

POMIAR ENERGII CZĄSTEK α SPEKTROMETREM PÓŁPRZEWODNIKOWYM. WYZNACZANIE STRAT ENERGII CZĄSTEK α W POWIETRZU I ALUMINIUM

I. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest ilościowy pomiar strat energii promieniowania α na skutek pochłaniania w powietrzu oraz w aluminium.

II. Informacje potrzebne do przeprowadzenia eksperymentu

1. Cząstki α – jak są zbudowane, jak powstają, podstawowe własności.
2. Podstawowe własności rozpadu α – w szczególności reguły wyboru¹.
3. Schemat rozpadu ^{241}Am .
4. Oddziaływanie cząstek α z materią – w szczególności równanie Bethe-Blocha.
5. Działanie półprzewodnikowego detektora krzemowego.

III. Aparatura pomiarowa

1. Komora próżniowa.
2. Manometr wyskalowany w MPa.
3. Pompa z układem zaworów.
4. Zamknięte źródło cząstek α zamontowane w górnej części komory na śrubie mikrometrycznej.
5. Detektor krzemowy zamontowany w dolnej części komory.
6. Zasilacz z przedwzmacniaczem.
7. Wzmacniacz liniowy.
8. Analizator wielokanałowy (Hetman lub Tukan).
9. Komputer.
10. Folie aluminiowe.
11. Waga analityczna.
12. Linijka.

Pompa połączona jest z komorą węzłem próżniowym oraz zaworem Z-1. Z prawej strony komory znajduje się zawór Z-2 służący do zapowietrzania komory. W celu odpompowania komory należy w pierwszej kolejności zakręcić zawór Z-2, następnie włączyć pompę, po czym delikatnie odkręcić zawór Z-1. Po

¹ Reguły wyboru, to wynikające z zasad zachowania reguły określające prawdopodobieństwo rozpadu.

uzyskaniu odpowiedniego ciśnienia należy zakręcić zawór Z-1 i wyłączyć pompę. Aby zwiększyć ciśnienie w komorze należy delikatnie odkręcić zawór Z-2 obserwując jednocześnie wskazania manometru. Z lewej strony komory znajduje się jeszcze jeden, nieużywany zawór Z-3.

Uwaga: Żółty zawór Z-1, znajdujący się przy jednym z zestawów, należy dokręcać delikatnie – wycucie niedużego oporu oznacza, że zawór jest zakręcony. Użycie zbyt dużej siły może doprowadzić do zniszczenia zaworu.

IV. Pomiary i analiza wyników

1. **Uruchomienie aparatury.** Oglądając na oscyloskopie impulsy z detektora po przedwzmacniaczu należy ustawić napięcie zasilające na 100 V. Następnie należy obejrzeć impulsy po wzmacniaczu. Po włączeniu komputera trzeba uruchomić program akwizycyjny.
2. **Pomiar widma energetycznego² cząstek α o maksymalnej energii.** Cząstki będą mieć maksymalną energię, gdy źródło ustawione zostanie najbliżej detektora, a powietrze zostanie maksymalnie odpompowane. Początkowe wartości parametrów wzmacniacza: wzmocnienia i stałej czasowej kształtowania impulsu powinny wynosić odpowiednio 80 i 1 μ s. Należy teraz dokonać korekty wzmocnienia tak, by mierzony pik, odpowiadający maksymalnej energii cząstek, był położony w możliwie wysokich kanałach analizatora, lecz by nie był obciążony z prawej strony. Nowe ustawienia wzmacniacza należy koniecznie zapisać. Następnie należy dokonać pomiaru widma cząstek α .
Uwaga 1: Czas pomiaru tego i wszystkich następnych widm powinien być zawsze tak dobrany, by w maksimum piku znajdowało się co najmniej 150 zliczeń. Wyniki (zmierzone widma) tego oraz następnych pomiarów należy zapisać na dysku we własnej kartotece studenta oraz na własnym nośniku.
Uwaga 2: Pomiar widma energetycznego dla maksymalnej energii cząstek powinien być systematycznie powtarzany (np. co 3 godziny), by kontrolować ewentualne zmiany wzmocnienia aparatury pomiarowej (wzmacniacza, przedwzmacniacza, detektora).
3. **Pomiar zależności położenia piku od grubości folii aluminiowych umieszczonych pomiędzy detektorem, a źródłem.** Podczas tego pomiaru zarówno ciśnienie, jak i odległość źródła od detektora powinny być minimalne. Przy ćwiczeniu dostępne są folie aluminiowe o grubościach 2, 3 i 6 μ m. Folia są umieszczone pomiędzy sklejonymi podkładkami. Są one bardzo delikatne i dlatego należy je traktować z dużą ostrożnością. Należy wykonać pomiary dla różnych grubości folii: 2, 3, 5, 6, 8, ... μ m – folie można układać jedne na drugich. Przy każdej zmianie ilości folii należy wpierw zapowietrzyć i otworzyć komorę, zmienić folie, a następnie zamknąć i odpompować komorę.
Uwaga: Pomiary bez folii z punktów 4. i 5. są do wyboru – wykonuje się albo p. 4, albo p. 5.
4. **Pomiar zależności położenia piku od ciśnienia powietrza.** Przy minimalnej odległości detektora od źródła należy zmieniać ciśnienie skokowo od ciśnienia minimalnego do ciśnienia atmosferycznego i za każdym razem mierzyć widmo cząstek α – należy wykonać około 10 pomiarów.

² Widmo energetyczne przedstawia zależność pomiędzy ilością zarejestrowanych przez detektor cząstek, a ich energią. Energia cząstki jest oddana przez wielkość (amplitudę lub pole powierzchni, czyli ładunek) elektrycznego impulsu wychodzącego z detektora i jest mierzona przez odpowiedni układ elektroniczny (przetwornik analogowo cyfrowy ADC). Układ detekcyjny detektor - przetwornik nie jest wykalibrowany. A mianowicie, cząstka deponuje w detektorze pewną energię, co powoduje powstanie elektrycznego impulsu o amplitudzie A . Cały zakres przetwornika ADC (np. od 0 V do $Z = 10$ V) podzielony jest na tzw. kanały (np. $K = 1024$) – stąd np. pierwszy kanał obejmuje zakres $0 \div 9.8$ mV. Zarejestrowanie impulsu powoduje inkrementację kanału odpowiadającego wielkości amplitudy impulsu $\# = A/Z \cdot K$ (np. impuls o amplitudzie 3 V spowoduje inkrementację kanału 307.). Dlatego mówimy, że przetworniki podają energię (lub czas, lub ładunek, lub prąd itd.) w kanałach. Kalibracja układu detekcyjnego polega na detekcji cząstek, które deponują znaną energię, co pozwala na otrzymanie zależności (najczęściej liniowej) pomiędzy kanałem układu detekcyjnego, a energią cząstek, czyli otrzymanie tzw. kalibracji.

5. **Pomiar zależności położenia pików od odległości pomiędzy źródłem i detektorem.** Pomiaru należy wykonywać co 3 mm dla ciśnienia wybranego z zakresu $-0.05 \div -0.02$ MPa.

Uwaga: Odległość detektora od źródła wynosi 16 mm plus wielkość odczytana na śrubie mikrometrycznej.

6. **Opracowanie pomiaru:**

a) Widmo energetyczne każdego z przeprowadzonych pomiarów zawiera jeden pik, którego położenie i kształt odpowiadają zarejestrowanym energiom cząstek. Dla każdego pomiaru należy określić położenie pików. Proszę przyjrzeć się kształtom zarejestrowanych pików. Dlaczego wyglądają one tak, a nie inaczej? Proszę następnie zdecydować, jaka wielkość będzie najlepiej charakteryzować ich położenie: może to być na przykład środek rozkładu Gaussa, centroid³ lub coś innego. Należy uzasadnić wybraną metodę. W celu przeprowadzenia tej analizy można wykorzystać dostępne na pracowni programy do analizy danych pomiarowych (*Origin* lub *Tukan*).

b) W oparciu o pomiary przeprowadzone z foliami aluminiowymi (p. IV.3) należy wykonać kalibrację energetyczną detektora krzemowego. W tym celu trzeba wykreślić zależność pomiędzy zmierzonymi położeniami pików w kanałach, a odpowiadającymi im energiami cząstek α w MeV – należy wziąć pod uwagę wszystkie pomiary z foliami oraz pomiar bez folii (IV.2) (grubość folii równa zero). Proszę się zastanowić, jaka funkcja będzie najlepiej opisywać uzyskaną zależność? Parametry tej funkcji należy znaleźć poprzez jej fit do danych eksperymentalnych (np. regresja liniowa dla funkcji liniowej). Uzyskana zależność nosi nazwę kalibracji energetycznej układu detekcyjnego i może być używana do zamiany energii zmierzonej w kanałach na jednostki fizyczne. Energie cząstek przechodzących przez folię aluminiową należy policzyć korzystając ze wzoru Bethe-Bloch'a uwzględniając grubość aluminium x w danym pomiarze. Obliczenia te najlepiej przeprowadzić pisząc prosty program (Fortran/C/C++/Mathematica lub inny), który dokona obliczeń z odpowiednio małym krokiem całkowania – należy policzyć całkę, co można w przybliżeniu wykonać przez sumowanie małych przedziałów Δx . W sprawozdaniu należy zamieścić kod tego programu. **W programie należy koniecznie wpisać *explicite* każdą stałą występującą we wzorze.**

UWAGA: Używane źródło jest źródłem zamkniętym, osłoniętym folią aluminiową. Dlatego też w pomiarze przeprowadzonym w próżni i bez dodatkowych folii pomiędzy detektorem, a źródłem (IV.2) pozycja pików w kanałach odpowiada energii cząstek α zmniejszonych o straty energii w folii osłaniającej źródło i wynosi 4.65 MeV, co zostało zmierzone w niezależnym pomiarze kalibracyjnym. Jak można określić grubość folii osłaniającej źródło?

c) Modyfikując napisany dla aluminium program na potrzeby pomiarów z powietrzem (przyjmując obecność jedynie tlenu i azotu) należy policzyć i narysować zależności strat energii od energii cząstek $-\frac{dE}{dx} = f(E)$, od drogi przebytej wewnątrz absorbentu⁴ $-\frac{dE}{dx} = f(x)$ oraz

$E = f(x)$ dla przeprowadzonych serii pomiarowych IV.4 lub IV.5. Zmienna x oznacza oczywiście odległość pomiędzy detektorem i źródłem (IV.5) lub grubość folii aluminiowych (IV.3). Również zmieniające się ciśnienie powietrza (IV.4) może zostać w prosty sposób wyrażone jako zmieniająca się grubość x przy stałym ciśnieniu, gdyż obie te wielkości określają ilość atomów materii, przez którą przechodzą cząstki.

³ Centroid rozkładu, to inaczej „środek masy” rozkładu. Jest to arytmetyczna średnia kanałów ważona ilością zarejestrowanych w danym kanale cząstek. Np. jeżeli zmierzone widmo cząstek ogranicza się do trzech kanałów: (kanał, ilość cząstek) = (10,1000), (11,1500) oraz (12,200), to centroid tego rozkładu wynosi 10.704. Ile wynosi niepewność statystyczna centroidu?

⁴ Zależność strat energii (czyli średniej energii jonizacji) od drogi przebytej przez ciężkie cząstki naładowane wewnątrz materii jest nazywana krzywą Bragga. Proszę się zastanowić (poszukać) jaki ta krzywa ma kształt i dlaczego.

- d) Należy porównać zależności policzone ze wzoru Bethe-Bloch'a z zależnościami zmierzonymi eksperymentalnie. W tym celu należy zrobić odpowiednie wykresy porównujące wykalibrowane dane doświadczalne (IV.4 lub IV.5) z wynikami obliczeń dla poszczególnych serii pomiarowych. Kalibracja została policzona na podstawie pomiaru IV.3. Jeżeli uzyskane krzywe się nie pokrywają, to albo zastosowana kalibracja jest zbyt uproszczona, albo wystąpiły inne (systematyczne lub grube) błędy pomiarowe. Czy uzyskana kalibracja ma sens, tzn. czy kształty obu zależności są podobne? Czy uzyskane krzywe zgadzają się ze sobą w granicach niepewności pomiarowych? Proszę przedyskutować powyższe pytania.
- e) Należy policzyć zasięg cząstek α w aluminium oraz w powietrzu dla wybranego ciśnienia korzystając z wzoru Bethe-Bloch'a.
- f) Proszę pamiętać o dyskusji błędów. Z jakiego rodzaju niepewnościami pomiarowymi mamy do czynienia w niniejszym pomiarze?

V. Dodatek: Straty energii i zasięg cząstek naładowanych w materii

Straty energii dla ciężkich cząstek naładowanych w zderzeniach atomowych są dobrze opisane w szerokim zakresie energii wzorem podanym przez H.A. Bethe oraz F. Blocha:

$$-\frac{dE}{dx} = 2\pi N_a r_e^2 m_e c^2 \rho \frac{Z}{A} \frac{z^2}{\beta^2} \left[\ln \left(\frac{2m_e \gamma^2 \beta^2 c^2 W_{\max}}{I^2} \right) - 2\beta^2 \right],$$

gdzie

r_e – klasyczny promień elektronu = $2.818 \cdot 10^{-15}$ m.

m_e – masa elektronu

N_a – liczba Avogadra

I – średni potencjał jonizacji

Z – liczba atomowa absorbentu

A – liczba masowa absorbentu (*de facto* masa molowa, by zgadzały się jednostki)

ρ – gęstość absorbentu

z – ładunek cząstki padającej [jednostki ładunku elektronu]

β – prędkość cząstki padającej.

c – prędkość światła w próżni.

$\gamma = 1/\sqrt{1-\beta^2}$.

Korzystając z analizy wymiarowej proszę ustalić, jaką jednostkę ma każda z powyższych zmiennych.

$W_{\max} \cong 2m_e (\beta \gamma c)^2$ – maksymalny przekaz energii w pojedynczym zderzeniu. Został on policzony na podstawie rozważań kinematycznych.

Dla określenia średniego potencjału jonizacji stosuje się wzór fenomenologiczny:

$$\begin{cases} \frac{I}{Z} = 12 + \frac{7}{Z} \quad [\text{eV}] & Z < 13 \\ \frac{I}{Z} = 9.76 + 58.8 \cdot Z^{-1.19} \quad [\text{eV}] & Z \geq 13 \end{cases}$$

W przypadku cząstek padających o wyższych energiach ($E > 800 \text{ MeV}$) wzór Bethe-Bloch'a musi być dodatkowo skorygowany.

W przypadku absorbentów będących mieszaniną N różnych rodzajów atomów (związanych lub niezwiązanych) należy znaleźć średnie straty energii dane następującym wzorem:

$$\frac{dE}{dx} = \sum_{i=1}^N w_i \cdot \left(\frac{dE}{dx} \right)_i,$$

gdzie $w_i = \frac{a_i A_i}{\sum_i a_i A_i}$ jest wagą masową i -tego rodzaju atomów, a_i jest procentową ilością danego

rodzaju atomów w mieszaninie, a $\left(\frac{dE}{dx} \right)_i$ jest stratą energii w i -tym rodzaju atomów.

Średni zasięg promieniowania w materii uzyskuje się poprzez scałkowanie krzywej strat energii. Dla cząstek padających o energii E_0 mamy:

$$R(E_0) = \int_0^{E_0} \left(\frac{dE}{dx} \right)^{-1} dE.$$

VI. Literatura

Pozycje 2 i 3 znajdują się również na stronach II pracowni fizycznej.

1. A. Strzałkowski, Wstęp do fizyki jądra atomowego, PWN. Rozdziały dotyczące oddziaływania ciężkich cząstek naładowanych z materią oraz detektorów (liczników) półprzewodnikowych.
2. K.N. Muchin, Doświadczalna Fizyka Jądrowa, tom 1, rozdział 3.2 (kopia znajduje się na stronie Pracowni w materiałach dodatkowych do ćwiczenia – fragmenty przekreślone można opuścić, ale można też przeczytać).
3. C. Amsler et al., Physics Letters **B667**, 1 (2008) dostępny na stronach PDG (Particle Data Group) pod adresem <http://pdg.lbl.gov/2011/reviews/rpp2011-rev-passage-particles-matter.pdf>. Dobrze jest przeczytać rozdziały 27.2 i 27.3.
4. W.R. Leo, Techniques for Nuclear and Particle Physics Experiments, Springer-Verlag
Ta pozycja jest trudno dostępna. Jej przeczytanie nie jest konieczne, warto jednak wiedzieć o istnieniu tej niezwykle przydatnej w pracy fizyka eksperymentalnego książki.