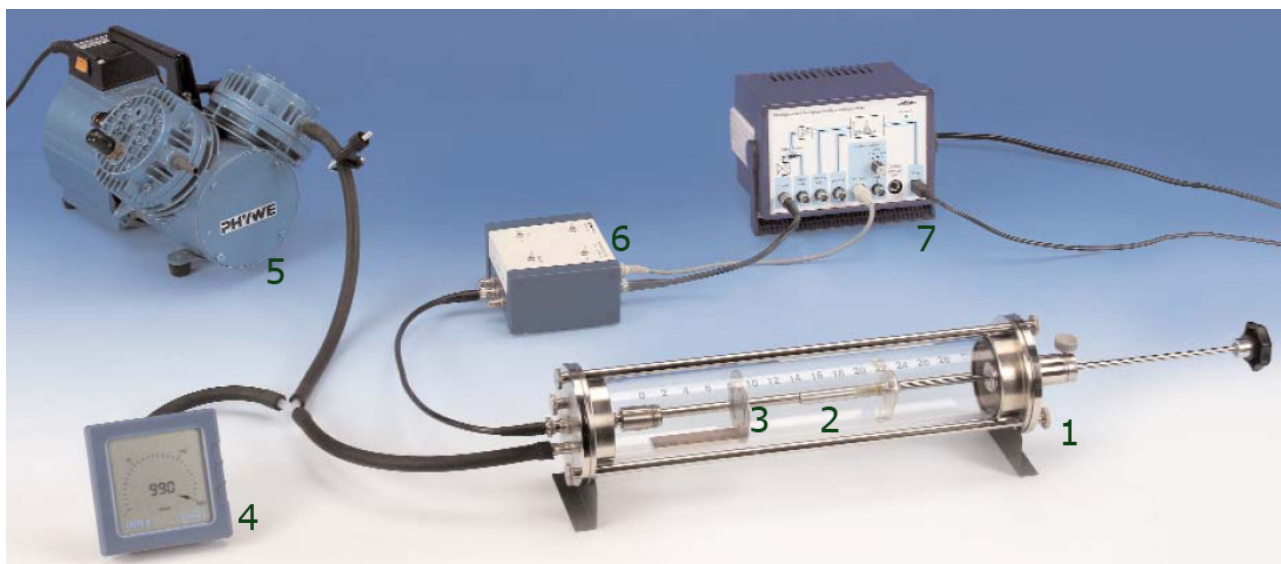
Celem ćwiczenia jest wykonanie eksperymentu Rutherforda, czyli pomiar zależności pomiędzy ilością rozproszonych na cienkiej folii cząstek  $\alpha$ , a kątem ich rozproszenia.

### II. Informacje potrzebne do przeprowadzenia eksperymentu

1. Cząstki  $\alpha$  – jak są zbudowane, jak powstają, podstawowe własności.
2. Podstawowe własności rozpadu  $\alpha$  – w szczególności reguły wyboru.
3. Schemat rozpadu  $^{241}\text{Am}$ .
4. Oddziaływanie cząstek  $\alpha$  z materią – w szczególności rozpraszanie (równanie) Rutherforda.
5. Działanie półprzewodnikowego detektora krzemowego.

### III. Aparatura pomiarowa

1. Otwierana komora próżniowa z zamontowanym detektorem krzemowym.
2. Zamknięte źródło cząstek  $\alpha$ :  $^{241}\text{Am}$ .
3. Folie aluminiowa i złota oraz magnes do zmiany pozycji folii w komorze.
4. Manometr.
5. Pompa próżniowa.
6. Przedwzmacniacz.
7. Analizator wielokanałowy (AWK) z oprogramowaniem „measure” zainstalowanym na komputerze PC.



Rysunek 1. Układ pomiarowy

Pompa (5) połączona jest z komorą (1) węzłem próżniowym, na którym znajduje się zacisk odcinający (należy go zacisnąć po odpompowaniu powietrza). Ciśnienie powietrza jest mierzone manometrem (4). Komora próżniowa jest szklanym cylindrem zamykanym z obu stron metalowymi

zaślepkami. Zaśleпки mogą być odkręcone i wyjęte, co pozwala na zmianę folii aluminiowej i złotej (3) oraz na zmianę miejsca mocowania źródła (2) z pozycji umożliwiającej pomiar rozpraszania do przodu na pozycję do rozpraszania wstecznego. Na lewym końcu komory znajduje się zawór zapowietrzający. W celu odpompowania komory należy wpierw zakręcić zawór zapowietrzający, sprawdzić czy dokręcone są śruby mocujące zaśleпки, a następnie włączyć pompę i delikatnie odkręcić zacisk na gumowym wężu. Po uzyskaniu odpowiedniego ciśnienia (poniżej 20 hPa) należy zakręcić zacisk i wyłączyć pompę. Aby zwiększyć ciśnienie w komorze należy delikatnie odkręcić zawór zapowietrzający obserwując jednocześnie wskazania manometru.

**Uwaga:** żadna ze śrub w układzie nie wymaga nazbyt silnego przykręcania.

Detektor półprzewodnikowy jest połączony kablem BNC z przedwzmacniaczem (6), który z kolei połączony jest z analizatorem wielokanałowym (7) kablami sygnałowym i zasilającym. Analizator komunikuje się z komputerem, na którym zainstalowane jest oprogramowanie „measure”, poprzez port USB.

#### IV. Pomiary i analiza wyników

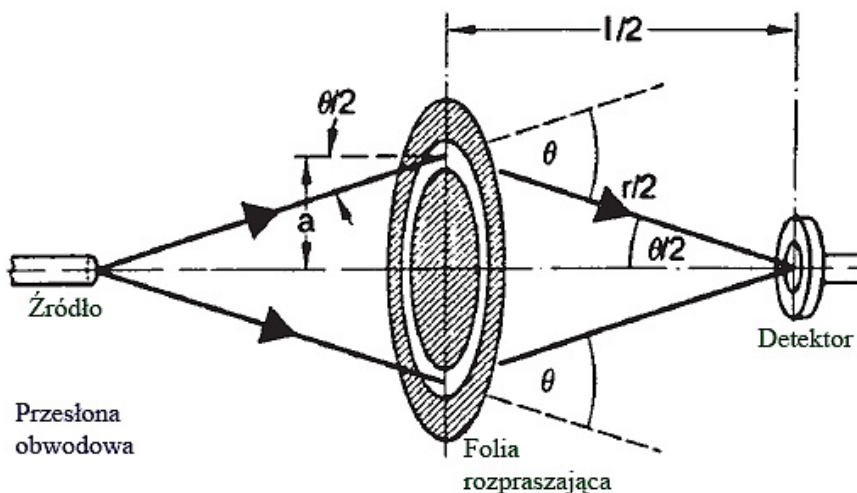
##### 1. Uruchomienie aparatury.

Zanim włączony zostanie AWK należy koniecznie sprawdzić i ustawić pozycje przełączników na przedwzmacniaczu: górne przełączniki na „ $\alpha$ ” i „Inv.”, przełącznik „Bias” (napięcie wstępne) musi być w pozycji „Int.”, a przełącznik polarności tego napięcia w pozycji „-”.

##### 2. Pomiar rozpraszania do przodu.

###### **Pomiar z folią złotą.**

Ustawiamy konfigurację układu pomiarowego tak, jak to jest na rysunku 2. Wpierw instalujemy folię złotą.



**Rysunek 2. Eksperyment Rutherforda: rozpraszanie do przodu z przesłoną obwodową. Folia rozpraszająca znajduje się w środku pomiędzy źródłem, a detektorem.**

Po wykonaniu czynności z punktu IV.1 odpompowujemy powietrze w komorze próżniowej (poniżej 20 hPa). Uruchamiamy na komputerze program „measure”, w zakładce „Miernik” wybieramy „Analizator wielokanałowy” – pojawi się nowe okno, w którym wybieramy „Pomiar integracyjny” i klikamy przycisk „Dalej”.

Pojawi się okno pomiarowe: Po prawej stronie okna jest obszar o nazwie „Ustawienia AWK”, ustawiamy współczynnik wzmocnienia na Stopień 2 oraz offset na 6%. Czas trwania pomiaru jest ustalany kontrolką „Czas trwania bramki” na 1800 s. Wypełniamy również obszar o nazwie „Rekord x”: np. „Odległość”, „l” i „cm”.

Pomiar należy wykonać dla kilku odległości pomiędzy źródłem, a detektorem, np.  $l = 5, 7, 10, 14$  i  $19$  cm. Nie powinno się robić pomiarów dla odległości mniejszej od  $5$  cm, gdyż część powierzchni detektora będzie osłonięta jego obudową. Za każdym razem po ustawieniu pozycji źródła (detektor jest nieruchomy) ustawiamy folię w odległości  $l/2$  od detektora.

#### UWAGA:

1. Nie wolno dotykać folii palcami.
2. Źródło należy przesuwając poprzez delikatne obracanie i jednoczesne pchanie lub ciągnięcie pręta, na którym jest ono zamocowane.
3. Aby przesunąć folię, należy położyć na stole, pod komorą próżniową, magnes i go przesuwać.

Po ustawieniu pozycji źródła i folii należy osłonić komorę próżniową od światła oraz uruchomić pomiar przez naciśnięcie przycisku „Wykonaj pomiar”. W trakcie działania pomiaru **nie wolno** uruchamiać pompy, gdyż może to spowodować zatrzymanie pomiaru. Gdy upłynie podany czas trwania pomiaru pojawi się okno, w które należy wpisać aktualną wartość  $l$ , a następnie nacisnąć przycisk „Akceptuj wartości pomiarowe”. Na głównym widmie prezentującym ilość zarejestrowanych cząstek od odległości  $l$  pojawi się nowy punkt. Naciskając przycisk F2 lub klikając prawym przyciskiem myszy w to okno i wybierając „Opcje wyświetlania” uzyskuje się możliwość nazwania i opisanego tego wykresu.

**UWAGA: Należy na bieżąco zapisywać wyniki pomiarów (ilość zliczonych impulsów i czas trwania pomiaru) w zeszycie pomiarowym.**

Należy powtórzyć ustawienie nowej odległości i wykonanie pomiaru, **po czym zapisać zmierzone dane na dysku.**

#### Pomiar z folią aluminiową.

Należy zmienić folię złotą na aluminiową i wykonać jeden pomiar dla  $l = 10$  cm i czas  $2400$  s. Ponieważ układ mierzy nie tylko cząstki rozproszone na folii, ale również cząstki inne (np. rozproszone na szklanej obudowie) czyli tzw. tło więc dokonamy jeszcze pomiaru tła, czyli pomiaru z samą ramką bez folii.

#### Pomiary dodatkowe.

W zestawie, poza ramkami z folią złotą i aluminiową, znajduje się również ramka bez folii. Po pierwsze, można dokonać pomiaru z pustą ramką, by ocenić ilość promieniowania rozproszonego na ramce, a nie na folii. Po drugie, można dokonać pomiaru z folią złotą, podczas którego pusta ramka jest ustawiona około  $5$  mm od folii złotej (od strony detektora) – w ten sposób pełni ona rolę kolimatora ograniczającego wpływ rozproszeń na komorze próżniowej. W tym przypadku trzeba będzie wziąć pod uwagę zmniejszenie kąta bryłowego detektora.

### 3. Opracowanie pomiaru dla rozpraszania do przodu:

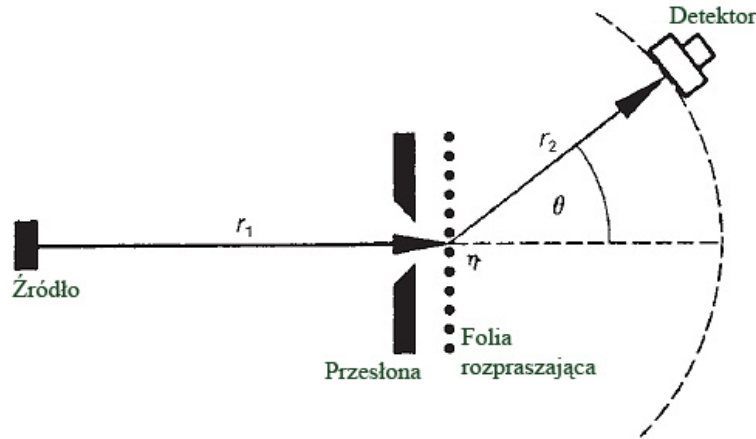
Rysunek 3 przedstawia zasadę pomiaru rozpraszania Rutherforda do przodu. Nasz układ jest nieco inny, ale wpięrow rozważmy ten prostszy z rys 3.

Ilość cząstek alfa padających w ciągu sekundy na fragment folii o powierzchni  $A_F$ , emitowanych ze źródła o aktywności  $Q$  znajdującego się w odległości  $r_1$  od folii wynosi

$$n = \frac{Q}{4\pi \cdot r_1^2} \cdot A_F.$$

Cząstki rozproszone są mierzone przez detektor o powierzchni  $A_D$ , czyli o kącie bryłowym

$$\Delta\Omega = \frac{A_D}{r_2^2}.$$



Rysunek 3. Zasada pomiaru rozpraszania Rutherforda wprzód.

Równanie Rutherforda określa ilość ciężkich cząstek naładowanych (np. cząstek  $\alpha$ ) rozproszonych pod kątem  $\theta$  w kąt bryłowy  $\Delta\Omega$ :

$$\Delta n(\theta) = n \cdot N \cdot d_F \cdot \left( \frac{z \cdot Z \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 2E_\alpha} \right)^2 \cdot \frac{\Delta\Omega}{4 \cdot \sin^4 \frac{\theta}{2}},$$

gdzie  $n$  jest ilością cząstek padających w ciągu sekundy na folię,  $N$  jest koncentracją atomów w jednostkowej objętości materiału folii,  $d_F$  jest grubością folii,  $z$  i  $Z$  są liczbami atomowymi odpowiednio rozpraszanych cząstek i jąder materiału rozpraszającego,  $E_\alpha$  jest energią rozpraszanych cząstek,  $e$  ładunkiem elementarnym, a  $\epsilon_0$  stałą elektrostatyczną. Stosując powyższe wzory oraz wprowadzając stałą

$$S = \frac{N}{4} \cdot \left( \frac{z \cdot Z \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 2E_\alpha} \right)^2$$

otrzymujemy

$$\Delta n(\theta) = \frac{Q \cdot A_F \cdot d_F}{4\pi \cdot r_1^2} \cdot \frac{A_D}{r_2^2} \cdot \frac{S}{\sin^4 \frac{\theta}{2}}.$$

Powyższy wzór musimy teraz dostosować na potrzeby naszego pomiaru. Część rozpraszająca folii nie jest kółkiem w jej środku, lecz pierścieniem o promieniu  $a$  (rys. 2). Ponieważ folia znajduje się w środku układu, więc

$$\theta = 2 \arctan \frac{2d}{l}.$$

Inna geometria powoduje, że np.  $d_F \rightarrow \frac{d_F}{\cos(\theta/2)}$ , gdyż droga, jaką cząstka przechodzi przez folię jest dłuższa, ponieważ nie pada na nią prostopadle. Analogicznie należy przetransformować  $A_D$  i  $A_F$  oraz korzystając z faktu, że  $r_1 = r_2 = r/2$  oraz  $\sin(\theta/2) = \frac{2a}{r}$  należy pokazać, że wzór na ilość cząstek padających na sekundę w naszym pomiarze wynosi:

$$\Delta n(\theta) = \frac{Q \cdot A_F \cdot d_F \cdot S}{4\pi \cdot a^4} \cdot A_D \cdot \cos\left(\frac{\theta}{2}\right).$$

Proszę znaleźć oczekiwaną ilość mierzonych cząstek na sekundę zakładając, że  $E_\alpha = 3$  MeV,  $a = 20.16$  mm,  $Q = 370$  kBq,  $A_F = 6$  cm<sup>2</sup>,  $d_F = 1.5$   $\mu$ m, a  $A_D = 45$  mm<sup>2</sup> – proszę zrobić tabelę

i wykres zawierający zmierzone i policzone wartości. Czy wielkości te zgadzają się ze sobą? Czy są proporcjonalne do siebie?

Analogicznie należy porównać pomiary przeprowadzone dla obu folii, aluminiowej i złotej, które zostały przeprowadzone dla tej samej odległości  $l$  – tu wystarczy tylko tabela.

1. Czy można lepiej określić energię cząstek alfa? Dlaczego użyto wartości 3 MeV, a nie 5.49 MeV, która jest energią emisji cząstek alfa z  $^{241}\text{Am}$ ?
2. Czy cząstki alfa rozpraszają się tylko na jądrach atomowych folii? Czy ma to wpływ na uzyskane wyniki? W jaki sposób uwzględnić w analizie pomiar z ramką bez folii?
3. Jak można określić statystyczne i systematyczne niepewności tego pomiaru? Proszę je oszacować.

### Poprawki dodatkowe.

W powyższym wzorze energia cząstek alfa jest podana w przybliżeniu – można dokładniej oszacować jej wartość zakładając, że złota folia osłaniająca źródło  $^{241}\text{Am}$  ma grubość  $5\ \mu\text{m}$ . Co więcej, cząstka alfa może rozpraszac się na różnych głębokościach w folii tarczy – tak więc energia cząstki alfa zależy również od miejsca rozproszenia – jak ten efekt można uwzględnić w obliczeniach? Tutaj należy przeczytać sobie instrukcję do ćwiczenia Z30, dotyczącego strat energii cząstek alfa w materiałach.

#### 4. Pomiar rozpraszania wstecznego.

Ustawiamy konfigurację układu pomiarowego tak, jak to jest na rysunku 4 – źródło jest zamontowane tuż przy detektorze, a folia ustawiona w kierunku źródła. Wpierw instalujemy folię złotą w pozycji  $z = 4.5\ \text{cm}$ .

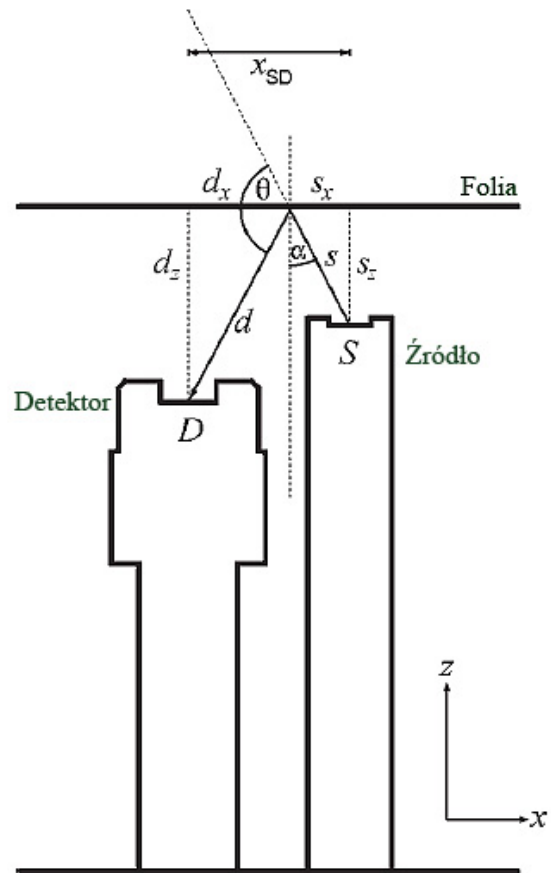
Po wykonaniu czynności z punktu IV.1 odpompowujemy powietrze w komorze próżniowej (poniżej 20 hPa). Uruchamiamy na komputerze program „measure”, w zakładce „Miernik” wybieramy „Analizator wielokanałowy” – pojawi się nowe okno, w którym wybieramy „Rejestracja widm” i klikamy przycisk „Dalej”.

Pojawi się okno pomiarowe: Po prawej stronie okna jest obszar o nazwie „Ustawienia AWK”, ustawiamy współczynnik wzmocnienia na Stopień 2 oraz offset na 6%. Wybieramy „numer kanału” jako dane-x. Startujemy pomiar przyciskiem „Reset”. Czas pomiaru jest uwidoczniony pod widmem. Czekamy, aż zarejestrowanych zostanie co najmniej 100 zdarzeń. **Należy zapisać ilość zebranych impulsów oraz czas trwania pomiaru.**

Pomiar wykonamy dla kilku pozycji folii, np.  $z = 4.0, 5.0, 5.5$  i  $6.0\ \text{cm}$ . Wykonujemy pomiar również dla folii aluminiowej ustawionej w pozycji  $4.0\ \text{cm}$ .

#### 5. Opracowanie pomiaru dla rozpraszania wstecznego:

Głównym problemem tego pomiaru jest brak możliwości wyboru trajektorii cząstek, czyli brak kolimacji. Nie wiemy, gdzie odbiła się cząstka, którą zarejestrowaliśmy w detektorze. Są możliwe dwa podejścia, uproszczone i dokładne.



Rysunek 4. Eksperyment Rutherforda - rozpraszanie wsteczne. Folia nie jest chroniona żadną dodatkową przesłoną.

W podejściu uproszczonym możemy wykorzystać fakt, że kąt bryłowy detektora dla odbić w różnych miejscach folii maleje jak  $\frac{1}{r^2} = \frac{1}{(s+d)^2}$  (Rysunek 4) i założyć, że główny przyczynik do mierzonej ilości cząstek mają przypadki, gdy droga cząstki jest minimalna. Dla takich trajektorii możemy powiedzieć, że

$$\tan \alpha = \frac{s_x}{s_z} = \frac{d_x}{d_z} = \frac{x_{SD}}{r},$$

$$r = s + d = \sqrt{s_x^2 + s_z^2} + \sqrt{d_x^2 + d_z^2},$$

gdzie  $x_{SD} = d_x + s_x = 23 \text{ mm}$ .

Ponieważ w tym pomiarze całkujemy nie tylko po powierzchni folii, ale także po jej grubości, nie mamy możliwości uzyskania zgodności wartości policzonych i zmierzonych ilości zliczeń w danym czasie. Możemy natomiast porównać kształt zależności od kąta rozpraszania. W tym celu nie trzeba liczyć całego wzoru Rutherforda, lecz wystarczy policzyć jedynie jej część, która jest zależna od parametrów pomiaru (od kąta  $\theta$ ):

$$\Delta n(\theta) \propto \frac{\Delta n(z)}{r^2 \cdot \sin^4 \frac{\theta}{2}}$$

Analogicznie, porównanie rozpraszania dla folii aluminiowej i złotej sprowadza się do porównania wielkości  $\frac{\Delta n(z)}{z^2}$ .

Podejście dokładne do powyższego problemu może, w najprostszym przypadku, polegać na scałkowaniu wzoru Rutherforda po całej powierzchni folii. Bardziej zaawansowane metody powinny uwzględniać zmiany energii cząstek alfa wewnątrz folii oraz inne, bardziej subtelne efekty, ale to zdecydowanie wykracza poza zakres ćwiczeń na II pracowni fizycznej.

## VI. Literatura

1. A. Strzałkowski, Wstęp do fizyki jądra atomowego, PWN. Fragmenty dotyczące rozpraszania Rutherforda oraz detektorów (liczników) półprzewodnikowych.
2. Z. Wilhelmi, Fizyka reakcji jądrowych, PWN. Rozdział 2.3.1: „Rozpraszanie kulombowskie cząstek  $\alpha$ ”.