

Ćwiczenie 28

Wyznaczanie czasu połowicznego zaniku izotopu promieniotwórczego

28.1. Zasada ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest wyznaczenie czasu połowicznego zaniku izotopu promieniotwórczego Ba-137m (izotop wtórny) otrzymanego przez płukanie generatora izotopów Cs-137 (izotop macierzysty). Czas połowicznego zaniku Ba-137m wyznaczany jest bezpośrednio z pomiaru zaniku aktywności izotopu wtórnego oraz z pomiaru wzrostu aktywności izotopu macierzystego.

28.2. Wiadomości teoretyczne

Rozpad promieniotwórczy to zachodząca samorzutnie przemiana jądra atomowego (izotopu niestabilnego), której towarzyszy emisja cząstki α , β lub γ . Jest to proces przypadkowy (stochastyczny), niezależny od czynników zewnętrznych i można przyjąć, że zachodzi ze stałym prawdopodobieństwem.

Ilość rozpadów promieniotwórczych zachodzących w próbce w pewnym przedziale czasu dt jest proporcjonalna zarówno do długości tego przedziału czasu jak i liczby jąder promieniotwórczych N zawartych w próbce w danej chwili. Zatem zmiana (ubytek) liczby jąder dN można wyrazić zależnością:

$$dN = -\lambda N dt, \quad (28.1)$$

gdzie współczynnik proporcjonalności λ nazywany jest stałą rozpadu promieniotwórczego. Jest to wielkość charakterystyczna dla danego izotopu, przyjmująca wartości od 10^{-17}s^{-1} do 10^6s^{-1} .

Całkując powyższe równanie otrzymujemy prawo rozpadu promieniotwórczego, opisujące zależność liczby jąder $N(t)$, które nie uległy rozpadowi w danej chwili t :

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}. \quad (28.2)$$

gdzie: N_0 oznacza ilość jąder promieniotwórczych w chwili początkowej $t=0$. Średni czas życia jądra promieniotwórczego τ można zdefiniować jako:

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} t N_0 e^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} N_0 e^{-\lambda t} dt} \quad (28.3)$$

Z powyższej zależności otrzymujemy więc, że $\tau = \lambda^{-1}$. Nietrudno wykazać, że liczba jąder promieniotwórczych w próbce w przedziale czasu równym średniemu czasowi życia zmniejsza się e -krotnie.

Powszechnie używaną w fizyce jądrowej wielkością jest czas połowicznego zaniku $T_{1/2}$. Jest to czas, po którym liczba jąder promieniotwórczych zmaleje o połowę w stosunku do ilości pierwotnej. Z prawa rozpadu promieniotwórczego otrzymujemy więc:

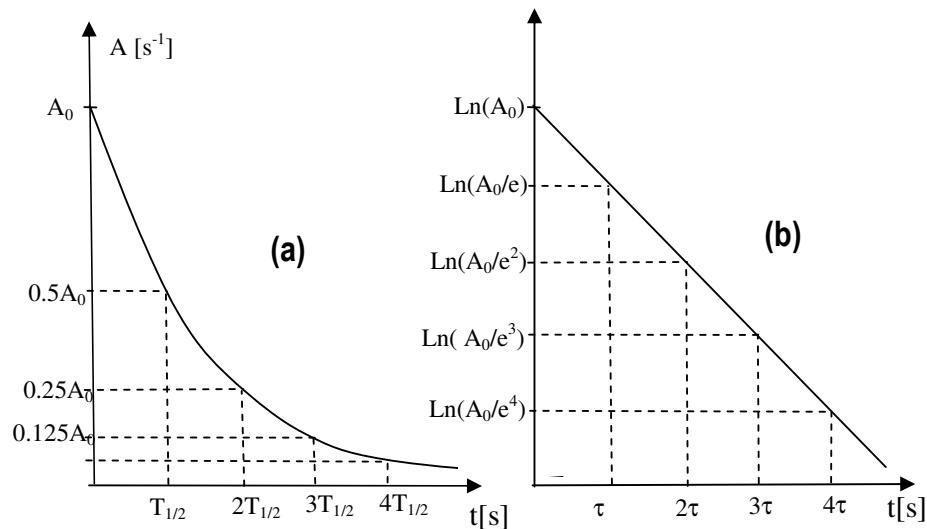
$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda} \quad (28.4)$$

Aktywność substancji promieniotwórczej $A(t)$ opisuje liczba rozpadów zachodzących w preparacie w jednostce czasu. Z prawa rozpadu promieniotwórczego otrzymujemy:

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = A_0 e^{-\lambda t} \quad (28.5)$$

gdzie A_0 oznacza aktywność preparatu w chwili początkowej. Jednostką aktywności jest I bekerel [$1Bq = 1rozpad/sek$] Jest to jednostka bardzo mała, więc częściej używa się jej wielokrotności (kBq , MBq , GBq , TBq). Dawniej stosowaną jednostką jest $Ikiur$ [Ci] odpowiadający aktywności $3,7 \cdot 10^{10} Bq = 37GBq$.

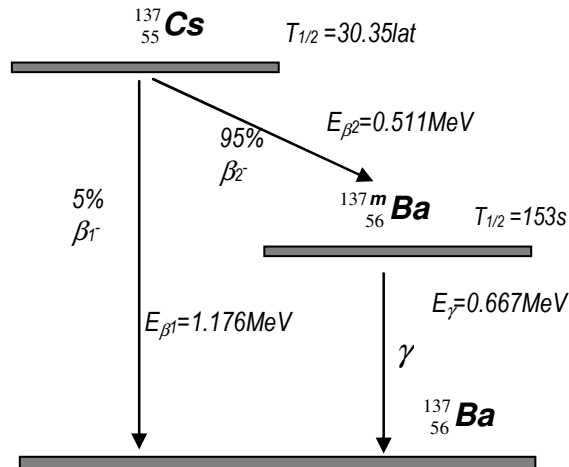
Zdefiniowane powyżej wielkości można przedstawić na wykresie krzywej rozpadu w skali liniowej (rys. 28.1a) i półlogarytmicznej (rys. 28.1b).



Rys. 28.1. Zależność aktywności substancji promieniotwórczej od czasu.

Schemat rozpadu izotopu cezu Cs-137

Wykorzystywany w ćwiczeniu generator izotopów zawiera izotop promieniotwórczy Cs-137 (o aktywności do 370kBq) jako pierwiastek o długim czasie połowicznego zaniku (30,25 lat). Cs-137 podlega rozpadowi promieniotwórczemu typu β^- przekształcając się w izotop stabilny Ba-137. Proces ten w ok. 95% zachodzi za pośrednictwem stanu metastabilnego Ba-137m, który zanika do stanu podstawowego na drodze emisji kwantu γ ($E_\gamma=662\text{keV}$) z połowicznym czasem rozpadu 2,6 min (zgodnie ze schematem pokazanym na rys. 28.2).



Rys. 28.2. Schemat rozpadu promieniotwórczego izotopu cezu ^{137}Cs .

Można więc zapisać następujący łańcuch przemian promieniotwórczych:



gdzie: N_1 – liczba atomów cezu Cs-137, N_2 – liczba atomów baru Ba-137m, N_3 – liczba atomów baru Ba-137, λ_1 – stała rozpadu cezu Cs-137, λ_2 – stała rozpadu baru Ba-137m. Zmianę liczby jąder obu pierwiastków promieniotwórczych opisują równania:

$$\frac{dN_1}{dt} = -\lambda_1 N_1 \quad (28.7)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 \quad (28.8)$$

Rozwiązania obu równań, przy warunkach początkowych $N_1(t=0) = N_0$ i $N_2(t=0) = 0$, mają postać:

$$N_1(t) = N_0 e^{-\lambda_1 t}$$

$$N_2(t) = - = N_0 \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (28.9)$$

Aktywność izotopu wtórnego wynosi wówczas:

$$A_2(t) = \lambda_2 N_2 = A_0 \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t}) \quad (28.10)$$

gdzie A_0 – aktywność początkowa substancji macierzystej. Ponieważ czas życia izotopu macierzystego jest znacznie dłuższy niż wtórnego, stała rozpadu λ_1 jest zaniedbywanie mała w porównaniu ze stałą λ_2 . Wówczas:

$$A_2(t) = A_1 (1 - e^{-\lambda_2 t}) \quad (28.11)$$

gdzie A_1 – wartość aktywności substancji macierzystej (w przybliżeniu stała). Aktywność powstającego pierwiastka początkowo wzrasta, a po dostatecznie długim czasie osiąga wartość aktywności pierwiastka macierzystego. Całkowita aktywność preparatu jest wówczas dwukrotnie większa od aktywności pierwiastka macierzystego.

$$A = A_1 + A_2 = 2A_1 \quad (28.12)$$

Jest to tzw. stan równowagi wiekowej.

Jeżeli równowaga zostanie zakłócona przez usunięcie pewnej ilości izotopu wtórnego (w tym ćwiczeniu - przez wypłukanie Ba-137m z generatora izotopu Cs-137) układ będzie dążył do przywrócenia stanu równowagi. Wzrost liczby jąder izotopu wtórnego dany jest zależnością:

$$N_2(t) = N_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} (1 - e^{-\lambda_2 t}), \quad (28.13)$$

przyjmując, że liczba jąder długożyciowego izotopu macierzystego N_1 jest stała. Aktywność substancji wtórnej rośnie więc, zgodnie z zależnością:

$$A_2(t) = A_1 (1 - e^{-\lambda_2 t}). \quad (28.14)$$

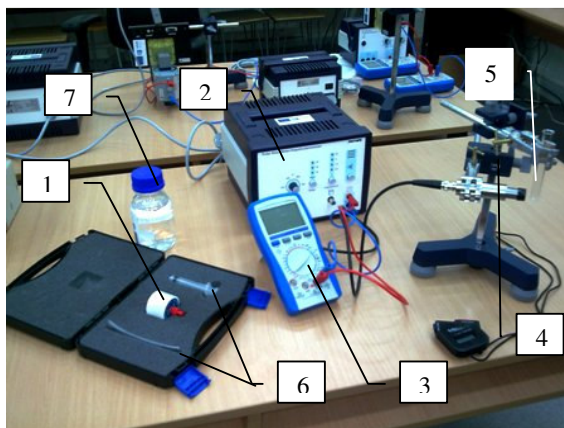
Znając aktywność A_1 z pomiaru wykonanego przed wypłukaniem (w stanie równowagi), można wyznaczyć stałą rozpadu λ_2 z zależności:

$$A_1 e^{-\lambda_2 t} = A_1 - A_2(t) \quad (28.15)$$

Możliwe jest także wyznaczenie stałej λ_2 bezpośrednio w pomiarze aktywności promieniotwórczej cieczy użytej do płukania generatora izotopu. Wówczas:

$$A'_2(t) = A'_0 e^{-\lambda_2 t} \quad (28.16)$$

28.3. Aparatura pomiarowa



1. Generator izotopu Cs-137;
2. Licznik impulsów;
3. Multimetr cyfrowy;
4. Detektor promieniowania (licznik Geigera-Muellera);
5. Probówka z roztworem;
6. Strzykawka z rurką pobierczą;
7. Roztwór HCl.

Rys. 28.3. Widok aparatury pomiarowej.

28.4. Zadania

1. Zmierzyć zależność liczby zliczeń z generatora izotopu Cs-137 w stanie równowagi od napięcia licznika (charakterystyka licznika Geigera-Muellera) w przedziale 100-500V, wykonać wykres i wybrać wartość napięcia pracy licznika.
2. Zmierzyć poziom tła promieniotwórczego po odsunięciu źródła promieniotwórczego od okienka wlotowego głowicy.
3. Wykonać serię pomiarów aktywności roztworu przepływającego w funkcji czasu i wyznaczyć czas połowicznego zaniku oraz stałą rozpadu.
4. Wykonać serię pomiarów aktywności generatora w funkcji czasu bezpośrednio po przepłukaniu roztworem HCl.

28.5. Przebieg pomiarów i opracowanie wyników

Ad 1.

Generator izotopu umieścić w uchwycie statywu w pozycji pionowej (otworem wylotowym skierowanym ku dołowi i zdjąć dolną zatyczkę, odsłaniając otwór wylotowy. Głowicę detektora zamocować w drugim uchwycie także w pozycji pionowej, bezpośrednio pod otworem wylotowym generatora. Pomiarów wykonywać w przedziałach 1-minutowych dla min 5 różnych wartości napięcia z przedziału 100-500V.

Ad.2.

Pomiar tła przeprowadzić w nieobecności izotopu w przedziale min 600 sekund.

Ad3.

Atomy Ba-137m są wypłukiwane z generatora roztworem HCl. Podczas wykonywania ćwiczenia generator może być poddawany wielokrotnie płukaniu. Aktywność Ba-137m jest jednak zależna od równowagi promieniotwórczej pomiędzy nuklidem macierzystym Cs-137 i wtórnym Ba-137m. Maksimum aktywności Ba-137m jest osiągnięte wyłącznie

w stanie równowagi promieniotwórczej, który następuje po pewnym czasie od wypłukania. Stopień osiągnięcia równowagi po wypłukaniu przedstawia się następująco: 1 min – ok. 23%; 2,6 min – ok. 50%; 5,5 min – ok. 75%; 12 min – 96%; 20 min – 99,5%. Po wypłukaniu powrót do stanu równowagi promieniotwórczej wewnątrz generatora może być stwierdzony przy pomocy odpowiedniego przyrządu pomiarowego.

Procedura przepłukiwania i pomiaru aktywności roztworu:

1. Na czas płukania generatora należy założyć rękawiczki i fartuchy ochronne.
2. Umieścić w uchwycie probówkę i prostopadle do niej głowicę detektora, jak to pokazano na rys. 28.3 Połączyć strzykawkę z plastikową rurką pobierczą, zanurzając jej drugi koniec w butelce z roztworem HCl, napełnić strzykawkę do objętości 2ml i odłączyć rurkę od strzykawki.
3. Zdjąć górną zatyczkę ochronną generatora i wpasować końcówkę strzykawki w gniazdo oznaczone kolorem niebieskim.
4. Trzymając generator otworem wylotowym w dół umieścić go bezpośrednio nad probówką (dolna zatyczka powinna być również zdjęta).
5. Przez powolne przyciskanie tłoka strzykawki roztwór HCl wprowadzić do generatora i zebrać do probówki. Procedura przepłukiwania powinna trwać od 10 do 20 sekund.
6. Po zakończeniu płukania należy założyć zatyczki na oba końce generatora i umieścić go w pudełku zabezpieczającym.
7. Bezpośrednio po napełnieniu probówki przeprowadzić serię odczytów liczby zliczeń w odstępach 30 sekundowych w czasie 10 minut. Po zakończeniu pomiarów student odstawia probówkę z roztworem do stojaka na probówki.

Korzystając z otrzymanych wyników i zależności (28.16) wykonać wykres $\ln(A'_2) = f(t)$ nanosząc także słupki standardowych niepewności pomiarowych. W oparciu o metodę regresji liniowej wyznaczyć stałą rozpadu λ_2 i jej błąd.

Ad 4.

Umieścić ponownie generator izotopów Cs-137 w uchwycie statywu i ustawić sondę licznika Geigera-Muellera okienkiem wylotowym w kierunku otworu wyjściowego generatora. Następnie przeprowadzić kolejną serię odczytów liczby zliczeń w odstępach 30 sekundowych w czasie 10 minut. Po wykonaniu ćwiczenia umieścić generator izotopów oraz butelki z roztworem HCl w szafie panczernej. Pozostały w probówce roztwór po płukaniu generatora po czasie przynajmniej 30 min od płukania można przelać do butelki polietylenowej. Roztwór może być także wylany do umywalki, gdyż po ponad 30 minutach aktywność Ba-137m w roztworze jest mniejsza niż 0.001 jego pierwotnej aktywności, a całkowity wkład aktywności izotopu Cs-137 w roztworze jest mniejszy niż 50 Bq/cm^3 .

Z wyników otrzymanych w tej części ćwiczenia i w oparciu o zależność (28.15) wykonać wykres $\ln(A_1 - A_2) = f(t)$ i wyznaczyć ponownie wartość stałej rozpadu promieniotwórczego λ_2 izotopu Ba-137m i jej błąd. Ocenic zgodność otrzymanych wyników.

28.6. Wymagane wiadomości.

- rodzaje rozpadów promieniotwórczych, schematy rozpadów, widmo energetyczne emitowanych cząstek,
- prawo rozpadu promieniotwórczego i wielkości z nim związane, łańcuch przemian promieniotwórczych,
- zasada działania licznika Geigera-Muellera,

- błędy pomiarów w zjawiskach statystycznych.

28.7. Literatura.

- Zubek M., Kuczkowski A.: II Pracownia Fizyczna. Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej.
- Bobrowski Cz., Fizyka – krótki kurs. WNT 2003.
- Halliday D, Resnick R., Walker J.: Podstawy fizyki, t.5. PWN 2003.