

Grzegorz Olszewski, Dagmara Strumińska-Parulska

**Przewodnik do ćwiczeń laboratoryjnych z chemii
jądrowej, radiochemii i monitoringu skażeń
promieniotwórczych**

**Pracownia Analityki i Radiochemii Środowiska
Katedra Chemii i radiochemii Środowiska**

Gdańsk, 2024

Od Autorów,

Przewodnik laboratoryjny zawiera zestaw 15-stu ćwiczeń eksperymentalnych z chemii jądrowej, radiochemii i monitoringu skażeń promieniotwórczych dla studentów studiów I i II stopnia na kierunkach: chemia (Ch), ochrona środowiska (OŚ) i bezpieczeństwo jądrowe i ochrona radiologiczna (BJiOR). W ramach poszczególnych ćwiczeń zawarte są postawy teoretyczne dotyczące ich zakresu oraz instrukcja ich wykonania, a także opracowanie wyników pomiarowych. Zostały one dostosowane do poziomu edukacyjnego studentów, jak również kierunku studiów. Podział tych ćwiczeń na grupy laboratoryjne zależy również od liczby godzin, przewidzianych w ramach danego przedmiotu.

Spis ćwiczeń

1. Pipetowanie roztworów i pomiar masy w badaniach radioanalitycznych
2. Pomiar czasu połowicznego rozpadu radioizotopu ^{137m}Ba
3. Określenie samoabsorpcji promieniowania γ w próbce KCl
4. Pomiaru zawartości radioizotopów ^{40}K i ^{137}Cs w żywności za pomocą spektrometrii promieniowania γ
5. Pomiar zawartości wybranych radioizotopów w materiałach budowlanych za pomocą spektrometrii promieniowania γ
6. Współstrącanie radionuklidów na matrycy nieorganicznej jako metoda zateżniania próbek i separacji radionuklidów
7. Analizy radioizotopów uranu ^{234}U , ^{235}U i ^{238}U w próbkach środowiskowych z wykorzystaniem chromatografii jonowymiennej
8. Przygotowywanie źródeł promieniotwórczych do pomiaru w spektrometrze alfa za pomocą elektrolizy
9. Przygotowywanie źródeł promieniotwórczych polonu ^{210}Po do pomiaru w spektrometrze alfa za pomocą autodepozycji
10. Pomiar dawki ekspozycyjnej
11. Osłabienie promieniowania jonizującego
12. Widma promieniowania alfa
13. Wyznaczenie napięcia pracy licznika Geigera-Müllera oraz pomiary aktywności próbek gleby
14. Dobór optymalnych parametrów pracy licznika scyntylicyjnego
15. Wyznaczenie czasu martwego licznika Geigera-Müllera metodą dwóch źródeł oraz przy użyciu oscyloskopu

Ćwiczenie 1

Pipetowanie roztworów i pomiar masy w badaniach radioanalitycznych

Cel

Umiejętność wykonania ważenia małych mas i odmierzenia małych objętości stosowanych w laboratorium radioanalitycznym z użyciem wagi analitycznej i pipet przez studentów

Wprowadzenie

Waga analityczna to urządzenie, które waży masy substancji z bardzo dużą dokładnością (zazwyczaj 0,1 mg) i znajduje zastosowanie w laboratoriach do ważenia bardzo małych ilości substancji. Pipety do odmierzenia objętości dzieli się na dwa rodzaje: pipety szklane (jedno- lub wielomiarowe) i pipety automatyczne, które dodatkowo są klasyfikowane jako: zawierające (TC) lub do dostarczenia (TD). Każda z pipet jest skalibrowana na określone objętości, które mają być dostarczone, jednak przy użyciu pipety typu TC (zawierające) cała zawartość pipety, czyli ta, która swobodnie wypływa z pipety, jaki zawartość reszkowa w pipecie, musi zostać przeniesiona z pipety do naczynia. Pipety zawierające (TC) są oznaczone dwoma paskami w jej górnej części. Pipety do dostarczenia (TD) są skalibrowane w taki sposób, aby zawartość reszkowa została w końcówce pipety szklanej; są one częściej stosowane w laboratoriach. Jeżeli pipeta nie posiada żadnych dodatkowych oznaczeń w górnej części, jest to pipeta typu TD i nie należy wydmuchiwać zawartości reszkowej do naczynia. Natomiast szkło miarowe dzieli się na dwie klasy: A i B, które związane są przede wszystkim z precyzją pomiaru objętości. W normach dla obu klas podane są dokładne tabele oraz maksymalny dopuszczalny błąd pomiaru objętości dla danego rodzaju szkła laboratoryjnego o określonej objętości całkowitej. We wszystkich normach wymagania dla klasy B są dokładnie dwa razy mniejsze niż dla szkła miarowego klasy A. Coraz bardziej popularne w laboratoriach stają się automatyczne pipety plastikowe, które stopniowo zastępują szklane pipety. Z reguły są one używane do dostarczania bardzo małych objętości z dużą dokładnością.

Do ćwiczenia wybrano trzy typy pipet celem porównania ich dokładności dostarczania roztworów.

Sprzęt pomiarowy i materiały

- Pipeta automatyczna 0,1 ml (TD)
- Pipeta miarowa 1 ml z działką 0,1 ml klasy A (TD)
- Pipeta wolumetryczna jednomiarowa 1 ml klasy A (TD)
- Waga analityczna z działką 0,1 mg
- Naczynka wagowe
- Pęseta

Odczynniki chemiczne

- Woda dejonizowana

Instrukcja

1. Oznacz i zważ na wadze analitycznej cztery czyste, suche naczynka wagowe. Masę zapisz z dokładnością do 0,1 mg. Do przenoszenia naczynek załóż rękawiczki, ponieważ pozostałości znajdujące się na palcach mogą wpływać na pomiar masy.
2. Przenieś następujące ilości wody do naczynek wagowych Tabela 1, od A do D) i niezwłocznie zważ po każdym dodaniu. Jeśli płyn nie zostanie zważony natychmiast, utrata próbki przez odparowanie może powodować błędy pomiaru. Wykonaj każdy pomiar dwa razy.
 - A. 1 ml wody dejonizowanej za pomocą 1 ml pipety jednomiarowej
 - B. 1 ml wody dejonizowanej za pomocą 1 ml pipety miarowej z działką 0,1 ml
 - C. 0.1 ml wody dejonizowanej za pomocą 1 ml pipety miarowej z działką 0,1 ml
 - D. 0.1 ml wody dejonizowanej za pomocą pipety automatycznej 0,1 ml

Wyniki ważenia zapisz w tabeli 1.

Tabela 1. Pomiary masy wody dejonizowanej (punkt 2)

Pomiar	Masa naczynka wagowego (mg)	Naczynko wagowe +woda (mg) Pomiar 1	Naczynko wagowe +woda (mg) Pomiar 2
A			
B			
C			
D			

3. Przygotuj i zważ na wadze analitycznej osiem czystych, suchych naczynek wagowych. Przenieś 1 ml wody pipetą jednomiarową o objętości 1 ml do 4 naczynek wagowych i 0,1 ml wody za pomocą pipety automatycznej o objętości 0,1 ml do każdego z pozostałych 4 naczynek wagowych, następnie zważ ponownie. Zapisz wyniki ważenia w tabeli 2.

Tabela 2. Pomiary masy wody dejonizowanej (punkt 3)

Pomiar	Masa naczynka wagowego (mg)	Naczynko wagowe+woda (mg) Pomiar 1
1A		
2A		
3A		
4A		
1D		
2D		
3D		
4D		

Opracowanie wyników

1. Aby uzyskać masę netto dostarczonej wody, odejmij od masy brutto masę tary (naczynko). Znając gęstość wody (0,998 g/ml w temperaturze pokojowej 22°C), oblicz objętość wody korzystając z wartości średniej jej masy (gęstość = masa/ objętość).
2. Uzupełnij tabelę 3. Na podstawie danych z tabeli 1, oblicz i zapisz średnią masę dostarczonej wody (punkt 2 instrukcji). Oblicz błąd względny (podany w %) w porównaniu z wartością rzeczywistą i zapisz w tabeli 3.

Tabela 3. Opracowanie wyników (punkt 2)

Pomiar	Średnia masa dostarczonej wody (mg)	Błąd względny (+/- %)
A		
B		
C		
D		

3. Uzupełnij tabelę 4. Na podstawie tabeli 2, oblicz wartość średnią z 4 pomiarów masy dostarczonej wody dejonizowanej dwiema pipetami (punkt 3 instrukcji). Oblicz odchylenie standardowe średniej i porównaj otrzymane średnie masy z wartościami z punktu 2 (tabela 3).

Tabela 4. Opracowanie wyników (punkt 3)

Pomiar	Średnia masa dostarczonej wody (mg)	Odchylenie standardowe średniej (+/-)
1A-4A		
1D-4D		

4. W sprawozdaniu opisz wszystkie wykonane czynności wraz z obliczeniami i wypełnionymi tabelami.

Ćwiczenie 2

Pomiar czasu połowicznego rozpadu radioizotopu ^{137m}Ba

Cel

Celem ćwiczenia jest pomiar czasu półtrwania radioizotopu ^{137m}Ba w oparciu o znajomość prawa rozpadu promieniotwórczego oraz definicji czasu połowicznego rozpadu

Wprowadzenie

Radioaktywność (promieniotwórczość) to zdolność jąder atomowych do rozpadu promieniotwórczego, natomiast aktywność substancji promieniotwórczej (A) to liczba jąder atomów, które w jednostce czasu ulegają rozpadowi, emitując cząstki α , β , lub kwanty γ promieniotwórcze. Radioaktywność materiału promieniotwórczego zależy od jego ilości i maleje z upływem czasu, wraz z rozpadem atomów. Zmiana liczby jąder radioaktywnych, które istnieją w dowolnym momencie czasu, jest równa liczbie jąder, które rozpadają się przez wydzielanie cząstek promieniotwórczych. Zmiana liczby jąder, które nie uległy rozpadowi ΔN jest więc proporcjonalna do liczby jąder, które nie uległy rozpadowi N i czasu Δt , w którym następuje pomiar. Można to zapisać matematycznie za pomocą równania:

$$\Delta N = -\lambda N \Delta t \quad (1)$$

gdzie λ to stała rozpadu promieniotwórczego (szybkości radioaktywnego zaniku), charakterystyczna dla danego izotopu.

Równanie to w postaci różniczkowej stanowi matematyczna postać prawa rozpadu promieniotwórczego:

$$dN = -\lambda N dt \quad (2)$$

które po rozwiązaniu przyjmuje postać:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (3)$$

gdzie N to liczba jąder, które nie uległy rozpadowi w dowolnym momencie t , natomiast początkowa liczba jąder w czasie $t=0$ wynosi N_0 .

Ponieważ aktywność (A) jest proporcjonalna do liczby jąder promieniotwórczych, będzie się ona zmieniać w takim samym tempie jak liczba jąder. Aktywność promieniotwórcza jest opisana za pomocą równania:

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (4)$$

gdzie A_0 jest początkową aktywnością próbki w czasie $t=0$ i jest równa λN_0 .

Bardzo ważnym pojęciem w fizyce i chemii jądrowej jest czas połowicznego rozpadu ($T_{1/2}$), czyli okres, w którym aktywność materiału promieniotwórczego zmniejszy się o połowę swojej pierwotnej aktywności. Jest on specyficzny dla każdego izotopu promieniotwórczego, dlatego też może być wykorzystywany do identyfikowania nieznanego radioizotopu. Czas połowicznego rozpadu zależy od stałej szybkości zaniku λ – im wyższa wartość stałej

szybkości zaniku, tym krótszy okres półtrwania. Czas połowicznego rozpadu $T_{1/2}$ określony jest następująco: jeśli początkowa aktywność wynosi A_0 w czasie $t=0$, to aktywność po czasie $t=T_{1/2}$ będzie wynosiła połowę aktywności początkowej:

$$\frac{1}{2} A = A_0 e^{-\lambda t} \quad (5)$$

Równanie to po uproszczeniu i przekształceniu przyjmuje postać:

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} \quad (6)$$

lub

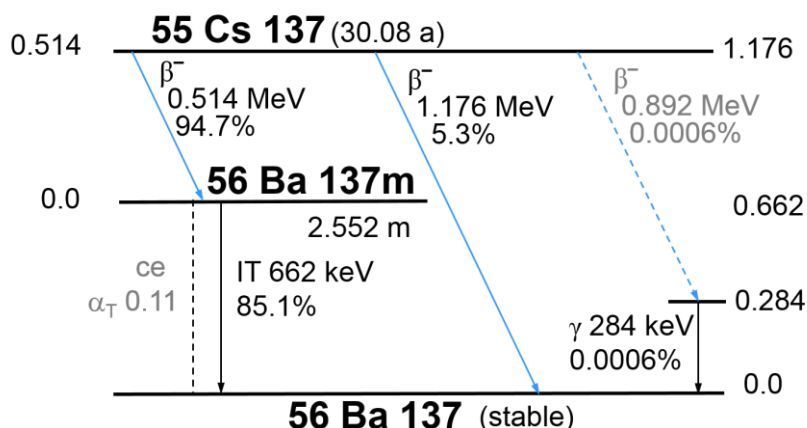
$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (7)$$

Gdy liczba jąder N maleje wykładniczo wraz z czasem t podobnie jak aktywność A , to wykres $\ln(N)$ względem czasu t będzie opisany równaniem linii prostej i przyjmie formę równania (1), a stała rozpadu promieniotwórczego λ będzie wskazywać jak szybko liczba jąder N lub aktywność A zmienia się w czasie. Po zlogarytmowaniu równania (1) otrzymujemy następującą postać:

$$\ln N = \ln N_0 - \lambda t \quad (8)$$

Wzór ten ma postać równania prostej, $y = a + bx$, gdzie: $y = \ln N$, $a = \ln N_0$, $x = t$, i $b = \lambda$. Jeśli $\ln N$ jest wykreślony w funkcji t , to wynikiem powinna być linia prosta, której nachylenie jest ujemne i ma wartość λ . Dlatego stałą rozpadu promieniotwórczego λ można wyszukać na wykresie zależności $\ln N$ względem czasu t , po zastosowaniu metody regresji liniowej.

Do wykonania ćwiczenia wykorzystywana jest sonda scyntylicyjna NaI(Tl), która posłuży do pomiaru czasu półtrwania metastabilnego radioizotopu ^{137m}Ba , który emituje promieniowanie gamma i rozpada się do stabilnego ^{137}Ba (Rys. 1). Aktywność ^{137m}Ba oblicza się za pomocą funkcji czasu przez pomiar promieniowania γ emitowanego z rozpadu ^{137m}Ba , a czas połowicznego rozpadu $T_{1/2}$ jest obliczany z wykorzystaniem stałej rozpadu promieniotwórczego tego radionuklidu.



Rys. 1. Schemat rozpadu ^{137}Cs do ^{137}Ba poprzez ^{137m}Ba

Aparatura i materiały

- Sonda scyntylacyjna NaI(Tl) z radiometrem RUM-2
- Komputer
- Generator izotopowy $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$
- Naczynko pomiarowe
- Rękawiczki

Odczynniki chemiczne

- Roztwór 0,9% NaCl w 0,04M HCl do wypłukiwania baru z generatora

Instrukcja

1. Podłącz do sieci zasilacz radiometru. Zwróć uwagę czy radiometr jest połączony z komputerem przewodem USB i czy na radiometrze podświetlone są diody ZASILANIE i SYNCHRONIZACJA. Jeśli tak, włącz komputer i z pulpitu uruchom program RUM-2.
2. Postępuj zgodnie z wyświetlanymi instrukcjami: wybierz kolejno sondę SSU-70, połączenie przez Uniwersalną Magistralę Szeregową (USB) a następnie z rozwijanej listy wybierz dostępną sondę i kliknij POŁĄCZ i DALEJ.
3. W zakładce „Wysokie napięcie” zmień limit bezpieczeństwa napięcia na 1000 V, ustaw napięcie na 1000 V i zaznacz „Zasilacz wysokiego napięcia włączony”. W tym momencie powinna podświetlić się informacja „Włączone zasilanie” a na wykresie widać będzie wzrost napięcia fotopowielacza. Poczekaj aż podświetli się informacja „Napięcie stabilne”.
4. W zakładce „Nastawy” zaznacz „Skanuj ciągle”, ustaw poziom wyzwalania na 100 mV, wzmocnienie na 0,3, zaznacz okienko „Automatycznie” i „Włącz zasilacz 24V”. Na podglądzie amplitudy sygnałów powinny być widoczne impulsy tła.
5. W zakładce „Tryb pomiaru” wybierz moduł pomiarowy „Szybki licznik”, odhacz „Pomiar ciągły” i ustaw ilość pomiarów w serii na 5 i czas trwania pomiaru 300 sekund.
6. Wejdź w zakładkę licznik i w zakładce „Tabela” zaznacz „Zbieraj w tabeli”.
7. Podstaw pod sondę puste naczynko pomiarowe i wykonaj pomiary tła aparaturowego naciskając przycisk START w prawym dolnym rogu programu.
8. Po zakończeniu pomiaru tła, skopiuj dane z „Tabeli” do programu Excel i w zakładce „Tryb pomiaru” ustaw ilość pomiarów w serii na 45 i czas trwania pomiaru 30 sekund.
9. Poproś prowadzącego o sporządzenie źródła $^{137\text{m}}\text{Ba}$ poprzez przepłukanie generatora $^{137}\text{Cs}/^{137\text{m}}\text{Ba}$ roztworem 0,9% NaCl w 0,04M HCl.
10. Płytkę z roztworem ustaw niezwłocznie pod detektorem i dokonaj serii pomiarów. Wyniki z zakładki „Tabela” zapisz jako plik ODS zaimportuj do programu Excel.

11. Naczynka pomiarowe wraz z roztworem oddaj prowadzącemu.

Opracowanie wyników do sprawozdania

1. Oblicz średnią wartość zliczeń tła (N_t) i średnią częstość zliczeń tła (I_t) na sekundę i odejmij od częstości zlinearyzowanej z zaimportowanych wyników.
2. Wykonaj wykres zależności $\ln(I_{Ba}-I_t)$ względem czasu t i używając metody regresji liniowej i wyznacz równanie prostej opisującej powstałą zależność.
3. Z równania prostej ($y = a + bx$) wyznacz współczynnik kierunkowy b , który jest równy stałej rozpadu λ i używając wzoru nr 7 oblicz wartość czasu połowicznego zaniku $T_{1/2}$ dla radioizotopu ^{137m}Ba .
4. Oblicz rzeczywistą (stabelaryzowaną) wartość stałej rozpadu radionuklidu ^{137m}Ba wiedząc, że czas połowicznego zaniku $T_{1/2}$ dla tego radionuklidu wynosi 2,552 min.
5. Porównaj otrzymaną wartość stałej rozpadu i czasu połowicznego zaniku z wartościami rzeczywistymi (stabelaryzowanymi) i oblicz błąd względny wyznaczonej wartości $T_{1/2}$.
6. Tabelę z danymi, wykres i obliczenia wyślij do prowadzącego.

Literatura

1. J. Sobkowski, M. Jelińska-Kazimierczuk, Chemia Jądrowa, ADAMANTAN 2006
2. J.B. England, Metody Doświadczalne Fizyki Jądrowej, PWN Warszawa 1980.

Ćwiczenie 3

Określenie samoabsorpcji promieniowania γ w próbce KCl

Cel

Pomiar samoabsorpcji promieniowania γ ^{40}K w próbce KCl zawartej w kalibrowanym cylindrycznym pojemniku Marinelli o pojemności 500 ml.

Wprowadzenie

Promieniowanie γ może ulegać rozproszeniu, absorpcji lub może tworzyć pary pozytron-elektron. Gdy masa próbki jest duża, promieniowanie gamma emitowane z ^{40}K zostaje częściowo pochłonięte przez próbkę i przy pomiarze należy wówczas uwzględnić jego samoabsorpcję. Dotyczy to głównie próbek o stosunkowo dużej objętości od 0,5 do 3 litrów. Poprawka na samoabsorpcję nie jest wymagana w przypadku, gdy kalibracja wydajnościowa detektora była przeprowadzona dla próbek w tej samej konfiguracji geometrycznej, o podobnej gęstości właściwej i o podobnym współczynniku osłabienia promieniowania γ . Współczynnik samoabsorpcji promieniowania gamma f można wyliczyć korzystając ze wzoru:

$$f = \frac{1 - e^{-\mu x}}{\mu x} \quad (1)$$

gdzie:

f – współczynnik samoabsorpcji promieniowania γ

μ – współczynnik osłabienia promieniowania gamma (dla energii promieniowania gamma 1,461 MeV jego wartość wynosi 0,051 cm²/g w soli KCl);

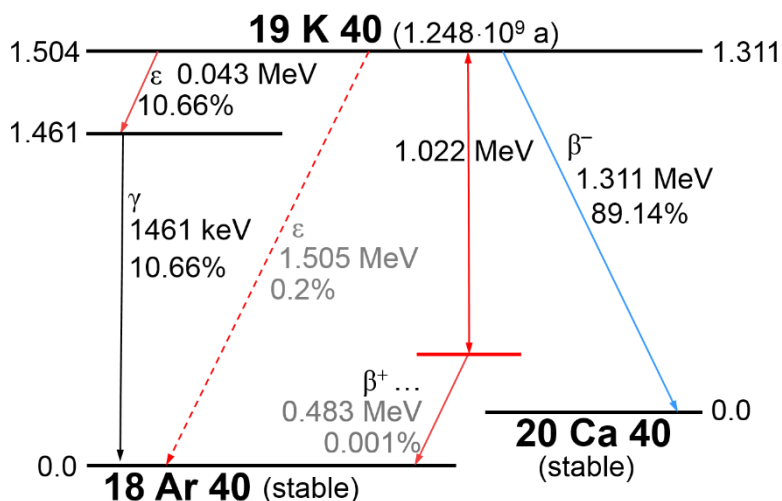
x – masa powierzchniowa badanej próbki (w g/cm²)

Piki energii kwantów gamma (fotopiki) zazwyczaj mierzy się w oparciu o detektory promieniowania gamma połączone ze spektrometrem w celu identyfikacji energii w maksimum piku oraz określenia intensywności energii opisanej jako pole powierzchni pod pikiem.

W tym ćwiczeniu zastosowano chlorek potasu KCl, który zawiera 0,0117% naturalnie występującego radioizotopu ^{40}K , o czasie połowicznego rozpadu wynoszącym 28,1·10⁹ lat. ^{40}K emituje promienie γ o energii 1,461 MeV z intensywnością 10,7%. Pozostałe 89,3% przypada na rozpad β . Schemat rozpadu radioizotopu ^{40}K podano na rysunku 1.

Szybkość zliczeń netto impulsów pomiarowych dla danej masy R_m jest związana ze współczynnikiem samoabsorpcji promieniowania γ dla danej masy f_m , intensywnością promieniowania gamma d oraz jego wydajnością, przy założeniu braku samoabsorpcji promieniowania ϵ_0 . Zależność ta opisana jest równaniem:

$$\frac{R_m}{A} = f_m \epsilon_0 d \quad (2)$$



Rys. 1. Schemat rozpadu ^{40}K

Aparatura i materiały

- Sonda scyntylicyjna NaI(Tl) z analizatorem wielokanałowym OSPREY
- Komputer
- Skalibrowane naczynie Marinelli 500 ml
- Waga laboratoryjna z działką 0,01 g
- Linijka

Odczynniki chemiczne

- Sól KCl 1000 g

Instrukcja

1. Zmierz wysokość otrzymanego pojemnika Marinelli do kreski oznaczającej 500 ml. Zważ pojemnik i napełnij go solą KCl. Zważ masę dodanego KCl. Zamknij pojemnik, oblicz gęstość i pole powierzchni pojemnika, uwzględniając powierzchnię wewnętrznego cylindra na detektor. Następnie oblicz masę powierzchniową w g/cm^2 , dzieląc masę naważki KCl przez obliczone pole powierzchni naczynia Marinelli. Wynik zapisz w tabeli 1.
2. Wykonaj pomiar tła z użyciem sondy NaI(Tl) w czasie 2000 sekund wykorzystując naczynie Marinelli wypełnione wodą dejonizowaną. Zapisz częstość zliczeń tła dla fotopiku gamma ^{40}K o energii 1461 keV w tabeli 2.
3. Wykonaj dwukrotnie pomiar próbki KCl z użyciem sondy NaI(Tl) w czasie 1000 sekund i zapisz częstości zliczeń dla fotopiku gamma ^{40}K o energii 1461 keV w tabeli 2.

Tabela 1. Wymiary naczynia Marinelli i masa próbki KCl

Wysokość naczynia Marinelli [cm]	
Pole powierzchni [cm ²]	
Waga naczynia Marinelli [g]	
Waga naczynia Marinelli + KCl [g]	
Waga KCl [g]	
Masa powierzchniowa [g/cm ²]	

Tabela 2. Częstości zliczeń dla przeprowadzonych pomiarów

Pomiar	Częstość zliczeń (zliczenie/sek)
Częstość zliczeń tła ⁴⁰ K	
Częstość zliczeń netto ⁴⁰ K dla KCl – 1 pomiar	
Częstość zliczeń netto ⁴⁰ K dla KCl – 2 pomiar	
Częstość zliczeń netto ⁴⁰ K dla KCl – wartość średnia	

Opracowanie wyników

1. Oblicz częstość zliczeń netto dla fotopiku gamma ⁴⁰K o energii 1461 keV, odejmując częstość zliczeń dla fotopiku ⁴⁰K z pomiaru tła od częstości zliczeń dla fotopiku ⁴⁰K w badanej próbce KCl.
2. Oblicz częstość rozpadów ⁴⁰K w badanej próbce w oparciu o oznaczoną częstość zliczeń. Intensywność promieniowania gamma ⁴⁰K wynosi 10,7%.
3. Oblicz aktywność ⁴⁰K w badanej próbce KCl wykorzystując czas połowicznego rozpadu $T_{1/2}$, częstość występowania radioizotopu ⁴⁰K w naturalnym potasie oraz zawartość K w KCl, zgodnie z poniższymi wzorami i otrzymany wynik zapisz w tabeli 3.

Liczba atomów ⁴⁰K w próbce KCl:

$$N = \left(\frac{m}{M_{KCl}} \right) \cdot C \cdot N_A \quad (3)$$

gdzie:

N – liczba atomów ⁴⁰K w próbce;

m – masa KCl;

M_{KCl} – masa molowa KCl;

C – częstość występowania ⁴⁰K w przyrodzie (0,0117%);

N_A – stała Avogadra ($6,022 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$)

Aktywność ^{40}K w próbce KCl:

$$A = \frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot N \quad (4)$$

gdzie:

$T_{1/2}$ – czas połowicznego rozpadu ^{40}K ($1,28 \cdot 10^9$ lat)

4. Oblicz współczynnik samoabsorpcji f_{KCl} zgodnie z wzorem 1 oraz wydajność pomiaru promieniowania gamma, przy założeniu braku samoabsorpcji promieniowania e_0 zgodnie z wzorem 2. Otrzymane wyniki zapisz w tabeli 3.

Tabela 3. Wyniki obliczeń

Stężenie ^{40}K w próbce KCl [Bq]	
Współczynnik samoabsorpcji dla KCl f_{KCl}	
Wydajność pomiaru promieniowania gamma przy założeniu braku samoabsorpcji e_0	

5. W sprawozdaniu opisz wszystkie wykonane czynności wraz z obliczeniami i wypełnionymi tabelami.

Literatura

3. J. Sobkowski, M. Jelińska-Kazimierczuk, Chemia Jądrowa, ADAMANTAN 2006
4. J.B. England, Metody Doświadczalne Fizyki Jądrowej, PWN Warszawa 1980.

Ćwiczenie 4

Pomiaru zawartości radioizotopów ^{40}K i ^{137}Cs w żywności za pomocą spektrometrii promieniowania γ

Cel

Pomiar zawartości naturalnego ^{40}K i sztucznego ^{137}Cs radioizotopów w próbkach żywności z wykorzystaniem spektrometrii promieniowania γ .

Wprowadzenie

Radionuklidy pochodzenia naturalnego są obecne wokół nas: zarówno w otoczeniu w której żyjemy, jak również w naszym ciele i produktach, które spożywamy. Narażenie człowieka na promieniowanie jonizujące związane jest przede wszystkim z tzw. promieniowaniem tła naturalnego. Promieniowanie to pochodzi z kosmosu (promieniowanie kosmiczne), a także z naturalnie występujących materiałów promieniotwórczych znajdujących się w glebie, wodzie i powietrzu. Otaczającą nas radioaktywność można wykryć między innymi w żywności i wodzie. Stężenia naturalnie występujących radionuklidów w żywności różnią się w zależności od: lokalnej składu podłoża geologicznego, klimatu oraz sposobu prowadzenia upraw rolniczych. Oprócz naturalnych radionuklidów zawartych w środowisku, ich podwyższone ilości mogą być związane z działalnością człowieka, taką jak: przemysł wykorzystujący materiały o podwyższonej naturalnej radioaktywności (radionuklidy naturalne), czy cywilne lub wojskowe zastosowania jądrowe (radionuklidy sztuczne). Również diagnostyka medyczna stanowi potencjalne źródło promieniowania jonizującego oddziałującego z organizmem ludzkim. Niezależnie od tego, czy radionuklidy są wytwarzane przez człowieka, czy są pochodzenia naturalnego, przechodzą przez łańcuch troficzny podobnie jak inne pierwiastki. Stopień szkodliwości dla zdrowia ludzkiego zależy od typu radionuklidu i czasu narażenia na działanie. Ilość promieniowania jonizującego, na które narażeni są ludzie może różnić się w zależności od miejsca zamieszkania. W przypadku uwolnienia do środowiska radioaktywności w wyniku awarii w elektrowni jądrowej, pobliskie grunty, rzeki, akweny wodne oraz budynki mogą zostać zanieczyszczone przez radionuklidy reaktorowe, a człowiek może być narażony na promieniowanie emitowane przez produkty rozszczepienia i aktywacji neutronowej

Radionuklidy naturalnie występujące w pożywieniu to głównie potas ^{40}K , uran ^{238}U i produkty jego rozpadu np. rad ^{226}Ra , polon ^{210}Po oraz ołów ^{210}Pb . Spośród produktów żywnościowych, duże stężenia potasu ^{40}K występują w mleku, gdzie jego zawartość wynosi około 50 Bq/L, natomiast w mięsie, bananach i innych produktach bogatych w potas, może osiągać nawet kilkaset Bq/kg. Inne naturalne izotopy promieniotwórcze w znacznie niższych stężeniach, to produkty rozpadu promieniotwórczego radioizotopów uranu ^{238}U i toru ^{232}Th .

W przypadku przedostania się do środowiska znacznych ilości radionuklidów, mogą one wraz z suchym opadem atmosferycznym osiąść na powierzchni owoców i warzyw lub paszy dla zwierząt (np. trawy). Inną drogą wnikania radionuklidów do organizmu ludzkiego może być skażona woda deszczowa i śnieg. Radioaktywność zdeponowana w środowisku wodnym (rzeki, jeziora, morza), powoduje akumulacje radionuklidów w rybach i owocach morza. Spośród radionuklidów sztucznych, które mogą deponować się w żywności to głównie: tryt ^3H , węgiel ^{14}C , technet ^{99}Tc , siarka ^{35}S , kobalt ^{60}Co , stront ^{89}Sr i ^{90}Sr , ruten ^{103}Ru i ^{106}Ru , jod ^{131}I i

^{129}I , cez ^{134}Cs i ^{137}Cs , cer ^{103}Ce , iryd ^{192}Ir , uran ^{235}U , pluton ^{238}Pu , ^{239}Pu , ^{240}Pu i ^{241}Pu oraz ameryk ^{241}Am . Rośliny uprawne rosnące na glebie mogą nagromadzać sztuczne radionuklidy zdeponowane w podłożu. Dotyczy to głównie grzybów, jagód, niektórych owoców, jak również mięsa z dziczyzny. Najistotniejszym radioizotopem, który ma bezpośredni wpływ, po awarii w urządzeniach jądrowych, na zdrowie człowieka jest ^{131}I . Stosunkowo szybko jest on przenoszony z zanieczyszczonej paszy krów do mleka. Izotop ^{131}I ma krótki czas połowicznego rozpadu i ulega zanikowi w ciągu kilku tygodni, podczas gdy sztuczny radioizotop cezu ^{137}Cs , posiada znacznie dłuższy czas połowicznego rozpadu wynoszący około 30 lat. Dlatego obecność radiocezu ^{137}Cs w żywności jest problemem długoterminowym, nawet w skali do kilkuset lat. Stront i pluton to pierwiastki, których radionuklidy mogą również mieć długotrwały wpływ na skażenie radiologiczne żywności. ^{90}Sr ma czas połowicznego rozpadu około 29 lat, natomiast radioizotopy plutonu mają znacznie dłuższe czasy połowicznego rozpadu (^{238}Pu : 88 lat, ^{239}Pu : 24100 lat, ^{240}Pu : 6564 lata, ^{241}Pu : 14 lat). Jednakże, zarówno stront, jak i pluton, są stosunkowo mało mobilne w środowisku i problem skażenia żywności nimi jest ograniczony lokalnie.

Aparatura i materiały

- Sonda scyntylicyjna NaI(Tl) z analizatorem wielokanałowym OSPREY
- Komputer
- Źródła promieniowania o znanej aktywności: wzorec ^{137}Cs (woda dejonizowana) i ^{40}K (KCl)
- Próbkę wody dejonizowanej BLANK do pomiaru tła spektrometru
- Próbkę żywności (grzyby z Czarnobyla, mąka sojowa, mąka ziemniaczana, kakao) w naczyniach pomiarowych o geometrii Marinelli

Instrukcja

1. Zmierz tło spektrometru w czasie 1000 s w obszarze fotopiku promieniowania gamma ^{40}K (1460 keV) oraz ^{137}Cs (662 keV), wykorzystując dostarczone naczynie z wodą dejonizowaną (próba ślepa) oraz wyznacz liczby zliczeń po oboma fotopikami (N_{tCs} i N_{tK}). Wartości zapisz w tabeli 1. Obszary obu fotopików są na widmie zaznaczone kolorem czerwonym.
2. Wykonaj pomiar ilości zliczeń w czasie 1000 sekund dla wzorca ^{137}Cs o znanej aktywności A_{Cs} . Zaznacz rejon fotopiku ^{137}Cs i wyznacz liczbę zliczeń pod fotopikiem N_{Cs} . Wartość zapisz w tabeli 2.
3. Wykonaj pomiar ilości zliczeń w czasie 1000 sekund dla wzorca ^{40}K (KCl) w ciągu 1000 s. Zaznacz rejon fotopiku ^{40}K i wyznacz liczbę zliczeń pod fotopikiem N_{K} . Wartość zapisz w tabeli 2.
4. Zmierz aktywność analizowanych próbek żywności w czasie 1000 s. Wyznacz liczbę zliczeń ^{40}K i ^{137}Cs pod fotopikami (N_{gK} i N_{gCs}). Wartości zapisz w tabeli 3.

Opracowanie wyników

1. Oblicz ilość zliczeń tła na sekundę (I_{tK} i I_{tCs}). Wartości zapisz w tabeli 1
2. Oblicz ilości zliczeń na sekundę netto (I_{nCs} i I_{nK}) poprzez odjęcie ilości zliczeń na sekundę tła i wyniki zapisz w tabeli 2.
3. Oblicz wydajności detekcji (ϵ_{Cs} i ϵ_K) radionuklidów ^{137}Cs i ^{40}K na podstawie pomiarów aktywności wzorców ^{137}Cs i ^{40}K oraz w odniesieniu do ich znanej aktywności i zapisz w tabeli 2:

$$\epsilon_{Cs} = \frac{I_{Cs} - I_{tCs}}{A_{Cs}} \qquad \epsilon_K = \frac{I_K - I_{tK}}{A_K}$$

1. Oblicz ilości zliczeń na sekundę netto (I_{nCs} i I_{nK}) oraz bezwzględne aktywności (A_{gCs} i A_{gK}) w Bq/kg, na podstawie obliczonych wydajności detekcji i zmierzonych częstości zliczeń na sekundę ^{137}Cs i ^{40}K (I_{gCs} i I_{gK}) w próbkach żywności i wyniki zapisz w tabeli 3:

$$A_{gCs} = \frac{I_{gCs} - I_{tCs}}{m \cdot \epsilon_{Cs}} \qquad A_{gK} = \frac{I_{gK} - I_{tK}}{m \cdot \epsilon_K}$$

gdzie:

m – masa próbki żywności w kg

2. Oceń czy analizowane próbki żywności nadają się do spożycia, wiedząc, że krajowy limit skażenia produktów spożywczych przez ^{137}Cs wynosi 2000 Bq/kg.
3. W sprawozdaniu opisz wszystkie wykonane czynności wraz z obliczeniami i wypełnionymi tabelami.

Tab. 1. Wartości liczby zliczeń oraz zliczeń na sekundę dla pomiaru tła ^{137}Cs i ^{40}K

	N_{tCs}	N_{tK}	I_{tCs}	I_{tK}
Próba ślepa				

Tab. 2. Wartości liczby zliczeń, częstości zliczeń na sekundę oraz wydajności detekcji pomiaru ^{137}Cs i ^{40}K z wykorzystaniem detektora scyntylacyjnego

	N_{Cs}	N_K	I_{Cs}	I_K	I_{nCs}	I_{nK}	ϵ_K	ϵ_{Cs}
Wzorec ^{40}K								
Wzorec ^{137}Cs								

Tab. 3. Wartości częstości zliczeń na sekundę oraz aktywności w Bq/kg w badanych próbkach żywności

	N_{gCs}	N_{gK}	I_{gCs}	I_{gK}	I_{ngCs}	I_{ngK}	A_{gCs}	A_{gK}
Grzyby z Czarnobyła								
Mąka sojowa								
Mąka ziemniaczana								
Kakao								

Ćwiczenie 5

Pomiar zawartości wybranych radioizotopów w materiałach budowlanych za pomocą spektrometrii promieniowania γ

Cel

Pomiar aktywności naturalnych radioizotopów ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th (wariant A) lub radionuklidów ^{40}K i ^{137}Cs (wariant B) w próbkach materiałów budowlanych.

Wprowadzenie

Człowiek jest stale narażony na promieniowanie jonizujące pochodzące z rozpadu radionuklidów naturalnych zawartych w przyrodzie (NORM). W sposób ciągły przenikają one do powietrza, wody, żywności, materiałów budowlanych i organizmu człowieka z otaczającego środowiska. Średnia roczna ogólnowa dawka skuteczna dla promieniowania γ z materiałów budowlanych została szacowana na około 0,4 mSv. Osoby, które spędzają w pomieszczeniach zamkniętych blisko 20 godzin dziennie są narażone na promieniowanie wewnętrzne i zewnętrzne emitowane z materiałów budowlanych. Większość tych materiałów zawiera małe aktywności naturalnych pierwiastków promieniotwórczych, głównie radionuklidów z szeregów promieniotwórczych ^{238}U i ^{232}Th oraz radioaktywny izotop potasu ^{40}K . Zewnętrzne narażenie na promieniowanie jonizujące jest spowodowane radionuklidami pochodzącymi głównie z rozpadu radu ^{226}Ra , emitującymi promieniowanie γ . Narażenie na promieniowanie wewnętrzne (inhalacja) jest związane z obecnością gazowego radonu (^{222}Rn i nieznaczne ilości ^{220}Rn) i jego krótkożytych produktów rozpadu, emitowanych z materiałów budowlanych do wnętrza budynków. Zawartość radioizotopów w naturalnych materiałach budowlanych jest związana z ich obecnością w materiale geologicznym z którego pochodzą. Średnie aktywności radionuklidów ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K w skorupie Ziemi wynoszą odpowiednio 35, 30 i 400 Bq/kg. Występują na Ziemi rejony o podwyższonych zawartościach naturalnych radionuklidów i tych miejscach roczne dawki skuteczne dla okolicznych mieszkańców mogą być znacznie wyższe i przekraczać nawet 50 mSv (np. niektóre rejony Brazylii, Francji, Indii, Nigerii i Iranu). W budownictwie stosuje się również technologicznie przetworzone naturalnie występujące materiały radioaktywne (TENORM), takie jak popiół węglowy, czyli odpad ze spalania węgla, stosowany jako dodatek do cementu i betonu. W niektórych krajach cegły są wykonywane z popiołu lotnego, a żużel węglowy jest stosowany w konstrukcjach podłogowych jako materiał wypełniająco-izolacyjny. Jako materiał budowlany stosuje się także fosfogips (produkt uboczny w produkcji nawozów fosforowych), z kolei czerwone błoto (odpad z pierwotnej produkcji aluminium) jest stosowane do produkcji cegieł, ceramiki i kafelków. Dawki promieniowania i stężenie radonu wewnątrz budynków są oceniane bezpośrednio poprzez pomiar aktywności ^{222}Rn lub z wykorzystaniem obliczeń matematycznych. Aktualnie w przemyśle materiałów budowlanych istnieje tendencja do wykorzystania odpadów przemysłowych jako zamienników produktów naturalnych. Wpływa to na stosunkowo wysokie aktywności naturalnych radionuklidów w materiałach budowlanych oraz zwiększone narażenie ludności spowodowane ich obecnością, a to wymusza ciągłe opracowywanie nowych norm i wytycznych.

W celu porównania materiałów budowlanych zawierających różne aktywności ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th , wprowadzono tzw. równoważnik radu Ra_{eq} , który oblicza się w oparciu o przelicznik, że zawartości 370 Bq/kg ^{226}Ra , 259 Bq/kg ^{232}Th i 4810 Bq/kg ^{40}K są źródłem takiej samej dawki promieniowania γ . Wielkości równoważnika radu Ra_{eq} materiałów budowlanych jest opisana zależnością:

$$Ra_{eq} = C_{Ra} + 1,43C_{Th} + 0,077C_K$$

Od 1 stycznia 2003 r. warunki dopuszczenia surowców i minerałów dla różnych typów budownictwa w Polsce określa Rozporządzenie Rady Ministrów „w sprawie wymagań dotyczących zawartości naturalnych izotopów promieniotwórczych w surowcach i materiałach stosowanych w budynkach”, które wprowadza dwa wskaźniki aktywności:

1. Wskaźnik f_1 , który określa zawartość naturalnych izotopów w materiale:

$$f_1 = \frac{A_K}{3000} + \frac{A_{Ra}}{300} + \frac{A_{Th}}{200}$$

gdzie: A_K , A_{Ra} i A_{Th} oznaczają aktywności: ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th (Bq/kg).

2. Wskaźnik f_2 , który określa zawartość ^{226}Ra w materiale (Bq/kg).

Wskaźnik f_2 jest miarą narażenia mieszkańców na inhalację ^{222}Rn wydostającego się ze ścian (ekshalacja) do wnętrza pomieszczenia wskutek rozpadu obecnego w materiale budowlanym radu ^{226}Ra . Zgodnie z tym rozporządzeniem wskaźniki aktywności f_1 i f_2 nie mogą przekraczać nie więcej niż 20% wartości $f_1=1$ i $f_2=200$ Bq/kg w odniesieniu do surowców i materiałów budowlanych stosowanych w budynkach przeznaczonych dla ludzi.

Aktywności ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K w materiałach budowlanych różnią się w zależności od rodzaju i pochodzenia materiału budowlanego. Średnie aktywności ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K w najbardziej powszechnych materiałach budowlanych w Europie, np. ceglach betonowych i piaskowo-wapiennych wynoszą odpowiednio 40, 30 i 400 dla cegieł betonowych oraz 10, 10, 330 Bq/kg dla cegieł piaskowo-wapiennych. Tabela 1 przedstawia typowe aktywności ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K w materiałach budowlanych.

Tabela 1. Typowe aktywności ^{226}Ra , ^{232}Th i ^{40}K w materiałach budowlanych

Materiał budowlany	^{226}Ra (Bq/kg)	^{232}Th (Bq/kg)	^{40}K (Bq/kg)
Beton	18 – 67	3 – 43	16 – 1100
Beton lekki	10 – 60	6 – 66	51 – 870
Cegły	7 – 140	8 – 127	227 – 1140
Gips	1 – 67	0,5 – 190	22 – 804
Cement	13 – 107	7 – 62	48 – 564
Ceramika	25 – 193	29 – 66	320 – 1049
Granit	bd – 160	bd – 364	24 – 2355
Kafelki	33 – 61	45 – 66	476 – 788
Marmur	1 – 63	0,4 – 142	9 – 986

Wariant A – pomiar ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th

Aparatura i materiały

- Sonda scyntylicyjna NaI(Tl) z analizatorem wielokanałowym OSPREY
- Komputer
- Naczynia pomiarowe
- Próbkki materiałów budowlanych

Instrukcja

1. Odważ w pojemniku Marinelli wskazany materiał budowlany do linii oznaczającej objętość 500 ml i zamknij szczelnie pojemnik. Masę zapisz.
2. Rozpocznij pomiar aktywności tego materiału za pomocą sondy scyntylicyjnej NaI(Tl) w czasie 6000 s (100 min).
3. Otwórz z pamięci komputera, uprzednio zarejestrowane w czasie 5000 s, widma wzorców: ^{40}K (1460 keV), ^{226}Ra (186 keV) i ^{232}Th (64 keV) o aktywności A_K , A_{Ra} i A_{Th} . Zapisz odczytane z widma liczby zliczeń N_s pod zaznaczonymi fotopikami tych wzorców: N_{sK} , N_{sRa} i N_{sTh} .
4. Otwórz z pamięci komputera, uprzednio zarejestrowane w czasie 50000 s, widmo tła. Odczytaj liczby zliczeń N_t dla ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th pod fotopikami: N_{tK} , N_{tRa} i N_{tTh} .
5. Po zakończeniu pomiaru aktywności badanego materiału budowlanego zarejestruj widmo i zaznacz na nim wybrane kanały pomiarowe dla: ^{40}K (1460 keV), ^{226}Ra (186 keV) i ^{232}Th (64 keV).

Opracowanie wyników

1. Oblicz ilości zliczeń na sekundę I_{sK} , I_{sRa} i I_{sTh} wzorców ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th i wpisz do tabeli 1.
2. Oblicz ilości zliczeń na sekundę tła I_{tK} , I_{tRa} i I_{tTh} i wpisz do tabeli 2.
3. Oblicz ilości zliczeń netto I_{ns} standardów radionuklidów ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th (I_{nsK} , I_{nsRa} i I_{nsTh}) poprzez odjęcie ilości zliczeń tła i wpisz do tabeli 2.
4. Na podstawie pomiarów aktywności i aktywności wzorców oblicz wydajności oznaczania radionuklidów ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th i wpisz do tabeli 2.

$$\epsilon_{Ra} = \frac{I_{sRa} - I_{tRa}}{A_{Ra}} \quad \epsilon_K = \frac{I_{sK} - I_{tK}}{A_K} \quad \epsilon_{Th} = \frac{I_{sTh} - I_{tTh}}{A_{Th}}$$

5. Oblicz ilości zliczeń netto I_{np} standardów radionuklidów ^{40}K , ^{226}Ra i ^{232}Th (I_{npK} , I_{npRa} i I_{npTh}) poprzez odjęcie ilości zliczeń tła i wpisz do tabeli 3.

6. Oblicz aktywności: A_{pK} , A_{pRa} oraz A_{pTh} w Bq/kg i wpisz do tabeli 3.

$$A_{pRa} = \frac{I_{pRa} - I_{tRa}}{m_p \cdot \epsilon_{Ra}} \quad A_{pK} = \frac{I_{pK} - I_{tK}}{m_p \cdot \epsilon_K} \quad A_{pTh} = \frac{I_{pTh} - I_{tTh}}{m_p \cdot \epsilon_{Th}}$$

7. Oblicz wartości współczynników f_1 i f_2 korzystając z zależności:

$$f_1 = \frac{A_{pK}}{3000} + \frac{A_{pRa}}{300} + \frac{A_{pTh}}{200}$$

oraz

$$f_2 = A_{pRa}$$

8. Oceń przydatność badanego materiału w budownictwie korzystając z informacji zawartych w wstępie teoretycznym.
9. W sprawozdaniu opisz wszystkie wykonane czynności wraz z obliczeniami i wypełnionymi tabelami.

Tab. 1. Wartości liczby zliczeń oraz zliczeń na sekundę dla pomiaru tła ^{137}Cs i ^{40}K

	N_{tTh}	N_{tRa}	N_{tK}	I_{tTh}	I_{tRa}	I_{tK}
Próba ślepa						

Tab. 2. Wartości liczby zliczeń, częstości zliczeń na sekundę oraz wydajności detekcji pomiaru ^{137}Cs i ^{40}K z wykorzystaniem detektora scyntylacyjnego

	N_{Th}	N_{Ra}	N_K	I_{Th}	I_{Ra}	I_K	I_{nTh}	I_{nRa}	I_{nK}	ϵ_{Th}	ϵ_{Ra}	ϵ_K
Wzorzec ^{40}K												
Wzorzec ^{226}Ra												
Wzorzec ^{232}Th												

Tab. 3. Wartości częstości zliczeń na sekundę oraz aktywności w Bq/kg w badanej próbce materiału budowlanego

	N_{gTh}	N_{gRa}	N_{gK}	I_{gTh}	I_{gRa}	I_{gK}	I_{ngCs}	I_{ngK}	A_{gTh}	A_{gRa}	A_{gK}
Materiał budowlany											

Wariant B – pomiar ^{137}Cs i ^{40}K

Aparatura i materiały

- Sonda scyntylacyjna NaI(Tl) z analizatorem wielokanałowym OSPREY
- Komputer
- Naczynia pomiarowe
- Źródła promieniowania: 2 standardy: ^{137}Cs i ^{40}K (KCl)
- Próbkki materiałów budowlanych

Instrukcja

5. Zmierz tło spektrometru w czasie 1000 s w obszarze fotopiku promieniowania gamma ^{40}K (1460 keV) oraz ^{137}Cs (662 keV), wykorzystując dostarczone naczynie z wodą dejonizowaną (próba ślepa) oraz wyznacz liczby zliczeń po oboma fotopikami (N_{tCs} i N_{tK}). Wartości zapisz w tabeli 1. Obszary obu fotopików są na widmie zaznaczone kolorem czerwonym.
6. Wykonaj pomiar ilości zliczeń w czasie 1000 sekund dla wzorca ^{137}Cs o znanej aktywności A_{Cs} . Zaznacz rejon fotopiku ^{137}Cs i wyznacz liczbę zliczeń pod fotopikiem N_{Cs} . Wartość zapisz w tabeli 2.
7. Wykonaj pomiar ilości zliczeń w czasie 1000 sekund dla wzorca ^{40}K (KCl) w ciągu 1000 s. Zaznacz rejon fotopiku ^{40}K i wyznacz liczbę zliczeń pod fotopikiem N_K . Wartość zapisz w tabeli 2.
8. Zmierz aktywność analizowanych próbek materiałów budowlanych w czasie 1000 s. Wyznacz liczbę zliczeń ^{40}K i ^{137}Cs pod fotopikami (N_{gK} i N_{gCs}). Wartości zapisz w tabeli 3.

Opracowanie wyników

4. Oblicz ilość zliczeń tła na sekundę (I_{tK} i I_{tCs}). Wartości zapisz w tabeli 1
5. Oblicz ilości zliczeń na sekundę netto (I_{nCs} i I_{nK}) poprzez odjęcie ilości zliczeń tła i wyniki zapisz w tabeli 2.
6. Oblicz wydajności detekcji (ϵ_{Cs} i ϵ_K) radionuklidów ^{137}Cs i ^{40}K na podstawie pomiarów aktywności wzorców ^{137}Cs i ^{40}K oraz w odniesieniu do ich znanej aktywności i zapisz w tabeli 2:

$$\epsilon_{Cs} = \frac{I_{Cs} - I_{tCs}}{A_{Cs}} \qquad \epsilon_K = \frac{I_K - I_{tK}}{A_K}$$

7. Oblicz ilości zliczeń na sekundę netto (I_{ngCs} i I_{ngK}) oraz bezwzględne aktywności (A_{gCs} i A_{gK}) w Bq/kg, na podstawie obliczonych wydajności detekcji i zmierzonych częstości zliczeń na sekundę ^{137}Cs i ^{40}K (I_{gCs} i I_{gK}) w próbkach żywności i wyniki zapisz w tabeli 3:

$$A_{gCs} = \frac{I_{gCs} - I_{tCs}}{m \cdot \epsilon_{Cs}} \quad A_{gK} = \frac{I_{gK} - I_{tK}}{m \cdot \epsilon_K}$$

gdzie:

m – masa próbki materiału budowlanego w kg

8. W sprawozdaniu opisz wszystkie wykonane czynności wraz z obliczeniami i wypełnionymi tabelami.

Tab. 1. Wartości liczby zliczeń oraz zliczeń na sekundę dla pomiaru tła ^{137}Cs i ^{40}K

	N_{tCs}	N_{tK}	I_{tCs}	I_{tK}
Próba ślepa				

Tab. 2. Wartości liczby zliczeń, częstości zliczeń na sekundę oraz wydajności detekcji pomiaru ^{137}Cs i ^{40}K z wykorzystaniem detektora scyntylacyjnego

	N_{Cs}	N_K	I_{Cs}	I_K	I_{nCs}	I_{nK}	ϵ_K	ϵ_{Cs}
Wzorzec ^{40}K								
Wzorzec ^{137}Cs								

Tab. 3. Wartości częstości zliczeń na sekundę oraz aktywności w Bq/kg w badanych próbkach materiałów budowlanych

	N_{gCs}	N_{gK}	I_{gCs}	I_{gK}	I_{ngCs}	I_{ngK}	A_{gCs}	A_{gK}
Materiał 1								
Materiał 2								
Materiał 3								
Materiał 4								

Ćwiczenie 6

Współstrącanie radionuklidów na matrycy nieorganicznej jako metoda zateżniania próbek i separacji radionuklidów

Cel

Poznanie procedury współstrącania radionuklidów na matrycy nieorganicznej (MnO_2 , $\text{Fe}(\text{OH})_3$, BaSO_4 oraz CaC_2O_4) jako metody zateżniania próbek i separacji radionuklidów.

Wprowadzenie

Współstrącanie jest procesem chemicznym wydzielania analitu na matrycy nieorganicznej (np. strąconym osadzie) badanych substancji czy pierwiastków chemicznych. Współstrącanie może zachodzić w wyniku adsorpcji, okluzji, tworzenia kryształów mieszanych lub złożonych połączeń z innymi jonami obecnymi w roztworze oraz wytrącania następczego.

Powstały osad składa się między innymi z kryształów mieszanych, w których atomy radionuklidów są rozmieszczone równomiernie w siatce krystalicznej, zastępując izomorficznie atomy nośnika, nie powodując jednak defektów w sieci krystalicznej. Aby to nastąpiło, nośnik i radionuklid muszą być podobne chemicznie. Na przykład, ^{226}Ra może być współstrącany z trudno rozpuszczalnym BaSO_4 , ponieważ zarówno Ra, jak i Ba są metalami alkalicznymi o ładunku +2 i ich promienie jonowe nie są znacząco różne. Jeśli składnik śladowy (radionuklid) tworzy mniej rozpuszczalny związek niż nośnik z przeciwnie naładowanym jonem wytrącającym (w tym przypadku siarczanem), wówczas wzbogaci on wytrącony związek i wówczas stosunek ilości radionuklidu do nośnika będzie wyższy w wytrąconym osadzie niż w roztworze. Wymiana izomorficzna niekoniecznie oznacza, że stężenie radionuklidu będzie równomierne w obrębie całego kryształu osadu. Warunki wytrącania (wysoka temperatura, powolna szybkość opadania, stężenia, czas starzenia osadu) wpływają pozytywnie na jednorodność. Silne wzbogacenie kryształu radionuklidem sprzyja niejednorodności i jego stężenie jest większe w rdzeniu struktury. Proces wytrącania osadów prowadzi do anomalnych mieszanych kryształów, w których radionuklid może być równomiernie rozmieszczony poprzez tworzenie w związku z utworzonym z nośnikiem, ale wówczas wymiana nie jest izomorficzna. Ładunki atomów nośnika i współstrącanego radionuklidu są niekoniecznie identyczne w mieszanych kryształach anomalnych. Na przykład fluorek lantanowca (CeF_3 , NdF_3 itd.) współstrąca zarówno trój-, jak i czterowartościowe aktynowce (np. Pu^{3+} i Pu^{4+}). Choć współstrącanie jest procesem bardzo wydajnym, Pu^{4+} nie zastępuje atomów Ce czy Nd w kryształach w sposób izomorficzny.

Podczas strącania nośnika, radionuklid może adsorbować się na powierzchni strącanego osadu w procesie wymiany jonów (adsorpcja jonowymienna). Wodorotlenki metali wielowalencyjnych np. $\text{Fe}(\text{OH})_3$ lub uwodnione tlenki np. $\text{MnO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ bardzo efektywnie współstrącają metale, szczególnie te obdarzone wysokim ładunkiem. Wodorotlenki i tlenki mają na swojej powierzchni grupy $-\text{OH}$, które dysocjując w środowisku obojętnym i zasadowym, pozostawiają naładowany ujemnie jon $-\text{O}^-$ mogący wiązać kationy z roztworu. Ponieważ jest to reakcja powierzchniowa, wielkość pola powierzchni zwiększa wydajność procesu adsorpcji. Najczęściej adsorbujący osad tworzy się przez dodanie odpowiednich

odczynniki do roztworu zawierającego radionuklidy. Wiele metali przejściowych adsorbuje się na osadzie $\text{Fe}(\text{OH})_3$, który powstaje poprzez dodanie Fe^{3+} do kwaśnego roztworu ($\text{pH}=1-2$), a następnie strącenie $\text{Fe}(\text{OH})_3$ przez dodanie do roztworu NaOH lub NH_4OH . Innym, mniej powszechnym sposobem, może być dodanie do roztworu zawierającego radionuklidy, wcześniej przygotowanego osadu, na którym może dokonać się ich adsorpcja.

Selektywne współstrącanie radionuklidu z nierozpuszczalnym związkiem chemicznym jest możliwe przez wybór takiej molekuly, która tworzy odpowiedni osad. Właściwe i umiejętne wykorzystanie techniki strącania może minimalizować adsorpcję na osadzie zbędnych zanieczyszczeń. W związku z tym wybrany do współstrącania związek chemiczny powinien maksymalnie współstrącać analizowany radionuklid na stabilnym osadzie, a ten jednocześnie będzie w minimalnym stopniu przyciągał inne jony mogące stanowić zanieczyszczenie.

Zatężanie polega na oddzieleniu docelowego radionuklidu od matrycy przy użyciu osadu rozpuszczającego się w niewielkiej objętości roztworu. Przykładowo, do zatężania aktynowców i innych hydrolizujących metali stosuje się współstrącanie wspomnianymi wcześniej $\text{Fe}(\text{OH})_3$ lub MnO_2 w bardzo dużych objętościach próbki, nawet 100–200 litrów, a otrzymany osad rozpuszcza się w znacznie mniejszej ilości kwasu.

Większość metod separacji radionuklidów poprzez współstrącanie jest opartych na strącaniu wodorotlenków, węglanów, fosforanów i szczawianów. Strącenie $\text{Fe}(\text{OH})_3$ przy $\text{pH} = 8-9$, powoduje pozostanie w roztworze wszystkich metale ziem alkalicznych, gdyż metale alkaliczne takie jak bar oraz stront nie tworzą nierozpuszczalnych wodorotlenków, a z kolei inne metale ziem alkalicznych nie strącają się w postaci wodorotlenków przy tak niskim pH . Co więcej, radionuklidy w formie anionowej mogą również pozostawać w roztworze. Lantanowce, aktynowce i inne metale występujące w formie kationów są strącane jako wodorotlenki. Z punktu widzenia analizy radiochemicznej bardzo ważne jest usunięcie z próbki żelaza, które utrudnia analizę np. aktynowców. Można tego dokonać np. przez współstrącanie na szczawianie wapnia CaC_2O_4 przy $\text{pH} = 2$. W tym przypadku, jony Fe^{3+} nie strąca się z jonami szczawianowymi i żelazo pozostaje w roztworze. Współstrącanie na węglanach i siarczanach jest stosowane podczas rozdzielania metali alkalicznych i ziem alkalicznych. Metale ziem alkalicznych tworzą słabo rozpuszczalne węglany w przeciwieństwie do metali alkalicznych. Jeśli analizowany radionuklid jest metalem ziem alkalicznych, współstrącanie z użyciem węglanów i wodorotlenków może następować po sobie. Wytrącanie wodorotlenku prowadzi się najpierw w celu usunięcia metali, które tworzą wodorotlenki, podczas gdy metale alkaliczne i ziem alkalicznych oraz anionowe radionuklidy pozostają w roztworze. Metale alkaliczne i anionowe składniki usuwa się następnie przez wytrącanie węglanów lub fosforanów.

Najważniejsze procedury współstrącania radionuklidów stosowane w metodach radioanalitycznych są następujące:

- wytrącanie węglanów oraz fosforanów w celu zatężania oznaczanych radionuklidów oraz usunięcia metali alkalicznych i radionuklidów w formie anionowej, które pozostają w roztworze;
- wytrącanie wodorotlenku żelaza $\text{Fe}(\text{OH})_3$ w celu wstępnego zatężania oznaczanych radionuklidów oraz do usuwania metali alkalicznych, metali ziem alkalicznych i

anionowych radionuklidów z próbek, wówczas zanieczyszczenia pozostają w roztworze;

- wytrącanie ditlenku manganu MnO_2 w celu wstępnego zatężania oznaczanych radionuklidów oraz do usuwania metali alkalicznych, niektórych metali przejściowych i anionowych radionuklidów z próbek; wówczas zanieczyszczenia pozostają w roztworze;
- wytrącanie szczawianów w celu wstępnego zatężania oznaczanych radionuklidów oraz do usuwania metali alkalicznych, metali ziem alkalicznych, żelaza i anionowych radionuklidów z próbek; wówczas zanieczyszczenia pozostają w roztworze;
- wytrącanie fluorków lantanowców do wytrącania trój- i czterowartościowych aktynowców;
- specyficzne wytrącanie dimetylogliksymu DMG do oddzielania niklu (np. ^{63}Ni);
- wytrącanie siarczanem do separacji rad ^{226}Ra i ołowiu ^{210}Po ;
- wytrącanie halogenku srebra do separacji chlorku i jodku;
- używanie fosfomolibdenianu amonu i heksacyjanożelazianów metali przejściowych do wstępnego zatężania cezu z wód naturalnych.

Aparatura i materiały

- 2 zlewki o pojemności 1 litra
- 1 zlewka o pojemności 400 ml
- 1 zlewka o pojemności 150 ml
- Bagietki szklane
- Papierki wskaźnikowe pH

Odczynniki chemiczne

- Roztwór chlorku żelaza (50 mg Fe^{3+} /ml)
- Stężona woda amoniakalna
- Stężony 65% HNO_3
- Stężony 98% H_2SO_4
- Roztwór 0,2 M KMnO_4
- Roztwór 0,3 M MnCl_2
- Roztwór 1% H_2O_2 w 1,2M HCl
- Roztwór 0,24 M $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$
- Roztwór 0,1 M K_2SO_4 /0,2 M H_2SO_4

- Roztwór 0,1 M EDTA o pH=10
- Sól $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- Sól K_2SO_4
- Kwas szczawiowy $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Instrukcja

Strącanie MnO_2

1. Zlewkę o pojemności 1 litra napełnić wodą kranową i zakwasić stężonym HNO_3 do pH=1
2. Dodać 5 ml roztworu 0,2 M KMnO_4
3. Dodać wody amoniakalnej do uzyskania pH=9
4. Dodać 10 ml roztworu 0,3 M MnCl_2
5. Strącony osad MnO_2 mieszać okresowo przez 30 minut po czym pozostawić do opadnięcia
6. Roztwór znad osadu zdekantować
7. Dodać 10 ml 1% H_2O_2 w 1,2M HCl w celu rozpuszczenia osadu MnO_2

Strącanie $\text{Fe}(\text{OH})_3$

1. Zlewki o pojemności 1 litra napełnić wodą kranową i zakwasić stężonym HNO_3 do pH=1
2. Dodać 3 ml roztworu Fe^{3+} (150 mg Fe^{3+})
3. Dodać wody amoniakalnej do pH=8
4. Strącony osad $\text{Fe}(\text{OH})_3$ mieszać okresowo przez 30 minut po czym pozostawić do opadnięcia
5. Roztwór znad osadu zdekantować
6. Osad $\text{Fe}(\text{OH})_3$ rozpuścić przy pH=1 używając stężonego HNO_3

Strącanie PbSO_4

1. Zlewkę o objętości 150 ml napełnić 100 ml wody kranowej i zakwasić stężonym HNO_3 do pH=1
2. Dodać 1 ml 98% H_2SO_4 , a następnie 2 g K_2SO_4 (w celu współstrącenia Th)
3. Miesząc próbkę dodać kroplami 1 ml roztwór 0,24 M PbNO_3
4. Ogrzewać próbkę pod przykryciem, okresowo mieszać, nie gotować
5. Pozostawić roztwór do ostygnięcia
6. Po opadnięciu osadu PbSO_4 , roztwór zdekantować
7. Osad przemyć 0,1 M roztworu K_2SO_4 /0,2 M H_2SO_4 i pozostawić do opadnięcia

8. Po opadnięciu osadu, roztwór zdekantować
9. Osad PbSO_4 rozpuścić przy użyciu 5 ml roztworu 0,1 M EDTA o $\text{pH}=10$

Strącanie CaC_2O_4

1. Zlewkę o objętości 400 ml napełnić 300 ml wody kranowej i zakwasić stężonym HNO_3 do $\text{pH}=1$
2. Ogrzewać próbkę, dodać 28 g $\text{H}_2\text{C}_2\text{O}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ i rozpuścić na ciepło
3. Dodać 1,36 g $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ a następnie wody amoniakalnej do $\text{pH}=4$
4. Ogrzewać próbkę pod przykryciem, okresowo mieszając, nie gotować
5. Pozostawić roztwór do ostygnięcia, a, następnie zdekantować roztwór
6. Osad CaC_2O_4 rozpuścić przy użyciu 65% HNO_3

W sprawozdaniu zwięźle opisać wykonane czynności, obserwacje i wskazać jakie radionuklidy mogą być rozdzielane od jakich pierwiastków w wykonanych współstrącaniach.

Ćwiczenie 7

Analizy radioizotopów uranu ^{234}U , ^{235}U i ^{238}U w próbkach środowiskowych z wykorzystaniem chromatografii jonowymiennej

Cel

Wykorzystanie chromatografii jonowymiennej do rozdzielenia radioizotopów uranu ^{234}U , ^{235}U i ^{238}U od pierwiastków utrudniających pomiar cząstek alfa w spektrometrze alfa.

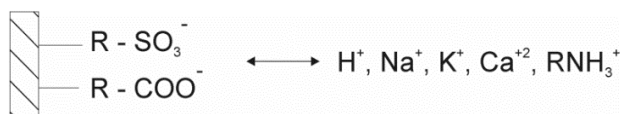
Wprowadzenie

Chromatografia jonowa jest odmianą chromatografii cieczowej stosowanej do separacji i analizy anionów i kationów oraz innych związków chemicznych w formie zdysocjowanej. Chromatografię jonową stosuje się między innymi do oznaczania anionów i kationów w wodach i ściekach. Do zalet chromatografii jonowej należy:

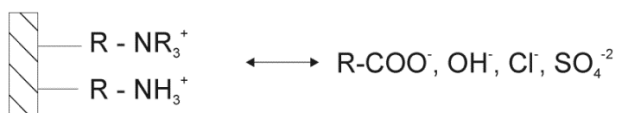
- możliwość jednoczesnego oznaczania kilkunastu jonów,
- możliwość oznaczania jednocześnie kationów i anionów,
- możliwość oznaczania jonów pierwiastka na różnych stopniach utlenienia (analiza specjacyjna),
- wykrywalność jonów na niskim poziomie stężenia, $\mu\text{mol/l}$ lub mniejszym,
- wysoka selektywność oznaczania jonów w próbkach o złożonym składzie,
- niewielka ilość próbki potrzebna do analizy,
- prosty sposób przygotowania próbek do analizy,
- krótki czas analizy.

Wyróżniamy 3 typy wymieniaczy jonowych:

1. Kationity – obdarzone ładunkiem ujemnym (ujemnie naładowane grupy funkcyjne) zdolne do adsorbowania kationów z roztworu



2. Anionity - obdarzone ładunkiem dodatnim (dodatnio naładowane grupy funkcyjne), zdolne do adsorbowania anionów z roztworu



3. Wymieniacze jonów z dodatkowymi oddziaływaniami sorpcyjnymi, np. posiadające jednocześnie grupy typu C_{18} oraz $-\text{SO}_3\text{H}$, albo/i $\text{NR}_4 + \text{OH}$.

Ogólne zasady wymywanie jonów (elucji) w chromatografii jonowej są następujące:

- ze wzrostem wartościowości analizowanego jonu zwiększa się jego powinowactwo do grupy funkcyjnej jonitu,
- jeżeli analizowane jony mają tę samą wartościowość, to im większy jest ich promień jonowy i stopień polaryzacji, tym silniej jon jest zatrzymywany na jonicie,
- jony charakteryzujące się silnymi oddziaływaniami hydrofobowymi lub van der Waalsa z fazą stacjonarną, będą wymywane później niż jony o słabszych oddziaływaniach.

Dla zobrazowania procesu podziału przyjmuje się, że kolumna chromatograficzna składa się z wielkiej ilości połączonych ze sobą sekcji, czyli tzw. półek teoretycznych. Pod pojęciem półki teoretycznej rozumiemy taką objętość kolumny, w której zostaje osiągnięty stan dynamicznej równowagi pomiędzy stężeniem związku w fazie stacjonarnej a jego stężeniem w fazie ruchomej.

Sprawność kolumny chromatograficznej opisana jest przez wysokość równoważną półki teoretycznej (ang. HETP). Liczba półek teoretycznych zależy od długości kolumny L oraz od HETP. Im więcej półek teoretycznych, tym kolumna jest sprawniejsza, a tym samym uzyskane z wymycia piki alalitu są wąskie. Kolumna jest mniej sprawna, gdy HETP jest duże, co oznacza, że mniej półek teoretycznych znajduje się w kolumnie.

Zgodnie z teorią kinetyczną, sprawność kolumny chromatograficznej można określić, używając równania van Deemtera (Rys. 1) dla chromatografii gazowej lub równania Knoxa dla chromatografii cieczowej:

$$HETP = Au^{1/3} + \frac{B}{u} + Cu$$

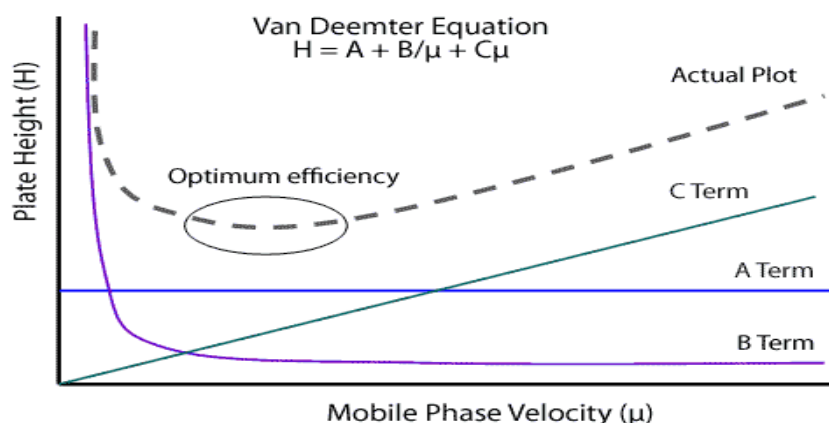
gdzie:

A – dyfuzja wirowa,

B – dyfuzja podłużna w fazie ruchomej,

C – opór przenoszenia masy,

u – prędkość liniowa fazy ruchomej.



Rys. 1. Krzywa van Deemtera - zależność wysokości półki teoretycznej od prędkości przepływu fazy ruchomej w chromatografii gazowej

Istnieje wiele modyfikacji klasycznego równania van Deemtera, uwzględniających wpływ takich parametrów jak prędkość przepływu, średnica uziarnienia złoża i stała podziału między fazą stacjonarną i ruchomą.

Aparatura i materiały

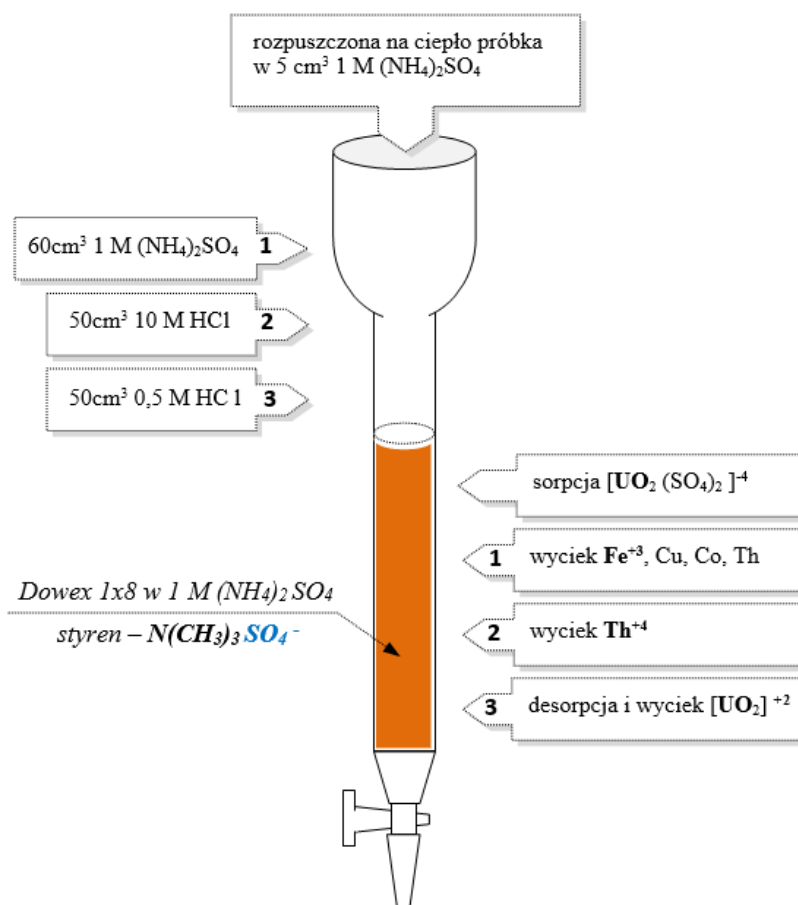
- kolumna chromatograficzna z lejkiem
- stojak na kolumnę
- zlewki
- próbka (mieszanina radioizotopów U i Th z dodatkiem Fe)
- żywica jonowymienna: anionit Dowex 1x8 100-200 mesh w 1M $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$

Instrukcja

Tabela 1. Procedura separacji uranu

KROK	Odczynniki	Czynności
	5 ml 1 M $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	Próbkę odparować i rozpuścić na ciepło, następnie nanieść na kolumnę
<i>Anionit typu Dowex 1x8 w 1 M $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, pow. czynna 100-200 mesh, wysokość żywicy 7cm</i>		
1.	–	wyciek główny
2.	60 ml 1 M $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$	przepłukać kolumnę na obecność Fe, Co i Cu, popłuczyny połączyć z wyciekiem głównym , całość odrzucić
3.	50 ml 10 M HCl	przepłukać kolumnę na obecność Th, całość odrzucić
4.	50 ml 0,5 M HCl	przepłukać kolumnę na obecność uranu , <u>całość odparować</u> , próbkę zachować do elektrolizy uranu (ćwiczenie 8)

Schemat kolumny chromatograficznej i analizy uranu:



Procesy chemiczne

Uran (VI) w kwasie siarkowym występuje głównie w postaci kationu uranylowego [UO₂]⁺² oraz częściowo w postaci kompleksów siarczanowych: [UO₂SO₄]⁻, [UO₂(SO₄)₂]⁻², [UO₂(SO₄)₃]⁻⁴, które w tej formie sorbują się na anionicie Dowex 1x8. Inne pierwiastki, głównie Fe, w środowisku kwasu siarkowego H₂SO₄ nie tworzą kompleksów siarczanowych i nie sorbują się na żywicy. Związki kompleksowe Th w kwasie siarkowym bardzo słabo sorbują się na anionitach. W środowisku HCl Th występuje w formie kationu Th⁴⁺.

W sprawozdaniu zwięźle opisać wykonane czynności, obserwacje i wskazać, na podstawie znalezionej literatury, jakie pierwiastki radioaktywne mogą być rozdzielane od jakich zanieczyszczeń z wykorzystaniem chromatografii jonowymiennej.

Ćwiczenie 8

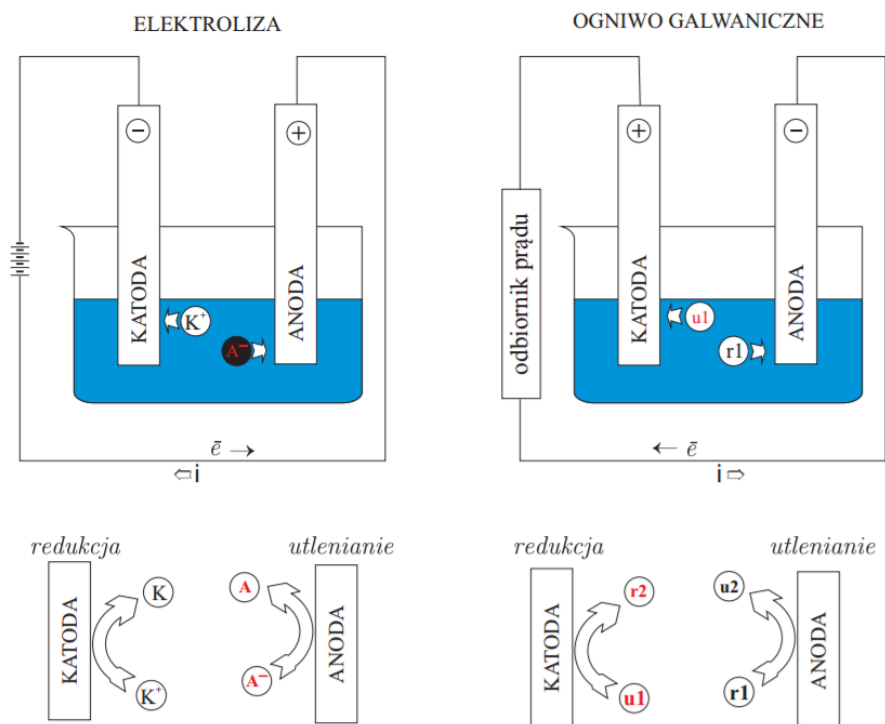
Przygotowywanie źródeł promieniotwórczych do pomiaru w spektrometrze alfa za pomocą elektrolizy

Cel

Zapoznanie z procedurą przygotowywania źródeł promieniotwórczych z wykorzystaniem procesu elektrolizy do pomiaru aktywności radioizotopów uranu za pomocą spektrometrii alfa.

Wprowadzenie

Elektroliza jest procesem wymuszonym, który przebiega w przewodniku elektrolitycznym, gdzie nośnikami ładunków elektrycznych są zarówno jony dodatnie (kationy), jak i ujemne (aniony). Ruch ładunków elektrycznych jest wymuszony poprzez podłączenie zewnętrznego źródła prądu stałego do elektrod zanurzonych w ciekłym przewodniku jonowym (Rys.1).



Rys. 1. Schemat elektrolizera i ogniwa galwanicznego

Podczas elektrolizy zachodzą procesy odwrotne w stosunku do przemian zachodzących w czasie pracy ogniwa galwanicznego. Katodą jest elektroda, na której zachodzi proces redukcji, natomiast anodą jest elektroda, na której zachodzi proces utleniania. Znak elektrod jest przeciwny do znaku elektrod w ogniwie galwanicznym.

Napięcie rozkładowe U_r to najmniejsze napięcie, jakie jest potrzebne do zapoczątkowania procesu elektrolizy. Jest to suma siły elektromotorycznej (SEM), nadnapięcia elektrodowego (η) i oraz spadku omowego przyłożonego napięcia w elektrolizerze (iR).

$$U_r = SEM + \eta + iR$$

Siłę elektromotoryczną obliczamy jako różnicę potencjałów katody i anody:

$$SEM = E_k - E_a$$

1 prawo elektrolizy Faradaya - masa substancji wydzielonych na elektrodzie podczas elektrolizy jest proporcjonalna do wielkości ładunku elektrycznego, który przepłynął przez elektrolit:

$$m = k \cdot Q = k \cdot I \cdot t$$

m – masa wydzielonej substancji (g)

k – równoważnik elektrochemiczny

$$k = \frac{M}{z \cdot F}$$

Q – ładunek elektryczny (C)

i – natężenie prądu (A)

t – czas (s)

M – masa molowa wydzielonego jonu

z – liczba elektronów przeniesionych w reakcji elektrodowej

F – stała Faradaya ($F = 96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$)

2 prawo elektrolizy Faradaya - masy różnych substancji wydzielone na elektrodach podczas przepływu jednakowego ładunku elektrycznego są proporcjonalne do ich równoważników elektrochemicznych:

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{k_1}{k_2} = \frac{Eq_1}{Eq_2}$$

lub

$$\frac{Eq_2}{k_2} = \frac{Eq_1}{k_1} = \text{const} = F$$

natomiast

$$Eq = \frac{M}{z}$$

Wpływ stężenia elektrolitu na potencjał półogniwa opisuje równanie Nernsta:

$$E = E_0 \cdot \frac{2,303 \cdot RT}{zF} \log \frac{[oks]}{[red]}$$

gdzie:

R – stała gazowa $8,31 \text{ J} \cdot (\text{mol} \cdot \text{K})^{-1}$

T – temperatura

Preparat zawierający radioizotopy uranu ^{234}U , ^{235}U i ^{238}U do pomiarów w spektrometrze alfa musi być cienkie, jednolite i mieć jednorodny rozkład aktywności. Tylko, tak przygotowane źródła gwarantują otrzymanie widma o wysokiej rozdzielczości energetycznej i uniknięcia tzw. ogonowania pików w obszarze niższych energii. Aby sprostać tym wymaganiom, elektroliza uranu na płytkach ze stali nierdzewnej jest jednym z najczęściej stosowanych sposobów wytwarzania wysokiej rozdzielczości źródeł promieniotwórczych dla spektroskopii alfa. Aby otrzymać wysokiej jakości źródła alfa należy zoptymalizować wiele parametrów, takich jak: rodzaj elektrolitu, typ elektrody, jakość powierzchni podłoża, osadzona masa, obrót i kształt anody, gęstość prądu, czas osadzania oraz doświadczenie analityka.

Elektrolit – w celu przygotowania źródeł do pomiarów alfa spektrometrycznych stosuje się takie nieorganiczne elektrolity, jak: NH_4 -cytrynian/ HCl , Na_2SO_4 , $\text{H}_2\text{SO}_4/(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/ \text{Na}_2\text{SO}_4$, nasycony NH_4NO_3 lub NO_3^-/NaF . Z wymienionych najczęściej stosowane są roztwory, które zawierają mieszaninę $\text{H}_2\text{SO}_4/(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4/ \text{Na}_2\text{SO}_4$ w środowisku kwaśnym o $\text{pH} = 2,1\text{--}2,4$.

Zanieczyszczenia – powstają wówczas, jeśli materiał mający kontakt z elektrolitem (elektrody) nie jest odporny chemicznie, może się rozpuścić i osadzić się na powierzchni źródła podczas procesu elektrolizy. Zanieczyszczenia zawarte w odczynnikach chemicznych (np. Mn, Fe itp.) mogą utrudniać osadzanie się radioizotopów uranu. Na przykład, opiłki metalu powstałe w trakcie nieumiejętnego podłączania elektrody do zasilacza, mogą przedostać się do elektrolitu i być osadzane na stali nierdzewnej. Aby tego uniknąć, należy wybrać stosować elektrody wykonane z odpowiednich materiałów odpowiedni materiał i używać przykrywek do elektrolizerów.

Jakość katody (stal nierdzewna) – morfologia powierzchni katody ma wpływ na jakość osadzania uranu, ponieważ to od niej zależy grubość i jednorodność warstwy osadzanego metalu. Wypolerowana powierzchnia powoduje bardziej jednorodną warstwę depozycji uranu, a podłoża nierówne lub zadrapane dają źródła mniej jednorodne o słabszej rozdzielczości.

Materiał anody (platyna) – ponieważ Pt jest stosowana jako anoda do osadzania uranu z roztworu elektrolitu zawierającego $\text{H}_2\text{SO}_4/(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, może wystąpić rozpuszczanie jej śladów i osadzanie na katodzie ze stali nierdzewnej. Proces ten prowadzi do pogorszenia jakości spektralnej otrzymanego źródła uranowego. Alternatywą dla anody platynowej może być stop ze stopu Pt-Rh (90% Pt, 10% Rh), który jest bardziej odporny na rozpuszczanie.

Geometria anody – kształt elektrody Pt jest bardzo ważny i wpływa na rozkład gęstości prądu w elektrolicie podczas elektrolizy i tym samym na jednorodność źródła alfa. Lepsza

jednorodność może być uzyskana przy użyciu spiralnych elektrod w kształcie tarczy lub siatki w porównaniu do elektrody w kształcie igły lub krzyża.

Wartość pH elektrolitu – proces elektrolizy uranu jest bardzo wrażliwy na pH elektrolitu i kwasowość roztworu ma istotny wpływ na wydajność osadzania uranu. Przy niskim pH (<2) osadzona warstwa uranu może być ponownie rozpuszczona w elektrolicie. Przy wyższym pH (> 4), uran może tworzyć kompleksy wodorotlenkowe o różnej stechiometrii, które hamują jego osadzanie.

Natężenie prądu i czas elektrolizy – natężenie prądu musi być na tyle duże, by przekroczyć napięcie rozkładowe. Zbyt wysokie natężenie prądu będzie powodować gwałtowny wzrost temperatury elektrolitu i jego odparowywanie. Na 1 minutę przed wyłączeniem elektrolizy, pH elektrolitu musi być alkaliczne, przez dodanie 1 ml stężonego NH_4OH , aby nie dopuścić do rozpuszczania osadzonego uranu na stali nierdzewnej. Typowy czas osadzania uranu wynosi od 60 do 120 minut, co przekłada się na wydajność jego elektrolizy w zakresie od 60 do 100%.

Aparatura i materiały

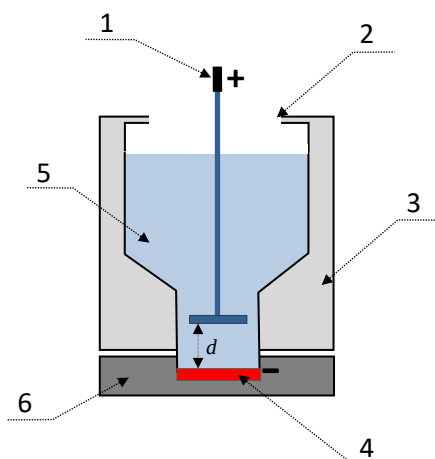
- teflonowe naczynko elektrolityczne z pokrywką
- elektroda platynowa
- płytkę ze stali nierdzewnej
- stojak na naczynko elektrolityczne
- zasilacz prądu

Odczynniki chemiczne

- roztwór elektrolitu (0,75M $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ o pH = 2)
- stężona woda amoniakalna
- 1% roztwór woda amoniakalna

Instrukcja

1. Pozostałość po odparowaniu z ćwiczenia 7 zalać 1 ml stężonego kwasu HCl i HNO_3 , a następnie odparować
2. Do suchej pozostałości dodać 5 ml roztworu 0.75M $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ o pH = 2
3. Płytkę ze stali nierdzewnej przemyć acetonem i wysuszyć
4. Przygotować elektrolizer i umieścić go na stojaku zgodnie ze schematem na rysunku



Rys. 1. Schemat zestawu do elektrolizy uranu, gdzie: 1. anoda - drut platynowy; 2. pokrywka; 3. naczynie teflonowe; 4. katoda - płytka ze stali nierdzewnej; 5. elektrolit - 0,75M $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ o $\text{pH}=2$; 6. Metalowa podstawa.

5. Włączyć zasilacz i ustawić natężenie prądu na 1A
6. Elektrolizę prowadzić przez 90 minut
7. Na 1 minutę przed końcem elektrolizy dodać do elektrolizera 0,5 ml stężonej wody amoniakalnej
8. Wyłączyć zasilacz, wyjąć płytkę i przemyć ją 1% roztworem NH_4OH oraz acetonem

Ćwiczenie 9

Przygotowywanie źródeł promieniotwórczych polonu ^{210}Po za pomocą autodepozycji do pomiaru w spektrometrze alfa

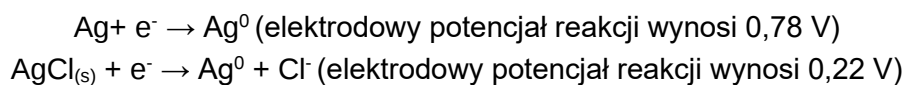
Cel

Zapoznanie z procedurą przygotowywania źródeł promieniotwórczych polonu z wykorzystaniem autodepozycji na płytkach srebrnych do pomiaru aktywności ^{210}Po w spektrometrze alfa.

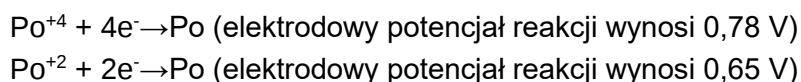
Wprowadzenie

Źródło promieniotwórcze polonu ^{210}Po do pomiaru aktywności za pomocą spektrometrii alfa jest zwykle przygotowywane poprzez spontaniczną, bezprądową depozycję polonu na srebrnym, niklowym lub miedzianym dysku. Wykorzystuje się możliwość redukcji metalicznego polonu na powierzchni mniej szlachetnego metalu. Proces autodepozycji jest bardzo podobny do elektrolizy, jednakże nie ma potrzeby przykładania zewnętrznego źródła napięcia. Dodatkowo, aby zwiększyć wydajność procesu, roztwór jest podgrzewany i mieszany. Najlepszą wydajność termicznej depozycji polonu stwierdzono na srebrze w kwaśnym środowisku 0,5 M HCl w temperaturze 90°C.

W środowisku kwaśnym 0,5 M HCl w roztworze wodnym, w którym występują jony Cl^- , potencjał srebra obniża się dzięki tworzeniu kompleksowego anionu AgCl_2^- :

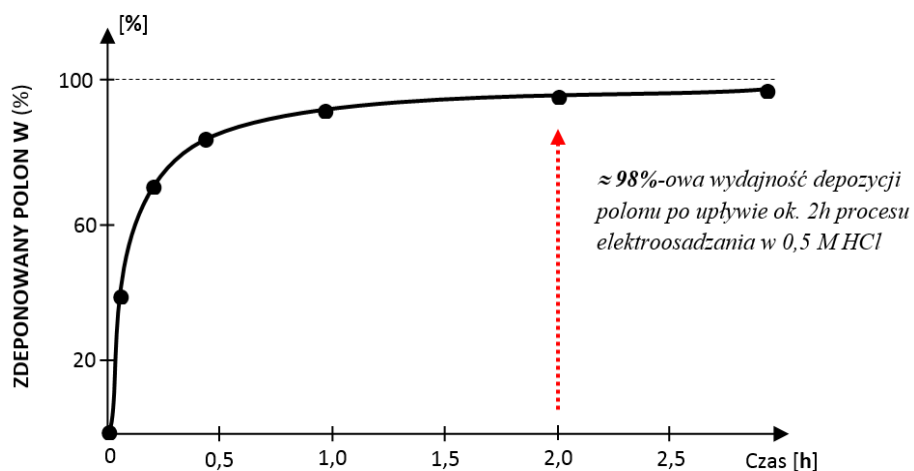


i na metalicznym srebrze wydziela się polon zgodnie z reakcją:



Przed autodepozycją polonu, do roztworu próbki w 0,5 M HCl należy dodać ok 0,15 g kwasu askorbinowego $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (witamina C) w celu zredukowania Fe^{+3} do Fe^{+2} , który w środowisku 0,5 M HCl nie osadza się na srebrze. Fe^{+3} w tych warunkach tworzy grubą matową warstwę na płytce srebrnej, gdyż żelazo Fe^{+3} osadza się podobnie jak Po^0 w postaci atomowej. Otrzymany preparat jest niezdatny do pomiaru energii cząstek alfa emitowanych przez atomy ^{210}Po .

Wydajność depozycji polonu na srebrze w rozcieńczonym roztworze kwasu solnego, (0,5 M HCl) zależy od czasu (Rys.1), rodzaju próbki, siły jonowej roztworu (suma ładunków kationów i anionów) i obecności reduktorów lub utleniaczy.



Rys. 1. Wydajność depozycji polonu na płytce srebrnej względem czasu

Aparatura i materiały

- naczynko teflonowe z pokrywką
- łaźnia wodna
- srebrna płytka
- stojak na naczynko
- zasilacz
- mieszadełko

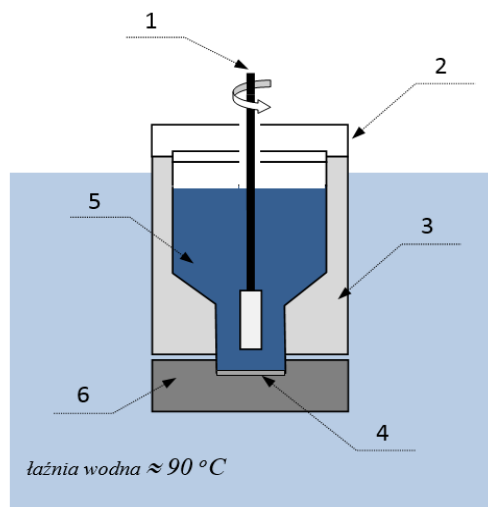
Odczynniki chemiczne

- roztwór 0,5 M HCl
- kwas askorbinowy
- woda dejonizowana
- aceton

Instrukcja

1. Włączyć łaźnię wodną i ustawić temperaturę na 90°C
2. Analizowaną próbkę rozpuścić w ok. 15 ml 0,5 M HCl (jeśli próbka się nie rozpuszcza, podgrzać pod przykryciem)
3. Do ostudzonej próbki dodać około 0,15 mg kwasu askorbinowego i mieszać do rozpuszczenia
4. Płytke srebrną przemyć acetonem i wysuszyć
5. Włożyć próbkę do naczynia teflonowego
6. Naczynie z próbką wstawić na stojak i zamontować mieszadełko i opuścić do zaznaczonej na stojaku głębokości (Rys. 2)
7. Włączyć zasilacz i wyregulować szybkość pracy mieszadełka
8. Depozycję polonu prowadzić przez ok. 2 h

9. Po wyłączeniu, roztwór schłodzić i przenieść do zlewki
10. Płytkę ze zdeponowanym polonem przemyć wodą dejonizowaną i acetonem



Rys. 2. Schemat zestawu do autodepozycji polonu, gdzie: 1. mieszadło; 2. pokrywka górna; 3. naczynie teflonowe; 4. srebrna płytka; 5. roztwór $\approx 0,5\text{M}$ HCl; 6. przykręcana teflonowa stopa.

Ćwiczenie 10

Pomiar dawki ekspozycyjnej

Cel

Celem ćwiczenia jest określenie mocy dawki ekspozycyjnej pochodzącej z różnych źródeł promieniowania beta i gamma.

Wprowadzenie

W wyniku obecności w biosferze naturalnych i antropogenicznych radionuklidów, jak również wskutek docierania do powierzchni naszej planety wysokoenergetycznego promieniowania elektromagnetycznego i korpuskularnego z kosmosu (promieniowania kosmicznego), wszystkie jej elementy mogą być w różnym stopniu narażone na działanie promieniowania jonizującego. Oddziaływanie promieniowania jonizującego na biosferę związane jest z absorpcją jego energii przez poszczególne jej składniki. Skutki działania promieniowania jonizującego na organizmy żywe zależą od wielu czynników. Najważniejsze to:

- pochłonięta energia (dawka) promieniowania przez cały organizm lub jego część (tkankę lub narząd);
- czas, w którym dawka została pochłonięta (moc dawki);
- rodzaj promieniowania jonizującego;
- wiek i ogólna kondycja napromieniowanego organizmu.

Do oceny narażenia organizmu promieniowaniem jonizującym służą dawki:

1. **Dawka ekspozycyjna:** jest miarą jonizacji (ilości powstających par jonów) powietrza, którym oddychamy. Jednostką dawki ekspozycyjnej jest C/kg, dawniej stosowany był rentgen (R) zdefiniowany jako:

$$1 R = 2,58 \cdot 10^4 \frac{C}{kg}$$

2. **Dawka pochłonięta (D):** jest miarą ilości energii pochłoniętej przez daną masę tkanki. Jest to energia jaką traci promieniowania jonizującego, a pochłania ośrodek, przez który przechodzi to promieniowania, przypadające na jednostkę masy tego ośrodka. Jednostką dawki pochłoniętej w układzie SI jest 1 grej (Gy), definiowany jako 1 J energii pochłoniętej w masie 1 kg. Dawniej stosowany był rad (1 Gy = 100 rad):

$$1 Gy = \frac{1 J}{kg}$$

3. **Dawka równoważna (H_T):** posługujemy się nią przy napromieniowaniu pojedynczego narządu lub tkanki. Jest sumą iloczynów dawki pochłoniętej w danym organie (D_{T,R}) i współczynnika wagowego promieniowania (W_R), zależnego od rodzaju promieniowania. Jednostką dawki równoważnej w układzie SI jest jednostką jest 1 siwert (Sv). Dawniej stosowany był rem (1 Sv = 100 rem). W przypadku działania na organ człowieka różnego

rodzaju promieniowania wartość dawki równoważnej w danej tkance H_T można obliczyć za pomocą wzoru:

$$H_T = \sum W_R \cdot D_{T,R}$$

Wartości współczynników wagowych W_R promieniowania wynoszą 20 dla cząstek α oraz 1 dla kwantów X i γ wszystkich energii i elektronów wszystkich energii.

4. **Dawka efektywna (skuteczna) (E):** W przypadku napromieniowanie całego organizmu człowieka, oprócz rodzaju promieniowania, istotny wpływ na ewentualne skutki zdrowotne ma także rodzaj napromienionej tkanki oraz jej znaczenie dla procesów życiowych. Dlatego dla wypadkowej oceny tych skutków wprowadzono pojęcie dawki efektywnej (skutecznej) E, którą definiujemy jako sumę iloczynów dawki równoważnej H_T i współczynnika wagowego tkanki W_T . Wartość dawki efektywnej E oblicza się za pomocą wzoru:

$$E = \sum W_T \cdot H_T$$

Wartości współczynnika wagowego promieniowania jonizującego W_T wynoszą od 0,25 dla gonad do 0,01 dla skóry.

5. **Obciążająca dawka równoważna $H_T(\tau)$:** jest miarą narażenia tkanki lub narządu przy napromieniowaniu wewnętrznym spowodowanym wchłanianiem do organizmu człowieka izotopu długożyciowego. Można ją obliczyć ze wzoru:

$$H_T(\tau) = \int_{t_0}^{t_0+\tau} \dot{H}_T dt$$

gdzie:

$\dot{H}_T$ – moc dawki równoważnej w organizmie lub tkance T w czasie t_0

τ – czas wchłonięcia radionuklidu (dorośli – 50 lat; dzieci – 70 lat)

6. **Obciążająca dawka równoważna $E(\tau)$:** jest to miara narażenia ciała człowieka na wchłonięcie do organizmu wielu radionuklidów, głównie długożyciowych. Oblicz się ją ze wzoru:

$$E(\tau) = \sum_T W_T H_T(\tau)$$

7. **Moc dawki:** Moc dawki określona jest jako dawka pochłonięta w jednostce czasu.

Moc dawki pochłoniętej

$$\dot{D} = \frac{dD}{dt} \quad \left[\frac{\text{Gy}}{\text{s}} \right]$$

Moc dawki ekspozycyjnej

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} \quad \left[\frac{\text{R}}{\text{s}} \right]$$

Moc równoważnika dawki

$$\dot{H} = \frac{dH}{dt} \quad \left[\frac{\text{Sv}}{\text{s}} \right]$$

8. **Wzajemne relacje i zależności między jednostkami**

- Dawka ekspozycyjna 1 R → Dawka pochłonięta w powietrzu 0,87 rad ($0,87 \cdot 10^{-2}$ Gy)
- Dawka pochłonięta w tkance 1 rad (0,01 Gy) → równoważnik dawki 1 rem (10 mSv)
- Dawce pochłoniętej w powietrzu równej $0,087 \cdot 10^{-2}$ Gy (0,87 mGy) czyli 1 R odpowiada równoważnik dawki 12 mSv

Aparatura i materiały

- Radiometr kieszonkowy typ RKS-104
- Radiometr kieszonkowy typ RK-10-1
- Źródła promieniowania beta i gamma: ^{14}C , ^{60}Co , ^{63}Ni , ^{90}Sr , ^{137}Cs .

Instrukcja

Radiometr RKS-104

1. Włączyć radiometr (czerwonym suwakiem z pozycji „ВЫКЛ” na „ВКЛ”), odsłonić detektor promieniowania (usuwając klapkę z tylnej części radiometru) i ustawić w pozycji pomiarowej (szary suwak z pozycji „ДЕЖ” na „РАБ”).
2. Źródło promieniowania ustawić w odległości 1-2 cm od detektora i dokonać pomiaru mocy dawki ekspozycyjnej (wynik jako równoważnik dawki promieniowania $\mu\text{Sv/h}$ („МКЗВ/ч”) dla każdego źródła promieniowania beta i gamma. Otrzymane wartości pomnożyć przez ustawiony na radiometrze przelicznik ($\times 0,01$).

Radiometr RK-10-1

1. Włączyć radiometr (przesuwając czarne pokrętkę w dół), wyjąć detektor promieniowania i ustawić właściwą/żądaną skalę pomiaru dawki ekspozycyjnej.

2. Źródło promieniowania ustawić w odległości 1-2 cm od detektora i dokonać pomiaru mocy dawki ekspozycyjnej (wynik mR/h) i według zależności jednostek obliczyć zmierzoną dawkę i podać w $\mu\text{Sv/h}$

Tabela pomiarów

Źródło promieniowania	Średnia wartość mocy dawki ekspozycyjnej [$\mu\text{Sv/h}$]	
	RKSW-104	RK-10-1
^{14}C		
^{60}Co		
^{63}Ni		
^{90}Sr		
^{137}Cs		

Ćwiczenie 11

Oslabienie promieniowania jonizującego

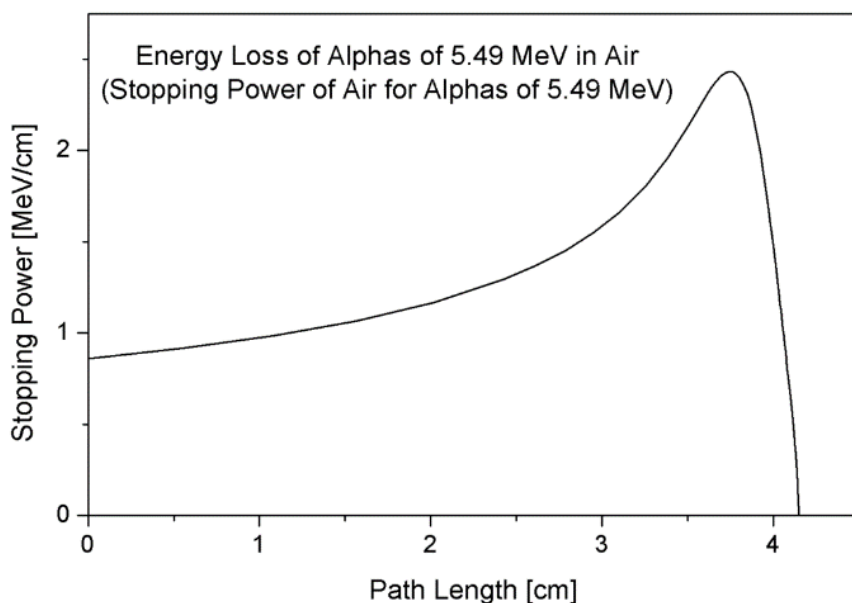
Cel

Celem ćwiczenia jest określenie osłabienia promieniowania jonizującego przez różne materiały (przesłony), jak również wyznaczenie współczynnika osłabienia promieniowania (k - krotność osłabienia) oraz zapoznanie z techniką przeprowadzania pomiarów przy pomocy monitora skażeń radioaktywnych EKO-C/s.

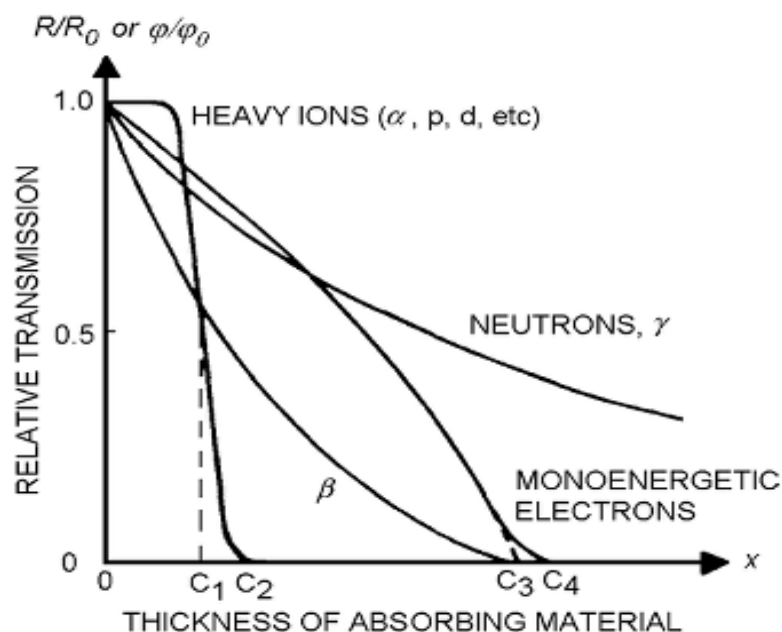
Wprowadzenie

Pochłanianie promieniowania α

Cząstki α obdarzone podwójnym dodatnim ładunkiem elektrycznym (jądra atomu helu) poruszają się z prędkościami v kilkadziesiąt razy mniejszymi od prędkości światła c . Dla nich tzw. współczynnik beta ($\beta = v/c$, zgodnie ze szczególną teorią względności oznaczający prędkość obiektu w odniesieniu do prędkości światła; nie mylić z cząstkami β) jest niższy od wartości 0,05 i wówczas liniowe straty energii dE/dx są szczególnie duże. Zmiany liniowej straty energii cząstek α w powietrzu, a tym samym tzw. jonizacji właściwej wzdłuż jej drogi przedstawia krzywa Bragga (Rys. 1).



Rys. 1. Jonizacja powietrza wzdłuż drogi cząstki α



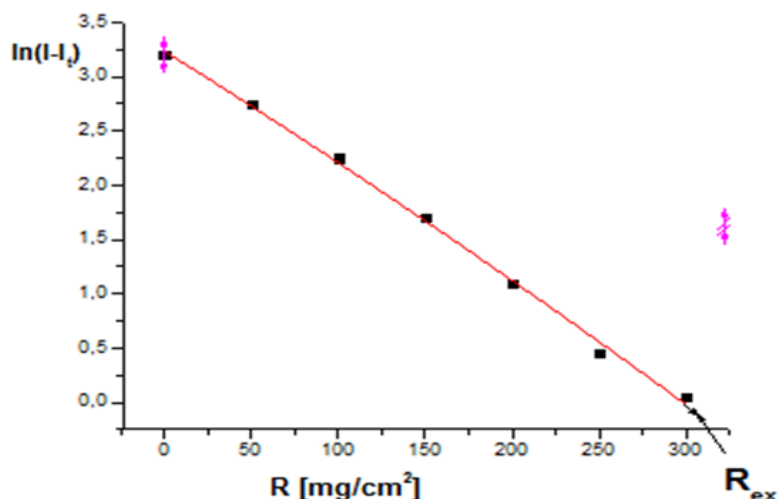
Rys. 2. Absorpcja promieniowania w materii

Ze względu na względnie dużą masę cząstki α , jest ona około 7500 razy większa od masy elektronu, w ciągu prawie całej swojej drogi w danym ośrodku porusza się ona ruchem prostoliniowym. Dopiero pod koniec zasięgu, gdy straci $\sim 80\%$ swojej energii początkowej, cząstka α zmienia kierunek po każdym zderzeniu, co powoduje rozrzut ich zasięgu. Zasięg cząstek α w wodzie (podobnie jak tkance ludzkiej) wynosi $\sim 50 \mu\text{m}$. Z tego powodu narażenie radiologiczne człowieka od zewnętrznych źródeł promieniowania α jest znikome, ponieważ 5-cio cm warstwa powietrza lub naskórek pochłaniają całkowicie to promieniowanie. Zupełnie inna sytuacja występuje wtedy, gdy radionuklidy α -promieniotwórcze dostaną się do wnętrza organizmu ludzkiego. Cząstka α w pojedynczym zderzeniu z elektronem może przekazać mu pewną część swojej początkowej energii (średnio $\sim 250 \text{ eV}$). Na drodze równej jej zasięgowi, czyli zaledwie $\sim 50 \mu\text{m}$, może zaistnieć około $2 \cdot 10^4$ aktów przekazania energii elektronom ośrodka. Energia przekazana elektronowi w pojedynczym zderzeniu wystarcza do jonizacji na jego drodze od kilku do kilkunastu cząsteczek i wzbudzenia kilku dalszych. Dlatego też na drodze przebiegu cząstki α powstaje zbiór tzw. węzłów jonizacji, tj. grupy cząsteczek, oddległych od siebie średnio zaledwie o $2,5 \text{ nm}$, w których skumulowana jest dodatkowa energia, umożliwiającą zachodzenie w nich dalszych procesów chemicznych, głównie rodnikowo-jonowych, prowadzących do zerwania wiązania chemicznego. Ma to istotne znaczenie przy powstawaniu w organizmie ludzkim uszkodzeń radiacyjnych, spowodowanych wchłonięciem cząstek α .

Pochłanianie promieniowania β

W przypadku oddziaływania promieniowania β , pojedynczy ujemnie naładowany elektron i jego duża prędkość (zbliżona do prędkości światła) sprawiają, że linowe straty energii (LET – linear energy transfer) tego promieniowania są dużo mniejsze niż dla cząstek α . W

przeciwieństwie do cząstek α , poruszający się elektron (promieniowanie β) ma taką samą masę spoczynkową jak elektrony ośrodka i w pojedynczym zderzeniu może im przekazywać znaczną część swojej energii, równocześnie zmieniając kierunek ruchu. Strata energii następuje także skokowo, ale na znacznie większych odległościach (Rys. 3).



Rys. 3. Absorpcja cząstek β w materii.

Wartość LET zależy od energii elektronów i waha się od 1 keV/ μ m dla małych energii do 0,2 keV/ μ m dla dużych jej wartości rzędu 1MeV. Cząstki β charakteryzują się ciągłym rozkładem energetycznym: od bardzo małych energii do energii maksymalnej $E_{\max}$, charakterystycznej dla danego radionuklidu. Proces pochłaniania tego promieniowania może być w początkowym przedziale grubości absorbenta dobrze opisany równaniem wykładniczym. Ekstrapolacja końcowej, zakrzywionej krzywej pochłaniania, do zerowego natężenia promieniowania daje wartość R_{ex} odpowiadającą maksymalnemu zasięgowi promieniowania β oznaczanemu jako $R_{\max}$.

Pochłanianie promieniowania γ

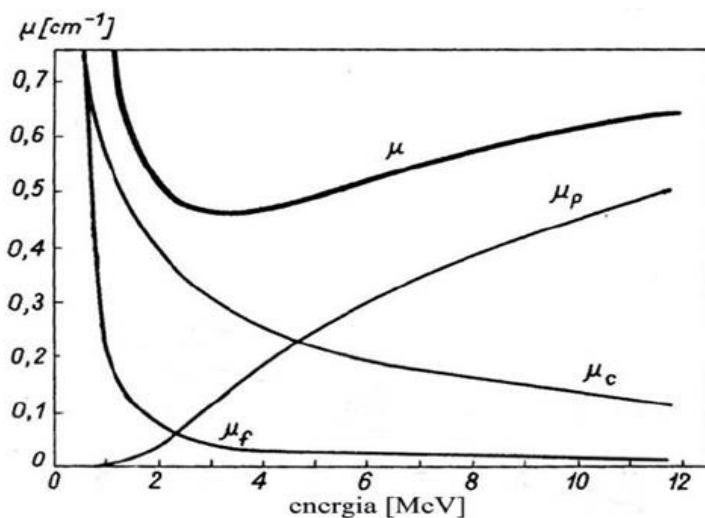
Fotony promieniowania γ lub promieniowania rentgenowskiego X oddziałując z materią przekazują jej całkowitą swoją energię lub jej część w wyniku następujących procesów:

- zderzenia z elektronami z wewnętrznych powłok elektronowych, silnie związanymi z jądrem (zjawisko fotoelektryczne) - τ
- zderzenia z elektronami słabo związanymi z jądrem (rozpraszanie comptonowskie) - σ
- oddziaływania z polem jądra atomowego (tworzenie par elektron-pozyton) - κ

W wyniku tych procesów całkowity liniowy współczynnik pochłaniania μ promieniowania γ jest równy:

$$\mu = \tau + \sigma + \kappa$$

Całkowity liniowy współczynnik pochłaniania μ zależy silnie od średniej liczby atomowej Z ośrodka pochłaniającego i od energii E kwantów promieniowania γ (Rys.4).



Rys. 4. Zależność współczynników pochłaniania promieniowania γ w ołowiu.

Dla skolimowanej (tzn. wąskiej i równoległej) wiązki promieniowania γ przebieg zmian natężenia promieniowania i w zależności od grubości absorbenta (przesłony) x ma charakter wykładniczy (Rys. 5).

$$I = I_0 \cdot e^{-\left(\frac{\mu}{\rho}\right)d}$$

gdzie:

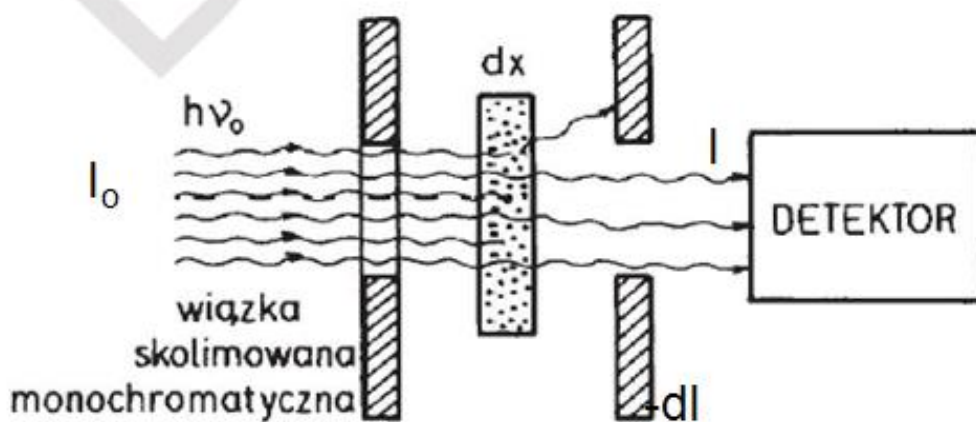
I_0 – jest natężeniem początkowym wiązki promieniowania (kwantów/s) lub (imp/s)

μ – całkowitym liniowym współczynnikiem absorpcji (cm^{-1})

I – natężeniem wiązki promieniowania po przejściu przez absorbent o grubości x

ρ – gęstość absorbenta (g/cm^3)

d – gęstość powierzchniowa (g/cm^2)



Rys. 5. Pochłanianie skolimowanej wiązki promieniowania γ

Aparatura i materiały

- monitor skażeń radioaktywnych EKO-C/s
- ława optyczna do pomiaru osłabiania promieniowania
- przesłony
- źródło promieniowania beta ^{90}Sr

Instrukcja

1. Dokonać pomiaru aktywności źródła promieniowania beta bez materiału osłaniającego (przesłony) przy różnych odległościach od źródła (0, 30, 50).
2. Dokonać pomiaru aktywności źródła po przejściu promieniowania przez materiał osłabiający (przesłona) umieszczonego w różnej odległości od źródła (0, 30, 50).
3. Obliczyć krotność osłabienia promieniowania k dla różnych materiałów osłabiających (przesłon) oddalonych na różną odległość z zależności $k = I_{0\text{sr}}/I_{\text{sr}}$

Pomiary dla $l=0$ cm

Materiał osłaniający (przesłona)	$I_{0\text{sr}}$ (cps)	I_{sr} (cps)	Krotność osłabienia k
1. Bez osłony		-	
2. Materiał osłaniający			
Papier	-		
Bawełna	-		
Skóra	-		
Folia PET	-		
Folia aluminiowa	-		
Pleksi 3,5 mm	-		
Pleksi 7,7 mm	-		
Szkło 3,0 mm	-		
Szkło 4,8 mm	-		

Pomiary dla $l=30$ cm

Materiał osłaniający (przesłona)	I_0 śr (cps)	Iśr (cps)	krotność osłabienia k
1. Bez osłony		-	
2. Materiał osłaniający			
Papier	-		
Bawełna	-		
Skóra	-		
Folia PET	-		
Folia aluminiowa	-		
Pleksi 3,5 mm	-		
Pleksi 7,7 mm	-		
Szkło 3,0 mm	-		
Szkło 4,8 mm	-		

Pomiary dla $l=50$ cm

Materiał osłaniający (przesłona)	I_0 śr (cps)	Iśr (cps)	krotność osłabienia k
1. Bez osłony		-	
2. Materiał osłaniający			
Papier	-		
Bawełna	-		
Skóra	-		
Folia PET	-		
Folia aluminiowa	-		
Pleksi 3,5 mm	-		
Pleksi 7,7 mm	-		
Szkło 3,0 mm	-		
Szkło 4,8 mm	-		

Ćwiczenie 12

Widma promieniowania alfa

Cel

Celem ćwiczenia jest wykreślenie krzywej kalibracji energetycznej, interpretacja widma i odczytanie oznaczonych w spektrometrze alfa radioizotopów.

Wprowadzenie

Spektrometria alfa jest techniką radiometryczną służącą do pomiaru promieniowania alfa emitowanego przez nuklidy promieniotwórcze. Spektrometr alfa składa się z półprzewodnikowych detektorów krzemowych, z barierą powierzchniową o powierzchni czynnej od 150 do 600 mm², umieszczonych w komorach próżniowych układów przedwzmacniaczy i zasilaczy oraz wielokanałowych (od 1024 do 4096) analizatorów amplitudy impulsów. Stosowane detektory są diodami krzemowymi z cienką warstwą kontaktową złota napylonego na warstwę „n” w ilości ok. 40 ug·cm⁻². Stosunkowo wysoka wydajność detektorów (od 0,24 do 0,40) oraz ich wysoka rozdzielczość (od 18 do 35 keV) umożliwiają pomiar aktywności większości radionuklidów alfa zarówno naturalnych, jak i sztucznych.

Kalibracja energetyczna i wydajnościowa spektrometru alfa polega na pomiarze źródła promieniotwórczego α o znanej aktywności, w którym znajdują się różne izotopy o jak najmniejszej liczbie wartości energii cząstek alfa w całym zakresie energetycznym widma. Jednym ze źródeł promieniotwórczych używanych w spektrometrii alfa do kalibracji jest preparat zawierający 3 radioizotopy: ²⁴¹Am, ²⁴⁴Cm i ²³⁷Np. Istotne jest, aby źródło kalibracyjne posiadało taką samą geometrię jak preparaty mierzonych próbek.

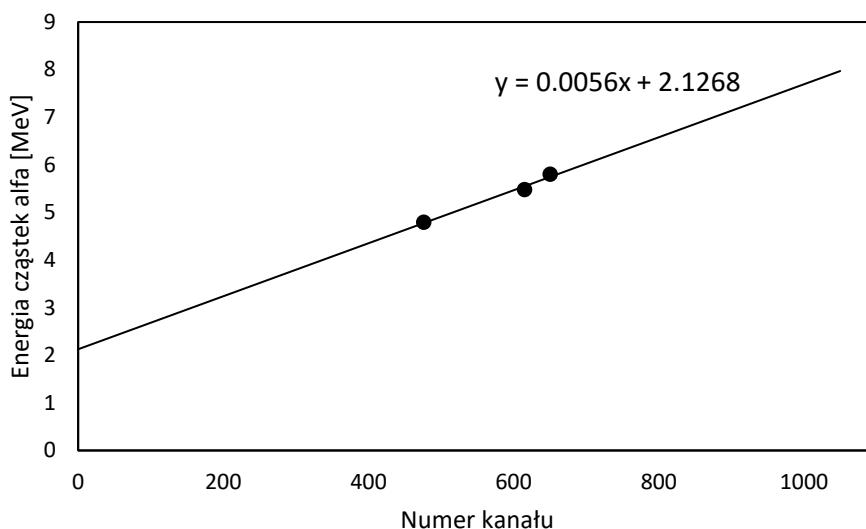
Kalibracja wydajnościowa polega na porównaniu zmierzonych aktywności radionuklidów α w preparacie kalibracyjnym w stosunku do ich certyfikowanej aktywności w danym źródle. Dla detektorów krzemowych o powierzchni 300 mm² wydajność wynosi około 30%. Krzywa kalibracji wydajnościowej w spektrometrii alfa powinna być opisana równaniem prostej.

Kalibracja energetyczna polega na przypisaniu badanej energii cząstki alfa określonemu kanałowi wielokanałowego analizatora amplitudy. Prowadząc pomiar źródła kalibracyjnego zawierającego radionuklidy ²⁴¹Am (5,48 MeV), ²⁴⁴Cm (5,80 MeV) i ²³⁷Np (4,79 MeV) przy użyciu spektrometru alfa z 1024 wielokanałowym analizatorem amplitudy, krzywą kalibracyjną (Rys. 1) rysujemy, przypisując badanym energiom cząstek alfa ²⁴¹Am, ²⁴⁴Cm i ²³⁷Np odpowiedni numer kanału odczytany z widma. Stosując metodę regresji liniowej, otrzymujemy równanie krzywej kalibracyjnej. W przedstawionym przykładzie jest to następujące równanie prostej $y = ax + b$ (Rys. 1):

$$y = 0,0056x + 2,1268$$

Stała nachylenia a (0,0056 MeV = 5,6 keV) to energia przypadająca na jeden kanał, natomiast wartość b wynosi 2,1268 MeV jest początkiem zakresu energetycznego naszego widma kalibracyjnego. Posiadając równanie krzywej kalibracyjnej jesteśmy w stanie przypisywać

energie badanych cząstek α nieznanymi radionuklidów poprzez znajomość numeru kanału, w którym energia ta występuje.



Rys. 1. Przykładowa krzywa kalibracji energetycznej spektrometru alfa

Energię przypadającą na jeden kanał możemy też obliczyć znając zakres energetyczny widma (np. od 2 do 9 MeV). W ten sposób możemy przypisać 1 kanałowi energię 2 MeV, natomiast kanałowi 1024 energię 9 MeV. W tym przypadku energia przypadająca na 1 kanał wynosi:

$$E_k = \frac{9 - 3 \text{ MeV}}{1024 \text{ kanały}} = 0,00585 \frac{\text{MeV}}{\text{kanał}} = 5,85 \frac{\text{keV}}{\text{kanał}}$$

Aparatura i materiały

- Spektrometr alfa
- Widmo A: ^{237}Np , ^{241}Am i ^{244}Cm
- Widmo B: nieznane radioizotopy

Instrukcja

1. Widmo A to spektrum pomiaru w spektrometrze alfa wzorca składającego się z 3 radioizotopów: ^{237}Np , ^{241}Am i ^{244}Cm . Większość radionuklidów w procesie rozpadu ma różne udziały energii tegoż rozpadu (MeV), ale zazwyczaj jedna z nich jest dominująca. Wśród danych impulsów w kanałach Widma A (Spectral Data Report), dla każdego z pików (zbiór rozpadów izotopu) należy wyszukać najwyższą liczbę impulsów (ilość rozpadów) i określić kanał, w którym została ona zarejestrowana. Prawdopodobieństwo pomiaru energii o maksymalnym udziale jest największe dla kanału, w którym jest zarejestrowana największą liczbą rozpadów. Odszukany kanał, w którym występuje największa liczba impulsów (rozpadów) jest charakterystyczny dla

danego izotopu, w związku z tym należy przypisać mu wartość o maksymalnym udziale energii rozpadu cząstek alfa emitowanych przez ten izotop. Na podstawie tych wartości (kanał i przypisana mu energia) należy wykreślić krzywą kalibracji energetycznej, czyli zależność rejestrowanej wartości energetycznej od kanału analizatora.

2. W oparciu o krzywą kalibracji energetycznej należy przeanalizować widmo B (izotopy A i B). Poprzez odnalezienie kanału, w którym zarejestrowana jest największa liczba impulsów (rozpadów) dla danego piku (radioizotopu), można odczytać z krzywej kalibracyjnej energii zarejestrowanej w tym kanale. Wartość tej energii odpowiada (jest zbliżona) do wartości energii o maksymalnym udziale dla zmierzonego radionuklidu. Po określeniu wartości energetycznych, korzystając z tabeli wykazu radionuklidów, należy odszukać i określić zarejestrowane na widmie B izotopy alfa promieniotwórcze. Oznaczane radionuklidy są izotopami tego samego pierwiastka, ponieważ zostały one wyizolowane z próbki na drodze analiza radiochemicznej, której celem jest otrzymanie czystej frakcji badanego pierwiastka.

Ćwiczenie 13

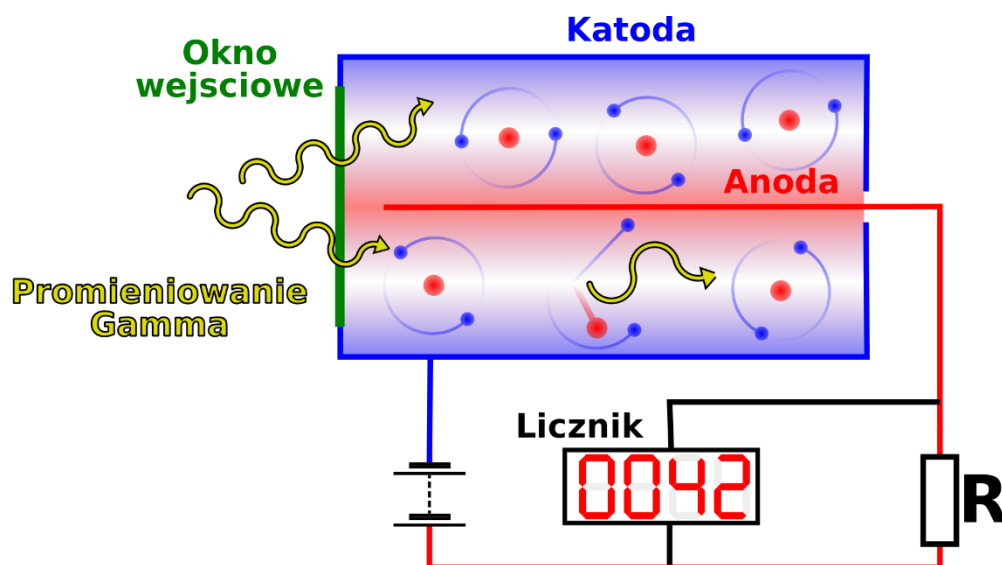
Wyznaczenie napięcia pracy licznika Geigera-Müllera oraz pomiary aktywności próbek gleby

Cel

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady działania licznika Geigera-Müllera poprzez wyznaczenie napięcia pracy licznika, wydajności pomiarowej przy zadanym napięciu dla próbki gleby o znanej aktywności i wykonaniu pomiarów aktywności próbek gleby o nieznanej aktywności.

Wprowadzenie

Licznik Geigera-Müllera (rys. 1) jest sondą gazową, która umożliwia pomiar promieniowania γ oraz w niektórych przypadkach cząstek naładowanych, czyli promieniowania α i β . Wewnątrz obudowy licznika znajduje się cylindryczna katoda i umieszczona w jej osi anoda zwykle wykonana z wolframowego drutu. Wnętrze szczelnego licznika wypełnione jest gazem (np. argon, neon, hel lub krypton) pod wysokim ciśnieniem (do 27 kPa). W zależności od typu licznika, pomiędzy elektrodami przykłada się wysokie napięcie rzędu od 300 do 1500 V. Różnica potencjałów pomiędzy elektrodami powoduje powstanie silnego pola elektrycznego.

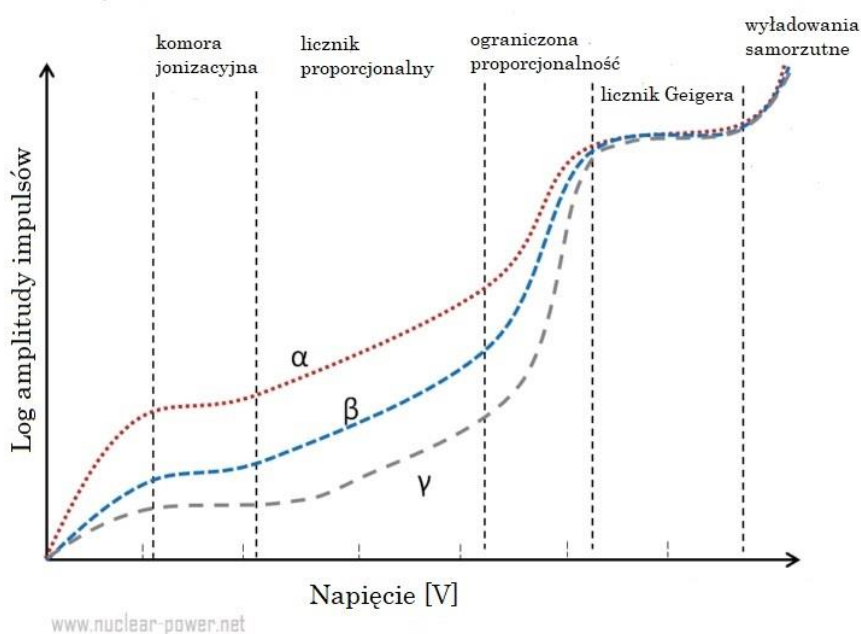


Rys. 1. Schemat licznika Geigera-Müllera
(https://pl.wikipedia.org/wiki/Licznik_Geigera)

Kwant γ lub cząsteczka naładowana wpadając do objętości czynnej licznika powoduje jonizację atomów gazu. Powstałe w wyniku jonizacji wolne elektrony i dodatnie jony gazu przyspieszane są w polu elektrycznym. Jony dodatnie kierują się w stronę elektrody ujemnej (katody), czyli ścianek tuby natomiast wolne elektrony w kierunku elektrody dodatniej (anody). Przyspieszane elektrony zderzają się z kolejnymi atomami gazu wywołując ich jonizację.

Powstaje proces lawinowy zwany wyładowaniem lawinowym lub lawiną Townsenda. Dodatkowo, wzbudzone atomy gazu mogą emitować promieniowanie UV, które wybija fotoelektrony z ujemnej katody (efekt fotoelektryczny). Fotoelektrony te są rozpędzane w polu elektrycznym jonizując lub wzbudzając kolejne atomy gazu. Podobnie zachowują się dodatnie jony gazu, które po dotarciu do katody, również wybijają z niej elektrony. Wyładowanie lawinowe powoduje chwilowy przepływ prądu jonowego pomiędzy anodą i katodą tuby. W obwodzie zamkniętym rezystorem objawia się to chwilowym spadkiem napięcia. Impulsy te są zliczane i po każdym z nich napięcie musi powrócić do wartości sprzed wyładowania lawinowego. Czas ten nazywany jest czasem martwym detektora i w czasie jego trwania kolejne impulsy nie mogą być rejestrowane.

Wszystkie sondy gazowe (komory jonizacyjne, liczniki proporcjonalne, liczniki Geigera-Müllera) zbudowane są z elektrod, różnią się natomiast geometrią i ciśnieniem wypełniającego tubę gazu a co za tym idzie napięciem pracy (rys. 2).

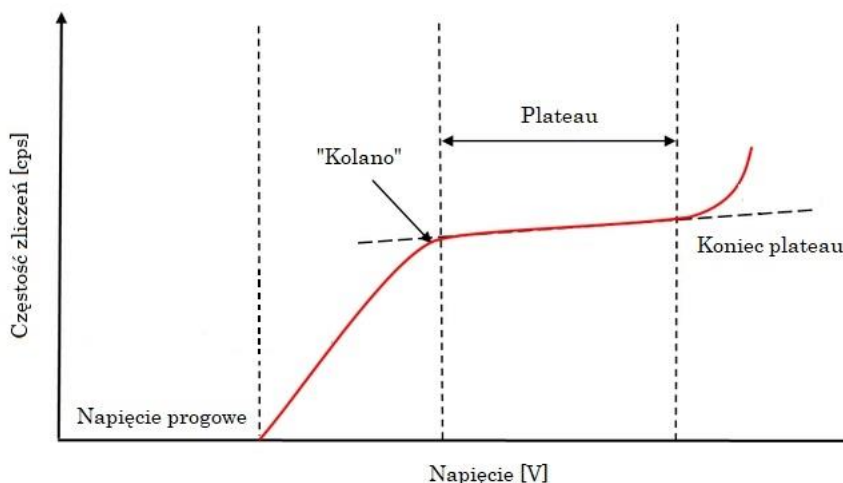


Rys. 2. Charakterystyka gazowych detektorów promieniowania - zależność liczby par jonów zebranych na elektrodach w funkcji napięcia.

W komorze jonizacyjnej przyłożone napięcie jest niewielkie, niewystarczające by po jonizacji pierwotnej wystąpiły wyładowania lawinowe. Liczba wytworzonych jonów jest proporcjonalna do energii traconej przez kwant γ lub naładowaną cząstkę. Licznik proporcjonalny pracuje w wyższych napięciach, wystarczających by elektrony pochodzące z jonizacji pierwotnej, rozpędzone w polu elektrycznym między katodą i anodą, wywoływały kolejne jonizacje gazu, co powoduje proporcjonalny wzrost ładunku. Powstałe impulsy mają wyższą amplitudę niż w przypadku komory jonizacyjnej ale wciąż pozostają proporcjonalne do ilości jonów z jonizacji pierwotnej, a tym do energii traconej przez kwant γ lub naładowaną cząstkę. W obu typach liczników możliwe jest rozróżnienie rodzaju i energii promieniowania. W liczniku Geigera-Müllera seria wyładowań lawinowych powoduje, że wszystkie wytworzone impulsy, bez względu na to jak była energia kwantu γ lub naładowanej cząstki, które wywołały jonizację

pierwotną, mają tę samą amplitudę. Z tego powodu licznik Geigera-Müllera może być wykorzystywany tylko do detekcji promieniowania, bez rozróżnienia jego typu i energii.

Przykładowa charakterystyka napięciowa licznika Geigera-Müllera pokazana jest na rys. 3. Wyróżnić można napięcie progowe poniżej którego licznik nie rejestruje żadnych impulsów, napięcie początku plateau, czyli tzw. "kolano" oraz napięcie końca plateau.



Rys. 3. Przykładowa charakterystyka napięciowa licznika Geigera-Müllera z uwidocznionym napięciem progowym, czyli tzw „kolanem” oraz plateau.

Napięcie pracy licznika powinno być ustawione na środek plateau. W tym punkcie wahania napięcia zasilania nie zmieniały wyników pomiarów. Poniżej napięcia progowego i napięcia końca plateau liczba zliczeń będzie zależała od napięcia zasilania. Ponadto przy zbyt wysokich napięciach, większych od napięcia końca plateau w liczniku mogą powstawać wyładowania samorzutne i niegasnące uniemożliwiające wykonanie pomiaru.

Wydajność licznika Geigera-Müllera zależna jest od rodzaju i energii promieniowania jonizującego. Dla promieniowania korpuskularnego wynosi ona do 100%, przy czym zdolność do pomiarów cząstek α zależna jest od grubości okna pomiarowego. Wydajność pomiaru promieniowania γ zależy od energii padających na detektor fotonów i waha się od około 1 do 2%.

Licznik Geigera-Müllera można również wykorzystać do pomiaru stężenia aktywnościowego próbek, wyznaczając wydajność pomiarową dla konkretnego rodzaju próbki i geometrii pomiarowej. Aby wyznaczyć wydajność pomiarową należy dokonać pomiaru aktywności próbki o znanym stężeniu aktywnościowym i składzie identycznym jak próbka o nieznanym aktywności.

Aparatura i materiały

- Licznik Geigera-Müllera ABG-10
- Komputer
- Miernik elektroniczny

- Próbką o znanej aktywności
- Zestaw próbek o nieznanej aktywności

Instrukcja

Wyznaczenie napięcia pracy licznika

1. Na pulpicie komputera uruchom program ABG-10 i postępuj zgodnie z instrukcjami na ekranie.
2. W zakładce „Nastawy audio” ustaw filtr pasmowy w zakresie od 3000 do 3300 Hz.
3. W zakładce „Pomiary seryjne” ustaw czas trwania pomiaru na 200 sekund i ilość pomiarów serii na 1.
4. W zakładce „Tablica wyników” zaznacz „Zbieraj wyniki w tabeli”.
5. W zakładce „Pomiary seryjne” ustaw czas trwania pomiaru na 200 sekund i ilość pomiarów serii na 1.
6. Włącz miernik elektroniczny. Zwróć uwagę czy jest on ustawiony na pomiar napięcia prądu stałego w zakresie do 200 V.
7. Włącz licznik ABG-10 i potencjometrem na liczniku ustaw na mierniku najmniejsze możliwe napięcie, czyli około 250 V (na mierniku jest to wartość 25 V gdyż wyjście pomiaru napięcia licznika podłączone jest przez dzielnik napięcia zmniejszający wartość napięcia 10 razy).
8. Wejdź w zakładkę „Wskaźnik” i wykonaj pomiar tła w zadany czas 200 sekund poprzez naciśnięcie ikony START w prawym dolnym rogu programu. Liczbę zliczeń (N_t) z zakładki „Tablica” wyników zapisz w tabeli 1.
9. Połóż próbkę o znanej aktywności na oknie pomiarowym licznika. Wejdź w zakładkę „Wskaźnik” i wykonaj pomiar w czasie 200 sekund. Liczbę zliczeń (N_v) z zakładki „Tablica” i dokładną wartość napięcia odczytaną z miernika zapisz w tabeli 1.
10. Następnie wykonaj pomiary tła i próbki dla następujących napięć: 350, 400, 425, 450 i 485 V. Liczbę zliczeń dla tła (N_t) i próbki (N_v) oraz dokładną wartość napięcia zapisz w tabeli 1.
11. Ustal napięcie pracy licznika zgodnie z opisem w części „Opracowanie wyników”.

Pomiary aktywności próbek gleby

1. W czasie ćwiczenia wykorzystywane są próbki gleby z Bałkanów skażone uranem zubożonym w trakcie konfliktu zbrojnego w latach 90 XX wieku.
2. Ustaw wyznaczone w pierwszej części ćwiczenia napięcie pracy licznika.
3. W zakładce Pomiary seryjne ustaw czas trwania pomiaru na 200 sekund i ilość pomiarów serii na 3.

- Wykonaj 3 pomiary próbki „P” o znanej aktywności w zadany czasie 200 sekund i liczbę zliczeń (N_p) zapisz w tabeli 2.
- Wykonaj 3 pomiary próbek o nieznannej aktywności w zadany czasie 200 sekund i liczby zliczeń ($N_{1,2,3,4}$) zapisz w tabeli 2.

Opracowanie wyników do sprawozdania

Wyznaczenie napięcia pracy licznika

- Oblicz częstości zliczeń na sekundę netto (I_{V_netto}) dla poszczególnych wartości napięcia poprzez odjęcie częstości zliczeń tła (I_t) i wyniki zapisz w tabeli 1.

Tab. 2. Wyniki pomiarów dla poszczególnych napięć licznika

Napięcie [V]	N_t	I_t	N_V	N_{V_netto}	I_V	I_{V_netto}

- Wykreśl zależność między napięciem detektora w osi X i częstością zliczeń w osi Y posługując się programem Excel i ustal napięcie pracy licznika.

Pomiary aktywności próbek gleby

- Oblicz częstość zliczeń na sekundę (I_p) dla każdego pomiaru próbki o znanej aktywności i podaj wartość średnią ($I_{p_średnia}$) pomniejszoną o wartość tła z tabeli 1.
- Oblicz aktywność próbki „P” w Bq mnożąc stężenie aktywnościowe w Bq/kg przez masę próbki (stężenie aktywnościowe próbki „P” wynosi 30,1 kBq/kg a masa próbki to 50,1 g).
- Wyznacz, zgodnie z poniższym wzorem, wydajność pomiarową używając wyznaczonej aktywności próbki „P” w Bq (A_p). Wyniki zapisz w tabeli 3.

$$\varepsilon_{pomiaru} = \frac{I_p - I_t}{A_p} \quad (1)$$

3. Oblicz częstość zliczeń na sekundę ($I_{1,2,3,4}$) dla każdego pomiaru próbki o nieznanej aktywności i podaj wartość średnią ($I_{1,2,3,4_średnia}$) pomniejszoną o wartość tła z tabeli 1 oraz oblicz ich aktywność w kBq/kg, zgodnie z poniższym wzorem, znając masy próbek w gramach. Wyniki zapisz w tabeli 3

$$A_{1,2,3,4} = \frac{I_{1,2,3,4_średnia} - I_t}{m \cdot \epsilon_{pomiaru}} \quad (2)$$

gdzie:

m – masa próbki gleby w kg

Tab. 2. Wyniki pomiarów próbek gleby

Próbka	N (liczba zliczeń)			I (częstość zliczeń/s)			A [kBq/kg]	m [g]	$\epsilon_{pomiaru}$
P							30,1	-	
1								49,8	-
2								50,1	-
3								50,2	-
4								49,9	-

4. Tabele z danymi i obliczenia wyślij do prowadzącego w postaci sprawozdania.

Literatura

1. J. Sobkowski, M. Jelińska-Kazimierczuk, Chemia Jądrowa, ADAMANTAN 2006
2. J.B. England, Metody Doświadczalne Fizyki Jądrowej, PWN Warszawa 1980.

Ćwiczenie 14

Dobór optymalnych parametrów pracy licznika scyntylacyjnego

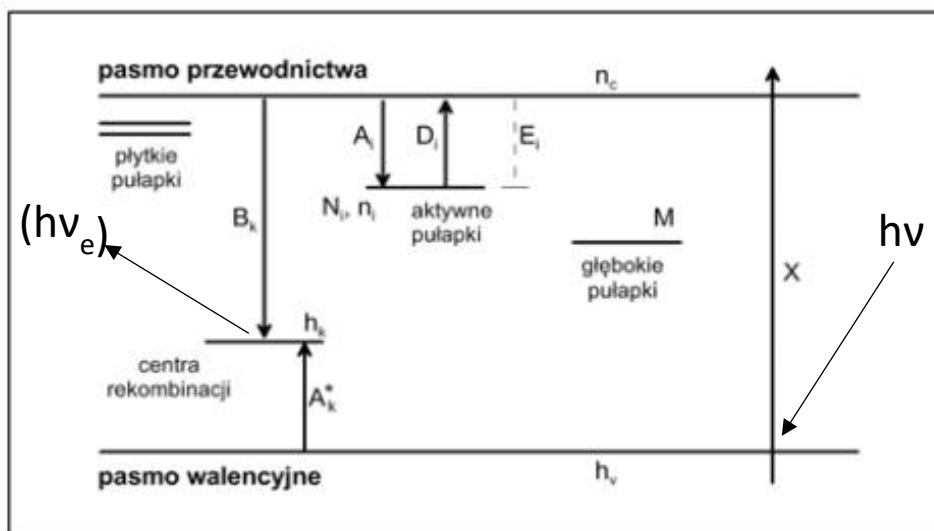
Cel

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady działania licznika scyntylacyjnego NaI(Tl) poprzez wyznaczenie optymalnego napięcia pracy licznika.

Wprowadzenie

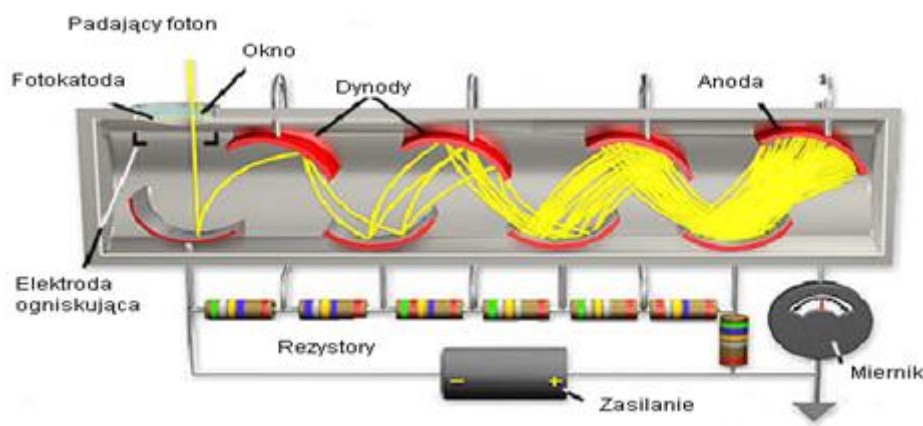
Oddziaływanie promieniowania jądrowego z materią (jonizacja i wzbudzenie) dają podstawę jego wykrywania i pomiaru. Liczba jonizacji lub wzbudzenia w ośrodku powinna być proporcjonalna do liczby cząstek lub kwantów docierających do jego objętości. Pod wpływem pola elektrycznego, utworzone pary nośników ładunku elektrycznego dają krótkie impulsy prądowe, które mogą być zliczane przez odpowiednio przystosowane urządzenia elektroniczne.

Jednym z najczęściej wykorzystywanych typów detektorów promieniowania jonizującego są liczniki scyntylacyjne zbudowane z kryształów np. NaI(Tl) lub ZnS(Ag). Wykorzystują one zdolność niektórych substancji do szybkiej dezaktywacji, po wzbudzeniu na skutek oddziaływania promieniowania jonizującego. W przypadku scyntylatorów, dezaktywacja następuje poprzez emisję kwantu promieniowania elektromagnetycznego w zakresie UV lub widzialnym. Proces ten nazywany jest fluorescencją, który obok fosforescencji jest szczególnym przypadkiem luminescencji (czas trwania fluorescencji to $10^{-9} - 10^{-5}$ s, natomiast fosforescencji to $> 10^{-8}$ s). Jeśli wzbudzenie materii następuje wskutek działania promieniowania jonizującego, mówimy o radioluminescencji. W fazach gazowych i ciekłych mechanizm radioluminescencji można przedstawić za pomocą diagramów Jabłońskiego, wiedząc, że bezpośrednie przejścia promieniste między wzbudzonym a podstawowym stanem singletowym odpowiada fluorescencji, natomiast przejście bezpromieniste między wzbudzonym a podstawowym stanem singletowym poprzez stan trypletowy, fosforescencji. W przypadku ciał stałych (kryształów) należy stosować pasmową teorię ciała stałego (Rys. 1). Padający kwant promieniowania $h\nu$ powoduje przejście elektronu z pasma walencyjnego (podstawowego) do pasma przewodnictwa. Między tymi pasmami znajduje się strefa wzbroniona, gdzie dla idealnych kryształów nie ma dozwolonych poziomów energii elektronów. W praktyce, wskutek obecności zanieczyszczeń lub defektów w sieci krystalicznej, w pobliżu pasma przewodnictwa pojawiają się poziomy energetyczne tzw. pułapki elektronowe. W detektorach scyntylacyjnych dozwolone poziomy energetyczne są tworzone sztucznie (centra rekombinacji lub centra luminescencji) poprzez dodanie do kryształu jonowego kationów niektórych metali ciężkich np. Tl do NaI. Swobodny elektron z pasma przewodnictwa może być schwytyany przez centrum rekombinacji z równoczesną emisją fotonu ($h\nu$)_e (fluorescencja) lub przez pułapkę, w której przebywa przez określony czas aż do przechwycenia porcji energii umożliwiającej mu powrót do pasma przewodnictwa i następnie opóźnione przejście do centrum rekombinacji (fosforescencja). W detektorach promieniowania jonizującego fosforescencja jest efektem niepożądanym. Idealny scyntylator powinien emitować fotony w zakresie fale ok 400 nm, dla których prawdopodobieństwo wybitcie fotoelektronu z fotokatody jest najwyższe.



Rys.1. Zjawisko radioluminescencji w kryształach jonowych (Mandowska i in., Przegląd Elektrochemiczny, R. 95 NR 9/2019).

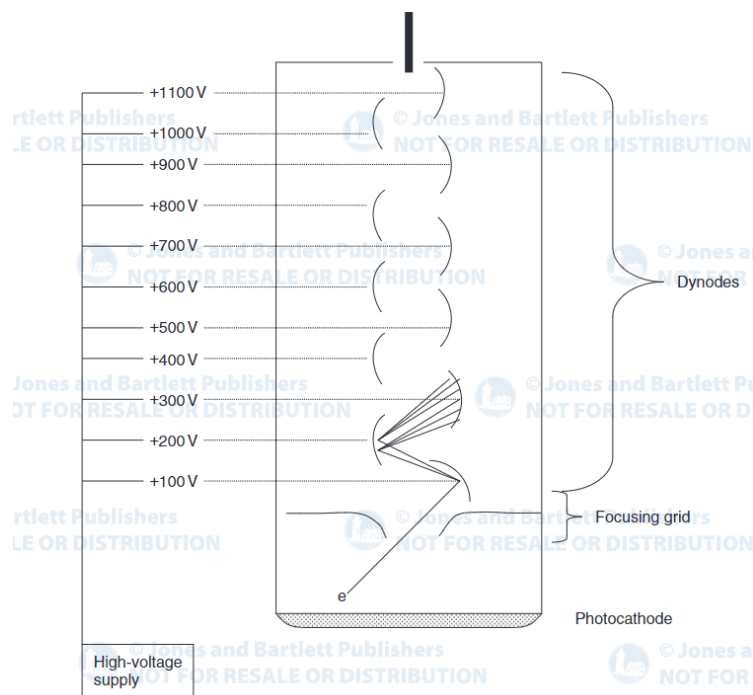
Ilość fotonów powstałych wskutek oddziaływania promieniowania jonizującego z kryształami scyntylatora powinna być proporcjonalna do energii padającego kwantu/cząsteczki promieniowania jonizującego (np. kwant promieniowania gamma o energii 20 keV wyemituje 5 razy mniej fotonów świetlnych niż kwant o energii 100 keV). Jeśli policzymy ilość wyemitowanych fotonów światła, jesteśmy w stanie określić energię padającego kwantów/cząsteczki promieniowania jonizującego.



Rys. 2. Schemat fotopowielacza (<https://www.olympus-lifescience.com/es/microscope-resource/primer/digitalimaging/concepts/photomultipliers/>)

Kolejnym etapem analizy jest konwersja wyemitowanych fotonów ze scyntylatora na sygnał elektroniczny. Ten proces wykonywany jest przy użyciu fotopowielacza (Rys. 2). Fotokatoda będąc najbliższą kryształu scyntylacyjnego przekształca fotony scyntylacyjne w elektrony. Wykonana jest ona z bardzo cienkiej fotoemisyjnej warstwy materiału (tzn. emituje elektrony pod wpływem fotonów UV i światła widzialnego) np. dwualkalicznych związków antymonu K_2CsSb i Na_2KSb . Wytworzone fotony uderzają w fotokatodę i powodują emisję elektronów,

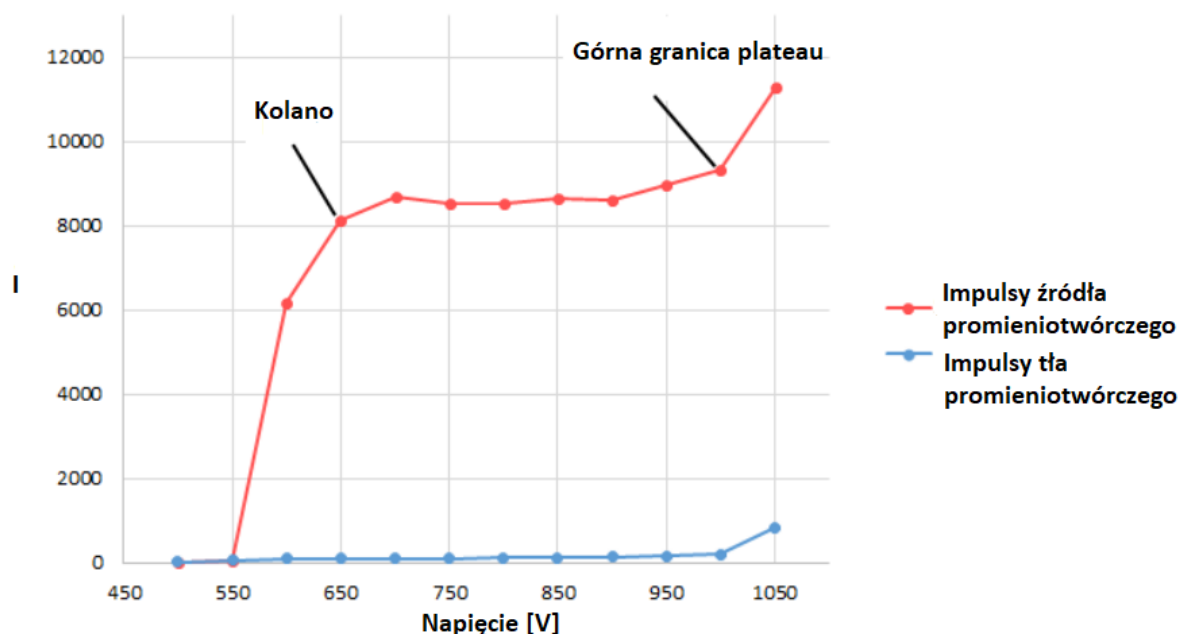
które są uwalniane do przestrzeni próżniowej fotopowielacza i są ogniskowane w kierunku pierwszej dynody. W fotopowielaczu musi być utrzymywana próżnia, aby żadne elektrony nie zostały utracone w wyniku interakcji z cząsteczkami powietrza. Dodatkowo fotopowielacz musi być również ekranowany przed wpływem pola magnetycznego, mogącego zmienić trajektorię elektronów. W dalszej części fotopowielacza znajduje się seria dynod, których zadaniem jest zwielokrotnienie niewielkiej liczby elektronów generowanych na fotokatodzie w mierzalny sygnał elektroniczny.



Rys. 3. Wysokość napięcia na kolejnych dynodach fotopowielacza.

Dynody wykonane są ze stopów metali cechujących się nadmiarem elektronów i są utrzymywane na dodatnich potencjałach elektrycznych, z których każdy jest wyższy od poprzedniego. Są zakrzywione lub ustawione tak, aby skierować emitowane elektrony w kierunku następnej dynody. Absorpcja jednego elektronu na dynodzie powoduje emisję od trzech do sześciu elektronów, w zależności od różnicy potencjałów między dynodą a dynodą. Elektrony uwolnione na każdej kolejnej dynodzie są przyspieszane w kierunku następnej dynody, ponownie z powodu różnicy potencjałów między dynodami. Proces obejmuje od 9 do 12 dynod, co daje łączny współczynnik mnożenia około miliona, wytwarzając niewielki, ale mierzalny sygnał elektroniczny. Ilość wtórnych elektronów generowanych w dynodzie zależy od energii pierwotnego elektronu, a więc od napięcia międzydynodowego, a całkowite wzmocnienie fotopowielacza od napięcia zasilania. Zasilanie wysokonapięciowe fotopowielacza określa różnicę potencjałów między dynodami, a tym samym ostateczną wielkość impulsu wyjściowego fotopowielacza. Zależność ta będzie tym silniejsza, im więcej dynod posiada fotopowielacz. Typowe napięcie pracy (jest to napięcie, przy którym układ osiąga maksymalną wydajność przy możliwie najmniejszej częstotliwości szumów) detektora scyntylacyjnego to około 1000 V lub więcej, z przyrostami co 100 V między dynodami (Rys. 3). Na koniec anoda zbiera wszystkie elektrony wytworzone z końcowej dynody i emituje sygnał napięcia wyjściowego. Detektory scyntylacyjne są bardzo wrażliwe na zmiany

wysokiego napięcia; 1% zmiana wysokiego napięcia skutkuje 10% zmianą wielkości mierzonego na anodzie impulsu. W związku z tym zasilanie wysokiego napięcia musi być stabilne i dobrze wyregulowane a ustawienie napięcia pracy fotopowielacza regularnie sprawdzane i dobierane względem zastosowanej dyskryminacji analizatora i energii promieniowania mierzonego źródła promieniotwórczego. W ten sposób, poprzez poznanie charakterystyki napięciowej fotopowielacza, istnieje możliwość odpowiedniego dobrania napięcia pracy licznika. Zbyt niskie napięcie pracy fotopowielacza zmniejszy efektywność detektora. W miarę zwiększania napięcia, liczba zliczeń będzie rosła, aż do osiągnięcia plateau (Rys. 4). Dalsze zwiększanie napięcia nie będzie powodowało już zauważalnych zmian w ilości zliczeń, aczkolwiek gwałtownie będzie rosła częstość szumów.



Rys. 4. Zależność między liczbą impulsów źródła promieniotwórczego oraz tła promieniotwórczego licznika scyntylacyjnego (oś Y) a wysokością napięcia fotopowielacza (oś X).

Wyznaczenie plateau pozwala ustalić napięcie pracy detektora. Zwykle za napięcie pracy przyjmuje się wartość znajdującą się po środku plateau. Licznik można uznać za dobry gdy nachylenie plateau nie jest większe od 3 % na 100 V. Nachylenie plateau wyznacza się używając wzoru:

$$\eta = \frac{\frac{I_2 - I_1}{I_p}}{\frac{U_2 - U_1}{100}} \cdot 100\% \quad (1)$$

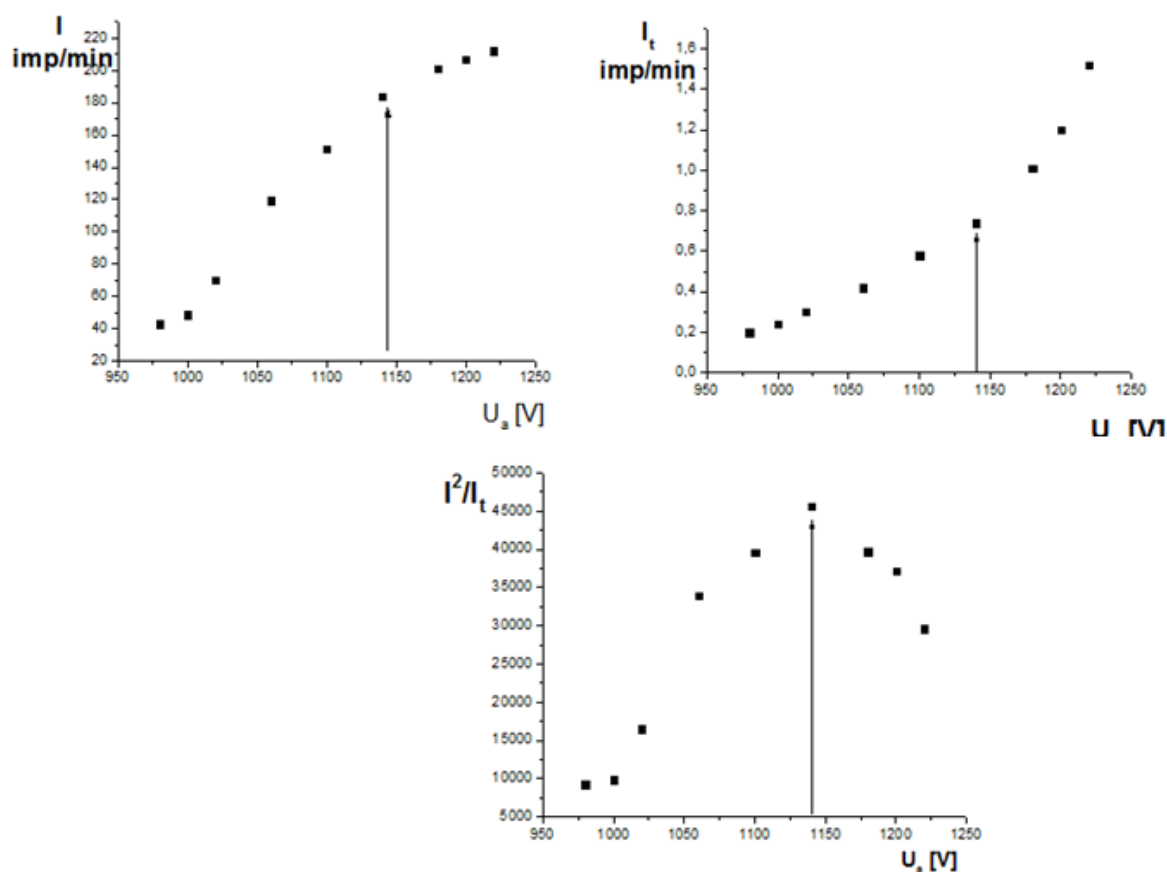
gdzie:

I_1 i U_1 – częstość zliczeń źródła przy napięciu początku plateau i wartość napięcia początku plateau;

I_2 i U_2 – częstość zliczeń źródła przy napięciu końca plateau i wartość napięcia końca plateau;

I_p – częstość zliczeń na środku plateau.

Dokładniejsze napięcie pracy licznika można określić wykreślając krzywą dobroci sondy scyntylacyjnej. Jak wspomniano wcześniej, wielkość tła bardzo silnie zależy od przyłożonego napięcia anodowego. Wariacja względna pomiaru źródła i tła osiągnie minimum jeśli wartość stosunku I_t/I^2 (gdzie I_t to częstość zliczeń tła promieniotwórczego, a I to częstość zliczeń źródła promieniotwórczego) również osiągnie minimum, a jego odwrotność tj. I^2/I_t osiągnie wtedy maksimum (Rys. 5). Jest to zasadnicze kryterium doboru optymalnych parametrów pracy liczników scyntylacyjnych.



Rys. 5. Wybór optymalnego napięcia anodowego U_a dla licznika scyntylacyjnego (Bem H., Bem E. Ćwiczenia laboratoryjne z zagrożeń radiacyjnych w środowisku i z radioekologii, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa w Kaliszu, 2014).

Aparatura i materiały

- Sonda scyntylacyjna NaI(Tl) z radiometrem RUM-2
- Komputer
- Źródło zamknięte ^{137}Cs

Instrukcja

Włączenie aparatury i pomiar tła

1. Podłącz do sieci zasilacz radiometru. Zwróć uwagę czy radiometr jest połączony z komputerem przewodem USB i czy na radiometrze podświetlone są diody ZASILANIE i SYNCHRONIZACJA. Jeśli tak, włącz komputer i z pulpitu uruchom program RUM-2.
2. Postępuj zgodnie z wyświetlanymi instrukcjami: wybierz kolejno sondę SSU-70, połączenie przez Uniwersalną Magistralę Szeregową (USB) a następnie z rozwijanej listy wybierz dostępną sondę i kliknij POŁĄCZ i DALEJ.
3. W zakładce „Wysokie napięcie” zmień limit bezpieczeństwa napięcia na 1300 V, ustaw napięcie na 600 V i zaznacz „Zasilacz wysokiego napięcia włączony”. W tym momencie powinna podświetlić się informacja „Włączone zasilanie” a na wykresie widać będzie wzrost napięcia fotopowielacza. Poczekaj aż podświetli się informacja „Napięcie stabilne”.
4. W zakładce „Nastawy” zaznacz „Skanuj ciągle”, ustaw poziom wyzwalania na 100 mV, wzmocnienie na 0,3, zaznacz okienko „Automatycznie” i „Włącz zasilacz 24V”. Na podglądzie amplitudy sygnałów powinny być widoczne impulsy tła.
5. W zakładce „Tryb pomiaru” wybierz moduł pomiarowy „Szybki licznik”, odhacz „Pomiar ciągły”, zaznacz „Włącz zadania między pomiarami”, wybierz zadanie „Zmień wys.napięcie o 25,0 [V]” oraz „Czekaj 30 [s]” i potwierdź naciskając przycisk „Wykonaj”. Ustaw ilość pomiarów w serii na 28 i czas trwania pomiaru 150 sekund.
6. Wejdź w zakładkę „Licznik” i w zakładce „Tabela” zaznacz „Zbieraj w tabeli”.
7. W prawym dolnym rogu ekranu naciśnij przycisk „start”. W tym momencie rozpocznie się seria 28 pomiarów tła dla różnych napięć fotopowielacza.

Pomiar napięcia pracy licznika dla źródła ^{137}Cs

1. W zakładce „Wysokie napięcie” ustaw napięcie na 600 V i potwierdź klawiszem Enter na klawiaturze. Odczekaj aż napięcie się ustabilizuje, co zostanie potwierdzone podświetloną informacją „Napięcie stabilne”.
2. W zakładce „Tryb pomiaru” ustaw ilość pomiarów w serii na 28 i czas trwania pomiaru 60 sekund.
3. Pobierz od Prowadzącego źródło zamknięte ^{137}Cs i umieść pod sondą scyntylacyjną.

4. W prawym dolnym rogu ekranu naciśnij przycisk „start”. W tym momencie rozpocznie się seria 25 pomiarów źródła promieniotwórczego dla różnych napięć fotopowielacza.
5. Wyniki z zakładki „Tabela” zapisz jako plik ODS skopiuj do programu Excel.

Wyznaczenie napięcia pracy licznika

1. Od każdej wartości częstości zliczeń dla danej wartości napięcia, odejmij odpowiadającą mu wartość częstości zliczeń tła promieniotwórczego.
2. Wykreśl zależności $I_t = f(U_A)$ oraz $I = f(U_A)$.
3. Określ wartości napięcia dla początku i końca plateau dla funkcji $I = f(U_A)$
4. Oblicz nachylenie plateau zgodnie z wzorem (1) ze wstępu teoretycznego.
5. Dla zakresu napięć plateau wykreśl zależności $I^2/I_t = f(U_A)$, $I_t = f(U_A)$ oraz $I = f(U_A)$.
6. Na podstawie wykresu dobroci licznika z punktu 4 określ napięcie pracy licznika (podobnie jak na Rys.5) i porównaj je z napięciem wyznaczonym z plateau.
7. W sprawozdaniu zamieść: opis dlaczego należy wyznaczać napięcie pracy licznika scyntylacyjnego, tabelę z wynikami, obliczenia, wykresy oraz wnioski.

Literatura

1. J. Sobkowski, M. Jelińska-Kazimierczuk, Chemia Jądrowa, ADAMANTAN 2006
2. J.B. England, Metody Doświadczalne Fizyki Jądrowej, PWN Warszawa 1980.

Ćwiczenie 15

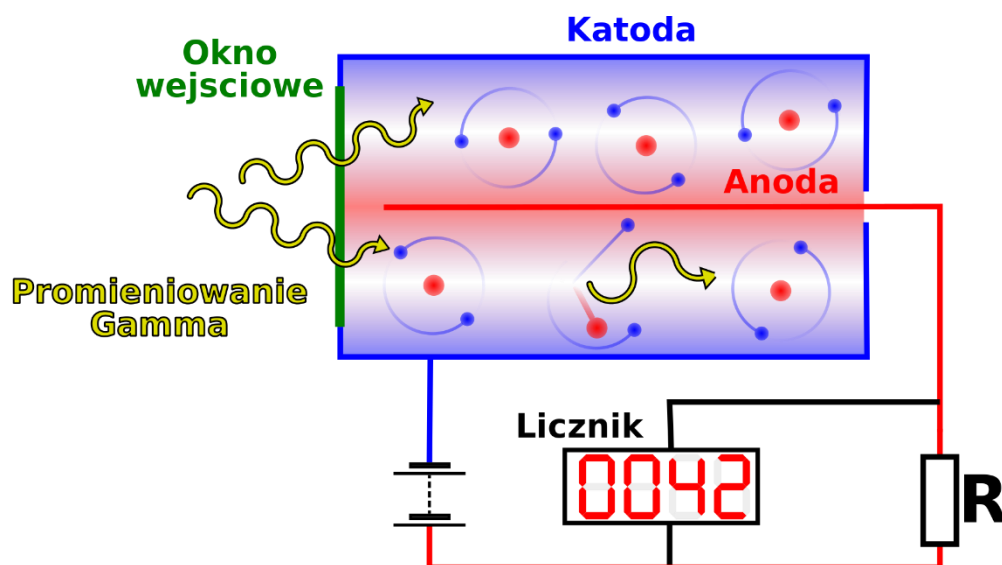
Wyznaczenie czasu martwego licznika Geigera-Müllera metodą dwóch źródeł oraz przy użyciu oscyloskopu

Cel

Celem ćwiczenia jest poznanie zasady działania licznika Geigera-Müllera poprzez wyznaczenie czasu martwego z użyciem dwóch metod, porównanie uzyskanych wyników oraz wprowadzenie poprawki na czas martwy do uzyskanych wyników.

Wprowadzenie

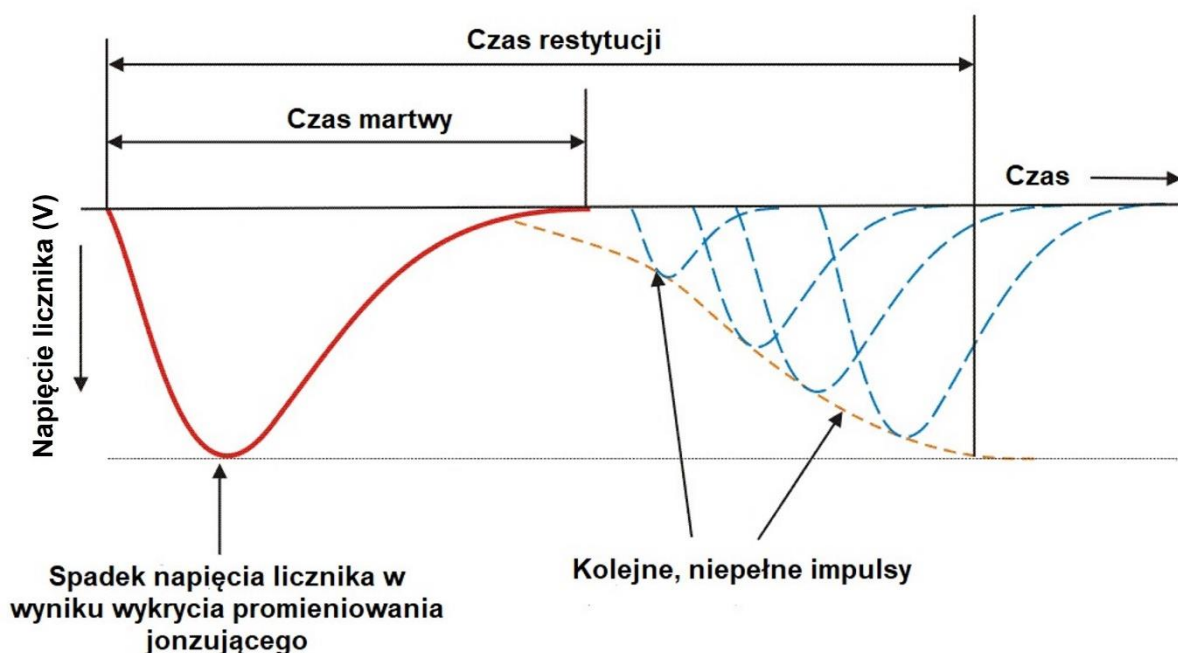
Licznik Geigera-Müllera (rys. 1) jest sondą gazową, która umożliwia pomiar promieniowania γ oraz w niektórych przypadkach cząstek naładowanych, czyli promieniowania α i β . Wewnątrz obudowy licznika znajduje się cylindryczna katoda i umieszczona w jej osi anoda zwykle wykonana z wolframowego drutu. Wnętrze szczelnego licznika wypełnione jest gazem (np. argon, neon, hel lub krypton) pod wysokim ciśnieniem (do 27 kPa). W zależności od typu licznika, pomiędzy elektrodami przykłada się wysokie napięcie rzędu od 300 do 1500 V. Różnica potencjałów pomiędzy elektrodami powoduje powstanie silnego pola elektrycznego.



Rys. 1. Schemat licznika Geigera-Müllera
(https://pl.wikipedia.org/wiki/Licznik_Geigera)

Kwant γ lub cząsteczka naładowana wpadając do objętości czynnej licznika powoduje jonizację atomów gazu. Powstałe w wyniku jonizacji wolne elektrony i dodatnie jony gazu przyspieszane są w polu elektrycznym. Jony dodatnie kierują się w stronę elektrody ujemnej (katody), czyli ścianek tuby natomiast wolne elektrony w kierunku elektrody dodatniej (anody). Przyspieszane elektrony zderzają się z kolejnymi atomami gazu wywołując ich jonizację.

Powstaje proces lawinowy zwany wyładowaniem lawinowym lub lawiną Townsenda. Dodatkowo, wzbudzone atomy gazu mogą emitować promieniowanie UV, które wybijały fotoelektrony z ujemnej katody (efekt fotoelektryczny). Fotoelektrony te są rozpędzane w polu elektrycznym jonizując lub wzbudzając kolejne atomy gazu. Podobnie zachowują się dodatnie jony gazu, które po dotarciu do katody, również wybijają z niej elektrony. Wyładowanie lawinowe powoduje chwilowy przepływ prądu jonowego pomiędzy anodą i katodą tuby. W obwodzie zamkniętym rezystorem objawia się to chwilowym spadkiem napięcia. Impulsy te są zliczane i po każdym z nich napięcie musi powrócić do wartości sprzed wyładowania lawinowego. Czas ten nazywany jest czasem martwym detektora. Występuje on kiedy trwa wyładowanie (tzn. zliczany jest impuls) wywołane przejściem przez licznik pierwszej cząstki promieniowania. Jeśli w tym czasie pojawi się kolejny kwant lub cząstka promieniowania jonizującego, ilość wytworzonych par jonów gazu i elektronów będzie mniejszy niż przy wyładowaniu pierwotnym. W efekcie ich wkład do wystąpienia nowego impulsu jest niewielki. Dopiero pod koniec trwania impulsu pierwotnego napięcie licznika powraca do stanu pierwotnego i może dojść do zliczenia kolejnego impulsu. Tym samym czas martwy to czas trwania pierwszego impulsu do momentu, kiedy możliwe jest pojawienie się kolejnego impulsu. Konstruując licznik dokłada się starań, aby odległość katody do anody była jak najkrótsza. Wyróżnia się również czas restytucji, czyli czas w którym licznik jest zdolny zarejestrować w pełni rozwinięty impuls (Rys. 2).



Rys. 2. Czas martwy i restytucji licznika Geigera-Müllera
(https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dead_time_of_geiger_muller_tube.png).

Jeśli przewidujemy szybkość zliczania I_0 ze źródła promieniotwórczego, to obecność koincydencji będzie oznaczać, że częstość zliczeń I , którą faktycznie mierzymy będzie

mniejsza niż wartość oczekiwana ($I < I_0$). Jeśli licznik Geigera-Müllera posiada czas martwy T , to równanie na rzeczywistą częstość zliczeń I_0 można zapisać jako:

$$I_0 = I + I \cdot I_0 T \quad (1)$$

a tym samym wzór na I_0 z poprawką na czas martwy T można zapisać jako:

$$I_0 = \frac{I}{1 - I \cdot T} \quad (2)$$

Jedną z metod wyznaczenia czasu martwego licznika Geigera-Müllera jest użycie oscyloskopu. Podłączając oscyloskop bezpośrednio do wyjścia przedwzmacniacza licznika możemy obserwować pierwszy impuls związanym ze spadkiem napięcia na anodzie licznika oraz kolejne impulsy rejestrowane przez licznik przed zakończeniem czasu trwania pierwszego impulsu.

Czas martwy T można też wyznaczyć stosując metodę dwóch źródeł lub odczytać z oscyloskopu. W metodzie dwóch źródeł prowadzi się pomiar dwóch połówek źródła i rejestruje się częstość zliczeń I_1 , I_2 oraz częstość zliczeń tła promieniotwórczego I_B . Uzyskane wyniki porównuje się z częstością zliczeń dla obu źródeł razem I_3 . Oczekujemy, że:

$$(I_1 - I_B) + (I_2 - I_B) = (I_3 - I_B) \quad (3)$$

A stąd, że:

$$I_1 + I_2 = I_3 + I_B \quad (4)$$

Łatwo wykazać, że w rzeczywistości:

$$I_1 + I_2 > I_3 + I_B \quad (5)$$

Wyższa częstość zliczeń dla pomiaru dwóch połówek źródła razem zwiększa prawdopodobieństwo "gubienia" impulsów w związku z istnieniem czasu martwego licznika.

Zakładając, że do wszystkich pomiarów wprowadzono poprawkę na czas martwy można zapisać, że:

$$\frac{I_1}{1 - I_1 T} + \frac{I_2}{1 - I_2 T} = \frac{I_3}{1 - I_3 T} + \frac{I_B}{1 - I_B T} \quad (6)$$

Ponieważ czas martwy T jest zwykle wyrażany w mikrosekundach, T^2 może pominąć jako liczbę bardzo małą. Po tym uproszczeniu, rozwiązując równanie na czas martwy T otrzymujemy:

$$T = \frac{2 \cdot (I_1 + I_2 - I_3 - I_B)}{(I_1 + I_2) \cdot I_3} \quad (7)$$

Aparatura i materiały

- Licznik Geigera-Müllera oraz radiometr ST365B
- Komputer
- Źródło zamknięte ^{204}Tl (trzy połówki)
- Oscyloskop

Instrukcja

Włączenie aparatury i pomiar tła

1. Sprawdź czy komputer, monitor, licznik oraz oscyloskop są podłączone do prądu, uruchom komputer, oraz licznik ST365B poprzez naciśnięcie przycisku „POWER”. Z poziomu Pulpitu komputera uruchom program ST365.
2. W panelu głównym programu wybierz „ST MODELS”, w okienku „Select Local USB Device” wybierz „st365b sn0211, COM3” i naciśnij „Connect”.
3. W panelu głównym programu wybierz „ST SETUP” i w okienku „Set High Voltage [0 – 1200]” wpisz 900. Potwierdź naciskając „OK”.
4. W panelu głównym programu, po prawej stronie pojawi się podświetlone na czerwono „900 volts” oraz „Off”. Naciśnij „Off”, które powinno zmienić się na „On” a podświetlenie zmieni się na kolor zielony.
5. W menu poniżej „900 volts” wybierz „Number of Runs” – 10 oraz „Preset Time” – 60 sekund.
6. U góry programu naciśnij „Start Counts” (zielony diament) i rozpocznij serię pomiarów tła dla najwyższej wysokości półki.

Pomiar czasu martwego metodą dwóch źródeł

1. Ilość pomiarów („Number of Runs”) ustaw na 1 a czas pomiaru („Preset Time”) na 120 sekund.
2. Poproś Prowadzącego o wydanie źródła ^{204}Tl (trzy połówki dysku – dwie ze źródłem promieniotwórczym, jedna pusta).
3. Na najwyższej półce pod licznikiem połóż naklejką w dół jedną połówkę źródła opisanego ^{204}Tl oraz drugą połówkę opisaną „Blank Disk”. Zapamiętaj orientację źródeł. Ważne jest aby pozostała ona taka sama we wszystkich następnych pomiarach! Rozpocznij pomiar naciskając zielony diament „Start Counts”. Program zapyta czy zapisać poprzednie dane. Odpowiedz Nie i rozpocznij serię pomiarów pierwszego źródła ^{204}Tl (I_1).

4. Po zakończeniu pierwszego pomiaru, zamień pustą połówkę dysku „Blank Disc” na drugie źródło ^{204}TI (I_2), pierwsze źródło ^{204}TI (I_1) pozostaw w tym samym miejscu (pamiętaj o orientacji źródeł!). Rozpocznij pomiar dwóch źródeł ^{204}TI razem (I_3).
5. Po zakończeniu drugiego pomiaru, zamień pierwszą połówkę źródła ^{204}TI (I_1) (zmierzoną w punkcie 4) na pustą połówkę „Blank Disc”. Drugie źródło ^{204}TI (I_2), pozostaw w tym samym miejscu (pamiętaj o orientacji źródeł!). Rozpocznij pomiar drugiego źródła ^{204}TI (I_2).
6. Czynności zawarte w punktach 3, 4 i 5 wykonaj dziesięciokrotnie dla najwyższej wysokości półki.
7. Czynności zawarte w punktach 3, 4 i 5 wykonaj dziesięciokrotnie używając 2 półki od góry.
8. Usuń źródła spod licznika i umieść w plastikowym pudełku naklejką do góry.
9. Otrzymane wyniki skopiuj do programu Excel.

Pomiar czasu martwego oscyloskopem

1. Uruchom oscyloskop poprzez wciśnięcie przycisku POWER.
2. Na ekranie oscyloskopu powinien pojawić się wykres napięcia (oś Y) w funkcji czasu (oś X).
3. Zwróć uwagę czy na dole ekranu oscyloskopu wyświetlona jest na żółto (dla kanału 1) stała napięciowa 200 mV, co oznacza że na osi Y jedno oczko siatki oscyloskopu ma wartość 200 mV. Jeśli tak nie jest, wyreguluj stałą napięciową używając oznaczonego na żółto (kanał 1) pokrętła VOLTS/DIV.
4. Obok powinna być podana podstawa czasu 100 μs , co oznacza że na osi X jedno oczko siatki oscyloskopu ma wartość 100 μs . Jeśli tak nie jest wyreguluj podstawę czasu używając pokrętła TIME/DIV.
5. Na oscyloskopie naciśnij przycisk DISPLAY i sprawdź czy w menu po prawej stronie ekranu jest włączona Akumulacja sygnału (oznaczona jako Akumulacj. Wł. lub Wył.).
6. Na najwyższej półce pod licznikiem połóż jedno ze źródeł ^{204}TI i naciśnij na oscyloskopie przycisk Run/Stop. Powinna rozpocząć się akumulacja sygnału z licznika wynikającego ze spadku napięcia na anodzie tak, jak na Rys. 2 (sygnał w oscyloskopie jest odwrócony dla ułatwienia odczytu czasu martwego). Akumulację sygnału prowadź przez minutę i ponownie naciśnij przycisk Run/Stop.
7. Następnie naciśnij przycisk CURSOR. Na ekranie oscyloskopu powinno pojawić się nowe menu Źródło: KANAŁ 1. Odpowiednim przyciskiem zaznacz X1 i pokrętłem VARIABLE naprowadź ciągłą żółtą linię na początek zakumulowanego piku spadku napięcia. Następnie naciśnij przycisk przy X2 i naprowadź ciągłą żółtą linię na początek

kolejnych pików sygnału, które zakumulowały się po prawej stronie (podobnie jak na rysunku 2).

8. Na ekranie oscyloskopu, przy X1X2 odczytaj wartość Δ (Δt), która stanowi różnicę między oznaczonymi punktami X1 i X2, a tym samym jest wartością czasu martwego licznika Geigera-Müllera. Spisz wartość Δ .
9. Przeprowadź pomiar pięciokrotnie, rozpoczynając ponownym naciśnięciem przycisku Run/Stop.
10. Czynności zawarte w punktach 6, 7 i 8 wykonaj pięciokrotnie używając 2 półki od góry.
11. Usuń źródło spod licznika, umieść w plastikowym pudełku naklejką w dół i wyłącz oscyloskop.

Opracowanie wyników

1. Oblicz częstości zliczeń tła oraz pomiarów źródła ^{204}Tl , dzieląc liczbę zliczeń przez czas trwania pomiaru.
2. Oblicz średnią wartość częstości zliczeń tła promieniotwórczego dla obu wysokości półek i odejmij ją od wartości częstości zliczeń dla wszystkich przeprowadzonych pomiarów źródła ^{204}Tl na odpowiednich półkach.
3. Używając wzoru (7) oblicz w μs czasy martwe dla dziesięciu serii pomiarowych przeprowadzonych dla obu wysokości półek.
4. Wyznacz wartości średnie czasu martwego wraz z odchyleniem standardowym, zarówno dla metody dwóch źródeł, jak i oscyloskopu.
5. Wyznaczone wartości średnie czasów martwych porównaj z wartościami otrzymanymi w oscyloskopie i oblicz błąd względny w %.
6. Wprowadź poprawkę na czas martwy dla wszystkich otrzymanych wartości częstości zliczeń dla pomiarów źródeł ^{204}Tl (po odjęciu tła promieniotwórczego) używając wzoru (2). Pamiętaj, że częstość zliczeń jest podawana na sekundę a czas martwy w μs .
7. Posiadając wartości częstości zliczeń przed i po poprawce dla wszystkich pomiarów, oblicz procentowe straty częstości zliczeń wskutek występowania czasu martwego licznika Geigera-Müllera.
8. W sprawozdaniu zamieść: krótki opis dlaczego należy wyznaczać czas martwy licznika Geigera-Müllera, wszystkie wyniki pomiarów w postaci tabel, obliczenia oraz wnioski.

Literatura

1. J. Sobkowski, M. Jelińska-Kazimierczuk, Chemia Jądrowa, ADAMANTAN 2006
2. J.B. England, Metody Doświadczalne Fizyki Jądrowej, PWN Warszawa 1980.