

# Reakcje jądrowe ( $n, \gamma$ )

Monika Kubek

Numer indeksu: 270018

Pomiary przeprowadzono dnia 12 V 2017 na II Pracowni Fizycznej Wydziału Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika. Celem doświadczenia była analiza reakcji jądrowych  $^{107}\text{Ag}(n, \gamma)^{107}\text{Ag}$  oraz  $^{109}\text{Ag}(n, \gamma)^{110}\text{Ag}$ . A także wyznaczenie średnich czasów rozpadu nuklidów promieniotwórczych srebra w przypadku małej liczby obserwowanych rozpadów.

## I. WSTĘP TEORETYCZNY

Promieniotwórczość to zjawisko samorzutnego rozpadu jąder połączone z emisją cząstek beta, cząstek alfa, promieniowania gamma. Na przemianę jądra nie mają wpływu czynniki zewnętrzne takie jak: temperatura, pole magnetyczne czy skupienie materiału promieniotwórczego.

Promieniotwórczość naturalna to promieniowanie pochodzące z samorzutnych rozpadów jądrowych w środowisku. Przemianom ulegają izotopy występujące naturalnie w przyrodzie. Promieniotwórczość sztuczna to zjawisko promieniotwórczości obserwowane dla izotopów promieniotwórczych innych niż występujące naturalnie, otrzymanych najczęściej w wyniku przemian izotopów stabilnych i zewnętrzną ingerencję w ich strukturę. Jądra atomów pierwiastków trwałych zawierają korzystną energetycznie liczbę protonów i neutronów. Pierwiastki takie albo nie ulegają przemianom jądrowym, albo proces ich rozpadu jest powolny. Takie jądra można wyprowadzić ze stanu stabilnego przez zmianę stosunku neutronów do protonów. Wzbudzone jądra dążą do uzyskania bardziej korzystnej konfiguracji, stają się więc promieniotwórcze. Wyróżniamy trzy rodzaje przemian jądrowych.

Rozpad  $\alpha$  to samorzutny proces emisji z wnętrza jądra cząstki  $\alpha$ , która składa się z dwóch protonów i dwóch neutronów, czyli jest jądrem pierwiastka – helu  $^4_2\text{He}$ . Można go ogólnie zapisać

$$^A_Z X \rightarrow ^{A-4}_{Z-2} Y + ^4_2 \text{He} + E, \quad (1)$$

widzimy, że w przemianie  $\alpha$  liczba masowa  $A$  jądra zmniejsza się o 4, a liczba atomowa  $Z$  zmniejsza się o 2. Wskutek tej przemiany część energii wiązania jądra zamienia się w energię kinetyczną cząstki  $\alpha$ . Energia wyzwolona wskutek różnicy mas jąder początkowego i końcowego stanowi głównie energię kinetyczną cząstki  $\alpha$ .

Rozróżniamy dwie wersje przemiany  $\beta$ : przemianę  $\beta^-$  oraz przemianę  $\beta^+$ . Pierwsza polega na samorzutnej emisji z wnętrza jądra elektronu  $e^-$ , a druga pozytonu  $e^+$ . Pozyton jest trwałą cząstką antymaterii, antycząstką elektronu o takiej samej masie, ale przeciwnym ładunku elektrycznym. W oddziaływaniu z elektronem pozyton ulega anihilacji i obie te cząstki zamieniają się w dwa kwanty promieniowania elektromagnetycznego. Elektronowi towarzyszy emisja antyneutrino  $\bar{\nu}$ , natomiast pozytonowi emisja neutrino  $\nu$ . W przemianie  $\beta$  liczba masowa jądra się nie zmienia, a liczba atomowa zmniejsza się lub

zwiększa o 1. Rozpad ten możemy przedstawić następująco

$$\beta^- : ^A_Z X \rightarrow ^A_{Z+1} Y + e^- + \bar{\nu} + E \quad (2)$$

$$\beta^+ : ^A_Z X \rightarrow ^A_{Z-1} Y + e^+ + \nu + E. \quad (3)$$

Przemianie  $\beta^-$  podlegają te jądra atomowe, które mają nadmiar neutronów w stosunku do jąder stabilnych o tej samej liczbie masowej. Z kolei przemianie  $\beta^+$  podlegają takie jądra, które mają nadmiar protonów w stosunku do jąder stabilnych o tej samej liczbie masowej.

W przemianie  $\gamma$  z wnętrza jądra atomowego emitowane są fotony, czyli kwanty promieniowania elektromagnetycznego. Przemiana  $\gamma$  jest na ogół następstwem przemiany  $\alpha$  lub  $\beta$ . Jądro powstałe w wyniku tych przemian znajduje się najczęściej w stanie wzbudzonym, a nadwyżkę energii może wypromieniować w postaci kwantu promieniowania gamma. W przemianie  $\gamma$  nie zmieniają się liczba masowa jądra i liczba atomowa. Zmienia się natomiast stan wzbudzenia jądra. Przejście ze stanu wzbudzonego do podstawowego odbywa się etapami. Następuje emisja jednego lub więcej kwantów gamma – jądro emituje kilka fotonów jeden po drugim, w bardzo krótkich odstępach czasu przechodząc po każdej emisji do stanu coraz mniej wzbudzonego. Zapis przemiany przyjmuje postać

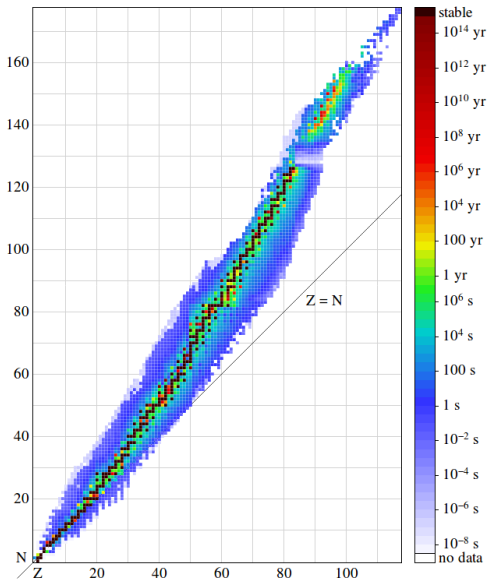
$$^A_Z X^* \rightarrow ^A_Z X + n\gamma, \quad (4)$$

gdzie liczba  $n$  oznacza ile fotonów zostało wyemitowanych. Przykład przemiany  $\beta$  której towarzyszy emisja kwantów  $\gamma$ :

$$^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow ^{60}_{28}\text{Ni}^* + e^-; \quad ^{60}_{28}\text{Ni}^* \rightarrow ^{60}_{28}\text{Ni} + 2\gamma. \quad (5)$$

Energia fotonów emitowanych w trakcie przemian jądrowych  $\gamma$  jest znacznie większa od energii fotonów światła widzialnego. Te ostanie to wielkości rzędu kilku elektronowoltów, podczas gdy najmniejsza energia fotonów  $\gamma$  jest wielkością rzędu dziesiątek kiloelektronowoltów, a największa sięga nawet dziesięciu megaelektronowoltów.

Jeżeli na dwóch osiach odłożymy liczbę protonów  $Z$  oraz liczbę neutronów  $N$  to otrzymamy diagram zwany tablicą nuklidów (rys. 1). W górnej części tego wykresu znajduje się tzw. wyspa stabilności – jest to hipoteza głosząca, że istnieje grupa izotopów superciężkich pierwiastków chemicznych, których jądra atomowe są znacznie bardziej trwałe, niż inne z tego obszaru liczb atomowych  $Z$ . Stabilne jądra atomowe zaznaczono na tablicy



Rysunek 1: Tabela nuklidów [4]. Kolor odpowiada czasowi połowicznego rozpadu danego izotopu.

nuklidów kolorem ciemnoczerwonym/bordowym. Układają się one w dość wąskim obszarze. Dla jąder lekkich pokrywa się on z linią  $N=Z$ . Jednak im bardziej masywne jądro, tym obszar stabilności bardziej odchodzi od tej linii, układając się nad nią. Dzieje się tak, ponieważ w miarę zwiększania się liczby atomowej  $Z$  do zapewnienia stabilności jądra potrzebna jest nadwyżka neutronów w jądrze nad protonami. Wynika to z faktu, że pojawia się coraz silniejsze odpychanie elektrostatyczne między protonami, których liczba w jądrze się zwiększa.

Reakcje jądrowe dzieli się na trzy kategorie.

Reakcje syntezy - łączyć mogą się pojedyncze nukleony lub ich układy (jądra), tworząc większe jądra atomowe lub przyłączając się do już istniejących jąder. Tego typu reakcje wymagają dużej energii, dlatego zachodzą m.in. we wnętrzu gwiazd, w bombach wodorowych i innych urządzeniach termojądrowych. Przykładem takiej reakcji jest łączenie się jąder deuteru i trytu w jądro helu.

Reakcje wymiany - substratem jest pojedynczy nukleon lub niewielkie jądro (np. cząstka  $\alpha$ ), drugim substratem jest inne jądro, ich połączeniu towarzyszy usunięcie z jądra innego nukleonu lub innej ich grupy. Takiego typu była pierwsza, zaobserwowana w roku 1919 przez Ernesta Rutherforda, reakcja jądrowa. Bombardował on cząstkami  $\alpha$  znajdujące się w powietrzu jądra azotu. W rezultacie tworzone były jądra tlenu i emitowane były protony.

Reakcje rozszczepienia (rozpadu) - substratem jest sporych rozmiarów jądro atomowe oraz pojedynczy nukleon, najczęściej neutron. Wśród produktów są dwa jądra atomowe porównywalnych rozmiarów oraz pojedyncze nukleony. Przykładem może być rozszczepienie ciężkich jąder, na przykład uranu czy plutonu. Reakcje takie zachodzą w reaktorach jądrowych i bombach atomowych.

Rozpady jąder podlegają pewnej statystyce. Szybkość ubytku jąder promieniotwórczych w danej próbce określa prawo rozpadu promieniotwórczego. Pozwala ono wyróżnić charakterystyczny czas zwany czasem połowicznego zaniku liczebności próbki (lub okresem połowicznego zaniku próbki). Jest to czas, po którego upływie liczebność próbki maleje dwukrotnie i jest on wielkością charakteryzującą dany izotop promieniotwórczy. Można go przedstawić następująco

$$T_{1/2} = \tau \ln 2, \quad (6)$$

gdzie  $\tau$  to średni czas życia izotopu.

Mamy próbkę w której znajduje się pewna ilość jąder pewnego izotopu. To jak liczba ta zmienia się w czasie mówi nam następujące równanie

$$\frac{dN}{dt} = -\tau N, \quad (7)$$

którego rozwiązaniem jest

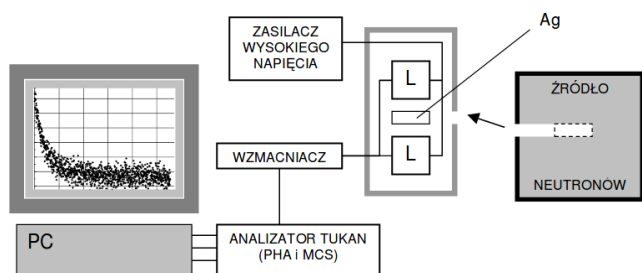
$$N = N_0 e^{-t/\tau}, \quad (8)$$

gdzie  $N_0$  to początkowa liczba jąder, a  $N$  to liczba jąder po czasie  $t$ .

Promieniowanie jądrowe oddziałuje z materią. Neutrony takiej zdolności praktycznie nie mają ze względu na zerowy ładunek elektryczny. Mogą powodować jonizację atomów i cząsteczek lub ich wzbudzenie. Takie procesy mogą prowadzić do rozpadu związków chemicznych, także do powstawania cząsteczek, rodników lub jonów silnie reaktywnych chemicznie. Pojedyncza cząstka promieniowania jądrowego może wywołać wielokrotnie takie procesy. Posiada ona energię wiele razy większą niż energia potrzebna do jonizacji atomów czy cząsteczek. Skutki procesów jonizacji i wzbudzenia w materii nieorganicznej na ogół nie są istotne. Inaczej jest w przypadku materii organicznej, gdyż może w niej dojść do istotnych zmian składu chemicznego komórek. Prowadzi to na ogół do śmierci komórek, a w przypadku masowego zaniku komórek może dojść do śmierci całej tkanki i narządu co ostatecznie prowadzi do śmierci całego organizmu. Może także nastąpić mutacja w kodzie genetycznym komórek.

## II. APARATURA

Aparatura pomiarowa użyta w doświadczeniu przedstawiona jest na rysunku 2. Zasilacz wysokiego napięcia zasila liczniki Geigera-Müllera (L) umieszczone w osłonie. Zasada działania liczników jest następująca. W niewielkim naczyniu wypełnionym gazem znajdują się dwie elektrody podłączone do źródła napięcia  $U$  przez opornik o dużej wartości oporu  $R$ . W obwodzie prąd nie płynie, bowiem elektrody nie są ze sobą połączone, więc napięcie na oporniku wynosi zero. Kiedy jednak przez detektor przebiegnie cząstka jonizująca, to uwolnione wskutek jonizacji elektrony zaczną poruszać się w kierunku elektrody dodatniej, a dodatnio naładowane jony w kierunku

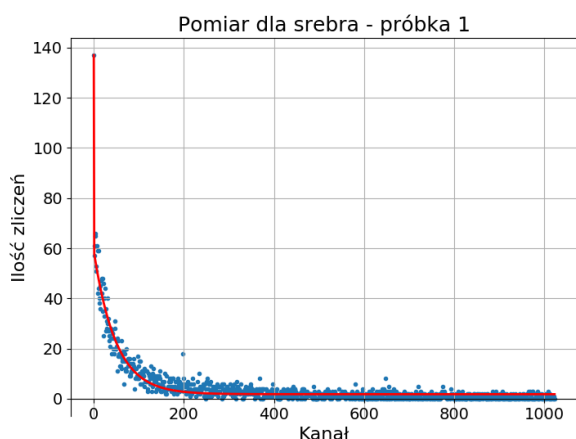


Rysunek 2: Schemat aparatury pomiarowej użytej w doświadczeniu.

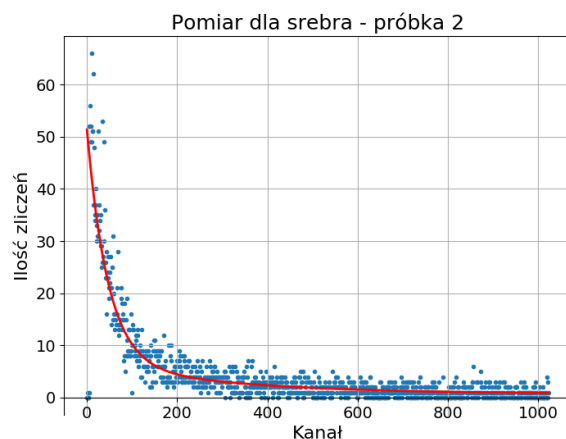
elektrody ujemnej. Spowoduje to krótkotrwały przepływ prądu i pojawienie się różnicy potencjałów na oporniku. Ten krótkotrwały impuls napięciowy zostanie zarejestrowany. Wzmocniony sygnał trafia do analizatora wielokanałowego (1024 kanały), każdy kanał odpowiada pewnemu stałemu przedziałowi czasu. Analizator połączony jest z komputerem na którym zainstalowany jest program TUKAN służący do kontroli pomiaru. W doświadczeniu używamy srebrnych krążków, które mają taką wielkość, aby mieściły się w komorze ze źródłem neutronów (Pu + Be) w postaci materiału jądowego  $^{239}\text{Pu}$ .

### III. POMIAR I ANALIZA WYNIKÓW

Po całym przygotowaniu aparatura była gotowa do pomiarów. Najpierw przygotowano próbki - dwa srebrne krążki. Wybrano jeden, który następnie był aktywowany neutronami przez ponad 30 minut, po czym został szybko przeniesiony do komory z licznikiem G-M. Analizator rejestrował i zliczał sygnały. Interwał na każdy kanał wy-



Rysunek 3: Dane pomiarowe dla próbki 1 (niebieski) wraz z dopasowaną funkcją (czerwony). Ilość zliczeń w funkcji czasu - numerowi kanału odpowiada czas pomiaru liczony w sekundach.



Rysunek 4: Dane pomiarowe dla próbki 2 wraz z dopasowaną funkcją. Ilość zliczeń w funkcji czasu - numerowi kanału odpowiada czas pomiaru liczony w sekundach.

nosił 1 s, więc cały pomiar trwał około 17 minut. Analogicznie badanie powtórzono dla drugiej próbki. Otrzymane dane pokazano na rysunkach 3 i 4. Do uzyskanych wyników dopasowano funkcję

$$N(t) = N_1 e^{-t/\tau_1} + N_2 e^{-t/\tau_2} + N_{tla}, \quad (9)$$

która jest sumą funkcji (8) dla dwóch izotopów srebra. Wyznaczono średnią arytmetyczną średnich czasów rozpadu dla obydwu izotopów

$$\tau_1 = 23,7 \pm 14,0 \text{ s}, \quad (10)$$

$$\tau_2 = 182 \pm 61 \text{ s}. \quad (11)$$

### IV. PODSUMOWANIE

Otrzymane w doświadczeniu wartości średnich czasów życia zgadzają się z danymi literaturowymi - dla  $^{108}\text{Ag}$  są to 162 s, a dla  $^{110}\text{Ag}$  to 24,5 s. Mimo prostego pomiaru uzyskane dane są bliskie wartościom rzeczywistym. Duży błąd wynika z jakości dopasowania wykresu funkcji do danych pomiarowych. Dane poddane analizie nie były najlepsze, czego powodem były krążki srebra użyte do pomiaru - nie były one najlepszej jakości.

Analiza została wykonana za pomocą języka Python [5], biblioteki SciPy [6]. Wykresy stworzone zostały przy użyciu modułu Matplotlib.

- [1] G. Karwasz, M. Więcek, Toruński podręcznik do fizyki, Fizyka współczesna i astrofizyka, Wydawnictwo Naukowe UMK, Toruń 2015.
- [2] E. Skrzypczak, Z. Szeffiński, Wstęp do fizyki jądra atomowego i cząstek elementarnych, PWN, Warszawa 2002.
- [3] J. Araminowicz, K. Małuszyńska, M. Przytuła, Laboratorium fizyki jądrowej, PWN, Warszawa 1984.
- [4] Tabela nuklidów [online]. Wikipedia : wolna encyklopedia, 2015-03-23 12:08Z [dostęp: 2017-06-01 21:25Z ]. Dostępny w Internecie: [http://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Tabela\\_nuklid%C3%B3w&from=Search](http://pl.wikipedia.org/w/index.php?title=Tabela_nuklid%C3%B3w&from=Search)
- [5] Python Software Foundation. Python Language Reference, version 3.5.2. Available at <http://www.python.org> [Online; accessed 2017-05-23].
- [6] Jones E, Oliphant E, Peterson P, et al. SciPy: Open Source Scientific Tools for Python, 2001-, <http://www.scipy.org/> [Online; accessed 2017-05-23].