

Rozdział 4 **Detektory aktywacyjne - wykorzystanie w eksperymentach i rezultaty.**

W kolejnych podrozdziałach zaprezentowane zostaną wyniki kilku eksperymentów, które odbyły się w ramach programu „Energia+Transmutacja”. Duża część uzyskanych danych była opracowana przez inne grupy uczestniczące w tych sesjach eksperymentalnych. Z eksperymentów starszych, podczas których nie używano jeszcze detektorów zbudowanych z Itru, zaprezentowane zostanie tylko kilka przykładowych wyników uzyskanych przy użyciu innych detektorów. Natomiast z eksperymentów, w których używane były itrowe detektory przedstawione zostanie większość wyników uzyskanych przy ich użyciu oraz dla porównania inne rezultaty (przede wszystkim ze złota). Wyniki z pierwszych dwu eksperymentów, jakie odbyły się w roku 1999 i 2000 [16], [19], [21] nie zostaną przedstawione w tej pracy. Były to sesje próbne dla wszystkich uczestników służące do dopracowania metodologii a nasza grupa nie wykonywała analizy danych z tych eksperymentów. Podstawową różnicą tych najstarszych eksperymentów w stosunku do późniejszych, było wykorzystywanie dwu sekcyjnego zestawu uranowo-ołowianego (patrz rozdział 3.1) Późniejsze eksperymenty bazowały na zestawie 4-o sekcyjnym [20]. Podsumowując, odbyły się 4 eksperymenty z wiązką protonową o energii 0,7 , 1 , 1,5 i 2 GeV [35], oraz 3 eksperymenty z wiązką deuteronów o energiach 2,52 GeV = 1,26 GeV/nukleon , 1,6 GeV = 0,8 GeV/nukleon [17] i 4 GeV = 2 GeV/nukleon. Większość prezentowanych w tej pracy rezultatów dotyczy trzech ostatnich eksperymentów. Planowane są dalsze eksperymenty z użyciem deuteronów.

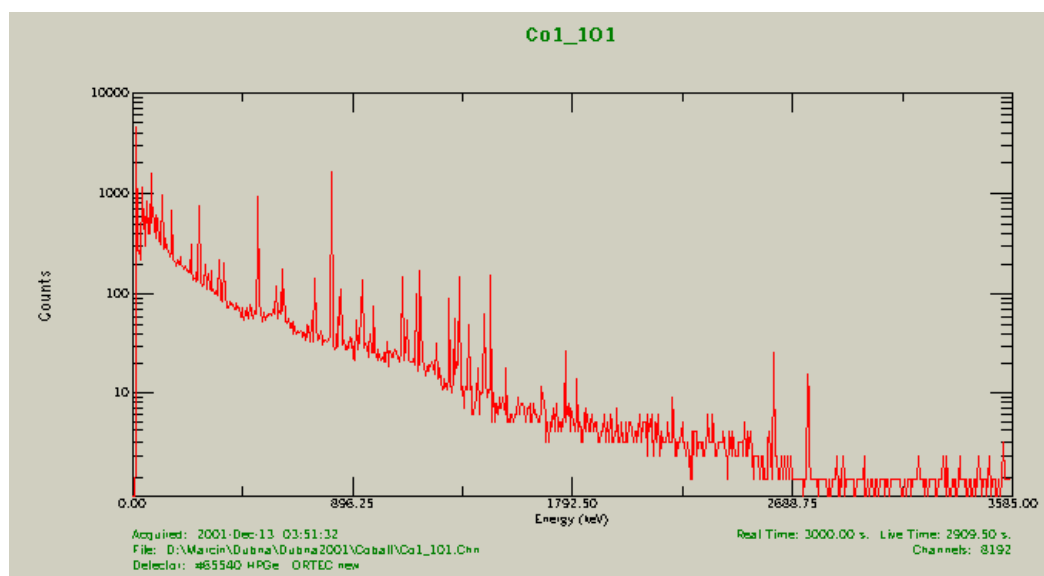
4.1 Eksperyment 1,5 GeV wiązka protonów [20], [24]

Od tego eksperymentu nasza grupa rozpoczęła wykonywać własne analizy z uzyskanych pomiarów. Był to też pierwszy eksperyment, w którym użyto nowego większego zestawu uranowo-ołowianego [20]. Powiększając zestaw eksperymentalny, możliwe stało się uzyskanie bardziej miarodajnych rezultatów. Najciekawsze efekty występowały pomiędzy 10 a 20 cm licząc od czoła (początku modelu) i w starszym modelu (krótszym), nie można było ich dobrze zaobserwować i ocenić. W nowym zestawie eksperymentalnym, dzięki dwukrotnemu wydłużeniu bazy pomiarowej, stało się to możliwe. Uzyskaliśmy też, realne wykresy zmian, bazujące na 5-u punktach pomiarowych (licząc od czoła do końca modelu), a nie jak dotychczas tylko na trzech.

Eksperyment odbył się 11-12 grudnia 2001 roku. Wiązka protonów o energii 1,5 GeV była doprowadzana z Synchronofazotronu (starego akceleratora). Detektory aktywacyjne były umieszczone na pięciu foliach rozmieszczonych z przodu, z tyłu i pomiędzy sekcjami uranowymi. Detektory rozmieszczono wzdłuż osi zestawu w odległości ok. 3,5 cm od osi. Na niektórych foliach (przede wszystkim na drugiej) rozmieszczono dodatkowe detektory w różnych odległościach radialnych. W grupie użytych, znalazły się próbki wykonane z następujących materiałów: Aluminium, Bizmut, Kobalt, Złoto oraz dodatkowo z uranu naturalnego i technetu. Nasza analiza wyników ograniczała się do rezultatów pochodzących z próbek Kobaltu i Bizmutu.

Detektory kobaltowe były wykonane z monoizotopu Co-59 a bizmutowe z Bi-209. Czas naświetlania wiązką protonową wyniósł 43800 sek. Intensywność całkowita wiązki z całego eksperymentu wyniosła $2 \cdot 10^{13}$ protonów. Po eksperymentcie wykonano 3 sesje

pomiarowe z użyciem detektora (spektroskopu) germanowego. Pierwszy pomiar trwał 3000 sek. dla kobaltu i 1800 sek. dla bizmutu zaraz po eksperymencie, druga seria pomiarów o długości 7200 sek. dla kobaltu, 3600 sek. dla bizmutu, ok. 30 godz. po eksperymencie. Ostatnią serię o długości poszczególnych pomiarów 86000 sek. zaczęto kilka dni po eksperymencie. Nie wykonano najdłuższych pomiarów dla wszystkich próbek, ponieważ czas naszego pobytu w laboratorium był ograniczony. W kolejnych latach nie wykonywano tych bardzo długich pomiarów, gdyż ich rezultaty nie wносиły nic znaczącego do finalnych wyników, a z kobaltu jako detektora zrezygnowano. Podczas analizy widm (wykonywanej programem DEIMOS) uzyskanych z próbek Co-59 (Rys. 4.1) udało się zidentyfikować następujące izotopy kobaltu: Co-55, Co-56, Co-57, Co-58, Co-60 pochodzące z reakcji (n,xn) oraz (n, γ). Ponadto udało się zidentyfikować kilkanaście izotopów innych pierwiastków, wyprodukowanych w innych reakcjach, takich jak: Fe-52, Mn-54, Sc-43, Sc-48, V-48.



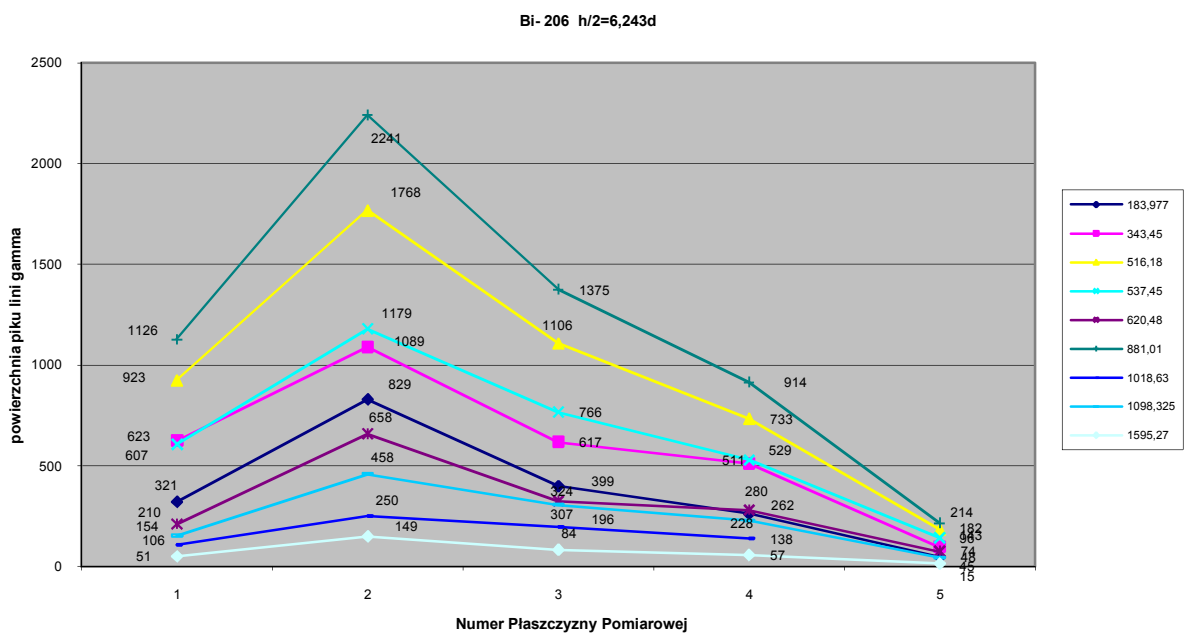
Rys 4.1 Przykładowe widmo uzyskane z jednej z próbek Co-59. Czas pomiaru 3000 sek. W dolnej części rysunku podane są parametry pomiaru danej próbki (w tym czas martwy i prawdziwy pomiaru). Rysunek taki jak ten nie służył do analizy i identyfikacji linii w widmie. Analizę tą wykonywaliśmy za pomocą programu DEIMOS, który dopasowywał profile linii i odejmował tło. Powyższy rysunek uzyskano za pomocą programu WinPlt32, który pokazuje graficzną prezentację całego uzyskanego widma.

W przypadku próbek bizmutu udało się zidentyfikować następujące izotopy tego pierwiastka: Bi-206, Bi-204, Bi-203, Bi-202, Bi-201 i Bi-200. Izotopy bizmutu, w większości charakteryzują się bardzo dużą ilością linii energetycznych (Tab. 4.1), dzięki temu łatwiejsza jest ich jednoznaczna identyfikacja, ale większe też jest prawdopodobieństwo, że linie te zostaną przysłonięte lub zakłócone przez inne pochodzące z innych izotopów. Z tego też powodu, widmo to jest bardzo skomplikowane i trudne w analizie. Izotopu Bi-205 nie udało się znaleźć, z powodu zbyt długiego czasu połowicznego rozpadu powyżej 15-u dni, co skutkowało bardzo słabymi liniami widmowymi ginącymi w tle innych linii. Z podobnych powodów nie można wykryć izotopu Bi-207. W tym przypadku udało się odnaleźć odpowiednie linie, lecz były one bardzo słabe i obciążone bardzo dużym błędem pomiarowym (rzędu 100%) i ich identyfikacja była bardzo niepewna.

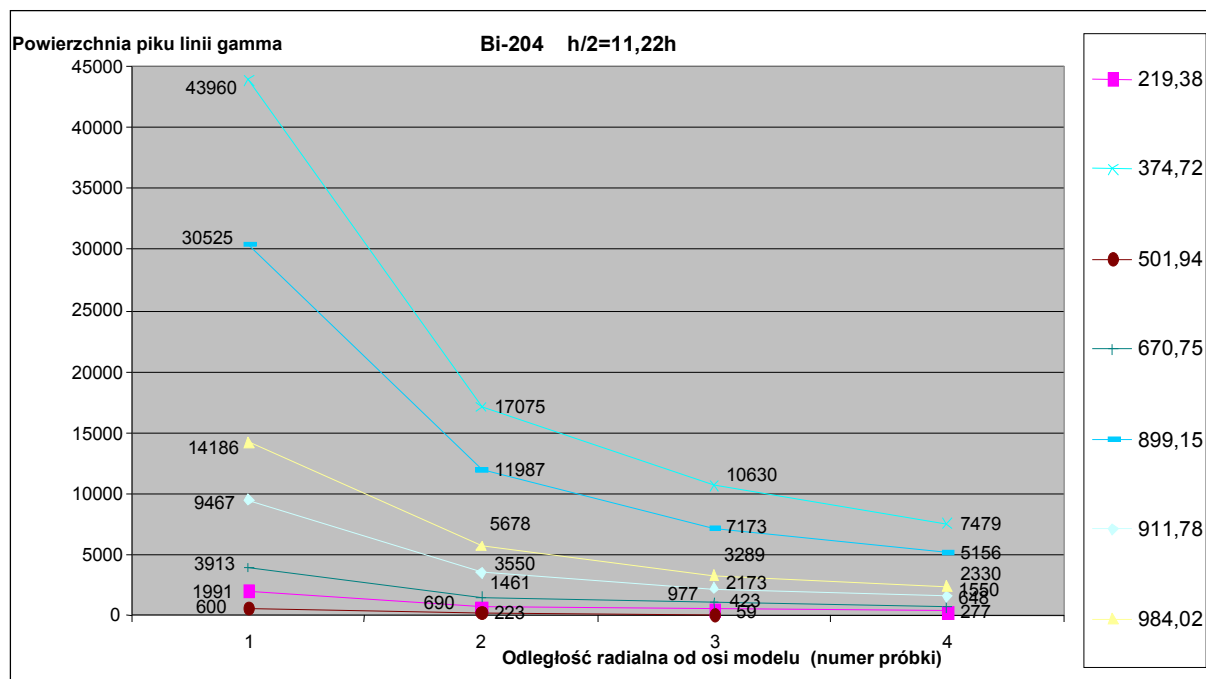
| Name | half live (s) | Energy | Name | half live | Energy | Name | half live | Energy | Name | half live | Energy |
|--------|---------------|---------|--------|-----------|--------|--------|-----------|--------|----------|-----------|---------|
| Bi-207 | 994960800 | 569,702 | Bi-204 | 40392 | 216,01 | Bi-203 | 42336 | 186,5 | Bi-202 | 6192 | 240,22 |
| 31,55y | | 1063,66 | 11,22h | | 219,38 | 11,76h | | 722,4 | 1,72h | | 346,47 |
| Bi-206 | 539395,2 | 183,977 | | | 222,32 | | | 820,3 | | | 422,18 |
| 6,243d | | 343,45 | | | 374,72 | | | 825,2 | | | 578,56 |
| | | 398,00 | | | 440,59 | | | 847,3 | | | 657,49 |
| | | 497,06 | | | 501,94 | | | 896,9 | | | 927,29 |
| | | 516,18 | | | 670,75 | | | 1033,8 | | | 954,45 |
| | | 537,45 | | | 791,19 | | | 1253,7 | | | 960,67 |
| | | 620,48 | | | 899,15 | | | 1506,7 | | | 1245,47 |
| | | 657,16 | | | 911,78 | | | 1536,4 | Bi-201 | 6480 | 171,7 |
| | | 803,10 | | | 918,15 | | | 1679,5 | 108m | | 629,1 |
| | | 881,01 | | | 984,02 | | | 1748,5 | | | 936,2 |
| | | 895,12 | | | | | | 1847,4 | | | 1014,1 |
| | | 1018,63 | | | | | | 1893,0 | | | 1325,2 |
| | | 1098,32 | | | | | | 2011,4 | Bi-200 | 2184 | 419,7 |
| | | 1595,27 | | | | | | | 36,4or31 | | 462,34 |
| | | 1718,70 | | | | | | | | | 1026,5 |

Tab. 4.1 Wykryte izotopy bizmutu wraz z odpowiadającymi im liniami energetycznymi.

Obecność pozostałych izotopów bizmutu jest niemożliwa do wykrycia, gdyż mają one, bądź bardzo długi czas połowicznego rozpadu rzędu setek tysięcy lat (Bi-210, Bi-208), bądź ten czas jest bardzo krótki (minuty – sekundy) (Bi-199 i dalsze). Poniższe wykresy pokazują zmiany intensywności tworzenia danego izotopu w funkcji odległości od czoła zestawu (Rys. 4.2) i w funkcji odległości od osi zestawu (odległość radialna) (Rys. 4.3).



Rys.4.2 Zmiana wielkości produkcji izotopu Bi-206 w funkcji odległości od czoła zestawu [20]. W ramce po prawej podane są wartości energii linii gamma emitowane przez rozpadający się izotop w keV. Wyraźnie jest widoczne maksimum produkcji danego izotopu w okolicy drugiej płaszczyzny pomiarowej. Powierzchnia pików jest ilością zliczeń pod pikiem minus tło.



Rys. 4.3 Zmiana wielkości produkcji izotopu Bi-204 w funkcji odległości radialnej od osi zestawu [20]. W ramce po prawej podane są wartości energii linii gamma emitowane przez rozpadający się izotop w keV. Powierzchnia piku jest ilością zliczeń pod pikiem minus tło.

Na podstawie wykresów zaprezentowanych powyżej widzimy że, tworzenie się izotopów w poszczególnych częściach zestawu zachodziło zgodnie z przewidywaniami tzn. w pierwszej płaszczyźnie, na którą padał strumień wtórnych neutronów pochodzący tylko z jednej strony – od tyłu, zawartość danego izotopu jest wyraźnie mniejsza niż w dalszych dwóch płaszczyznach. Przez dalsze płaszczyzny, przenikający je strumień wtórnych neutronów pochodzi z obszaru modelu położonego zarówno przed jak i za danej płaszczyzny. Strumień protonów pochodzący bezpośrednio od wiązki z akceleratora ma zbyt dużą energię aby brać udział w znaczącym stopniu w reakcjach (n,xn) odpowiedzialnych za tworzenie opisywanych izotopów. Dla wszystkich izotopów wyraźne maksimum jest w okolicy drugiej płaszczyzny (czyli odległości ok. 11 cm od czoła zestawu). W okolicy tej płaszczyzny suma strumieni wtórnych neutronów przychodzących z obu kierunków, jest największa. Jednak dla izotopów o mniejszej liczbie neutronów (wymagających większej energii uderzającego neutronu aby powstać) poziom produkcji jest wyraźnie niższy co sugeruje mniejszą gęstość neutronów o większej energii. Dla wszystkich izotopów na dwóch ostatnich płaszczyznach widzimy wyraźny spadek wielkości produkcji. W tej części zestawu wielkość strumienia protonów i neutronów jak i ich widmo energetyczne jest wyraźnie słabsze. Z wykresów zmienności radialnej widać, że ilość izotopów w zależności od odległości radialnej od osi gwałtownie zmniejsza się. Dzieje się tak z dwu powodów: efekt geometryczny oraz wyraźnie szybko malejąca energia wtórnych neutronów co można wnioskować na podstawie dużo większego zaniku dalszych izotopów (np. Bi-200).