

4.5 Wyznaczenie pola neutronów na podstawie danych eksperymentalnych i porównanie wyników z symulacjami za pomocą kodu MCNPX

W poprzednich rozdziałach opisano eksperymenty z udziałem itrowych detektorów aktywacyjnych oraz zaprezentowano uzyskane wyniki pod postacią parametru B, obrazującego wydajność danej reakcji jądrowej czyli wydajność produkcji danego izotopu w przeliczeniu na 1g próbki i 1 deuteron z wiązki z akceleratora. W tym rozdziale zostanie przedstawiony sposób wyznaczania wartości strumienia pola neutronów w kilku przedziałach energii na podstawie danych eksperymentalnych (parametru B). Część uzyskanych rezultatów zostanie porównana z symulacjami za pomocą kodu MCNPX. Zaprezentowany poniżej sposób wyznaczenia pola neutronów, za pomocą analizy znanych reakcji progowych w badanych izotopach, nie jest sposobem zupełnie nowym. Stosowano go już w przeszłości, w różnych zadaniach np.: w pracy [53] opisano wykorzystanie podobnej metody rachunkowej do wyznaczenia przekroju czynnego jednej reakcji przy znanych przekrojach kilku innych reakcji o energiach progowych większych niż reakcji poszukiwanej oraz z użyciem znanego kwazi-monochromatycznego źródła neutronów. Metoda z tej pracy [53] była przeznaczona dla neutronów o wysokiej energii. Problemem wtedy występującym była trudność wykorzystania skutecznych technik numerycznych. Z biegiem czasu moce obliczeniowe komputerów wzrosły oraz opracowano liczne numeryczne techniki obliczeniowe (np. TALYS [54] i MCNPX [52]) niemożliwe do zastosowania wiele lat temu. Biorąc pod uwagę metodę z pracy [53], opracowano prosty sposób wyznaczenia pola neutronów wysokich energii. Wykorzystano w niej np. możliwość wyznaczenia numerycznego [54] krzywych przekroju czynnego dla wszystkich potrzebnych reakcji (Rys. 4.30). Nie było by to możliwe, gdyby przyjęto bazowanie tylko na danych uzyskanych eksperymentalnie.

Pierwszym krokiem, jaki należy wykonać jest próba wyznaczenia wartości pola neutronów. Trzeba zwrócić uwagę, że wartość parametru B (czyli wydajność produkcji danego izotopu) dla izotopów powstałych za pomocą reakcji (n,xn) jest prostym przełożeniem wartości pola neutronów dla energii zbliżonej (równej lub większej) do energii progowej danej reakcji. Porównując wartości parametru B mamy informacje o polu neutronów. Chcąc przełożyć to na konkretne wartości, należy przeprowadzić następujące rozumowanie.

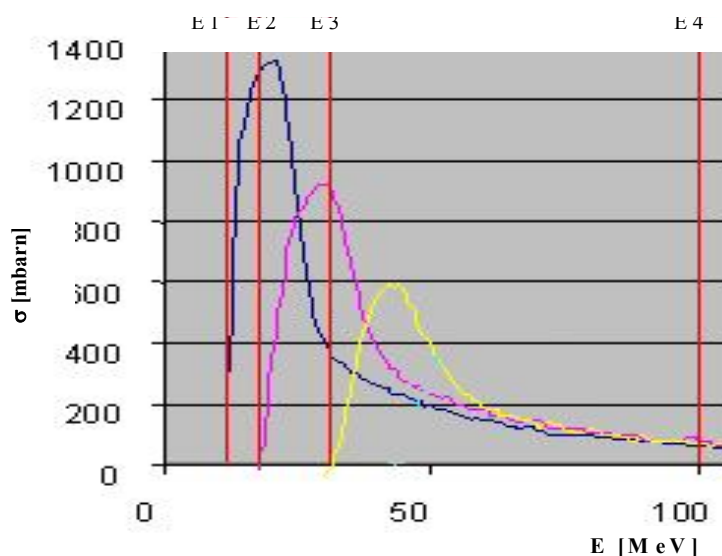
Całkowita ilość danego izotopu (liczba atomów) itru (N_y) wytworzona w próbce (detektorze) itru 89 o objętości (V_p) [cm^3], zawierającej (N) atomów itru 89, podczas trwania naświetlania o czasie (t) [s] oraz uwzględniając średni strumień neutronów z zadanego przedziału energii ($\bar{\Phi}$) [$\text{n/cm}^2 \cdot \text{s}$] wynosić będzie:

$$N_y = V_p \bar{\phi} N \bar{\sigma} t,$$

Gdzie $\bar{\sigma}$ [barn] jest średnim mikroskopowym przekrojem czynnym dla reakcji (n,xn) w przedziale energii (E_1 - E_2).

Na podstawie jednej danej eksperymentalnej np. wartości produkcji tylko jednego izotopu, ściśle wyznaczenie $\phi(E)$ jest niemożliwe. Można jednak wykorzystać kilka różnych kanałów reakcji (n,xn) i wykorzystując powyższe równanie dla każdego izotopu z osobna można sprowadzić ten problem do układu równań liniowych. Po wykorzystaniu danych doświadczalnych z tych kanałów reakcji (wyniki produkcji dla kilku różnych izotopów), układ ten sprowadza się do układu równań algebraicznych. Szczegóły wyprowadzenia

przedstawione zostały w ANEKSIE D niniejszej pracy. Na potrzeby tej pracy przeprowadzono uproszczone rozumowanie, tak by wyniki określające w przybliżeniu wartość strumienia neutronów można było uzyskać szybko. Po pierwsze zdecydowano się wykorzystać tylko 3 kanały reakcji dla Y-89: (n,2n), (n,3n) i (n,4n). Drugim uproszczeniem było takie dobranie zakresów energii neutronów, aby maksymalnie uprościć macierz ze średnimi przekrojami czynnymi (patrz wzór (13) w ANEKSIE D). Za granice kolejnych zakresów (grup) energetycznych przyjęto wartości kolejnych energii progowych na kolejne reakcje (n,xn) (Rys. 4.29). Dzięki temu trzy współczynniki w równaniach 8 i 9 (Aneks D) przyjęły wartość zero i otrzymano wzory na obliczenie wartości strumienia dla trzech różnych zakresów. Zakresy te mają różne rozmiary, co utrudnia ich porównywanie. Wartością eksperymentalną użytą do tych obliczeń jest parametr B (np. w Tab.4.7).



Rys. 4.29 Wykres przekrojów czynnych dla trzech pierwszych reakcji (n,xn) dla Y-89 (linia niebieska, różowa i żółta). Czerwone pionowe linie pokazują granice zakresów energii, dla których wyliczone zostaną wartości strumienia neutronów. E1 do E4 są to odpowiednio energie 11,5; 20,8; 32,7 i 100 MeV (trzy pierwsze to wartości energii progowych dla reakcji (n,xn)).

Metoda jest skutecznym narzędziem do szybkiego oszacowania wartości strumieni w interesujących nas zakresach energii neutronów. Po przeprowadzeniu wszystkich uproszczeń otrzymano 3 wzory na średnie strumienie $\bar{\phi}_1$ (zakres energii od 11,5 do 20,8 MeV), $\bar{\phi}_2$ (zakres od 20,8 do 32,7 MeV) i $\bar{\phi}_3$ (zakres od 32,7 do 100 MeV). Granicę trzeciego zakresu można było wybrać dowolną i zdecydowano się przesunąć ją znacznie ku wyższym energiom (100 MeV), gdzie wpływ neutronów o tej energii jest znikomy do pełnego bilansu wydajności danej reakcji progowej. Poniżej zaprezentowano trzy uzyskane wzory (pełne wyprowadzenie znajduje się w ANEKSIE D).

Wzór pierwszy na $\bar{\phi}_1$ jest najbardziej rozbudowany, bo uwzględnia najwięcej poprawek, bierze pod uwagę produkcję izotopu Y-88 nie tylko w pierwszym przedziale energii ale i w pozostałych, gdzie uruchamiają się już kolejne kanały reakcji. Uwzględnia prawdopodobieństwo, że w tych wyższych przedziałach energii, neutrony o energii wystarczającej do zainicjowania kolejnego kanału reakcji wytworzą dany izotop. Wzór trzeci na $\bar{\phi}_3$ jest najprostszy, gdyż nie musi uwzględniać poprawek od innych reakcji. Wszystkie średnie strumienie są wyrażone jako liczba neutronów przenikających powierzchnię 1 cm² w ciągu jednej sekundy.

$$\bar{\phi}_1 = \frac{C}{\sigma_{11}} \left[B^{88} - B^{87} \frac{\bar{\sigma}_{12}}{\sigma_{22}} + B^{86} \left(\frac{\bar{\sigma}_{23} \bar{\sigma}_{12}}{\sigma_{33} \sigma_{22}} - \frac{\bar{\sigma}_{13}}{\sigma_{33}} \right) \right]$$

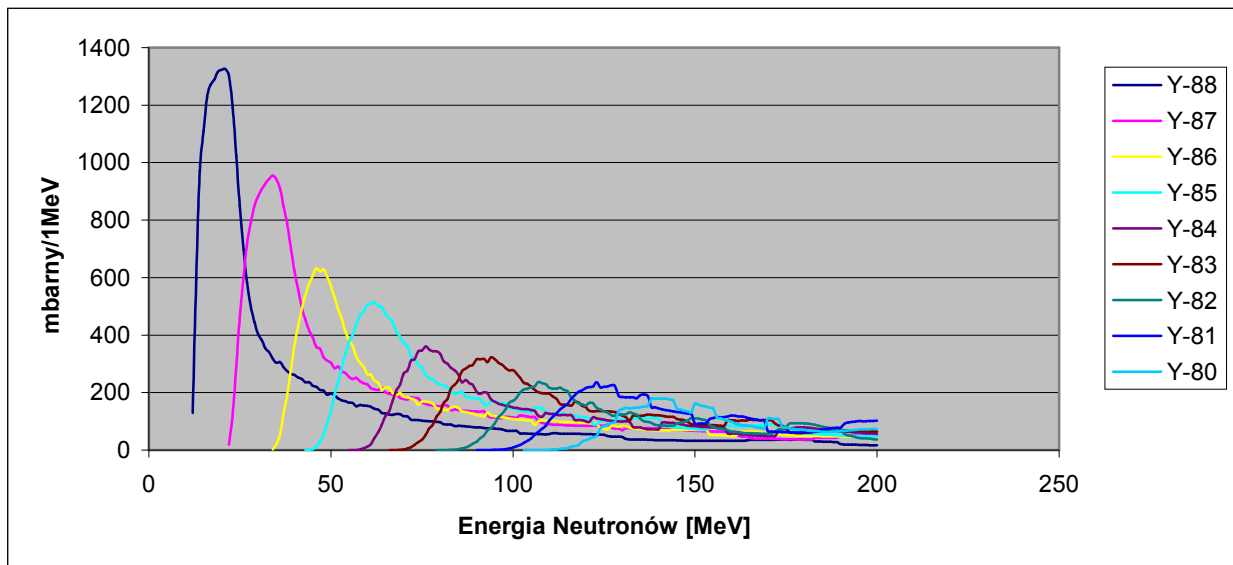
$$\bar{\phi}_2 = \frac{C}{\sigma_{22}} \left[B^{87} - B^{86} \frac{\bar{\sigma}_{23}}{\sigma_{33}} \right]$$

$$\bar{\phi}_3 = \frac{C}{\sigma_{33}} B^{86} \quad [1/\text{cm}^2/\text{s}]$$

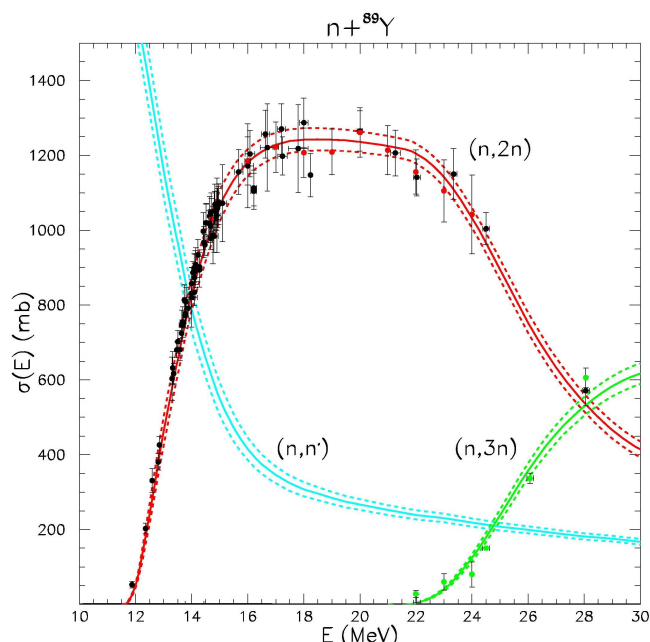
gdzie $C = \frac{S * G^{89}}{A * t}$

gdzie:

- S suma (liczba) deuteronów z wiązki podczas całego eksperymentu
- G^{89} gramatom (dla itru 89 ma wartość 89)
- A liczba Avogadro
- t czas naświetlania wiązka deuteronów [s]
- $\bar{\sigma}$ średnie wartości przekrojów czynnych dla danej reakcji w kolejnych przedziałach energii [cm^2]. (Rys. 4.29) (np.: $\bar{\sigma}_{12}$ oznacza średni przekrój czynny dla pierwszego izotopu Y-88 ale dla drugiego przedziału energii, $\bar{\sigma}_{33}$ to trzeci izotop Y-86 i trzeci przedział energii).



Rys. 4.30 Wartości przekrojów czynnych na reakcje (n,xn) tworzące izotopy z Y-89. Na wykresie widoczne są wartości dla izotopów od Y-88 do Y-80. Wyliczone przez M.Majerle [55], wykorzystując kod TALYS [54]. W ramce po prawej oznaczenia kolorów linii dla kolejnych izotopów itru.



Rys. 4.31 Wartości przekrojów czynnych dla reakcji (n,xn) dla Y-89 dostępnych w bazie danych eksperymentalnych EXFOR [14].

Wartości średnich przekrojów czynnych $\bar{\sigma}$ zostały wyznaczone na podstawie obliczonych wartości przekrojów na reakcje (n,xn) na 1 MeV za pomocą kodu TALYS [54]. Wykres z wyznaczonymi przekrojami czynnymi zaprezentowano na rysunku 4.30, do obliczeń wykorzystane zostały trzy pierwsze przekroje czynne (Rys. 4.29). Wcześniej wykonano porównanie wyników obliczonych dotyczących reakcji (n,2n) z wynikami eksperymentalnymi zgromadzonymi w bazie danych EXFOR [14] (Rys. 4.31). Zgodność tych danych była wystarczająco dobra (wartość maksymalna i punkt przecięcia z krzywą kolejnej reakcji (n,3n) zgodne), aby móc przyjąć założenie, że pozostałe reakcje zostały obliczone z równie dobrą dokładnością. W bazie danych przekrojów czynnych, uzyskanych eksperymentalnie [14], pełne dane są tylko dla pierwszej reakcji (n,2n). Dla pozostałych reakcji progowych, z udziałem neutronów, danych brak lub są one bardzo niekompletne. W związku z tym postanowiono posilkkować się wartościami obliczonymi numerycznie [54]. Jest to ważna przesłanka, aby w przyszłości uzupełnić bazy danych i wyznaczyć eksperymentalnie brakujące wartości przekrojów czynnych z udziałem itru. Eksperymenty te, jako rozwinięcie obecnie prowadzonych, planowane są w niedalekiej przyszłości w ramach europejskiego programu ERINDA. Po wykonaniu obliczeń uzyskano następujące wartości średnich przekrojów czynnych dla Y-88, Y-87 i Y-86:

- $\bar{\sigma}_{11}=1,17E-24 \text{ cm}^2$ reakcja Y-89(n,2n)Y-88 dla neutronów o energii 11,5-20,8 MeV
- $\bar{\sigma}_{12}=7,83E-25 \text{ cm}^2$ reakcja Y-89(n,2n)Y-88 dla neutronów o energii 20,8-32,7 MeV
- $\bar{\sigma}_{13}=1,53E-25 \text{ cm}^2$ reakcja Y-89(n,2n)Y-88 dla neutronów o energii 32,7-100 MeV
- $\bar{\sigma}_{22}=6,27E-25 \text{ cm}^2$ reakcja Y-89(n,3n)Y-87 dla neutronów o energii 20,8-32,7 MeV
- $\bar{\sigma}_{23}=2,94E-25 \text{ cm}^2$ reakcja Y-89(n,3n)Y-87 dla neutronów o energii 32,7-100 MeV
- $\bar{\sigma}_{33}=2,54E-25 \text{ cm}^2$ reakcja Y-89(n,4n)Y-86 dla neutronów o energii 32,7-100 MeV

Eksperyment (2,52 GeV)	Odległość radialna [cm]	Średni strumień na podstawie pomiarów Y-89				
		Odległość od czoła modelu [cm]				
		0.0	11.8	24.0	36.2	48.4
STRUMIEN 1 neutrony w zakresie od 11,5 MeV do do 20,8 (przedział 9,3)	0.0	5,51E+05	7,77E+05	8,77E+05	3,67E+05	1,16E+05
	3.0	6,53E+04	1,65E+05	2,00E+05	1,02E+05	5,35E+04
	6.0	4,09E+04	8,84E+04	8,52E+04	5,38E+04	2,84E+04
	8.5	2,90E+04	5,06E+04	5,35E+04	3,66E+04	1,67E+04
	10.5	2,49E+04	2,88E+04	3,86E+04	2,48E+04	1,33E+04
	13.5	1,22E+04	1,75E+04	2,20E+04	1,75E+04	7,64E+03
STRUMIEN 2 neutrony w zakresie od 20,8 MeV do do 32,7 (przedział 11,9)	0.0	1,51E+06	2,63E+06	2,36E+06	8,53E+05	2,66E+05
	3.0	2,79E+05	8,56E+05	7,13E+05	4,13E+05	1,91E+05
	6.0	1,63E+05	4,34E+05	3,23E+05	1,74E+05	8,82E+04
	8.5	9,73E+04	2,63E+05	2,11E+05	1,14E+05	5,88E+04
	10.5	6,30E+04	1,73E+05	1,45E+05	8,46E+04	4,30E+04
	13.5	4,98E+04	9,40E+04	7,98E+04	4,74E+04	2,79E+04
STRUMIEN 3 neutrony w zakresie od 32,7 MeV do do 100 (przedział 67,3)	0.0	3,01E+06	4,24E+06	4,79E+06	2,00E+06	6,36E+05
	3.0	3,57E+05	9,03E+05	1,09E+06	5,57E+05	2,92E+05
	6.0	2,23E+05	4,83E+05	4,65E+05	2,94E+05	1,55E+05
	8.5	1,58E+05	2,76E+05	2,93E+05	2,00E+05	9,12E+04
	10.5	1,36E+05	1,57E+05	2,11E+05	1,35E+05	7,24E+04
	13.5	6,69E+04	9,59E+04	1,20E+05	9,57E+04	4,17E+04

Tab. 4.8 Wartości średnich strumieni neutronów w trzech zakresach (przedziałach) energii w różnych punktach modelu ołowiu-uranowego „Energia plus Transmutacja”. Strumień wyrażony jest w ilości neutronów na 1 cm² w ciągu jednej sekundy. Dane pochodzą z eksperymentu z wiązką deuteronów o energii 2,52 GeV.

Wykorzystując wcześniej pokazany układ równań i podstawiając wyliczone średnie przekroje czynne oraz eksperymentalnie uzyskane wartości parametru B, wyznaczono wartości strumienia pola neutronów w trzech przedziałach energii w całym badanym przez nas zestawie eksperymentalnym E+T. Pełen zestaw wyników z dwu eksperymentów z użyciem wiązki deuteronów o energii 1,6 i 2,52 GeV, prezentują tabele 4.8 i 4.9. Na rysunkach 4.32, 4.33 i 4.34 przedstawiono uzyskane wyniki dla eksperymentu z wiązką deuteronów o energii 2,52 GeV. Wykresy te umożliwiają łatwą analizę rozkładu strumienia neutronów wewnątrz zestawu eksperymentalnego. Przesunięcie obszaru maksymalnego strumienia w kierunku trzeciej płaszczyzny w tym eksperymencie jest pozorne. Wyniki dla eksperymentu z wiązką deuteronów o energii 1,6 GeV (tab. 4.9) nie są obciążone tym błędem i w tym przypadku maksymalny strumień neutronów wypada w okolicy drugiej płaszczyzny pomiarowej.

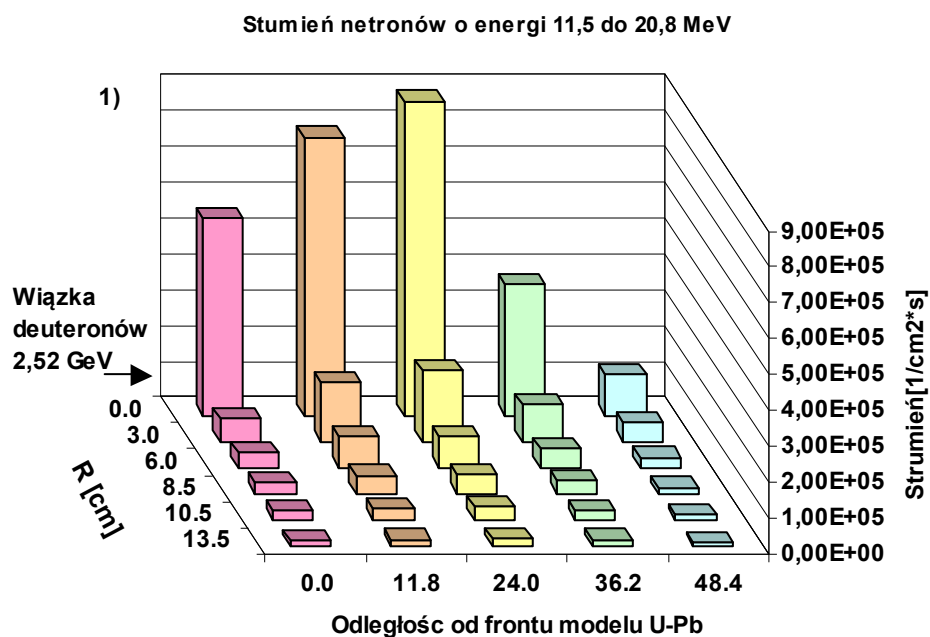
W kolejnym etapie analizy uzyskanych wyników wykonano porównanie uzyskanych wyników eksperymentalnych z kalkulacjami teoretycznymi. Do wykonania obliczeń użyto kodu MCNPX w wersji 2.5 [52]. Obliczenia wykonano dla eksperymentu z energią deuteronów 2,52 GeV. Obliczenia były wykonane metodą kombinowaną, tzn. strumień neutronów obliczany był za pomocą kodu MCNPX a przekroje czynne zostały wzięte z bazy danych EXFOR [14] zawierającej dane eksperymentalne (dotychczas najczęściej przekroje były też brane z bazy danych ENDF [7]). Następnie liczba reakcji została obliczana przy pomocy całki z iloczynu strumienia i przekroju czynnego. Liczba iteracji podczas obliczeń (statystyka) sięgała wartości 10⁶.

Obliczenia teoretyczne za pomocą kodu MCNPX uwzględniają tylko reakcje (n,xn) i (n,γ). Z powodu braku odpowiednich przekrojów czynnych nie uwzględniane są inne kanały

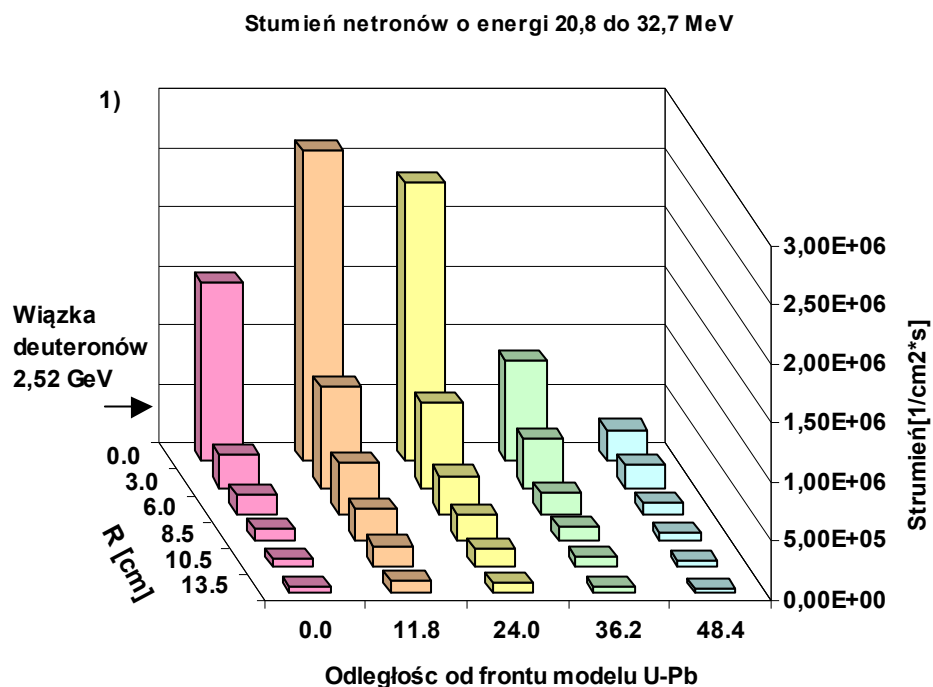
(reakcje), takie jak: (γ ,n), (p,d), (p,pn), (d,t), (d,p2n), jednak nie mają one znaczącego wpływu na końcowy rezultat obliczeń. Na rys. 4.35 widoczne jest porównanie wielkości produkcji izotopu Y-88 uzyskanej z eksperymentu i z obliczeń MCNPX dla odległości od osi modelu U-Pb 8,5 cm. Wykresy są zbliżone do siebie, co do kształtu a różnice w wartościach są rzędu 40-50%. Podobne lub mniejsze różnice, przy porównywaniu wartości eksperymentalnych z obliczonymi, miała grupa czeska [29], [30], [50], [56]. Dla wiązki protonowej o energii 0,7 GeV zgodność była lepsza (różnice rzędu 10-20%) (Rys. 4.36) i jedynie dla większych odległości radialnych różnice rosły. Przy większych energiach 1,5 i 2 GeV rozbieżności stały się znacznie większe (rzędu przynajmniej kilkudziesięciu %). Duże różnice były również widoczne dla krzywych zmienności radialnych (Rys. 4.37). Na kolejnym rysunku (Rys. 4.38) zaprezentowano dwie przykładowe krzywe zmian radialnych produkcji danego izotopu, dla odległości 12 i 24 cm od czoła modelu. Widać na nich dobrą zgodność kształtu krzywych z tymi uzyskanymi z obliczeń MCNPX, a różnice są rzędu 50%.

Eksperyment (1,6 GeV)	Odległość radialna [cm]	Średni strumień na podstawie pomiarów Y-89 odległość od czoła modelu [cm]				
		0.0	11.8	24.0	36.2	48.4
STRUMIEN 1	0.0	1,95E+06	3,52E+06	1,70E+06	7,40E+05	2,57E+05
neutrony w zakresie od 11,5 MeV do do 20,8 (przedział 9,3)	3.0	2,14E+05	9,36E+05	5,75E+05	3,37E+05	1,26E+05
	6.0	1,06E+05	3,11E+05	2,68E+05	1,60E+05	9,57E+04
	8.5	6,80E+04	1,85E+05	1,53E+05	1,04E+05	5,29E+04
	10.5	4,69E+04	1,17E+05	1,08E+05	6,47E+04	3,57E+04
	13.5	3,05E+04	6,81E+04	6,40E+04	3,91E+04	2,09E+04
STRUMIEN 2	0.0	6,06E+06	1,21E+07	5,89E+06	2,41E+06	7,75E+05
neutrony w zakresie od 20,8 MeV do do 32,7 (przedział 11,9)	3.0	1,24E+06	3,71E+06	2,23E+06	1,10E+06	4,83E+05
	6.0	6,03E+05	1,37E+06	1,17E+06	6,38E+05	2,78E+05
	8.5	4,02E+05	8,76E+05	7,47E+05	3,50E+05	1,57E+05
	10.5	2,80E+05	6,07E+05	5,09E+05	2,63E+05	1,37E+05
	13.5	1,61E+05	3,50E+05	2,74E+05	1,54E+05	9,78E+04
STRUMIEN 3	0.0	1,07E+07	1,93E+07	9,27E+06	4,04E+06	1,40E+06
neutrony w zakresie od 32,7 MeV do do 100 (przedział 67,3)	3.0	1,17E+06	5,11E+06	3,14E+06	1,84E+06	6,88E+05
	6.0	5,81E+05	1,70E+06	1,47E+06	8,77E+05	5,23E+05
	8.5	3,71E+05	1,01E+06	8,36E+05	5,66E+05	2,89E+05
	10.5	2,56E+05	6,38E+05	5,91E+05	3,53E+05	1,95E+05
	13.5	1,67E+05	3,72E+05	3,50E+05	2,14E+05	1,14E+05

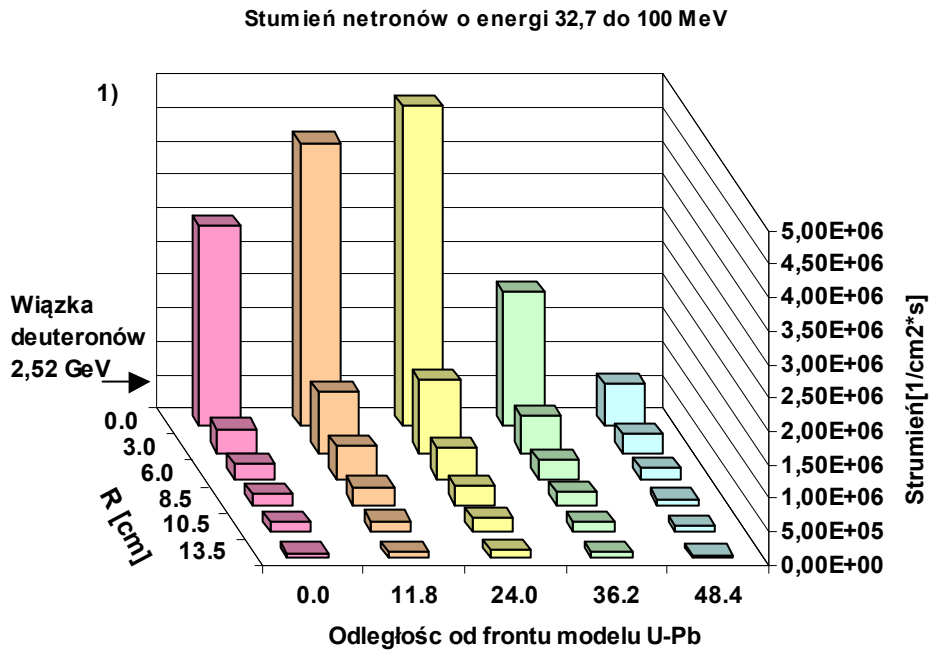
Tab. 4.9 Wartości średnich strumieni neutronów w trzech zakresach (przedziałach) energii w różnych punktach modelu ołowiu-uranowego „Energia plus Transmutacja”. Strumień wyrażony jest w ilości neutronów na 1 cm² w ciągu jednej sekundy. Dane pochodzą z eksperymentu z wiązką deuteronów o energii 1,6 GeV.



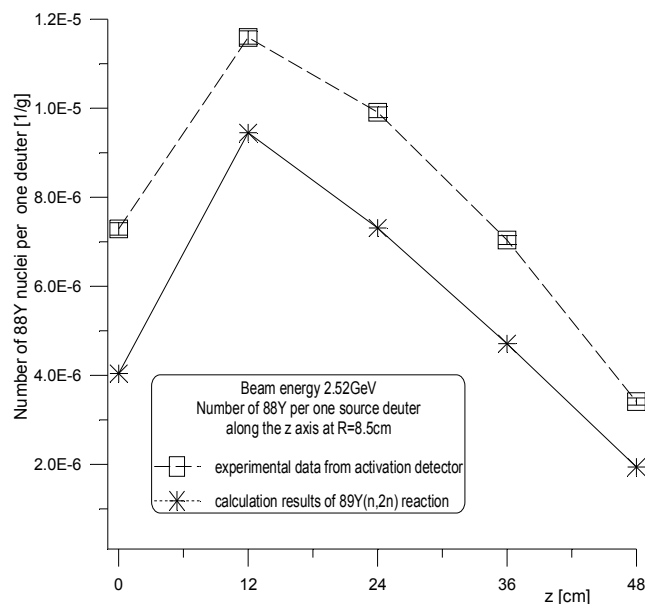
Rys. 4.32 Wykres rozkładu średnich strumieni neutronów wewnątrz zestawu U-Pb podczas eksperymentu z wiązką deuteronów 2,52 GeV dla przedziału energii neutronów od 11,5 do 20,8 MeV. Strumień wyznaczony za pomocą reakcji progowych (n,xn). Odległość od frontu modelu (oś X) i odległości radialne (oś Y) w [cm].



Rys. 4.33 Wykres rozkładu średnich strumieni neutronów wewnątrz zestawu U-Pb podczas eksperymentu z wiązką deuteronów 2,52 GeV, dla przedziału energii neutronów od 20,8 do 32,7 MeV. Strumień wyznaczony za pomocą reakcji progowych (n,xn). Odległość od frontu modelu (oś X) i odległości radialne (oś Y) w [cm].



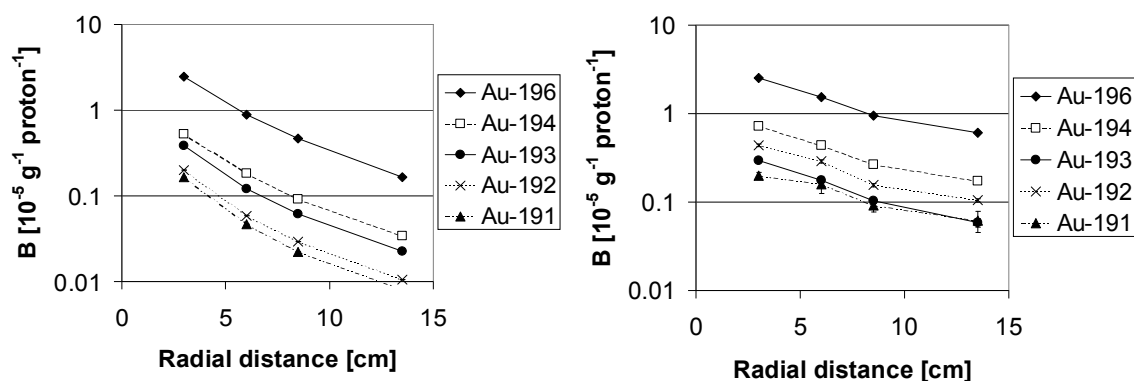
Rys. 4.34 Wykres rozkładu średnich strumieni neutronów wewnątrz zestawu U-Pb podczas eksperymentu z wiązką deuteronów 2,52 GeV dla przedziału energii neutronów od 32,7 do 100 MeV. Strumień wyznaczony za pomocą reakcji progowych (n,xn). Odległość od frontu modelu (oś X) i odległości radialne (oś Y) w [cm].



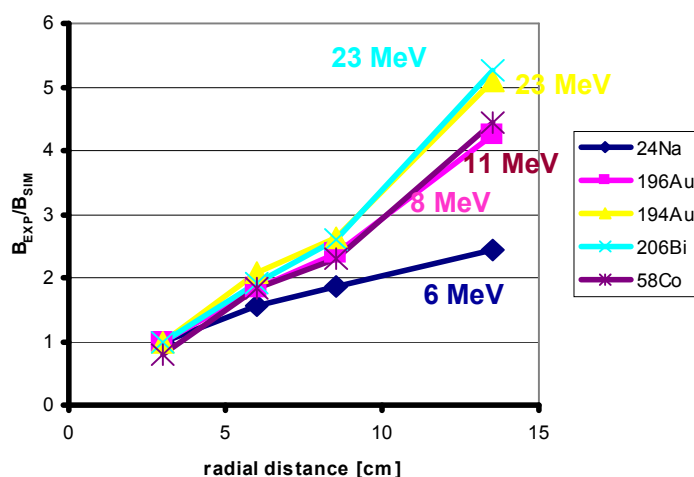
Rys. 4.35 Rozkład osiowy (odległość od frontu zestawu E+T) produkcji izotopu Y-88 dla odległości radialnej 8,5 cm. Porównanie wyników eksperymentalnych i kalkulacji kodem MCNPX ver. 2.5 dla energii wiązki deuteronów 2,52 GeV. Hipoteza wyjaśniająca różnice wartości tych dwóch krzywych w tekście poniżej. [17].

Różnice w wartościach pomiędzy danymi eksperymentalnymi i teoretycznymi, jakie przedstawiono na wykresie 4.35, można próbować wyjaśnić na dwa sposoby. Po pierwsze

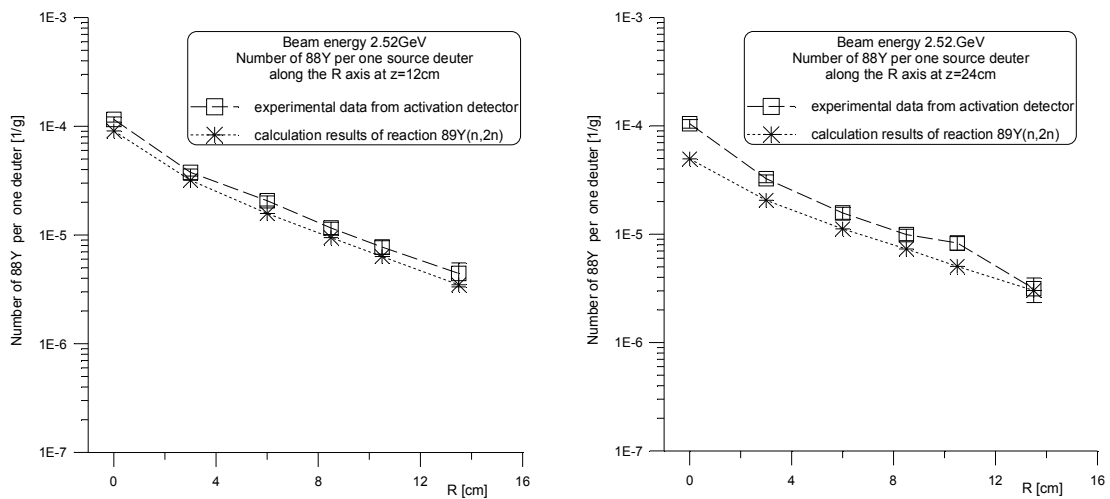
wyliczenia były wykonywane za pomocą kodu MCNPX w wersji 2.5. Jak się później okazało, wersja 2.5 i 2.6 dawała zaniżone wartości dla energii wiązki większej niż 1,5-2 GeV. Należało by powtórzyć te obliczenia w przyszłości przy użyciu wersji MCNPX 2.7, w której te błędy już poprawiono. Drugim źródłem rozbieżności mogą być błędy w normalizacji uzyskanych wyników eksperymentalnych np. wpływu na wyniki grubości użytych próbek lub co najprawdopodobniejsze wartość liczby deuteronów z wiązki. Wielkość błędu przy wyznaczaniu tej wartości może być na poziomie ponad 20% (wartość tego błędu nie została uwzględniona na tych rysunkach). Więcej informacji o podobnych porównaniach dotyczących kolejnych eksperymentów znajduje się w publikacji [57].



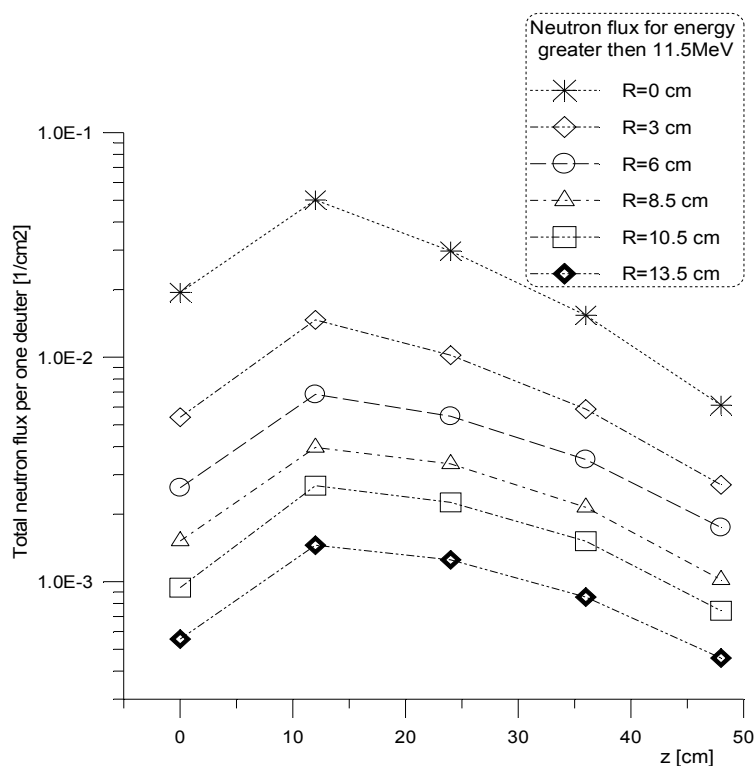
Rys. 4.36 Porównanie wartości eksperymentalnych (prawy wykres) i uzyskanych z symulacji (lewy wykres) wykonane przez czeska grupę dla eksperymentu z protonami 0,7 GeV [50].



Rys. 4.37 Porównanie zmienności wartości parametru B wraz z rosnącą odległością radialną od osi modelu, uzyskanego z eksperymentu i z obliczeń teoretycznych MCNPX. Różnice te rosną bardzo szybko i są tym większe im większa jest energia progowa reakcji wytwarzającej dany izotop [56].



Rys. 4.38 Zmiany produkcji izotopu Y-88 w funkcji odległości radialnej od osi zestawu dla odległości od czoła zestawu 12 cm (lewy wykres) i 24 cm (prawy wykres). Porównanie wartości eksperymentalnych (kwadraciki) i z kalkulacji MCNPX ver. 2.5 (gwiazdki) [17].



Rys. 4.39 Rozkład strumienia neutronów (dla energii większych od 11,5 MeV) w zestawie „Energia plus Transmutacja” przy wiązce deuteronowej o energii 2,52 GeV. Na osi X jest odległość od czoła zestawu w cm. Kolejne krzywe są dla kolejnych odległości radialnych od osi zestawu (od 0 do 13,5 cm). Krzywe uzyskane z kalkulacji kodem MCNPX ver. 2.5 [17].

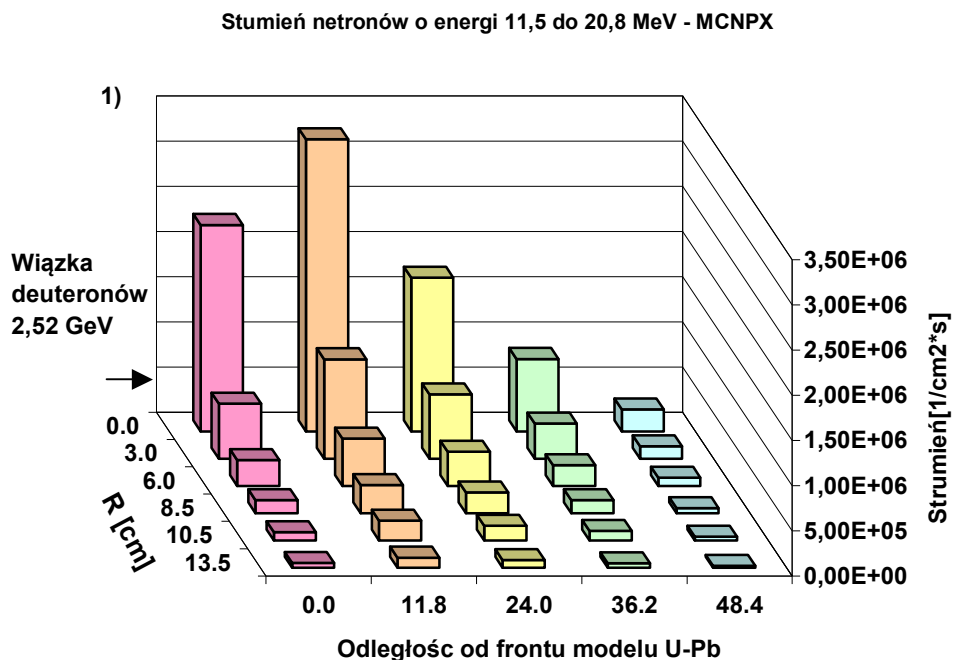
	Promień [cm]	Strumień na podstawie kalkulacji MCNPX				
		Odległość od czoła modelu [cm]				
		0.0	11.8	24.0	36.2	48.4
STRUMIEN 1	0.0	2,28E+06	3,23E+06	1,70E+06	8,02E+05	2,41E+05
neutrony	3.0	6,07E+05	1,10E+06	7,12E+05	3,88E+05	1,38E+05
od 11,5 MeV	6.0	2,86E+05	5,24E+05	3,79E+05	2,31E+05	9,04E+04
do 20,8	8.5	1,44E+05	3,12E+05	2,30E+05	1,46E+05	5,49E+04
	10.5	9,33E+04	2,19E+05	1,65E+05	1,05E+05	4,11E+04
(delta 9,3)	13.5	5,28E+04	1,12E+05	8,48E+04	4,90E+04	2,33E+04
STRUMIEN 2	0.0	1,07E+06	1,78E+06	9,70E+05	4,76E+05	1,56E+05
Neutrony	3.0	2,99E+05	6,22E+05	4,00E+05	2,30E+05	9,32E+04
od 20,8 MeV	6.0	1,46E+05	3,08E+05	2,25E+05	1,40E+05	6,06E+04
do 32,7	8.5	9,41E+04	1,88E+05	1,52E+05	9,51E+04	3,99E+04
	10.5	5,58E+04	1,21E+05	1,01E+05	6,18E+04	2,53E+04
(delta 11,9)	13.5	2,86E+04	6,66E+04	5,91E+04	4,00E+04	1,69E+04
STRUMIEN 3	0.0	2,45E+06	9,97E+06	6,20E+06	3,32E+06	1,43E+06
Neutrony	3.0	7,07E+05	2,66E+06	1,94E+06	1,13E+06	5,75E+05
od 32,7 MeV	6.0	3,50E+05	1,21E+06	1,03E+06	6,74E+05	3,70E+05
do nieskoń.	8.5	2,15E+05	6,83E+05	6,18E+05	3,99E+05	2,10E+05
	10.5	1,32E+05	4,59E+05	4,08E+05	2,85E+05	1,55E+05
(delta 27,3)	13.5	8,43E+04	2,55E+05	2,30E+05	1,66E+05	9,62E+04

Tab. 4.9 Wyniki obliczeń strumienia neutronów wewnątrz zestawu E+T z energią wiązki 2,52 GeV uzyskane kodem MCNPX ver. 2.5 i przekształcone tak, by prezentowały rezultaty dla 3 przedziałów energii neutronów identycznych, jak użytych we wcześniejszych obliczeniach z użyciem danych eksperymentalnych. Trzeci przedział w wypadku danych teoretycznych nie ma granicy na wartości 100 MeV ale w nieskończoności.[17]

Obliczenia kodem MCNPX dają bezpośrednią wartość strumienia neutronów w całym modelu. Na rys. 4.39 pokazano zmiany pola dla różnych odległości radialnych w całym modelu wzdłuż jego osi przy energii wiązki 2,52 GeV. Jak widać, obliczenia teoretyczne nie pokazują przesunięcia maksimum pola w kierunku trzeciej płaszczyzny jakie zaobserwowano po eksperymencie. Wyników obliczeń strumienia neutronów pokazanych na rysunku 4.39 nie da się wprost porównać z wynikami uzyskanymi eksperymentalnie i pokazanymi na rysunkach 4.32, 4.33 i 4.34. Podstawową różnicą jest zakres energii analizowanego pola. W przypadku symulacji rezultaty obejmowały zawsze przedział energii od danej energii progowej do nieskończoności. Rezultaty uzyskane z kodu MCNPX zostały przekształcone (podzielone na mniejsze przedziały energii) do takiej postaci, aby to porównanie było możliwe. Przekształcone wyniki pokazane są w tabeli 4.9 i na ich podstawie wykonano 3 trójwymiarowe wykresy (Rys 4.40, 4.41 i 4.42) identyczne w formie, jak te z rezultatami eksperymentalnymi. Jedyną różnicą jest przedział energii w trzecim zakresie. Dla eksperymentu miał on ograniczenie do 100 MeV dla kalkulacji MCNPX-em sięga nieskończoności. Jednak udział neutronów powyżej energii 100 MeV dla tych reakcji progowych jest minimalny. Porównując rysunki 4.32, 4.33 i 4.34 (dane eksperymentalne) z rysunkami 4.40, 4.41 i 4.42 (MCNPX), widzimy że pola są zgodne co do kształtu rozkładu w

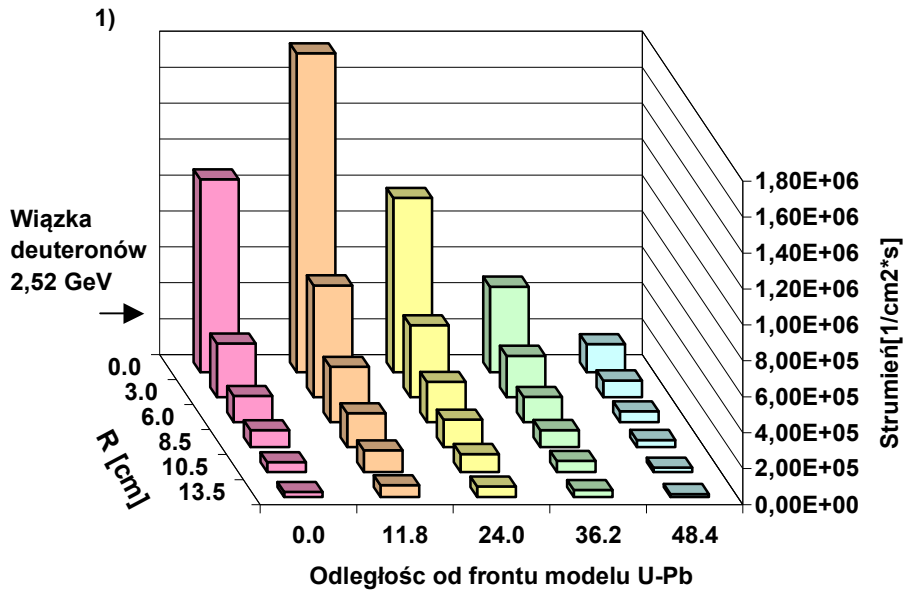
zestawie eksperymentalnym, a wartości mają ten sam rząd wielkości. Obserwowane różnice mogą mieć te same przyczyny, jak opisane wcześniej w tekście w związku z rysunkiem 4.35. Podsumowując, pokazano, że uproszczona metoda jaką zastosowano do wyznaczenia tego strumienia na podstawie danych eksperymentalnych dała wyniki sensowne i porównywalne z tymi uzyskiwanymi z symulacji czy podawane przez inne grupy eksperymentalne. Należy pamiętać, że metoda ta zakłada stałość strumienia podczas trwania całego eksperymentu. Ten warunek nie może być ściśle spełniony, ze względu na zaburzenia podczas długiej pracy akceleratora, które przekładają się na intensywność wiązki i wielkość strumienia neutronów wewnątrz zestawu eksperymentalnego. Większą dokładność w wyznaczeniu tego pola można by uzyskać zawężając zakresy energii do kilku MeV i używając dodatkowych reakcji progowych z innych próbek np. złota. Przy użyciu wąskich przedziałów energii, nie zaistniałaby potrzeba wykorzystania średnich przekrojów czynnych dla szerokich przedziałów energii, tylko zbliżonej do rzeczywistej konkretnej wartości przekrojów. Po drugie użycie rezultatów z innych próbek udostępniłoby znacznie większą liczbę kanałów (niż dotychczasowe trzy) na podstawie, których możliwe stałoby się wyznaczanie strumieni neutronów dla danej energii. Uzupełnienie wyników uzyskanych z itru, wynikami uzyskiwanymi ze złota jest zasadne, ponieważ energie progowe dla tych dwu izotopów nie pokrywają się i pozwalają uzyskać lepsze pokrycie w badanym przedziale energii. Z punktu widzenia łatwości wykonania pomiarów i dokładności wyników, połączenie rezultatów z tych dwóch detektorów może dać lepsze wyniki. W celu uzyskania pełnego porównywania danych w całym zestawie, należałoby próbki złota rozmieścić w taki sam sposób jak itru.

Zwiększenie dokładności, zaowocowało by jednak znacznym zwiększeniem stopnia skomplikowania rachunków oraz wydłużyło czas niezbędny na pomiary, czyli usunęło by zaletę, jaką jest prostota i szybkość tej metody.



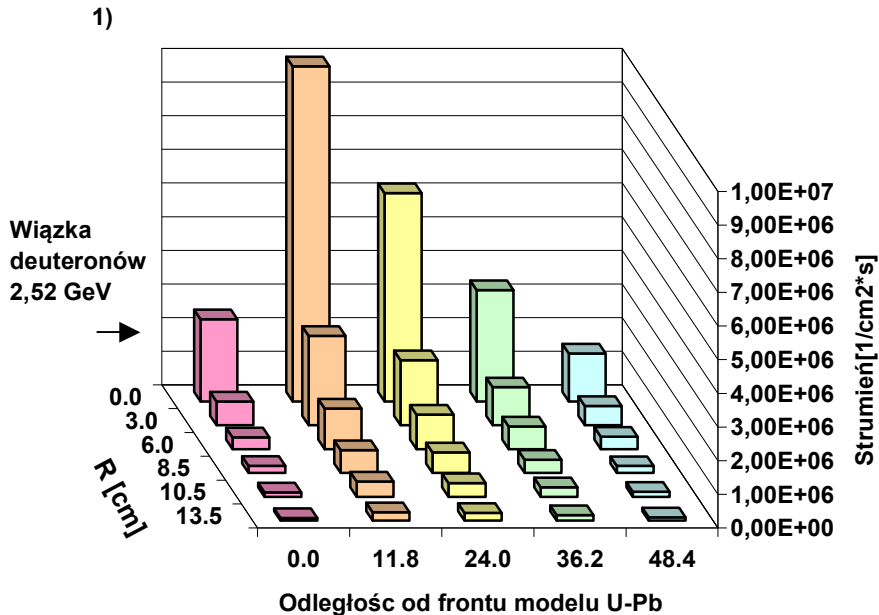
Rys. 4.40 Trójwymiarowy wykres rozkładu strumienia neutronów wewnątrz zestawu U-Pb z eksperymentu z wiązką deuteronów 2,52 GeV, dla przedziału energii neutronów od 11,5 do 20,8 MeV. Strumień wyznaczony za pomocą kodu MCNPX [17]. Odległość od frontu modelu (oś X) i odległości radialne (oś Y) w [cm].

Strumień neutronów o energii 20,8 do 32,7 MeV - MCNPX



Rys. 4.41 Wykres rozkładu strumienia neutronów wewnątrz zestawu U-Pb z eksperymentu z wiązką deuteronów 2,52 GeV dla przedziału energii neutronów od 20,8 do 32,7 MeV. Strumień wyznaczony za pomocą kodu MCNPX [17]. Odl. na osi X [cm].

Strumień neutronów o energii 32,7 do nieskoń. MeV - MCNPX



Rys. 4.42 Trójwymiarowy wykres rozkładu strumienia neutronów wewnątrz zestawu U-Pb z eksperymentu z wiązką deuteronów 2,52 GeV, dla przedziału energii neutronów od 32,7 MeV do nieskończoności. Strumień wyznaczony za pomocą kodu MCNPX [17]. Odległość na osi X [cm].

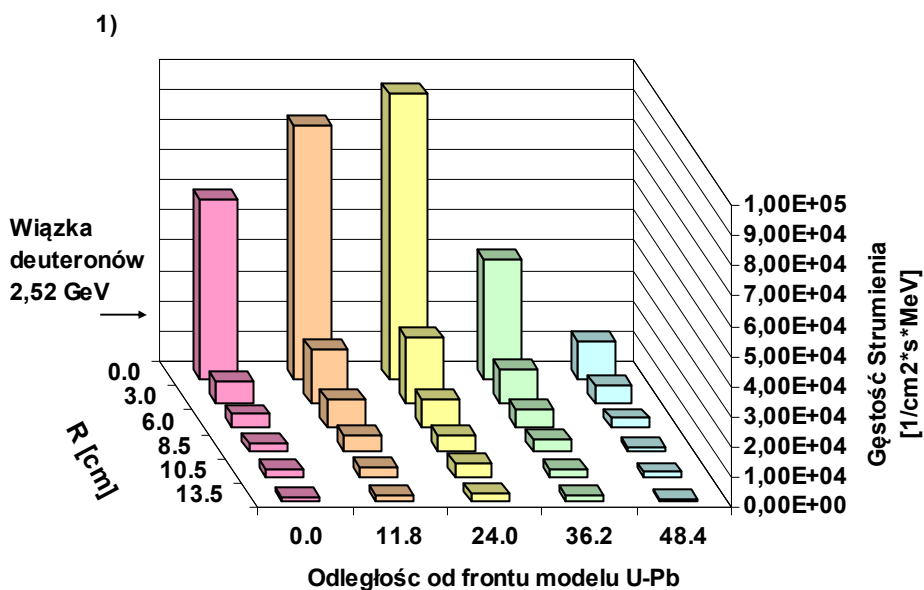
W celu dodatkowej kontroli przedstawionych wcześniej wyników średnich pól neutronów przeprowadzono podobne wyliczenia, wykorzystując wyniki dla złota które udostępnione zostały przez Ondrieja Svobode z czeskiej grupy [5]. Zaprezentowane zostaną wyniki uzyskane podczas eksperymentu z energią wiązki deuteronów 2,52 GeV. Z powodu różnic w wartościach energii progowej i wcześniej opisanych wad złota, jako detektor (duża trudność z uzyskaniem wyników dla reakcji progowej (n,3n) oraz (n,5n)), realnego porównania wyników można dokonać tylko dla pierwszego zakresu energetycznego, który dla Itru wynosił od 11,5 do 20,8 MeV. W przypadku złota, gdy pominiemy drugą reakcję progową (n,3n), przedział ten powinien wynosić od 8,2 do 23,2 MeV. Zakres ten został celowo skrócony. Obcięto część długiego, prawego skrzydła rozkładu dla wyższych energii, który ma bardzo niskie wartości i gdy wliczy się go do średniej otrzymane wyniki średniego strumienia są bardzo zaniżone (w przypadku Itru w pierwszym przedziale to skrzydło nie jest uwzględniane ponieważ dysponujemy wynikami dla (n,3n)). Pierwszy przedział energii dla złota, w którym wyliczono średni strumień pola neutronów zawiera się ostatecznie od 8,2 do 18 MeV. Pozostałe zakresy energii też uległy odpowiednim modyfikacjom. Wykorzystując wartości przekrojów czynnych wyliczonych dla złota [34] parametry sigma wynoszą odpowiednio:

- $\bar{\sigma}_{11}=1,67E-24$ reakcja Au197(n,2n)Au196 dla neutronów o energii 8,2-18 MeV
- $\bar{\sigma}_{12}=3,53E-25$ reakcja Au197(n,2n)Au196 dla neutronów o energii 18-47,2 MeV
- $\bar{\sigma}_{13}=1,12E-25$ reakcja Au197(n,2n)Au196 dla neutronów o energii 47,2-96,3 MeV
- $\bar{\sigma}_{22}=2,90E-25$ reakcja Au197(n,4n)Au194 dla neutronów o energii 18-47,2 MeV
- $\bar{\sigma}_{23}=2,64E-25$ reakcja Au197(n,4n)Au194 dla neutronów o energii 47,2-96,3 MeV
- $\bar{\sigma}_{33}=2,57E-25$ reakcja Au197(n,6n)Au192 dla neutronów o energii 47,2-96,3 MeV

Obliczenia przekrojów czynnych dla złota, za pomocą kodu TALYS, zostały wykonane do energii 96,3 MeV [5]. Ostatni przedział energii w przypadku złota kończy się na energii 96,3 MeV. Porównanie wyników uzyskanych dla złota i itru wymagało wykonania jeszcze jednej normalizacji. Uzyskane wyniki podzielono przez szerokość danego przedziału energetycznego, czyli wyniki znormalizowano do przedziału o szerokości 1 MeV. Na rysunku 4,43 widzimy wykres 3D ze znormalizowanymi wynikami dla Itru. Na Rys. 4,44 są analogiczne wyniki uzyskane za pomocą danych otrzymanych z detektorów ze złota. Próbkę złota nie były umieszczane na osi modelu tylko od odległości radialnej zaczynającej się 3cm od osi. Porównując rezultaty, nie można uwzględniać pierwszego najwyższego rzędu (odległość R=0) w wykresie dla Itru (Rys. 4.43). Rozmieszczono też znacznie mniej próbek złota i na Rys. 4.44 widać wiele punktów z wartością zero, gdyż nie było tam próbek (detektorów). Należy pamiętać, że dla drugiej płaszczyzny i odległości radialnych R=0 i R=3 cm, wyniki dla itru miały w tym eksperymencie zawyżoną wartość. Wyniki najlepiej porównać z trzeciej płaszczyzny pomiarowej (24 cm) dla R=3 i więcej cm – żółte słupki na Rys. 4.43 (drugi, trzeci i czwarty), a na Rys. 4.44 (pierwszy, drugi i trzeci).

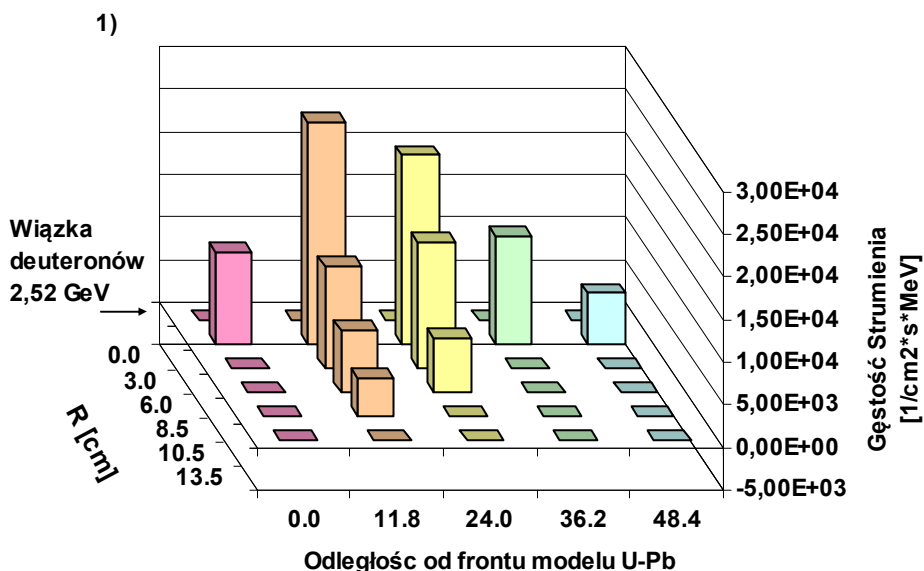
Po wykonaniu porównania widać, że w obu przypadkach średnia gęstość strumienia neutronów dla neutronów o energii w przedziale 10-20 MeV wynosi około $1-2 \cdot 10^4$. Wyniki kalkulacji dały podobne rezultaty, niezależnie czy materiałem wyjściowym był pomiar próbek Itru czy Złota.

Gęstość Strumienia neutronów na 1 MeV o energii 11,5 do 20,8 MeV



Rys. 4.43 Trójwymiarowy wykres rozkładu strumienia neutronów wewnątrz zestawu U-Pb z eksperymentu z wiązką deuteronów 2,52 GeV, dla przedziału energii neutronów od 11,5 MeV do 20,8 MeV znormalizowany do 1MeV. Strumień wyznaczony za pomocą danych eksperymentalnych z próbek Itru-89. Odległość na osi X w [cm].

Gęstość Strumienia neutronów na 1 MeV o energii 8,1 do 18 MeV



Rys. 4.44 Trójwymiarowy wykres rozkładu strumienia neutronów wewnątrz zestawu U-Pb z eksperymentu z wiązką deuteronów 2,52 GeV, dla przedziału energii neutronów od 8,2 MeV do 18MeV znormalizowany do 1MeV. Strumień wyznaczony za pomocą danych eksperymentalnych [5] z próbek Złota197. W punktach w których widzimy wartość zero, próbki złota nie były umieszczone. Odl. na osi X w [cm].