

3.3 Detektory aktywacyjne

Dzięki uczestniczeniu w doświadczeniach i pomaganiu w obróbce danych z detektorów aktywacyjnych czeskiej grupy uzyskaliśmy możliwość obserwacji całego procesu wraz z problemami, na jakie natrafiano przy analizie wyników. Należy pamiętać, że podstawową przyczyną wykorzystywania kilku różnych detektorów jest zwiększenie liczby kanałów (energii reakcji progowych) oraz uzyskanie wyników pokrywających - bez większych przerw - badany zakres energii, na podstawie których, wyznaczana była potem wartości pola neutronów w badanym przedziale energii. Każdy izotop ma trochę inny zestaw energii progowych na reakcje typu (n,xn) . Użytkowanie kilku różnych materiałów, daje możliwość kontroli wyników dla podobnych energii uzyskanych z różnych detektorów oraz uzupełnianie ich w przypadku, gdyby część pomiarów nie wyszła lub z jakiegoś powodu nie można było ich wykonać.

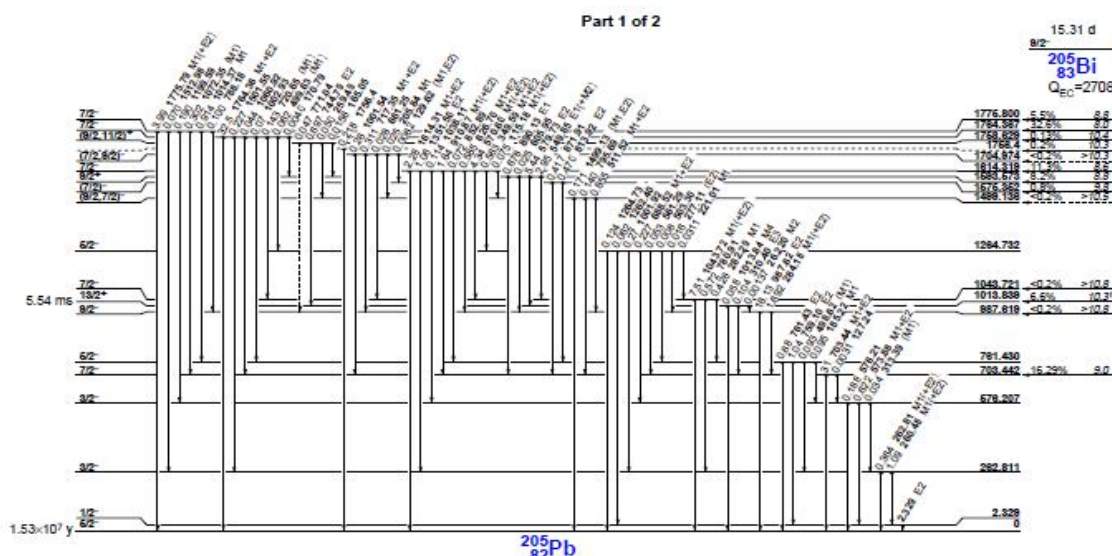
Stosowane dotychczas detektory nie dawały możliwości uzyskania pełnych wyników względem badanego przedziału energii neutronów. Każdy z używanych przez czeską grupę detektorów ma pewne wady i zalety. Dobry detektor powinien być wykonany z monoizotopu (w przyrodzie jest obecny tylko jeden stabilny izotop danego pierwiastka). Materiał, z którego zostanie wykonany, powinien być relatywnie niedrogi i łatwy w obróbce, aby móc wykonać dobre próbki (jak najcieńsze i o powtarzalnych kształtach). Izotop ten powinien posiadać kilka dobrze określonych reakcji progowych z łatwymi do detekcji silnymi liniami gamma. Wskazane jest, aby energia większości tych linii raczej nie przekracza 2000keV (powyżej 1500keV większość spektrometrów germanowych ma dużo mniejszą czułość). Czas połowicznego rozpadu izotopów powstałych z reakcjach progowych powinien zawierać się w przedziale godzin-dni (dzięki temu detekcja linii gamma jest możliwa i łatwa). Analiza wyników jest łatwiejsza, gdy widmo gamma z danego izotopu nie zawiera za dużo linii. Najlepiej jak izotop posiada kilka bardzo silnych linii a resztę wyraźnie słabsze. Czeska grupa używała regularnie 4-ech rodzajów detektorów progowych: Kobalt-59, Bizmut-209, Złoto-197 i Aluminium.

Kobalt (Co-59) - ma nie dużą grupę linii gamma w przedziale energii od 122keV do 1332keV, bardzo dobre reakcje progowe od $(n,2n)$ do $(n,5n)$ o energiach od 10,6MeV do 41,2 MeV (Tab. 3.1) i dodatkowo możliwą do wykrycia bez-progową reakcję $^{59}\text{Co}(n,\gamma)^{60}\text{Co}$ czułą na neutrony termiczne (linie z tej reakcji często są użyteczne do kalibracji energetycznej spektrometru). Niestety, oprócz izotopu pochodzącego z reakcji $(n,5n)$, który ma czas połowicznego rozpadu 17,5 godz., reszta izotopów ma czas bardzo długi od 70 dni do roku. W takich warunkach trudno jest wykonać szybkie pomiary tych próbek, gdyż wtedy większość linii gamma jest zbyt słaba do analizy. Wymagają one długich pomiarów (mało korzystne w eksperymentach wykonywanych za granicą). W efekcie, mimo zalet kobaltu Czesi przestali go używać w ostatnich eksperymentach.

Reakcja	Energia Progowa [MeV]	Czas T/2
$^{59}\text{Co} (n,2n) ^{58}\text{Co}$	13,3	78,82 d
$^{59}\text{Co} (n,3n) ^{57}\text{Co}$	24,6	271,79 d
$^{59}\text{Co} (n,4n) ^{56}\text{Co}$	41,7	77,27 d
$^{59}\text{Co} (n,5n) ^{55}\text{Co}$	56,2	17,53 h
$^{59}\text{Co} (n,6n) ^{54}\text{Co}$	74,5	193,23 ms
$^{59}\text{Co} (n,7n) ^{53}\text{Co}$	90,3	240 ms
$^{59}\text{Co} (n,8n) ^{52}\text{Co}$	109,9	18 ms

Tab. 3.1 Lista reakcji progowych dla Kobalu-59 [5], [6], [7].

Bizmut (Bi-209) – jego największą zaletą jest bardzo duża liczba możliwych do wykrycia reakcji progowych od $(n,4n)$ do $(n,9n)$ o energiach od 22,6 MeV do aż 61,4 MeV (Tab. 3.2), a przy sprzyjających warunkach do pomiarów (szybki start po skończeniu eksperymentu) również $(n,10)$ i $(n,11n)$. Reakcje $(n,2n)$ i $(n,3n)$ są niemożliwe (przy sensownych czasach pomiaru) do wykrycia ze względu na zbyt długi czas połowicznego rozpadu tych izotopów. Pozostałe czasy połowicznego rozpadu zawierają się w bardzo dobrym zakresie od 2 godzin do 15 dni. Poważną wadą jest bardzo wysoki stopień skomplikowania widma (setki linii – patrz rysunek 3.11), które jest bardzo trudne w identyfikacji i analizie, ponadto bardzo duża liczba linii znacznie wydłuża analizę. Z powodu dość wysokiej ceny wykonano i używano tylko kilku tych detektorów.



Rys. 3.11 Graficzny schemat rozpadu izotopu Bi-205 [34]. Rysunek ten przedstawia tylko połowę potencjalnych linii z tego izotopu. Schemat ten jest przykładem wysokiego stopnia skomplikowania większości widm pochodzących z rozpadu izotopów bizmutu.

Reakcje	Energia Progowa [MeV]	Czas T/2
$^{209}\text{Bi} (n,2n) ^{208}\text{Bi}$	7,3	$3,68 \cdot 10^5$ lat
$^{209}\text{Bi} (n,3n) ^{207}\text{Bi}$	13,9	31,55 lat
$^{209}\text{Bi} (n,4n) ^{206}\text{Bi}$	22,6	6,243 d
$^{209}\text{Bi} (n,5n) ^{205}\text{Bi}$	29,6	15,31 d
$^{209}\text{Bi} (n,6n) ^{204}\text{Bi}$	38,1	11,22 h
$^{209}\text{Bi} (n,7n) ^{203}\text{Bi}$	45,2	11,76 h
$^{209}\text{Bi} (n,8n) ^{202}\text{Bi}$	54	1,72 h
$^{209}\text{Bi} (n,9n) ^{201}\text{Bi}$	61,4	1,8 h
$^{209}\text{Bi} (n,10n) ^{200}\text{Bi}$	70,8	36,4 m
$^{209}\text{Bi} (n,11n) ^{199}\text{Bi}$	78,4	27 m

Tab. 3.2 Lista reakcji progowych dla Bizmutu-209 [5], [6], [7].

Złoto (Au-197) – potencjalna możliwość wykrycia 6-u reakcji progowych od (n,2n) do (n,7n) (a czasem również (n,8n) o energiach w szerokim zakresie od 8,1 do 45,7 MeV i czasach rozpadu od 3 godz. do 6 dni (jeden izotop ma czas ok. 180 dni) (Tab. 3.3). Posiada użyteczną do detekcji neutronów termicznych reakcję $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ z czasem połowicznego rozpadu 64 godz. Najważniejsza cecha to rozkład linii gamma z których zdecydowana większość mieści się w przedziale energii od 200 do 600 keV, czyli w przedziale największej czułości spektrometru germanowego. W praktyce ze względu na małą intensywność linii gamma powstałych w wyniku reakcji (n,5n) i w szczególności (n,3n), nie można łatwo wyznaczyć wydajności tych dwu reakcji [5]. Oznacza to, że analizując reakcje progowe dla złota musimy bazować na wybiórczych danych pochodzących z co drugiej reakcji. Z tego względu złoto nie sprawdza się jako detektor do samodzielnego wyznaczania pola neutronów na podstawie reakcji progowych.

Reakcja	Energia Progowa [MeV]	Czas T/2
$^{197}\text{Au} (n,2n) ^{196}\text{Au}$	8,1	6,183 d
$^{197}\text{Au} (n,3n) ^{195}\text{Au}$	14,8	186,1 d
$^{197}\text{Au} (n,4n) ^{194}\text{Au}$	23,2	38,02 h
$^{197}\text{Au} (n,5n) ^{193}\text{Au}$	30,2	17,65 h
$^{197}\text{Au} (n,6n) ^{192}\text{Au}$	38,9	4,94 h
$^{197}\text{Au} (n,7n) ^{191}\text{Au}$	45,7	3,18 h
$^{197}\text{Au} (n,8n) ^{190}\text{Au}$	54,5	42,8 min
$^{197}\text{Au} (n,9n) ^{189}\text{Au}$	61,8	28,7 min
$^{197}\text{Au} (n,10n) ^{188}\text{Au}$	70,9	8,84 min

Tab. 3.3 Lista reakcji progowych dla Złota197 [5], [6], [7].

Aluminium (Al.-27) (Glin) – detektor o tylko jednej ale za to bardzo użytecznej reakcji progowej $^{27}\text{Al} (n,\alpha) ^{24}\text{Na}$, o energii 5,5 MeV i czasie połowicznego rozpadu 15 godz. To właśnie ta cecha aluminium sprawia że, stał się on podstawowym materiałem do monitorowania różnych procesów (jako czuły detektor przepływu – cząstek, który nie zakłóca swą obecnością innych reakcji). Wykorzystywany jest w monitorowaniu wiązki z akceleratora jak i przy reakcjach śladowych [5].

Reakcja	Energie Progowa [MeV]	Czas T/2
$^{27}\text{Al} (n,p) ^{27}\text{Mg}$	1,9	9,458 m
$^{27}\text{Al} (n,\alpha) ^{24}\text{Na}$	5,5	14,959 h

Tab. 3.4 Lista reakcji progowych dla Aluminium-27 [5], [6], [7].

Biorąc pod uwagę cechy wcześniej opisanych materiałów, zaproponowano inny pierwiastek z którego można przygotować detektory - Itr. Podstawowymi zaletami tego materiału są: występuje tylko jeden stabilny izotop w przyrodzie, posiada on serie użytecznych reakcji progowych od (n,2n) do (n,5n) i przy sprzyjających warunkach (n,6n), o energiach w przedziale od 11,5 MeV do 42,1 MeV (Tab. 3.5). Energie te co do wartości są zbliżone do tych z kobaltu a przesunięte względem tych ze złota. Poza faktem, że można go używać jako samodzielny detektor pól neutronów (co wykażę później), może on zastąpić kobalt i świetnie uzupełnić wyniki uzyskiwane ze złota. Tylko jedna reakcja (n,2n) ma dość duży czas połowicznego rozpadu, ale dwie linie gamma jakie powstają podczas jego rozpadu, mają bardzo dużą intensywność (ponad 90% [33], [34]) i są łatwe do detekcji nawet przy krótkich czasach pomiaru. Większość linii gamma znajduje się w zakresie największej czułości spektrometru. Itr posiada również dość silne linie w wyższym zakresie energii co ułatwia przeprowadzenie kalibracji energetycznej (W ANEKSIE **B** znajduje się pełna lista wykrywanych izotopów wraz z parametrami linii gamma jakie posłużyły do ich identyfikacji). Utrudnieniem przy analizie widma itru jest to, że, dwie linie znajdują się w bezpośrednim sąsiedztwie dużej linii pochodzącej z anihilacji elektron-pozyton (511 keV) (Rys. 3.12). Itr posiada pary linii o podobnej i dużej intensywności i energii, co z kolei ułatwia szybką kalibrację energetyczną.

Reakcja	Energia Progowa [MeV]	Czas T/2
$^{89}\text{Y} (n,\gamma) ^{90}\text{Y}$	0	3,19 h
$^{89}\text{Y} (n,2n) ^{88}\text{Y}$	11,5	106,65 d
$^{89}\text{Y} (n,3n) ^{87}\text{Y}$	20,8	79,8 h
$^{89}\text{Y} (n,4n) ^{86}\text{Y}$	32,7	14,74 h
$^{89}\text{Y} (n,5n) ^{85}\text{Y}$	42,1	2,68 h
$^{89}\text{Y} (n,6n) ^{84}\text{Y}$	54,4	39,5 min
$^{89}\text{Y} (n,7n) ^{83}\text{Y}$	63,7	7,08 min
$^{89}\text{Y} (n,8n) ^{82}\text{Y}$	76,8	9,5 s
$^{89}\text{Y} (n,9n) ^{81}\text{Y}$	85,6	70,4 s
$^{89}\text{Y} (n,10n) ^{80}\text{Y}$	98,3	35 s

Tab. 3.5 Lista reakcji progowych dla Itru89.

Wartości do (n,6n) pochodzą z eksperymentów, powyżej są wyliczone [6], [7].

W próbce Itru-89 powstaje szereg dalszych izotopów (np.: ^{85}Sr , ^{83}Sr , ^{83}Rb , ^{82}Rb , ^{81}Rb , ^{77}Kr , ^{77}Br aż do Se73), które mogą się stać potencjalnym narzędziem do badania neutronów o dużo wyższych energiach (pełny zakres wykrytych i zidentyfikowanych izotopów wraz z ich parametrami można zobaczyć w formie graficznego schematu w ANEKSIE A). Izotopy Selenu 73 i 75 mogą być prawdopodobnie produktami spalacji. Na obecnym etapie skupiliśmy się przede wszystkim na analizie i wykorzystaniu reakcji typu (n,xn). Przyczyną jest fakt, że poza pierwszym eksperymentem z Itrzem (wiązka protonowa 0,7 GeV) nie udało się wykryć w widmie linii tych dalszych izotopów wymagających większych energii. Głównym powodem było znaczne zwiększenie ilości próbek, co spowodowało skrócenie czasu pierwszych pomiarów, a tym samym ograniczyło możliwość detekcji wielu izotopów. Praca nie obejmuje innych potencjalnych kanałów reakcji np.:(p,xn), (W ANEKSIE C znajdują się przykłady innych kanałów reakcji z udziałem Itru-89 i odpowiednie dla nich reakcje progowe).

W dalszej analizie danych skupiamy się na produktach reakcji (n,xn). Należy dodać, że w naszych analizach przyjmujemy, że izotopy itru ^{88}Y , ^{87}Y , ^{86}Y , ^{85}Y powstają w ponad 99% właśnie z reakcji (n,xn). Teoretycznie mogłyby one powstawać również z reakcji (p,xn) tworzącej izotopy cyrkonu ^{88}Zr , ^{87}Zr , ^{86}Zr , ^{85}Zr (tzw. prekursorzy), które następnie poprzez rozpad beta zmieniały by się w odpowiednie izotopy itru. Wydawało by się to dodatkowo prawdopodobne ze względu na fakt że przekroje czynne na reakcję (n,xn) i (p,xn) dla Itru-89 są bardzo zbliżone zarówno co do kształtu jak i wartości (w okolicy energii 20 MeV przekrój czynny dla obu reakcji jest zbliżony do 1 barna) [7]. Jednak strumień neutronów o odpowiednich energiach (10-50 MeV) wewnątrz zestawu eksperymentalnego, w porównaniu do strumienia protonów o tej samej energii, jest około 100 krotnie większy. Mimo zbliżonych przekrojów czynnych, faktyczna ilość reakcji z udziałem protonów będzie o dwa rzędy wielkości mniejsza. W celu potwierdzenia zanalizowano pod tym kątem nasze bezpośrednie dane eksperymentalne. Wynika z nich że, w przypadku izotopów ^{88}Zr , ^{87}Zr nie stwierdzono obecności mierzalnych linii gamma pochodzących z ich rozpadu, a w przypadku ^{86}Zr bardzo słabą linię (tylko jedną – niepewna identyfikacja) o intensywności jest kilkudziesięciu razy niższą niż intensywność linii ^{86}Y . Na tej podstawie można przyjąć że, ewentualny wkład prekursorów jest mniejszy niż 1% całkowitej produkcji izotopów itru z reakcji (n,xn).

Itr jako materiał posiada dość poważną wadę, nie jest łatwo wykonać z niego detektory. **Kiedy pierwszy raz kupowaliśmy ten materiał, to po przeglądzie tablic**

chemicznych, dowiedzieliśmy się, że itr jest plastycznym miękkim metalem. Nie jest to materiał tani i ze względu na cenę zdecydowano się na zakup czystego chemicznie itru (czystość 99,9%) w postaci bryłek (ang. ingot). Założyliśmy, że bez problemu przygotowujemy próbki korzystając z prostych narzędzi. Niestety w praktyce itr okazał się materiałem bardzo twardym nie poddającym się żadnej, miękkiej i delikatnej obróbce, a bryłki przypominały fragmenty ostro zakończonych skał z licznymi szczelinami Rys. 3.13. Udało się wykonać próbki o zbliżonych rozmiarach ale ich kształty były dość różne i przypadkowe. Przed kolejnym eksperymentem zakupiony został itr w postaci proszku (ang. powder) (znacznie droższy), dzięki czemu wykonana została duża ilość próbek o identycznym kształcie małych pastylek. Do ich wykonania użyto małej ręcznej prasy. Proszek poddany dużej, chwilowej sile trwale się skleja (spaja). Użyta forma miała kształt koła. Pastylki miały identyczną średnicę 10 mm, a różniły się tylko nieznacznie grubością, która wynosiła ok 1 mm (było to zależne od ilości nasypanego materiału przed prasowaniem). Tak wykonane próbki zostały użyte w dalszych eksperymentach z użyciem wiązki deuteronów.



Rys. 3.12 Obraz z programu DEIMOS [35] używany do analizy uzyskanych widm gamma. Program analizuje widmo dzieląc go na małe przedziały po kilkadziesiąt keV. Rysunek ukazuje problem z analizą linii 504,45 keV (z izotopu Y-85 – ciemno niebieska linia) i linii 514 keV (z izotopu Sr-85 – jasno niebieska), znajdujących się w bezpośrednim sąsiedztwie linii 511 keV – czerwona linia (anihilacja elektron-pozyton)

W dalszej części zaprezentowane zostaną informacje o właściwościach chemicznych i fizycznych itru oraz o jego zastosowaniach.



Rys. 3.13 Wygląd Itru w postaci metalicznej bryłki [36], [37].

ITR – symbol „Y” (łac. Ytrium) jest pierwiastkiem chemicznym o numerze 39 w układzie okresowym pierwiastków (grupa III B (3) – skandowce). [37] Odkryty został przez Gadolin Johan (1760-1852) w Finlandii w 1794 roku w postaci ziemi itrowej (iterbit), z którego następnie wyizolowano kilka pierwiastków (itr, terb, skand, tul, erb, holm, dysproz, terb, lutet). Itr został wyodrębniony przez Friedricha Wöhlera w roku 1828. Jest to jeden z czterech pierwiastków, których nazwy zostały utworzone od szwedzkiej miejscowości Ytterby (są to: erb, itr, iterb, terb). W stanie czystym wolny metal został otrzymany dopiero w 1935 roku przez amerykańskich chemików: Westa i Hopkinsa. Itr w skorupie ziemskiej zajmuje 30 miejsce pod względem rozpowszechnienia (procenty wagowe). Jest to pierwiastek należący do grupy pierwiastków ziem rzadkich, w skorupie ziemskiej występuje w ilości 30 ppm w postaci minerału ksenotymu. Itr jest srebrzystoszarym, stosunkowo stabilnym na powietrzu metalem. Na jego powierzchni tworzy się trwała warstwa tlenków. Metaliczny itr jest otrzymywany z fluorku itru działaniem metalicznego wapnia.

Dane szczegółowe: [36], [37], [38]

- Gęstość 4,472 g/cm³
- Twardość Bardzo duża
- Masa atomowa 88,90585
- Konfiguracja elektronowa : $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^2 3d^{10} 4p^6 5s^2 4d^1$
- Liczba neutronów (Y-89) 50
- Temperatura topnienia: 1526 °C
- Temperatura wrzenia: 3338 °C
- Ciepło właściwe 300 J/(kg*K)
- Izotop trwały Y89 100%
- Liczba izotopów 19 (Y80-Y99)

Zastosowanie: [36], [37], [38]

- jest głównym składnikiem czerwonego luminoforu w kineskopach,
- lampy ze stopu itru z wolframem są stosowane w rentgenografii,
- niektóre stopy itru mają własności nadprzewodnikowe,
- stosowany jako katalizator przy polimeryzacji etanu,
- tlenek Itru używany jest aby ustabilizować sześcienną formę cyrkonii np. w jubilerstwie,
- izotop ⁹⁰Y stosuje się jako znacznik oraz w medycynie do leczenia nowotworów,
- stosowany jako dodatek stopowy w metalurgii oraz jako materiał konstrukcyjny w technice jądrowej
- granat itrowo-żelazowy $3Y_2O_3 \cdot 5Fe_2O_3$ ma własności ferrimagnetyczne i znajduje zastosowanie w elektronice, do budowy pamięci komputerowych,
- izotop Y-88 jest wykorzystywany jako jeden ze standardów do kalibracji detektorów gamma.