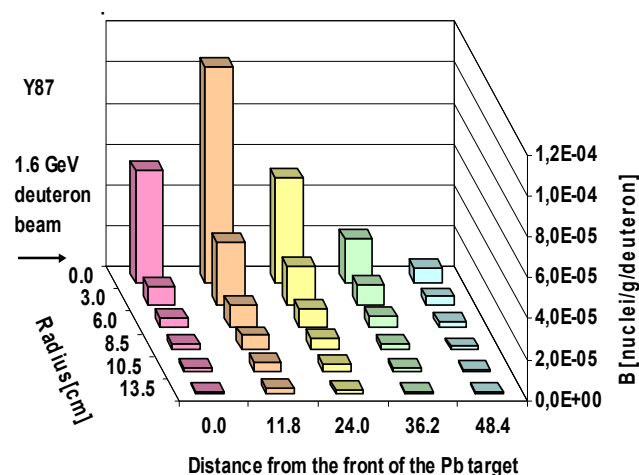
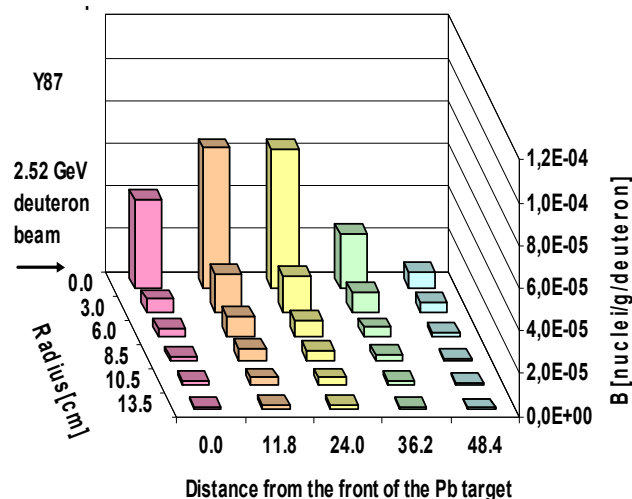


4.6 Porównanie eksperymentów z wiązką deuteronów o energii 1,6 z 2,52 i 4GeV. [58], [59]

Celem ostatniego rozdziału jest próba wyjaśnienia zaobserwowanej rozbieżności wyników w dwóch eksperymentach z użyciem wiązki deuteronowej o energii 2,52 i 1,6 GeV. Stało to się możliwe po uzyskaniu wyników z ostatniego eksperymentu z użyciem wiązki o energii 4 GeV. We wszystkich wcześniejszych eksperymentach z wiązką protonową, maksimum wydajności transmutacji wypadło zgodnie z oczekiwaniami w okolicy drugiej płaszczyzny pomiarowej, czyli w odległości ok. 11-12 cm od czoła zestawu U-Pb. W przypadku eksperymentu z wiązką deuteronów o energii 2,52 GeV maksimum to przesunęło się w okolice 3-ej płaszczyzny pomiarowej, czyli do odległości ok. 20 cm od czoła zestawu E+T. Pierwszą nasuwającą się przyczyną tego stanu rzeczy była zmiana rodzaju wiązki z akceleratora. Byłoby to jednak niezgodne z dotychczasową wiedzą popartą danymi z publikacji [51]. W kolejnym eksperymencie z wiązką o energii 1,6 GeV maksimum produkcji izotopów ponownie znalazło się w odległości ok. 11 cm, czyli tak samo, jak w przypadku eksperymentów z wiązką protonową. Symulacje teoretyczne za pomocą kodu MCNPX nie pokazały przesunięcia maksimum dla żadnej energii i rodzaju wiązki. Na tym etapie próbowano jeszcze wytłumaczyć to zjawisko wartością energii wiązki. Postulowano, że przesunięcie maksimum pojawia się dopiero po przekroczeniu pewnej (progowej) wartości energii wiązki deuteronów. Było by to jednak zupełnie nowe i niewyjaśnione wcześniej zjawisko fizyczne. Z przyczyn technicznych kolejny eksperyment został wykonany po dłuższej (kilkuletniej) przerwie. Już wstępne rezultaty z eksperymentu z wiązką deuteronową 4 GeV pokazały, że również i dla tej energii nie zaobserwowano żadnego przesunięcia. Na rysunkach (4.45 a,b,c) zaprezentowane są wykresy 3D pokazujące wielkość produkcji izotopu Y-87 pochodzące z trzech eksperymentów o różnych energiach wiązki. Przesunięcie maksimum produkcji wystąpiło tylko przy jednej energii (2,52 GeV) i tylko dla najmniejszych odległości radialnych $R=0\text{cm}$ i $R=3\text{cm}$. Dla większych odległości radialnych przesunięcia nie zaobserwowano.

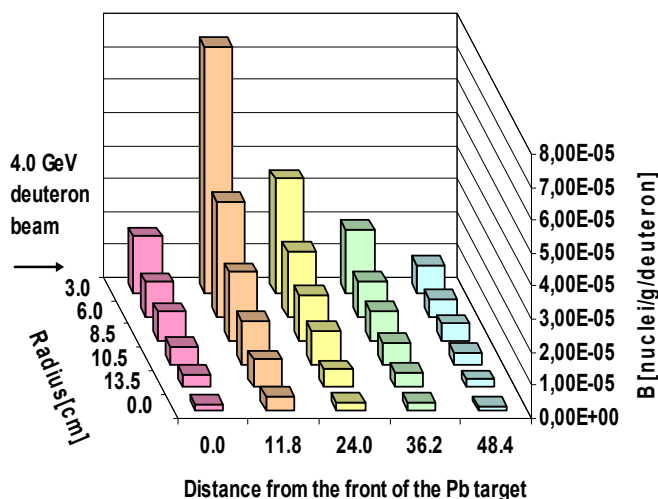


Rys. 4.45a Trójwymiarowy wykres obrazujący wielkość produkcji izotopu Y-87 w eksperymencie z energią wiązki deuteronów 1,6 GeV. Na tym wykresie maksimum produkcji izotopów wypada w okolicy 11cm od czoła zestawu. Na osi X jest odległość od czoła zestawu [cm], na osi Y odległość radialna od osi zestawu [cm] i na osi Z parametr B.



Rys. 4.45b Trójwymiarowy wykres obrazujący wielkość produkcji izotopu Y-87 w eksperymencie z energią wiązki deuteronów 2,52 GeV. Na tym wykresie maksimum produkcji izotopów dla $R=0\text{cm}$ i $R=3\text{cm}$ wypada w okolicy 20cm od czoła zestawu. Dla pozostałych odległości radialnych R maksimum jest w okolicy 11cm. Na osi X jest odległość od czoła zestawu [cm], na osi Y odległość radialna od osi zestawu [cm] i na osi Z parametr B.

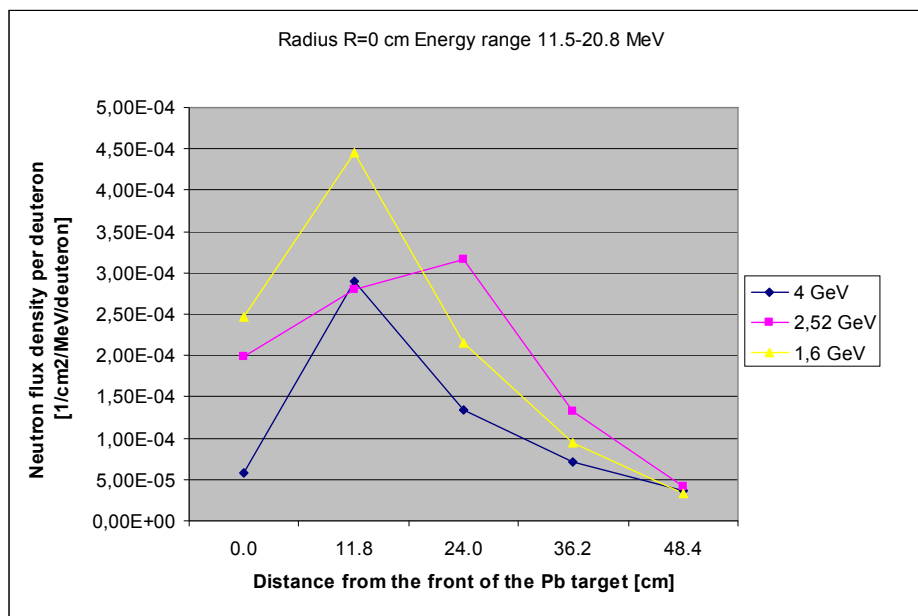
Y-87 S2 spatial distribution based on lines 388.53 and 484.805 keV



Rys. 4.45c Trójwymiarowy wykres obrazujący wielkość produkcji izotopu Y-87 w eksperymencie z energią wiązki deuteronów 4 GeV. Na tym wykresie maksimum produkcji izotopów wypada w okolicy 11cm od czoła zestawu. Na osi X jest odległość od czoła zestawu [cm], na osi Y odległość radialna od osi zestawu [cm] i na osi Z parametr B.

We wcześniejszych rozdziałach prezentowano trójwymiarowe wykresy rozkładu wydajności produkcji danego izotopu w postaci parametru B oraz wykonane na ich podstawie trójwymiarowe wykresy pokazujące rozkład pola neutronów o energii w danym przedziale (analizowane były trzy przedziały energii począwszy od 11 MeV). Wykresy w tej postaci, bardzo czytelnie pokazują tendencje zmian w całej objętości badanego zestawu, ale są trudne do porównywania. Z tego powodu, porównanie wyników dla średniej gęstości strumienia neutronów wykonano za pomocą znormalizowanych wykresów dwuwymiarowych. Dzięki tej postaci, wszelkie odstępstwa i nieprawidłowości będą na nich lepiej widoczne. Pokazane poniżej wykresy dwuwymiarowe będą prezentowały wyniki dla danej (jednej) odległości radialnej, pochodzące z trzech różnych eksperymentów. Dodatkowo znormalizowano

wszystkie dane dzieląc wyniki przez wielkość przedziału obserwowanej energii (badane przedziały miały różne rozmiary – np.: patrz Tab. 4.9) oraz przez liczbę deuteronów w wiązce. Dzięki temu, jeśli w porównywanych danych nie było dużych błędów pomiarowych i warunki w poszczególnych eksperymentach były w przybliżeniu podobne, to wykresy powinny się mniej więcej pokryć. Na rysunku 4.46 zaprezentowano wykres wykonany dla odległości radialnej $R=0\text{cm}$. Próbkę te były umieszczone dokładnie na osi naszego modelu, czyli teoretycznie dokładnie na drodze wiązki deuteronów z akceleratora.



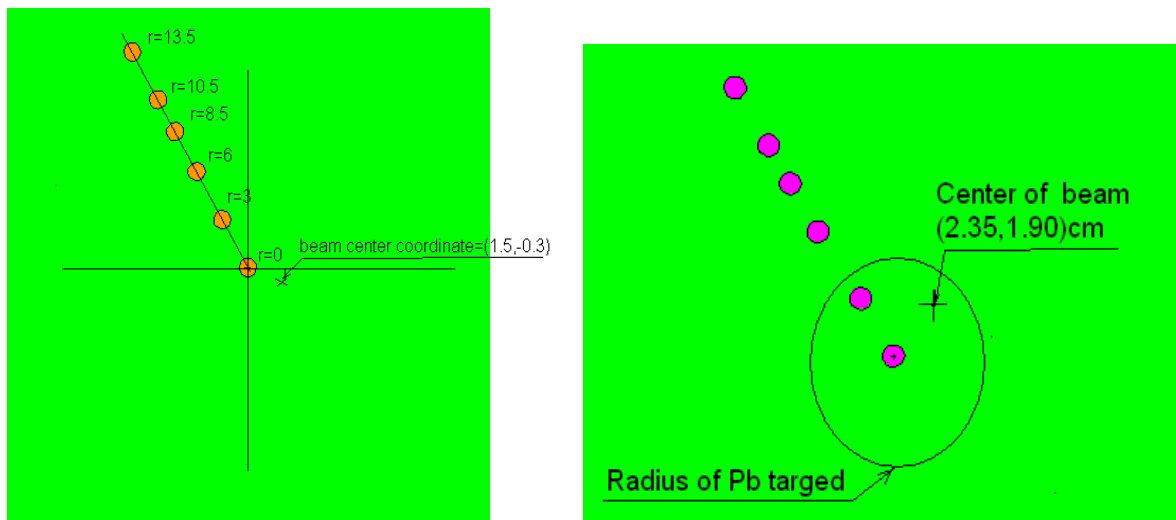
Rys. 4.46 Średnia gęstość strumienia neutronów o energii w przedziale od 11,5 do 20,8 MeV znormalizowana na 1 MeV i jeden padający deuteron, wewnątrz zestawu U/Pb w odległości radialnej $R=0\text{cm}$ od osi zestawu podczas trzech eksperymentów projektu „Energia+Transmutacja” z energiami wiązki deuteronów 1,6; 2,52 i 4 GeV. [58]

Na rysunku 4.46 widzimy krzywe z trzech eksperymentów. Powinny się one w zasadzie pokrywać i być zgodne co do kształtu. Jak widać, szczególnie w pierwszej połowie wykresu różnice pomiędzy krzywymi są dość znaczne, a krzywa dla energii 2,52 MeV ma inny kształt. Drugi punkt wykresu, dla odległości od czoła modelu 11,8cm jest wyraźnie obniżony w stosunku do dwu pozostałych eksperymentów. W tym eksperymencie zaobserwowano przesunięcie maksimum w kierunku trzeciej płaszczyzny pomiarowej. Podejrzewano, że przyczyną tego jest nieznaną błąd pomiarowy. Twierdzenie to staje się pewne po analizie wykresu. Widać wyraźnie, że w przypadku tego eksperymentu nie doszło do przesunięcia maksimum do trzeciej płaszczyzny, tylko do znacznego zniżenia wyznaczonej wartości wytworzonych izotopów na drugiej płaszczyźnie. Analiza danych, tylko z tego jednego eksperymentu mogła dać mylny obraz przesunięcia maksimum. Na dalej zaprezentowanych rysunkach widać że, dla większych odległości radialnych ($R>3\text{cm}$) zniżenie wartości na drugiej płaszczyźnie nie będzie już widoczne (Rys. 4.49). Szukając wyjaśnienia tego błędu zauważono, że dotyczy on pomiaru tylko kilku pierwszych próbek z drugiej płaszczyzny. Próbkę te były mierzone jako pierwsze, zaraz po zakończeniu eksperymentu i w stosunku do tych właśnie pomiarów wystąpiły problemy z kalibracją wyników. Kalibracja energetyczna detektora germanowego dla pierwszych pomiarów nie

pasowała do reszty pomiarów i konieczne było wykonanie oddzielnej kalibracji tylko dla tych pierwszych kilku pomiarów. Przyczyną tego były prawdopodobnie warunki zewnętrzne. Po upływie około godziny od rozpoczęcia pomiarów zmieniła się gwałtownie temperatura na zewnątrz budynku (obniżyła się o kilkanaście stopni – zapadała noc w czasie mroźnej zimy) i zmieniła się również temperatura wewnątrz pomieszczenia, gdzie przeprowadzane były pomiary. Mogło to mieć wpływ na właściwości elektroniki sterującej detektorem i tym samym na jego czułość. Można wykonać osobną kalibrację energetyczną detektora dla tych kilku pierwszych pomiarów. Nie jest to możliwe w stosunku do kalibracji wydajnościowej (czułość detektora), ponieważ pomiary kalibracyjne wykonane zostały raz po zakończeniu wszystkich pomiarów. W efekcie tego, wyniki pomiarów pierwszych próbek mogły mieć zaniżone wartości.

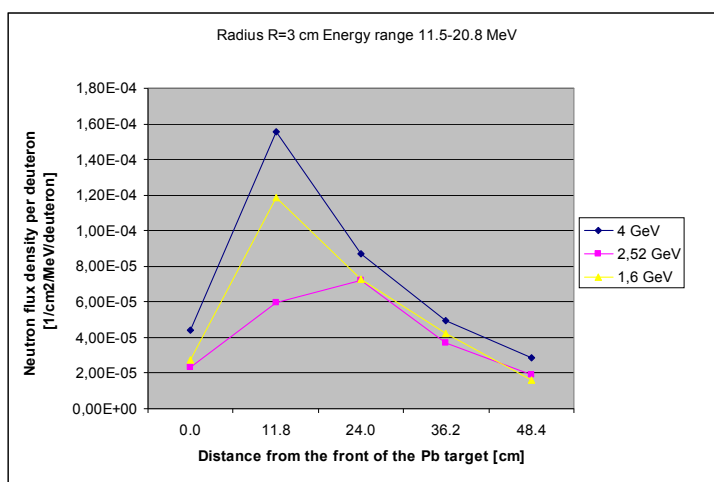
Powyższy opis jest tylko hipotezą, ale bardzo prawdopodobną. Hipotezy tej niestety nie można zweryfikować. Eksperyment wykonuje się raz i trwa wiele godzin. Pomiary rozpoczyna się, jak najszybciej jest to możliwe, po zakończeniu eksperymentu. Pierwsze pomiary są krótkie, aby móc zmierzyć jak najwięcej próbek i wykryć w nich izotopy krótko żyjące. Analizę tych pomiarów rozpoczyna się najczęściej wiele dni później. Nie istnieje możliwość powtórzenia pomiarów, ponieważ większość izotopów krótko żyjących ulega rozpadowi. Jedyną formą weryfikacji jest zbadanie danego problemu podczas kolejnego eksperymentu (tak zostało to uczynione w tym wypadku). Kolejny eksperyment jest jednak wykonywany w innym czasie (najczęściej rok później) i warunki nie są identyczne.

Drugą ważną cechą wykresów z Rys.4.46 jest rozbieżność (odstęp) między pierwszymi punktami trzech krzywych, czyli pomiarów wykonanych na froncie zestawu E+T (na jego osi). Wyjaśnieniem tej rozbieżności są właściwości wiązki deuteronów padającej na zestaw. W każdym z trzech eksperymentów miejsce padania wiązki było nieco inne. Teoretycznie wiązka za każdym razem powinna uderzać dokładnie wzdłuż osi zestawu. Taka sytuacja miała miejsce tylko w eksperymencie z energią 1,6 GeV, a w pozostałych dwóch wiązka była odchylona od osi Rys. 4.47.



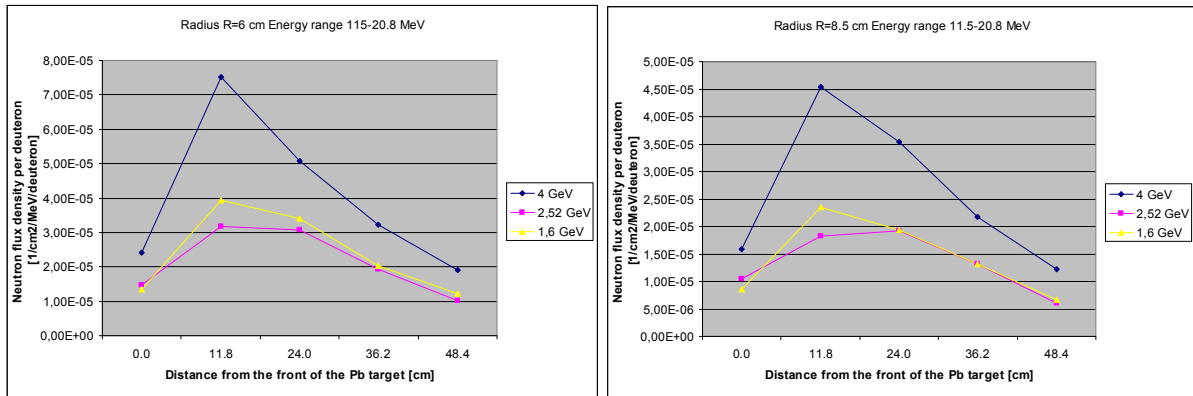
Rys. 4.47 Odchylenie punktu uderzenia wiązki deuteronów z akceleratora w zestawie U/Pb dla dwu eksperymentów. Lewy rysunek z energią 2,52 GeV. Prawy rysunek z energią 4 GeV. Pomarańczowe i fioletowe kółka pokazują położenia naszych próbek Y-89. Duże koło na prawym rysunku pokazuje wielkość ołowianego rdzenia.

Na Rys.4.46 najwyżej położony pierwszy punkt krzywej jest dla eksperymentu, z energią 1,6 GeV, gdzie wiązka nie była odchylona i uderzała dokładnie w badaną próbkę itru. Poniżej zaczyna się krzywa dla eksperymentu z energią 2,52 GeV, gdzie wiązka była odchylona ok. 1,5 cm od osi (Rys. 4.47). Najniżej zaczyna się krzywa dla ostatniego eksperymentu z energią 4 GeV gdzie wiązka była odchylona najbardziej, bo aż o ok. 2,5 cm. Potwierdzeniem tego jest to, że na kolejnych rysunkach (Rys. 4.48 i 4.49), dla większych odległości radialnych (gdzie wpływ przesuniętej wiązki staje się dużo mniejszy lub zaniedbywany), krzywe te zaczynają się od podobnej wartości.



Rys. 4.48 Średnia gęstość strumienia neutronów o energii w przedziale od 11,5 do 20,8 MeV znormalizowany na 1 MeV i jeden padający deuteron, wewnątrz zestawu U/Pb w odległości radialnej R=3cm od osi zestawu podczas trzech eksperymentów projektu „Energia+Transmutacja” z energiami wiązki deuteronów 1,6; 2,52 i 4 GeV.

Na rysunku 4.48 zaprezentowano porównanie trzech wykresów średniego strumienia neutronów, dla odległości radialnej R=3cm od osi zestawu. Widać na nim zaniżoną wartość przy drugiej płaszczyźnie dla eksperymentu 2,52 GeV. Pierwsze punkty pomiarowe są w tym przypadku bardzo do siebie zbliżone, co potwierdza wcześniejsze wnioski o ich rozsunięciu związanym z przesunięciem wiązki. Na rysunku 4.49 ukazane są te same wykresy dla większych odległości radialnych 6 i 8,5 cm od osi modelu. Widać, że niedokładność pomiaru na drugiej płaszczyźnie dla eksperymentu 2,52 GeV jest coraz mniejsza a krzywe pochodzące z dwu eksperymentów z energiami 2,52 i 1,6 GeV są praktycznie zgodne. Krzywa z ostatniego eksperymentu (4 GeV) jest przesunięta w górę. Można to wytłumaczyć faktem znacznego przesunięcia wiązki (patrz rysunek 4.47). Wiazka ta w odróżnieniu od wcześniejszych dwu eksperymentów uderzała nie tylko w ołowiany rdzeń, a również częściowo (15%-30% wiązki) w uranową otoczkę. W wyniku tego emitowana jest większa liczba neutronów niż w przypadku ołowiu a tym samym produkcja izotopów i gęstość pola neutronów również mogą być większe.



Rys. 4.49 Średnia gęstość strumienia neutronów o energii w przedziale od 11,5 do 20,8 MeV znormalizowany na 1MeV i jeden padający deuteron, wewnątrz zestawu U/Pb w odległości radialnej R=6cm (lewy rysunek) i R=8,5cm (prawy rysunek) od osi modelu podczas trzech eksperymentów projektu „Energia+Transmutacja” z energiami wiązki deuteronów 1,6; 2,52 i 4 GeV.

Wykryty błąd pomiarowy, dowodzi prawdziwości nadrzędnej zasady eksperymentalistów, że każdy eksperyment należy powtórzyć przynajmniej dwukrotnie w podobnych warunkach, aby móc jednoznacznie potwierdzić uzyskane rezultaty lub odrzucić błędne wyniki.

Przedstawione ze wszystkich eksperymentów rezultaty potwierdzają fakt, że ilość produkowanych neutronów w zestawach podkrytycznych sterowanych akceleratorem (ADS), przy energii wiązki powyżej 1GeV nie zależy od energii wiązki (gdy rezultaty są znormalizowane na 1GeV). Obszar maksymalnego strumienia neutronów wypada zawsze w odległości ok. 11-12 cm od czoła tarczy. Jest to obszar gdzie produkcja izotopów (transmutacja) jest największa. Sugeruje to, że ze względów ekonomicznych, w przyszłych instalacjach (ADS-ach) optymalna energia hadronów w wiązce powinna mieć energię od 1 do 1,5 GeV.