



prof. dr hab. Bogdan Fornal
Instytut Fizyki Jądrowej
im. H. Niewodniczańskiego
Polska Akademia Nauk

Kraków, 26 lutego 2024 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. Mateusza Fili

pt. „Study of $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$ nuclear reaction with the Warsaw TPC detector”

Rozprawa doktorska Pana mgr. Mateusza Fili jest opracowaniem prezentującym wyniki pracy badawczej przeprowadzonej przez Doktoranta w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierownictwem Promotora prof. dr. hab. Wojciecha Dominika. Warszawska grupa badawcza, którą kieruje Prof. Dominik, a w ramach której Pan mgr Fila prowadził badania, należy do światowej czołówki na froncie konstrukcji wyrafinowanych układów detekcyjnych na potrzeby zarówno fizyki wysokich energii, jak i fizyki jądrowej.

Podjęty w dysertacji doktorskiej temat, dotyczący budowy układu detekcyjnego posiadającego zdolność identyfikacji i pomiaru lekkich cząstek naładowanych o stosunkowo niskich energiach oraz w przypadku którego materiał czynny w postaci gazu stanowi jednocześnie tarczę, jest niezwykle intrygujący i ważny. Otwiera on bowiem drogę do badania np. indukowanych kwantami gamma reakcji dezintegracji lekkich jąder, co może dostarczyć unikatowych informacji o reakcjach odwrotnych, czyli reakcjach wychwytu radiacyjnego w reżimie energetycznym odpowiadającym syntezie lekkich nuklidów w gwiazdach. Informacje te są nieodzowne do poprawnego modelowania procesów nukleosyntezy, w wyniku których m.in. utworzone zostały pierwiastki, z których jesteśmy głównie zbudowani: węgiel, azot i tlen.

Układem detekcyjnym, który spełnia przytoczone powyżej warunki, jest zbudowana na Uniwersytecie Warszawskim komora dryfowa z projekcją czasu (Time Projection Chamber - TPC). W ramach przygotowywania omawianej rozprawy doktorskiej postawiono sobie za cel opracowanie systemu sterowania, odczytu i rekonstrukcji zdarzeń dla tej komory oraz jej użycie w testowych pomiarach reakcji $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$, które zaplanowano na wiązce kwantów gamma w ośrodku High Intensity Gamma-Ray Source (HIγS), Triangle Universities Nuclear Laboratory



(TUNL) w Durham (USA). Chodziło o uzyskanie informacji na temat względnego całkowitego przekroju czynnego na badaną reakcję w zakresie energii 1.35-6.7 MeV w układzie środka masy układu $\alpha+^{12}\text{C}$, jak i na cząstkowe przekroje czynne dotyczące komponent E1 i E2 padającej wiązki gamma.

Praca doktorska została napisana w języku angielskim. Posiada ona klasyczny dla tego typu opracowań schemat: liczy 145 stron i rozpoczynają ją „Abstrakt” oraz krótka „Przedmowa”, po których następują „Spis treści”, „Wykaz tabel”, „Spis rysunków”, „Lista skrótów”, „Słowniczek pojęć” oraz „Wstęp” mający na celu poinformowanie czytelnika o kontekście podejmowanych badań. To właśnie we „Wstępie” znajdujemy informacje dotyczące fizycznej motywacji dla prowadzonych prac badawczych z punktu widzenia astrofizyki jądrowej. Czytelnik przede wszystkim zapoznawany jest z kluczowymi procesami, które decydują o produkcji pierwiastków cięższych od wodoru i helu. Procesami takimi są synteza jąder ^{12}C z połączenia się 3 cząstek alfa oraz przekształcenie jąder ^{12}C w jądra ^{16}O w reakcji wychwytu radiacyjnego cząstki alfa $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$. Względne szybkości wspomnianych reakcji określają zawartości węgla-12 i tlenu-16 w gwiazdzie pod koniec spalania helu, a stosunek tych zawartości jest podstawowym parametrem w modelowaniu ewolucji gwiazd. Aby móc obliczyć wspomniany stosunek, potrzebna jest znajomość przekroju czynnego na reakcję $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$ przy bardzo niskich energiach padającej cząstki alfa, co stanowi potężne wyzwanie dla techniki eksperymentalnej.

Autor rozprawy w sposób bardzo przejrzysty pokazuje, że, aby uprościć problem, można, zamiast procesu $\alpha+^{12}\text{C}$, badać proces odwrotny, czyli reakcję fotodezintegracji $^{16}\text{O}(\gamma,\alpha)^{12}\text{C}$, której przekrój czynny można skorelować z przekrojem czynnym reakcji $^{12}\text{C}(\alpha,\gamma)^{16}\text{O}$, zgodnie z zasadą równowagi szczegółowej. Sprawę jednak komplikuje fakt, że w jądrze ^{16}O nie ma poziomów rezonansowych przy energii Gamowa. Reakcja zachodzi „na ogonach” stanów 1^- przy 7.12 MeV i 1^- przy 9.59 MeV lub 2^+ przy 6.92 MeV, które rozpadają się do stanu podstawowego poprzez przejścia o różnej multipolowości, to jest E1 ze stanów 1^- oraz E2 ze stanu 2^+ , co przysparza dodatkowych trudności.

W celu zastosowania reakcji fotodezintegracji konieczne było spełnienie dwóch warunków: dostęp do monochromatycznego strumienia γ o dużej intensywności oraz dysponowanie detektorem zdolnym do pomiaru niskoenergetycznych produktów reakcji. Pan mgr Fila w sposób kompetentny prezentuje instalację HI γ S jako jedną z niewielu na świecie, która spełnia wymagania dotyczące strumienia γ o potrzebnych parametrach. Omawiając



natomiast możliwe do zastosowania detektory, Doktorant skupia się na komorze projekcji czasowej z aktywną tarczą, zaopatrzonej w odczyt elektroniczny, zwanej Warsaw TPC, która, aby mogła zostać użyta „na wiązkę”, wymagała opracowania systemu sterowania oraz procedur potrzebnych do odczytu, rekonstrukcji i analizy zdarzeń.

Następujące po części wprowadzającej rozdziały 2 i 3 są szczegółowym opisem użytego aparatu detekcyjnego oraz pomiaru przeprowadzonego na wiązce gamma dostępnej w instalacji HIγS. Na początku, w bardzo systematyczny i wyczerpujący sposób, Autor prezentuje, budowę i zasadę działania detektora Warsaw TPC. Dużo uwagi poświęca opisowi układu wzmocnienia gazowego (Gas Electron Multiplier – GEM) składającego się z trzech dwustronnie metalizowanych folii i służącemu do wzmacniania ładunku wygenerowanego podczas wyhamowywania wyprodukowanych cząstek naładowanych w gazie detektora, co jest kluczowe do uzyskania makroskopowego sygnału. Omawia też dokładnie system odczytu sygnału, który jest realizowany poprzez zastosowanie płytki drukowanej, Printed Circuit Board (PCB), zorganizowanej w trzy rodziny pasków. Na skrzyżowaniu pasków wszystkich trzech rodzin powstają wirtualne piksele, które można wykorzystać do znalezienia lokalizacji rejestrowanego depozytu ładunku. System rejestracji danych (DAQ) to kolejny element Warsaw TPC – opiera się on na rozwiązaniu General Electronics for TPCs (GET). Pan mgr Fila z dużą wnikliwością przybliży czytelnikowi składniki tego systemu, z których wiele zostało zaprojektowanych na Uniwersytecie Warszawskim. Bardzo ważnym jest aspekt związany ze sposobem wyzwalania systemu DAQ. Możliwe są dwa rozwiązania, jedno, umożliwiające wyzwalanie sygnałem zewnętrznym, np. sygnałem związanym z przychodzącym pulsem wiązki, i drugie, dopuszczające wyzwalanie sygnałem wewnętrznym, np. sygnałem z ostatniej folii GEM.

Kolejna część zawiera opis przebiegu eksperymentu przeprowadzonego na wiązce kwantów gamma ze źródła High Intensity Gamma-Ray Source (HIγS) w ośrodku TUNL w Durham (USA). Detektor Warsaw TPC został wypełniony wysoko oczyszczonym gazem CO₂ pod ciśnieniem niższym od normalnego i dobieranym w zależności od energii wiązki tak, aby zoptymalizować pomiar produktów reakcji $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$, czyli cząstek alfa i jąder ^{12}C . Z TPC współpracował układ detektorów pomocniczych, które monitorowały własności wiązki. Zbadano łącznie 15 punktów doświadczalnych w zakresie energii kwantów gamma od 8.51 MeV do 13.9 MeV, co odpowiadało przedziałowi 1.35–6.7 MeV energii środka masy układu $\alpha+^{12}\text{C}$. Ważnym elementem było zdefiniowanie oczekiwanego tła, którego źródłem były



reakcje (γ, α) , (γ, p) (γ, n) na naturalnie występujących w gazie, oprócz ^{16}O , izotopach tlenu i węgla, czyli $^{17,18}\text{O}$ i $^{12,13}\text{C}$. Drugim rodzajem tła były cząstki α emitowane z obudowy detektora. Dodatkowo, Doktorant, w sposób wyjątkowo przejrzysty, pokazuje w jaki sposób przeprowadzono justowanie przebiegu wiązki gamma oraz pomiar jej energii i natężenia, a także sposób w jaki skonstruowano wewnętrzne wyzwalanie układu detekcyjnego.

Ta część pracy pozwala rozpoznać w Doktorancie bardzo wnikliwego eksperymentatora starannie przygotowującego swój instrument badawczy oraz dogłębnie kontrolującego poprawność procesów detekcji i rejestracji sygnałów.

Rozdziały 4 i 5 zawierają opis algorytmów wstępnego przetwarzania i rekonstrukcji zdarzeń oraz wielostronną analizę jakości zgromadzonych danych. Pan mgr Fila w pierwszej kolejności koncentruje się na procedurze przekształcania sygnałów elektronicznych w reprezentację związaną z obrazem fizycznym, czyli w ślady pozostawiane przez naładowane produkty reakcji podczas hamowania w medium detektora, czyli w gazie CO_2 . Otrzymane zdarzenia mogą mieć różne charakterystyki - są to: pojedynczy punkt, pojedynczy tor, dwa tory lub trzy tory. Analiza skupiła się na zdarzeniach z dokładnie dwoma współliniowymi torami, które odpowiadają poruszającym się w przeciwnych kierunkach cząstce alfa i jądra ^{12}C o ściśle określonych długościach dla danej energii padających kwantów gamma. Ze względu na to, że automatyczny algorytm analizy sygnałów nie był gotowy, do opracowania danych użyto rekonstrukcji ręcznej polegającej na tym, że zaangażowane osoby-eksperti (7 członków grupy badawczej) zaznaczały wierzchołki i punkty końcowe śladów na trzech obrazkach przedstawiających rzuty torów zdarzeń na odpowiednie płaszczyzny układu współrzędnych związanego z detektorem. Aby odciążyć ekspertów i zmniejszyć ilość obrazów do analizy, zastosowano dodatkowe dolne progi akceptacji na maksymalny ładunek rejestrowany przez ADC zarówno w całym zdarzeniu, jak i w jednym czasowym pikselu. Autor dużo miejsca przeznaczył także na opis weryfikacji kompatybilności wyników otrzymywanych przez różnych ekspertów oraz na osiągniętą w tym podejściu zdolność rozdzielczą długości torów oraz kąta emisji produktów w stosunku do kierunku wiązki.

Chciałbym zwrócić tutaj uwagę, że podczas detalicznych rozważań, czytelnikowi trudno jest znaleźć informację o ilościach zdarzeń analizowanych ręcznie przez ekspertów w przypadku kolejnych pomiarów. Chciałoby się, aby już na tym etapie zaznaczyć ilości przetworzonych przypadków w stosunku do przybliżonej liczby wszystkich zdarzeń, które



zostały zgromadzone dla każdej energii wiązki. (Taka informacja jest podana jest dopiero w rozdziale 7.)

Wyniki procedury manualnej zastosowanej do uwidocznionych torów produktów pozwoliły na przeprowadzenie szeregu sprawdzeń dotyczących poprawności pomiarów. Na podstawie danych eksperymentalnych wyznaczona została niewspółosiowość wiązki w stosunku do położenia komory TPC, dzięki czemu można było dokonać transformacji współrzędnych związanych z detektorem do współrzędnych związanych z wiązką. Doktorant przeprowadził także korektę prędkości dryfu (poprawka była rzędu maksymalnie 2%) w oparciu o wymóg symetrii kołowej dla zbioru końcowych punktów torów na płaszczyźnie (Z_{DET}, Y_{DET}). W celu wybrania obszaru objętości detektora, w którym działanie detektora jest dobrze poznane i niezawodne, do finalnej analizy wyselekcjonowano tylko te zdarzenia, które nie były zaburzone przez efekty krawędziowe i nie miały nic wspólnego ze zdarzeniami tła zachodzącymi poza objętością odniesienia lub były niezwiązane z wiązką.

Ze względu na obecność w medium detektora innych niż ^{16}O izotopów tlenu, tj. $^{17,18}\text{O}$, oraz izotopów węgla $^{12,13}\text{C}$, potrzebna była także selekcja i oddzielenie zdarzeń wynikających z reakcji (γ, α) na tych naturalnych domieszkach. Selekcji Autor dokonał na podstawie długości torów cząstki alfa oraz ciężkiego produktu – długości te są dla różnych reakcji różne ze względu na różnice w ciepłach reakcji. Szczególne przypadki reakcji $^{12}\text{C}(\gamma, 3\alpha)$ można oddzielić już na podstawie samej topologii.

W kolejnym kroku przeprowadzona została rekonstrukcja energii produktów reakcji $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$ w oparciu o długości torów cząstek alfa oraz tablice ich zasięgu w gazie wypełniającym TPC. Potrzebna okazała się korekta tej energii, którą Autor wykonał w oparciu o dobrze znane wartości wybranych stanów rezonansowych. Oszacowana została także efektywna energetyczna rozdzielczość detektora dla ręcznej rekonstrukcji zdarzeń – wyniosła ona 67(3) keV, czyli znacznie mniej niż szerokość wiązki γ , która była rzędu 500 keV.

Jakość rekonstrukcji zdarzenia w zależności od orientacji w przestrzeni to kolejne ważne zagadnienie związane z jakością danych - Pan mgr Fila podjął analizę danych również i pod tym kątem. O ile istniała symetria pomiędzy zdarzeniami ze względu na kierunki torów cząstek alfa w prawo i w lewo, o tyle wykazano asymetrię pomiędzy zdarzeniami zorientowanymi w stronę płaszczyzny odczytu, w stosunku do tych skierowanych przeciwnie do płaszczyzny odczytu. Możliwa przyczyna rozbieżności według Doktoranta to np. dłuższa



droga dryfu elektronów, co np. zmienić może kalibrację energetyczną. Efekt ten należy mieć na uwadze podczas detalicznej analizy danych.

Ważnych danych na temat badanej reakcji $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$ dostarczają również rozkłady kątowe produktów. Rozkład w funkcji kąta azymutalnego niesie informację o rodzaju polaryzacji wiązki kwantów gamma, natomiast rozkład wzdłuż kąta biegunowego mówi o multipolowości kwantów gamma, E1 lub E2, indukujących reakcję oraz o kącie zmieszania faz E1-E2. Przeprowadzone przez Doktoranta dopasowania funkcji gęstości prawdopodobieństwa polaryzacji wiązki γ do zmierzonych rozkładów cząstek alfa w funkcji kąta azymutalnego, opisywanej przez współczynnik frakcji liniowej polaryzacji oraz kąt polaryzacji, były zgodne z wynikami diagnostyki wiązki, co można uznać za potwierdzenie wysokiej jakości zgromadzonych wyników.

W końcowej części analizy Autor, dla wybranych energii wiązki, wykonał dopasowania rozkładów produktów reakcji w funkcji kąta biegunowego, uzyskując informację o: i) stosunku przekrojów czynnych na proces indukowany kwantami gamma E1 i E2 oraz ii) kącie zmieszania faz E1-E2. Dla danych zgromadzonych przy energiach wiązki, dla których dominowała multipolowość E1, dopasowania charakteryzowały się dużą nieoznaczonością wynikającą głównie ze zbyt małej ilości analizowanych zdarzeń. Oczekuje się, że uwzględnienie pełnej dostępnej statystyki usunie te nieoznaczoności.

Należy przyznać, że Doktorant wykonał wspaniałą pracę przy rekonstrukcji zdarzeń, wielostronnej analizie jakości zgromadzonych danych, czy też podczas selekcji finalnego zbioru zdarzeń. Należy też podkreślić, że wykazał się doskonałą sprawnością, jeśli chodzi o utworzenie końcowych rozkładów względnego przekroju czynnego na badaną reakcję w funkcji energii produktów, w uzyskaniu informacji o polaryzacji wiązki gamma, jak i w uzyskaniu stosunku przekroju czynnego na reakcję z udziałem kwantów gamma E1 i E2. Autor nie poprzestał jednak na tym - podjął jeszcze dyskusję uzyskanych rezultatów w oparciu o przewidywania modelowe oraz nakreślił perspektywy dalszych etapów badań, czemu poświęcone są rozdziały 6 i 7.

Otrzymane wyniki dotyczące względnego całkowitego przekroju czynnego na reakcję fotodezintegracji $^{16}\text{O}(\gamma, \alpha)^{12}\text{C}$ dla energii systemu $\alpha+^{12}\text{C}$ z przedziału 4.0 – 6.5 MeV okazały się być zgodne z rezultatami przewidywań opartych na formalizmie macierzy R. Widoczne drobne odchylenia mogą wynikać z niedoszacowania energetycznej zdolności rozdzielczej detektora lub z niedoskonałości metody odwikływania energii produktów. Bardzo dobrą



zgodność uzyskano natomiast w przypadku porównania wyznaczonego w eksperymencie stosunku przekroju czynnego na E1 do całkowitego przekroju czynnego. Podobna relacja widoczna jest także pomiędzy rezultatami pomiarów dla kąta mieszania faz E1-E2 i danymi pochodzącymi z reakcji elastycznego rozpraszania, co, tak swoją drogą, przeczy doniesieniom literaturowym, które kwestionowały powyższy związek.

Podczas analizy danych Autor zaobserwował zależność pomiędzy położeniem przestrzennym a energią wiązki γ w HI γ S, co było absolutnie nieoczekiwane. Wydaje się, że żadne wcześniejsze eksperymenty wykonane w HI γ S nie były w stanie zmierzyć tej zależności. Planowany jest kolejny eksperyment mający na celu dokładne zbadanie tego efektu.

W ostatnich fragmentach rozprawy Pan mgr Fila przedstawia perspektywy udoskonalania detektora Warsaw TPC oraz zastosowania tego urządzenia do dalszych, bardziej wyrafinowanych pomiarów. Słusznie argumentuje, że w celu uzyskania pełnej operatywności urządzenia niezbędne jest zastosowanie automatycznej procedury rekonstrukcji zdarzeń. Możliwe są dwie ogólne koncepcje rekonstrukcji automatycznej: i) rekonstrukcja oparta na klasycznych algorytmach, takich jak wykrywanie linii, a następnie dopasowanie stopnia jonizacji wzdłuż toru cząstki lub ii) rekonstrukcja oparta na zastosowaniu sztucznej inteligencji. Jeśli chodzi o plany kolejnych eksperymentów, to Doktorant przytacza zgłoszony zamiar kontynuacji programu eksperymentalnego w HI γ S przy niższych energiach, ale z użyciem wiązki gamma o znacznie wyższej intensywności. Wspomina też o zaakceptowanym liście intencyjnym, zapewniającym użycie detektora na wiązce w ELI-NP w Bukareszcie. Ta perspektywa jest jednak bardzo odległa ze względu na ogromne opóźnienie w budowie ELI-NP.

Zaprezentowane plany wykorzystania skonstruowanego i poddanego udanym testom detektora Warsaw TPC wydają się jednak zbyt skromne. Gotowość detektora do pomiarów na wiązkach stanowi idealną podstawę do zaproponowania szerokiego programu naukowego na polu zarówno mechanizmu reakcji jądrowych czy struktury jądra, jak i charakterystyk reakcji istotnych z punktu widzenia astrofizyki, a w szczególności procesów syntezy pierwiastków w gwiazdach.



Rozprawę doktorską zamykają „Podsumowanie” i cztery dodatki: jeden, dotyczący kinematyki badanej reakcji, drugi, opisujący układy współrzędnych stosowane m.in. do opisu torów rejestrowanych cząstek, trzeci, prezentujący system kontroli detektora i czwarty, omawiający procedurę rekonstrukcji oraz wizualizacji zdarzeń w detektorze. Ostatnim elementem dysertacji jest wykaz cytowanych prac zawierający 113 pozycji.

Podsumowując, pragnę stwierdzić, że Panu mgr. Fili należą się słowa wielkiego uznania za wnikliwość podczas przeprowadzania testów laboratoryjnych detektora Warsaw TPC, za pełną kontrolę procesu zbierania danych, którą sprawował podczas prowadzenia kampanii pomiarowych oraz za wszechstronne i krytyczne podejście do oceny jakości zgromadzonych danych i otrzymanych wyników dotyczących przekroju czynnego na reakcję fotodezintegracji jądra ^{16}O w szerokim zakresie energii kwantów gamma. System kontroli detektora, którego jest autorem, spełnia wyrafinowane wymogi, niezbędne do zapewnienia monitorowania procesu zbierania danych. Również wizualizacja torów produktów reakcji w detektorze oraz ich wielostronna analiza uwzględniająca nie tylko energie produktów, ale i ich rozkłady kątowe, była możliwa dzięki oprogramowaniu TPCesco, którego jednym z trzech głównych autorów jest Doktorant.

Zaprezentowany detektor Warsaw TPC wraz z jego możliwościami rejestracji zdarzeń związanych z emisją cząstek naładowanych, a w szczególności cząstek o bardzo niskich energiach, otwiera szerokie pole do badań zarówno reakcji w pobliżu progu, jak i stanów okołoprogowych. Pomiary można dokonywać za pomocą reakcji odwrotnych (takich, jak reakcja zaprezentowana w dysertacji), albo z użyciem procesów, w których stany okołoprogowe obsadzone są wynikiem reakcji indukowanych neutronami, czy też w wyniku rozpadów beta. Należy zauważyć, że to właśnie stany okołoprogowe w dużej mierze decydują o radiacyjnym wychwycie cząstek, co jest z kolei kluczowe dla pełnego modelowania procesów nukleosyntezy.

Rozprawa napisana jest po angielsku i, z ogólnego punktu widzenia, dobrym językiem z zachowaniem zgrabnych linii logicznych rozumowań. Autor nie ustrzegł się jednak wielu błędów typu „literówki” lub „niechciane podstawienia” (np. wstawienie zamiast właściwych wyrazów słów podobnych, ale nieodpowiednich) oraz niedociągnięć interpunkcyjnych (często brakuje przecinka, bez którego zdanie może wręcz zmienić znaczenie).



**INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

Drobne uwagi zamieszczone w recenzji w żaden sposób nie podważają jednak dużej wartości metodycznej i poznawczej dysertacji.

Przyznać należy, że oceniana praca doktorska stanowi oryginalny wkład w rozwój nowoczesnych technik detekcji w obszarze fizyki jądrowej oraz w poszerzenie wiedzy w zakresie badań reakcji jądrowych oraz astrofizyki jądrowej. Rozprawa, moim zdaniem, spełnia wymagania stawiane dysertacjom na stopień doktora nauk fizycznych, w związku z czym wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie Pana mgr. Mateusza Filę do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Bogdan Fornal