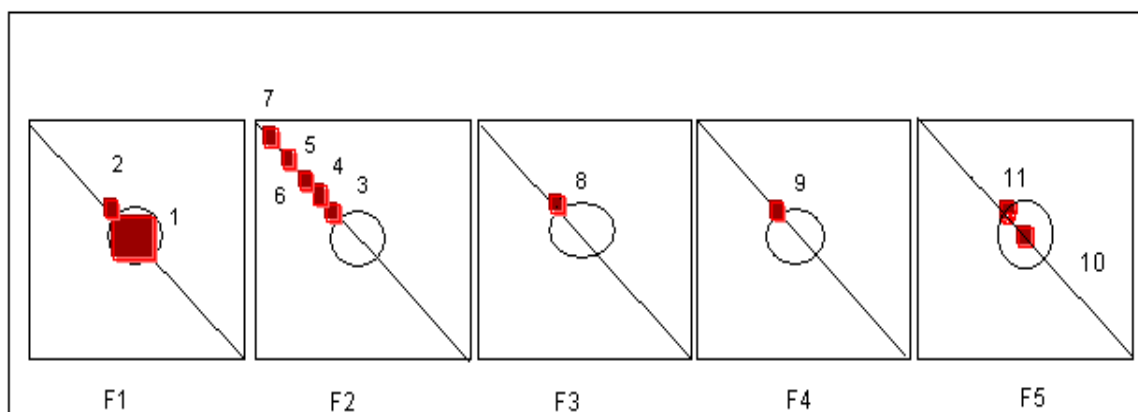


## 4.2 Eksperyment 0,7 GeV wiązka protonów [44]

Był to pierwszy eksperyment do którego wykorzystano wiązkę protonów z nowego nadprzewodzącego akceleratora (Nuklotron) w laboratorium ZIBJ Dubna [45],[46],[47]. Pierwszy, w którym użyto energii wiązki poniżej 1 GeV, ale przede wszystkim był to pierwszy eksperyment w którym użyto nowych detektorów, wykonanych z Itru. Był to też ostatni eksperyment w którym użyto wiązki protonowej. Doświadczenia i pomiary wykonano 26-27 czerwca 2004 roku, z użyciem 4-o sekcyjnego zestawu ołowiano-uranowego [20]. Wiązka protonów o energii 0,7 GeV była doprowadzana z Nuklotronu (nowego akceleratora). Naświetlanie trwało 31860 sek co pozwoliło zebrać około  $2 \cdot 10^{13}$  protonów z wiązki. Detektory aktywacyjne były umieszczone na pięciu foliach rozmieszczonych pomiędzy sekcjami uranowymi. Dodatkowo umieszczono jeszcze jedną folię z detektorami przed zestawem na drodze wiązki z akceleratora. Były to detektory użyte do oceny intensywności wiązki protonowej np.: 9-o częściowy detektor z folii aluminiowej. Pozostałe detektory rozmieszczono tak jak poprzednio w różnych odległościach od czoła i od osi zestawu. Detektory wykonane z Y-89 rozmieszczono wzdłuż dwu linii (Rys. 4.4 i Tab. 4.2). Pierwsza wzdłuż osi modelu w odległości 3 cm od osi (5 próbek na kolejnych foliach pomiarowych). Druga linia na drugiej folii (czyli pomiędzy pierwszą i drugą sekcją zestawu) w różnych odległościach radialnych od 3 cm do 13,5 cm (5 próbek). Na drugiej folii można się było spodziewać największej intensywności zachodzących reakcji.



Rys. 4.4 Rozmieszczenie próbek Y-89 [44] na poszczególnych foliach z detektorami. F1-F5 Kolejne folie rozmieszczono od czoła do końca zestawu eksperymentalnego. Odległości folii podano na rysunku 4.15. Numery próbek na rysunku są zgodne z numerami użytymi w Tabeli 4.2 gdzie podano dokładne odległości radialne.

Dodatkowo umieszczono dwie próbki dokładnie na osi modelu na pierwszej i ostatniej folii. Miały one za zadanie monitorować samą wiązkę protonową. W pierwszej próbce spodziewaliśmy się wykryć największą liczbę wyprodukowanych izotopów, w tym również izotopy powstałe z reakcji rozszczepienia (próbka „1” była wystawiona na bezpośrednie uderzenie wysokoenergetycznych protonów). Liczba wykrytych izotopów była znaczna, ale uzyskane dane były nie do powiązania z innymi próbkami, gdyż różniła się ona znacznie od pozostałych. Próbka „1” miała dużo większy rozmiar (kwadrat o bokach ok. 2 cm) i była wykonana z pyłu itrowego zapakowanego w plastikowa kopertę. Pył ten był pozostałością po ciecieniu pozostałych próbek. W kolejnych eksperymentach nie używaliśmy detektora skonstruowanego w ten sposób. Ostatnie próbki (nr 10 i 11), umieszone na piątej folii dały

niestety bardzo słabe wyniki. Przy małej masie próbek i niskiej energii wiązki z akceleratora stopień ich aktywacji był zbyt mały aby wykonać później dobre pomiary na detektorze gamma. Pozostałe próbki dały dobre rezultaty osiowego i radialnego rozkładu zmian wytwarzanych izotopów, które zostaną zaprezentowane w dalszej części tego podrozdziału.

Nr	Symbol	Numer folii	Odległość od osi [cm]	Masa [g]	Uwagi
1	Y1_0	F1	0,0	1,98	Proszek
2	Y1_1	F1	3,0	0,80	
3	Y2_1	F2	3,0	0,825	
4	Y2_2	F2	6,0	0,78	
5	Y2_3	F2	8,5	0,79	
6	Y2_4	F2	10,5	0,91	
7	Y2_5	F2	13,5	0,90	
8	Y3_1	F3	3,0	1,33	
9	Y4_1	F4	3,0	1,16	
10	Y5_0	F5	0,0	0,90	
11	Y5_1	F5	3,0	1,57	

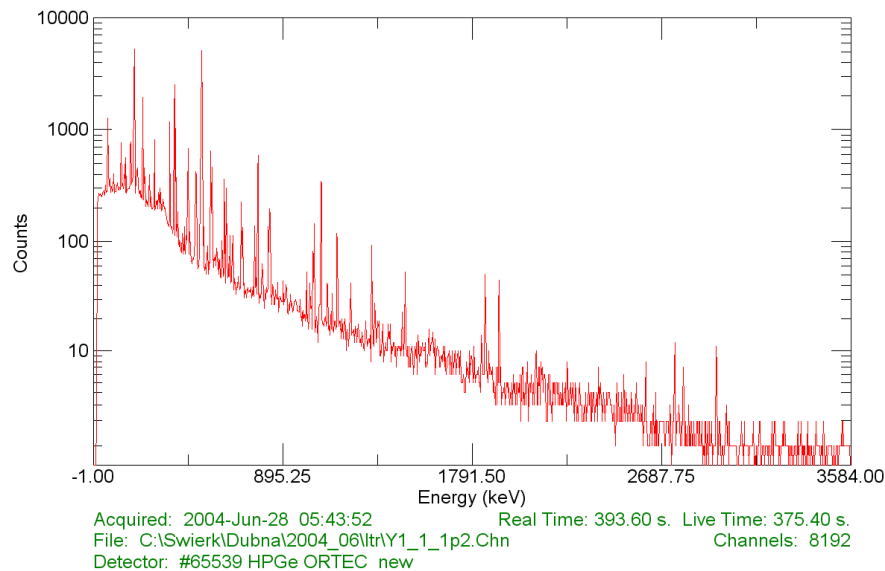
Tab. 4.2 Rozmieszczenie detektorów Y-89 podczas eksperymentu z wiązką prot. 0,7 GeV. Numery próbek z pierwszej kolumny są zgodne z numerami na Rysunku 4.4. Odległości folii F1-F5 podano na rysunku 4.15.

Eksperyment wykonano w nocy z 27 na 28 czerwca 2004 roku. Czas naświetlania modelu wiązką protonową wyniósł 31860 sek. Łączna intensywność wiązki wyniosła około  $1,4 \cdot 10^{13}$  protonów. Po eksperymencie próbki zostały przewiezione do sali pomiarowej. Pomiary widm rozpoczęły się około 2 godzin po skończeniu eksperymentu i trwały przez kilka kolejnych dni. Do pomiarów użyto detektora germanowego ORTEC (Rys. 3.20). Wykonano dwie serie pomiarów próbek Y-89, o czasie pomiarów, odpowiednio około 400 sek. i około 2500 sek. Czas pomiaru uzależniony był od uzyskanego natężenia (obserwowanego na monitorze podczas pomiaru w czasie rzeczywistym) kilku wybranych wcześniej linii (Tab. 4.3), tak by linie te były około 10-o krotnie silniejsze od tła.

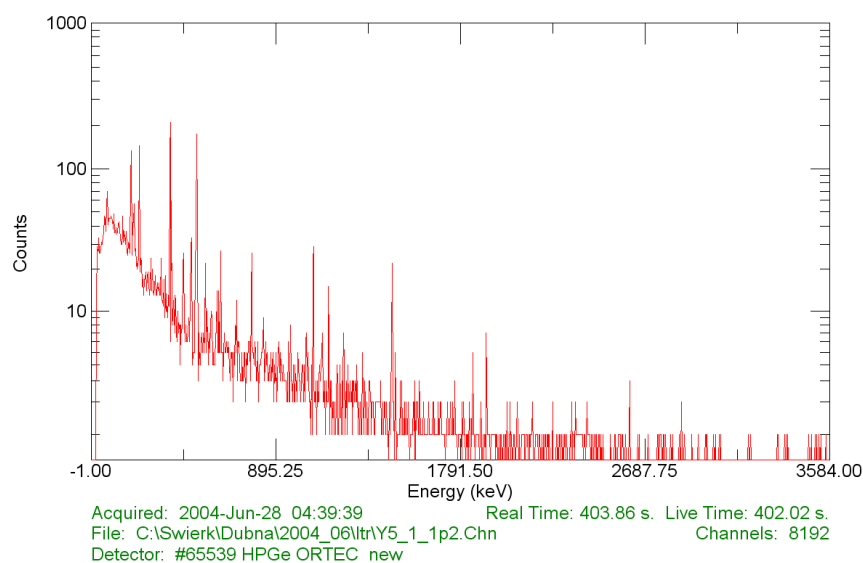
	Energia linii [keV]	Nazwa izotopu źródłowego	Czas połowicznego rozpadu
Główne linie krótko życiowe	202,51	Y-90	3,19 godz
	231,67	Y-85	2,68 godz
	497,17	Y-90	3,19 godz
	504,45	Y-85	2,68 godz
Główne linie średnio życiowe	380,79	Y-87 (a)	13,37 godz
	1076,64	Y-86	14,74 godz
	1920,72	Y-86	14,74 godz
Główne linie długo życiowe	388,531	Y-87 (b)	79,8 godz
	484,805	Y-87 (b)	79,8 godz

Tab. 4.3 Przykład zbioru linii gamma jaki był używany do oceny potrzebnego czasu pomiaru próbki na detektorze germanowym, oraz do wstępnej oceny i kalibracji uzyskanego widma.

Linie te zostały wybrane wcześniej tak by wyraźnie odznaczały się od tła (najsilniejsze) oraz by były przedstawicielami kilku różnych izotopów o wyraźnie różniącym się czasie połowicznego rozpadu. Dodatkowo przydatne jest aby pochodziły z możliwie najszerszego spektrum energetycznego, ze względu na różnice w czułość detektora, przy różnych energiach. Otrzymane widma (przykłady na rys. 4.5a i 4.5b) były następnie analizowane za pomocą programu DEIMOS [35].



Rys. 4.5a Przykład silnego widma – duża wartość tła. Widmo energetyczne z próbki Y-89 umieszczonej na drugiej folii w odległości 3cm od osi zestawu. Czas pomiaru ok. 400 sek. Na osi Y liczba zliczeń kwantów gamma w danym kanale detektora – skala logarymiczna. 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.



Rys. 4.5b Przykład słabego widma – mała wartość tła. Widmo energetyczne z próbki Y-89 umieszczonej na piątej folii w odległości 3cm od osi zestawu. Czas pomiaru ok. 400 sek.

Pełna lista wykonanych pomiarów wraz z ich parametrami prezentuje tabela 4.4. Podczas wszystkich pomiarów (oprócz jednego- patrz tabel 4.4), mierzona próbka była umieszczona w najbliższej możliwej odległości od główki detektora (pozycja 2) aby maksymalnie zwiększyć efektywność pomiarów. Po analizie uzyskanych pomiarów widm, zidentyfikowano liczne izotopy, w tym najbardziej nas interesujące izotopy itru pochodzące z reakcji progowej (n,xn). Listę podstawowych zidentyfikowanych izotopów wraz z liniami gamma, jakie posłużyły do ich identyfikacji prezentuje tabela 4.5. Ponadto w **Aneksie A** prezentowana jest grafika ułatwiająca w zorientowaniu się, dzięki jakim kanałom powstawały dane izotopy, oraz które izotopy były prawdopodobnie obecne, ale miały zbyt krótki czas życia by je odnaleźć. Dzięki tej grafice można bardzo łatwo ocenić, jakie dodatkowe izotopy można poszukiwać w analizowanych widmach mimo bardzo słabych linii gamma, powstałych podczas ich rozpadu.

Detektor #65539 HPGe ORTEC NEW			8192 kanałów			liczony od 1:58 28-06-04		
Nr	Nazwa pliku	Numer próbki	Data	Start	Czas pomiaru	Rzeczywisty czas pomiaru	Położenie	Czas od końca eksperymentu
1	Y2_1_1p2	3	28-06-2004	03:54:22	387,88	370,28	2	6982
2	Y1_0_1p2	1		04:17:57	439,32	387,16	2	8397
3	Y5_1_1p2	11		04:39:39	403,86	402,02	2	9699
4	Y4_1_1p2	9		05:01:31	363,10	353,78	2	11011
5	Y3_1_1p2	8		05:22:37	371,26	355,30	2	12277
6	Y1_1_1p2	2		05:43:52	393,60	375,40	2	13552
7	Y3_0_1p2	10		06:05:55	386,34	384,20	2	14875
8	Y2_0_1p2	7		06:28:55	400,08	391,52	2	16255
9	Y3_2_1p2	6		06:54:50	383,52	378,46	2	17782
10	Y2_3_1p2	5		07:18:44	377,52	374,36	2	19244
11	Y2_2_1p2	4		07:52:17	689,30	680,46	2	21257
12	Y1_0_2p2	1		23:02:14	2604,32	2518,58	2	75854
13	Y2_1_2p2	3	29-06-2004	00:55:49	1608,12	1587,50	2	82669
14	Y3_0_2p2	10		01:58:13	3029,40	2991,76	2	86413
15	Y5_1_2p2	11		03:29:01	2772,46	2756,86	2	91861
16	Y4_1_2p2	9		04:58:43	2003,64	1994,20	2	97243
17	Y3_1_2p2	8		06:10:29	2059,76	2041,38	2	101549
18	Y2_0_2p2	7		07:36:04	2799,30	2782,30	2	106684
19	Y3_2_2p2	6		08:56:37	2024,84	2011,72	2	111517
20	Y2_3_2p2	5		10:02:57	2249,70	2234,22	2	115497
21	Y2_2_2p2	4		11:18:10	2132,80	2117,74	2	120010
22	Y1_1_2p2	2		12:37:30	2628,06	2600,82	2	124770
23	Y1_0_3p2	1	30-06-2004	08:55:13	5326,74	5245,30	2	197833
24	Y2_1_3p4	3					4	
25	Y1_0_4p7	1	30-06-2004	15:29:45	7365,38	7287,14	7	221505

Tab. 4.4 Pełna lista pomiarów próbek Y-89 z parametrami z eksperymentu czerwiec 2004 r.

Po wykonaniu kalibracji uzyskanych wyników, wszystkie rezultaty normalizowane były do jednakowej postaci parametru B [20] (pełny opis parametru B – patrz rozdział 3.6). Parametr B - liczba powstałych nukleonów danego izotopu na jeden gram materiału próbki, oraz na jeden uderzający proton pochodzący z wiązki z akceleratora. Uzyskane wyniki przedstawione są na wykresach w dwu postaciach. Pierwsza będzie prezentowała wyniki pochodzące z każdej linii gamma z osobna, druga będzie uśredniała wynik ze wszystkich linii pochodzących od danego izotopu. Na Rysunku 4.6 widzimy jak zmieniała się intensywność

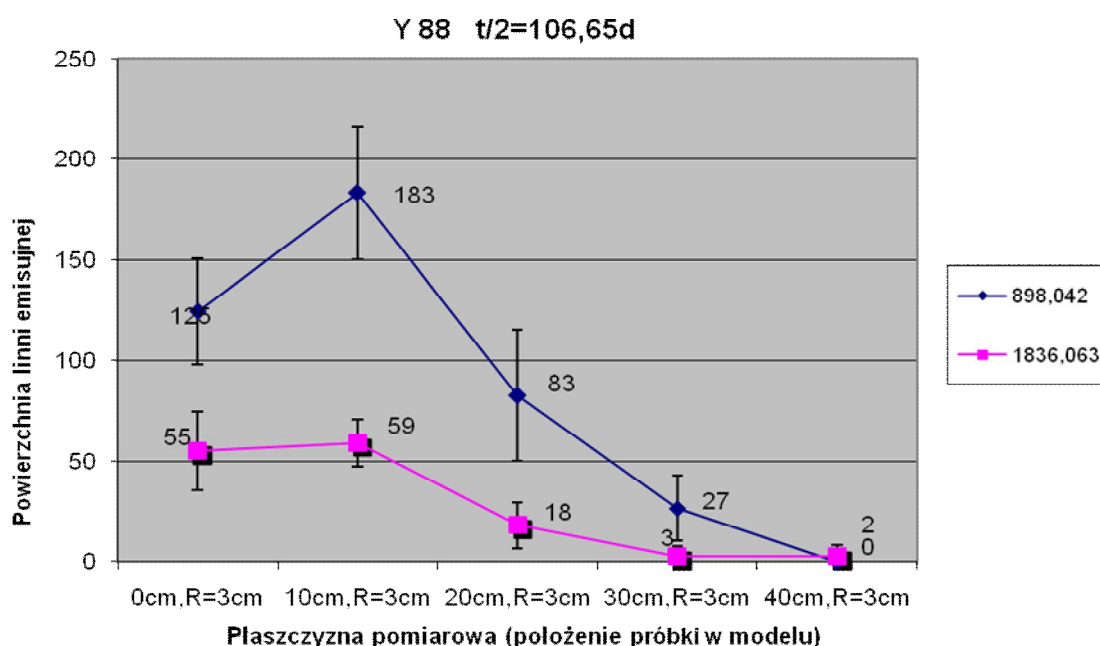
tworzenia izotopu itru Y-88 w funkcji odległości od czoła zestawu. Izotop ten powstał poprzez reakcję (n,2n) polegającą na wychwycie jednego neutronu i następnie wyemitowaniu dwóch. Energia progowa dla tej reakcji wynosi 11,5 MeV. Można powiedzieć, że wykres ten jest reprezentatywny dla określenia rozkładu pola neutronów w naszym zestawie o energii nie mniejszej niż 11 MeV, w którym większościowy udział stanowią neutrony o energii rzędu kilkunastu MeV (energia progowa następnej reakcji (n,3n) wynosi 20,8).

Nr	Reakcja	Powstały izotop	Czas połowicznego życia	Energia progowa reakcji [Mev]	Energia linii [keV]	Intensywność linii [%]	
1	(n,2n)	Y-88	106,65d	11,5	898,0	93,7	
					1836,1	99,2	
2	(n,3n)	Y-87	79,8h	20,8	388,5	82,00	
					484,8	89,7	
					380,8	78	
3	(n,4n)	Y-86	14,74h	32,7	627,7	32,6	
					703,3	15,4	
					777,4	22,4	
					1076,6	82,00	
					1153,0	30,50	
					1854,4	17,2	
					1920,7	20,8	
4	(n,5n)	Y-85	2,68h	42,1	231,7	84	
					504,5	60	
					913,9	9,00	
					4,86h	231,7	22,8
					1404,8	3,08	
					2123,8	5	
5	(n,6n)	Y-84	39,5m	54,4	793,3	99	
					974,6	75	
6		Sr-85	64,84d	38,1	1040,2	56	
					514,0	96	
					151,2	12,9	
7		Sr-83	32,41h	58,6	231,7	84,4	
					381,5	14,1	
8		Rb-83	86,2d	55,6	762,7	30	
					520,4	44,7	
9		Rb-82	6,47h	66,4	552,6	16	
					554,3	62,4	
10		Rb-81	4,576h	75,3	619,1	37,975	
					698,4	26,3	
					1007,6	7,17	
					1044,0	32,068	
					1317,5	23,7	
					1474,9	15,53	
					190,5	64	
11		Kr-77	74,4m		446,2	23,2	
					129,6	81	
12		Br-77	57,036h		146,6	37,3	
					239,0	23	
13		Br-75	96,7m		520,6	22,4	
					141,3	6,6	
					286,5	88	
					377,4	39,3	
14		Se-73	7,15h		427,9	4,4	
					67,0	78	
					360,8	108	

Tab. 4.5 Lista zidentyfikowanych izotopów powstałych w próbkach Y-89 w eksperymencie czerwiec 2004 r. Podano linie gamma jakie posłużyły do ich identyfikacji. Przygotowane za pomocą bazy izotopów NUBASE [33] i Firestone [34].

Na rysunku 4.6 zaznaczono oddzielnie intensywności obu linii emisyjnych izotopu Y-88. Tylko na tym wykresie zaznaczono wielkość błędów pomiarowych, na dalszych rysunkach ich nie zaznaczono, aby zwiększyć czytelność rysunków. Wielkość tego błędu jest

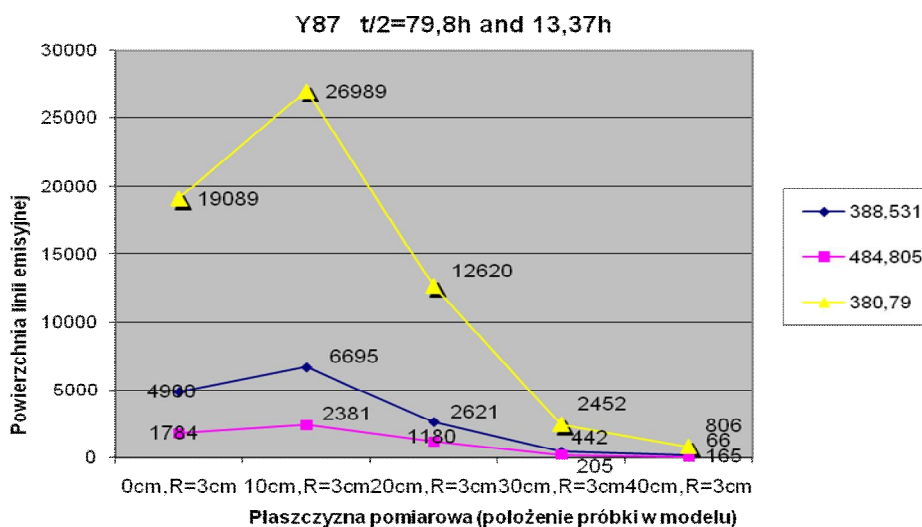
bezpośrednim przełożeniem intensywności danej linii w stosunku do tła (błąd statystyczny przy wyznaczaniu pola piku), i w stosunku do najsłabszych linii potrafi sięgać wielkości rzędu kilkudziesięciu procent, jednak w przypadku tego izotopu obie linie miały dużą intensywność i błąd był niewielki (rzędu kilku procent). Na wykresie (rys. 4.6) widzimy standartowy (w naszych doświadczeniach) rozkład. W okolicy drugiej płaszczyzny następuje maksimum produkcji danego izotopu, które następnie dość szybko zmniejsza się. Jest to też obszar (w odległości około 11 cm od czoła) gdzie intensywność pola neutronów o energii w zakresie 10-20 MeV jest największa. Wartości odległości (oś X), są orientacyjne. Na wykresie nie wykonano ekstrapolacji wyników a tylko połączono linią kolejne punkty pomiarowe. Porównując wyniki z produkcji kilku różnych izotopów i z różnych eksperymentów, można było obserwować stałą tendencję. Największa gęstość (intensywność pola neutronów) w zestawie ołowiano - uranowym występuje w odległości około 11 cm od czoła modelu niezależnie od energii wiązki protonowej z akceleratora. Wniosek ten potwierdziły rezultaty z kilku eksperymentów [40].



Rys. 4.6 Rozkład produkcji izotopu Y-88 (na podstawie dwu linii gamma 898 i 1836 keV) obserwowanej wzdłuż osi zestawu, 3cm powyżej osi. Na osi X jest orientacyjna odległość od czoła zestawu w [cm]. Pełny opis rysunku w tekście powyżej. Ramka po prawej - energia linii gamma w keV. Powierzchnia linii jest ilością zliczeń pod pikiem minus tło. [44]

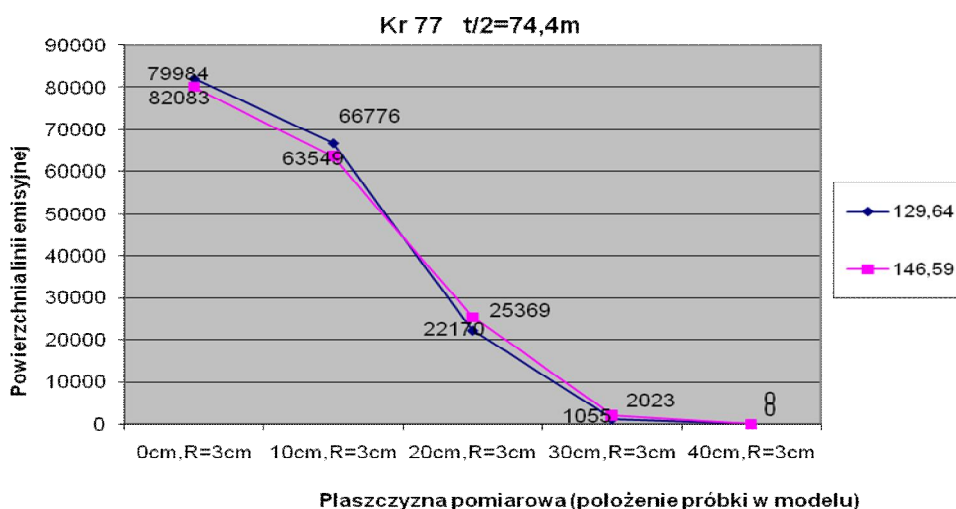
Gdy wiązka cząstek z akceleratora wpada do zestawu U-Pb, wywołuje one kolejne reakcje (nazwę je pierwotnymi). Za każdym razem nukleony w nich uczestniczące tracą część swojej energii. Procesy te z początku mają silny związek z samym strumieniem i rozkład neutronów (pierwotnych) o wysokich energiach też jest z tym strumieniem (kierunkiem) związany. Dla niższych energii (wzbudzenie a nie rozpad jądra - waporyzacja) emisja neutronów (nazwano je wtórnymi) następuje we wszystkich kierunkach równomiernie. Na czole zestawu będą obecne tylko neutrony wtórne, które poruszały się od wnętrza zestawu. W pewnej odległości od czoła wystąpi maksimum, ponieważ strumień będzie sumą cząstek nadlatujących z obu kierunków (zgodnym i przeciwnym do strumienia z akceleratora). W jeszcze dalszych odległościach od czoła zestawu sama liczba reakcji pierwotnych zaczyna bardzo szybko zmniejszać się. Związane jest to z możliwością penetracji zestawu przez

wiązkę z akceleratora. Pole neutronów wtórnych również zmniejsza swą wartość. Na kolejnym rysunku (Rys. 4.7) dla izotopu Y-87 widzimy taką samą zależność.

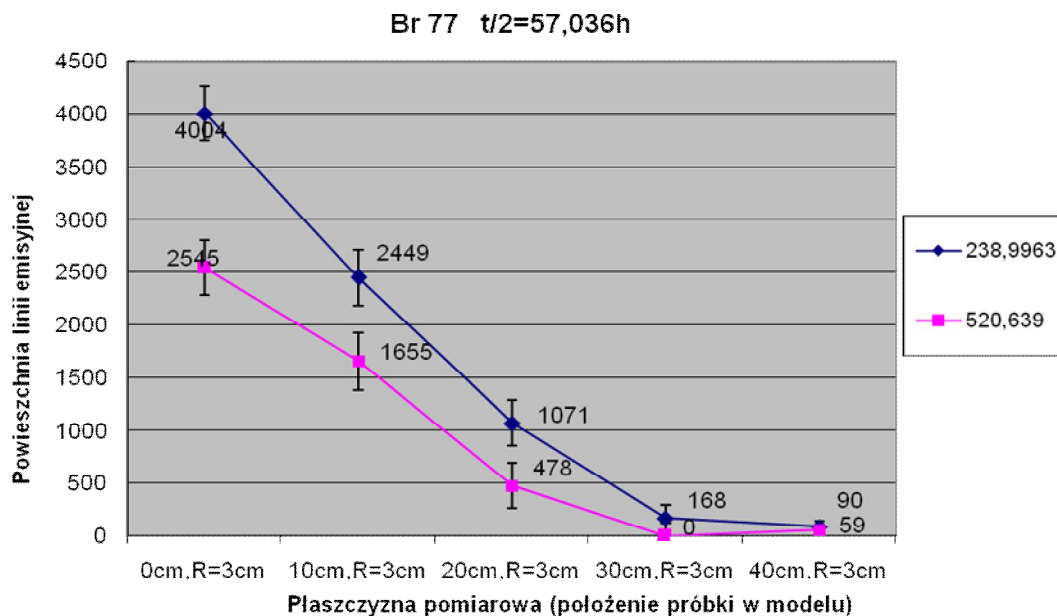


Rys. 4.7 Rozkład produkcji izotopu Y-87 wzdłuż osi zestawu, 3cm powyżej osi. Ramka po prawej - energia linii gamma w keV. Powierzchnia linii jest ilością zliczeń pod pikiem minus tło.

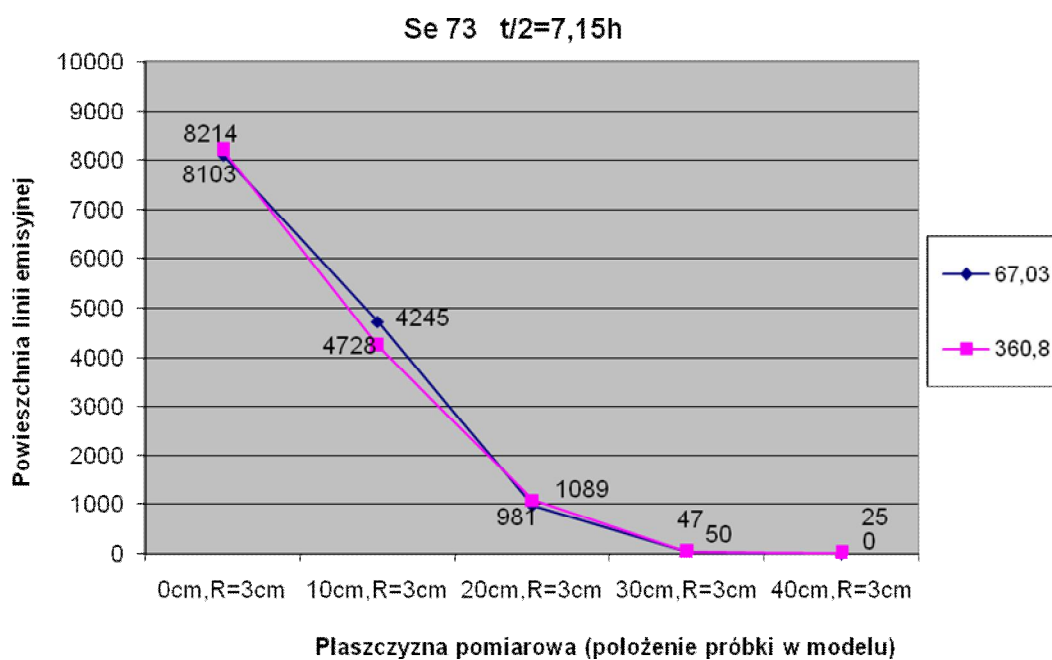
Na kolejnych 3 wykresach (Rys. 4.8, 4.9, 4.10) widzimy produkcję izotopów Kr-77, Br-77 i Se-73. Każdy kolejny z tych izotopów wymaga wyższej energii neutronów. W przypadku selenu jest to energia przekraczająca 100 MeV (wartość oszacowana na podstawie znanych energii reakcji (n,xn)). Wyraźnie widać, że zmienia się charakter rozkładu pola neutronów w zależności od ich energii. W przypadku mniejszych energii dominujący wpływ mają neutrony wtórne, których rozkład kierunków jest sferyczny w stosunku do jądra, z którego zostały wyemitowane. Jednak dla wyższych energii coraz większy wpływ mają neutrony produkowane pod wpływem pierwotnych cząstek ze strumienia z akceleratora, ich rozkład kierunkowy jest też przez ten strumień zdominowany. Dla Kr-77, Br-77 i Se-73 (Rys. 4.8-4.10) nie obserwujemy maksimum rozkładu w okolicy 11 cm. Maksimum to przesuwa się do czoła zestawu. Tylko tam występuje duża liczba neutronów o odpowiednio dużej energii, aby zainicjować daną reakcję. Następnie, wraz z odległością od czoła, udział tych neutronów bardzo szybko spada (neutrony o wysokiej energii są szybko rozpraszane na kolejnych zderzeniach).



Rys.4.8 Rozkład produkcji izotopu Kr-77 wzdłuż osi zestawu, 3cm powyżej osi. Ramka po prawej - energia linii gamma w keV. Powierzchnia linii - ilością zliczeń minus tło.



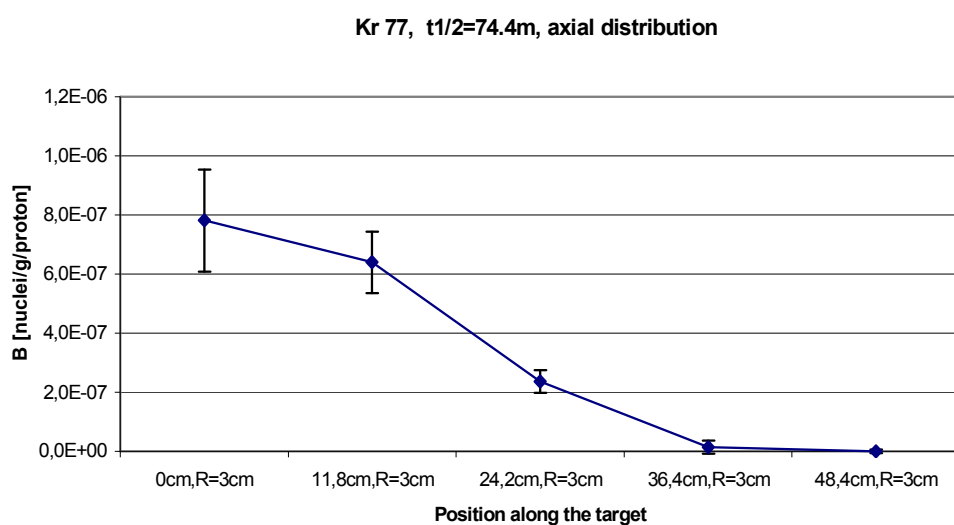
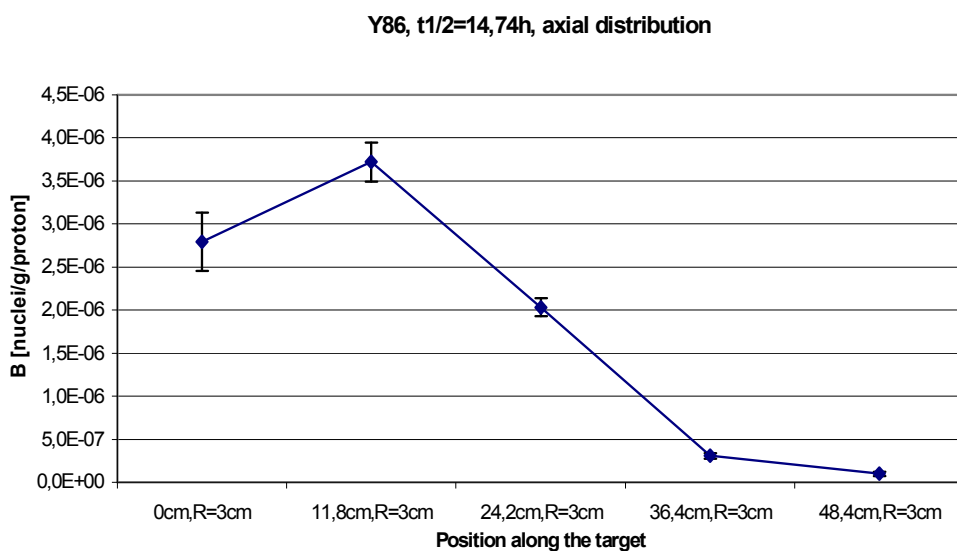
Rys.4.9 Rozkład produkcji izotopu Br-77 wzdłuż osi zestawu, 3cm powyżej osi. Ramka po prawej - energia linii gamma w keV. Powierzchnia linii - ilością zliczeń minus tło.



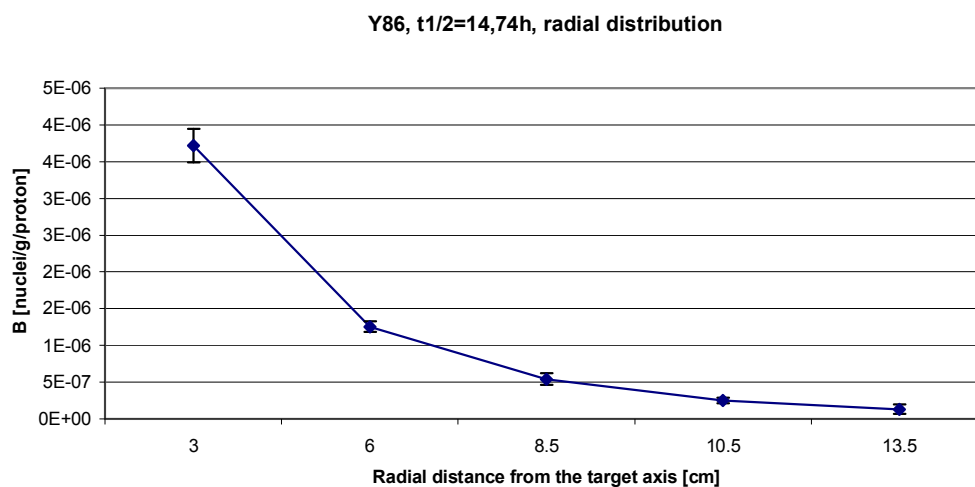
Rys.4.10 Rozkład produkcji izotopu Se-73 wzdłuż osi zestawu, 3cm powyżej osi. Ramka po prawej - energia linii gamma w keV. Powierzchnia linii - ilością zliczeń minus tło.

Na Rys. 4.11 i 4.12 wykresy prezentują wartości uśrednione ze wszystkich zmierzonych linii (które nie miały bardzo dużych błędów pomiarowych) i znormalizowanych do wartości parametru B [40]. Na Rys. 4.11 widać znormalizowaną intensywność produkcji izotopów Y-86, Kr-77. Na Rys. 4.12 przedstawiono produkcję Y-86 w funkcji odległości radialnej (odległości od osi zestawu). Wykres zmian radialnych jest całkowicie zgodny z oczekiwaniami, czyli intensywność zmniejsza się wraz ze wzrostem odległości.





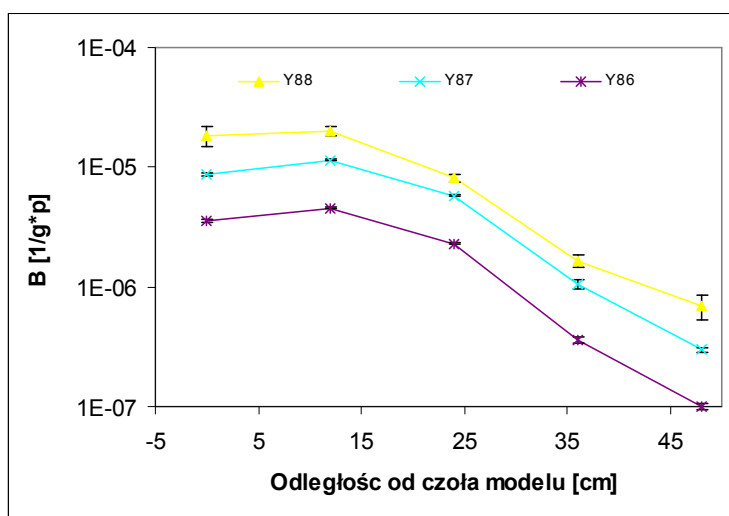
Rys. 4.11 Porównanie osiowej dystrybucji produkcji izotopu Y-86 [44] (górny rysunek) z osiową dystrybucją produkcji izotopu Kr-77 (rysunek dolny). Oś X odległość od czoła modelu.



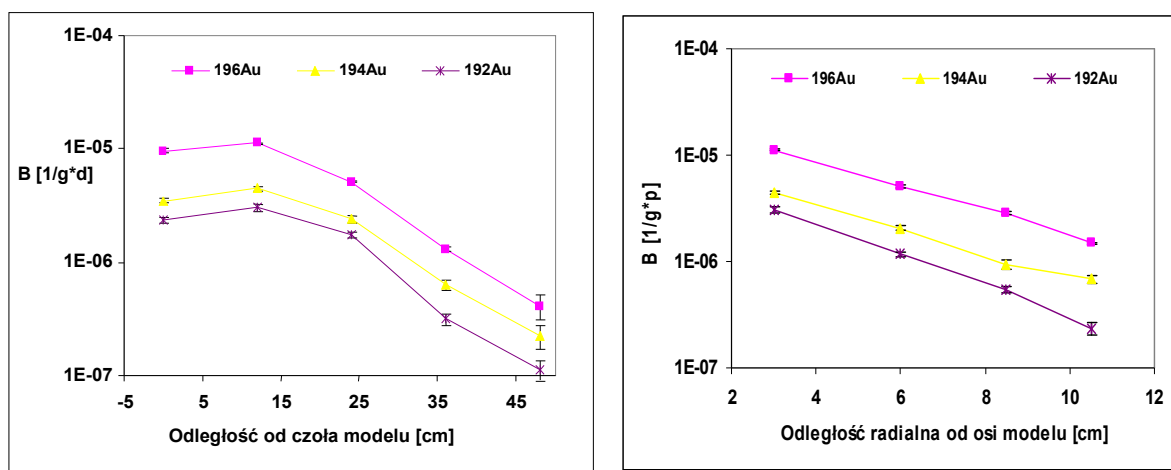
Rys. 4.12 Radialna dystrybucja produkcji izotopu Y-86.

Na zakończenie opisu tego eksperymentu przedstawione zostaną porównania wyników dla dwu rodzajów detektorów (wykresy przygotowane przez Ondřej Svoboda [5]). Na rysunku 4.13a widzimy rezultaty analizy detektorów wykonanych z Y-89. Gdy porównamy ten wykres z wcześniejszym Rys. 4.11, widzimy zgodność wyników (wielkość produkcji dla izotopu Y-86).

Na rysunku 4.13b przedstawione są wyniki analizy czeskiej grupy detektorów wykonanych ze złota Au-197 (rozkład osiowy i radialny). Na ich podstawie widzimy, że wydajność produkcji izotopów złota jest zbliżona do izotopów itru oraz, że mają taką samą tendencję (miejsce występowania maksimum produkcji). Próbkę złota były rozmieszczone w podobny sposób jak itru. To znaczy w tej samej odległości od osi (3 cm), tylko pod innym kątem względem osi.



Rys. 4.13a Rozkład produkcji trzech izotopów Itru Y-88, Y-87, Y-86 obserwowanej wzdłuż osi zestawu, 3cm powyżej osi [5].



Rys. 4.13b Rozkład produkcji trzech izotopów Złota Au-196, Au-194, Au-192. Obserwowanej wzdłuż osi zestawu, 3cm powyżej osi – rysunek z lewej. oraz zmiany radialne w odległości ok. 12 cm od czoła zestawu – rysunek z prawej [5].