

Kraków, 23 maja 2019

dr hab. Maria Kmiecik
Instytut Fizyki Jądrowej
im. H. Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr Aleksandry Gawlik

pt. „Radiative neutron capture cross section measurement of ^{70}Ge at the n_TOF CERN facility and its relevance for stellar nucleosynthesis“

Praca pani mgr Aleksandry Gawlik dotyczy pomiaru radiacyjnego wychwytu neutronu przez jądra ^{70}Ge . Przedstawione w niej wyniki uzyskane z eksperymentu n_TOF w ośrodku CERN obejmują wartości parametrów zmierzonych rezonansów oraz przekroju czynnego na radiacyjny wychwyt neutronów o szerokim zakresie energii: od neutronów termicznych do 300 keV.

Zawierająca 96 stron rozprawa napisana w języku angielskim podzielona jest na sześć rozdziałów. Dodatkowo, poza głównymi rozdziałami, znalazły miejsce w pracy: wstęp, podsumowanie, bibliografia a także spisy rysunków, tabel oraz zastosowanych skrótów. Rozprawę rozpoczyna „Wstęp” zawierający zwięzłe wprowadzenie w tematykę rozprawy oraz opis jej celu.

Rozdział pierwszy zatytułowany „The Origin of the Elements in the Universe” przybliży procesy odpowiedzialne za powstawanie pierwiastków we wszechświecie. Przedstawione w nim zostały reakcje nukleosyntezy zarówno mającej miejsce podczas powstawania wszechświata (Big Bang) jak i zachodzące w gwiazdach (cykl proton-proton, cykl CNO), w wyniku których powstają lekkie pierwiastki aż do ^{56}Fe . W rozdziale tym omówione zostały także zachodzące w gwiazdach procesy *s*, *r* i *p*, dzięki którym produkowane są pierwiastki cięższe od żelaza.

Niniejsza praca doktorska przedstawia rezultaty eksperymentu przeprowadzonego z zastosowaniem reakcji radiacyjnego wychwytu neutronu. Jej mechanizm, charakterystykę przekroju czynnego oraz jego zależność od energii neutronu omówiono w rozdziale drugim zatytułowanym „Neutron induced reactions”. Tytuł tego rozdziału obiecuje znalezienie w nim bardziej dokładnego omówienia różnych reakcji wywoływanych przez neutrony. W rzeczywistości są one przedstawione skrótowo, a bardziej detalicznie opisany jest jedynie proces radiacyjnego wychwytu neutronu, w oparciu o który wykonana została niniejsza praca. W szczególności należy podkreślić przedstawiony w tym rozdziale opis teoretyczny przekroju czynnego na radiacyjny wychwyt neutronu oraz metody otrzymywania jego wartości uśrednionej maxwellowsko, istotnej dla analizy danych eksperymentalnych.

Następny rozdział zatytułowany „The n_TOF facility” zawiera opis znajdującego się w europejskim ośrodku badań jądrowych CERN urządzenia badawczego, z wykorzystaniem którego przeprowadzono pomiary na potrzeby realizacji celu niniejszej rozprawy. W tej

części pracy Autorka przedstawia metodę wytwarzania neutronów, przeprowadzenia reakcji radiacyjnego wychwytu neutronów oraz detekcji rezonansów. Wiązka neutronów o energii od 0.1 eV do 1 GeV wytwarzana była z zastosowaniem reakcji spallacji protonów o energii 20 GeV na grubej, cylindrycznej tarczy wykonanej z ołowiu. Wiązka protonów dostarczana przez synchrotron protonowy (PS) z częstotliwością 0.5 Hz umożliwiała wytworzenie w jednym pulsie $2 \cdot 10^{15}$ neutronów. Energia neutronów określona była w oparciu o pomiar czasu przelotu (TOF). Jej szeroki zakres, wynoszący do 1 MeV, możliwy do uzyskania dzięki zastosowaniu do pomiaru promieniowania gamma detektorów scyntylacyjnych C_6D_6 , pozwalał na zbadanie rezonansów w obszarze do kilkuset keV. Promieniowanie gamma emitowane w wyniku radiacyjnego wychwytu neutronów rejestrowane było przez cztery detektory zawierające ciekły scyntylator C_6D_6 (deuterowany benzen). Ich zaletą jest bardzo niska czułość na rozproszone neutrony osiągnięta dodatkowo przez zastosowanie obudowy wykonanej z węgla i aluminium. Pomimo złej rozdzielczości energetycznej, detektory C_6D_6 charakteryzują się bardzo dobrą czasową zdolnością rozdzielczą. Ta właściwość, dzięki dokładnej informacji o czasie emisji kwantu γ w wyniku rozpadu rezonansu, umożliwia pomiar energii neutronu z dużą dokładnością.

Motywacja pomiaru przekroju czynnego na radiacyjny wychwyt neutronu przez jądra ^{70}Ge , opis układu pomiarowego oraz przeprowadzonego eksperymentu znajduje się w rozdziale czwartym noszącym tytuł „Measurement of the $^{70}\text{Ge}(n, \gamma)$ reaction”. Jako główny powód badań wychwytu radiacyjnego neutronu przez jądra germanu pani mgr Aleksandra Gawlik podaje znaczący wpływ tego procesu na produkcję cięższych pierwiastków o masach z obszaru 70 – 90 A (Ge – Y) oraz na ich abundancję. Jądra ^{70}Ge , jako tzw. izotopy „s-only”, czyli produkowane głównie w wyniku procesu s, odgrywają znaczącą rolę w procesie gwiazdnej nukleosyntezy. Pierwsze pomiary dla tego izotopu przeprowadzono już w latach 60-tych, jednakże do tej pory zbadano przekroje czynne jedynie dla trzech rezonansów o energiach kilku keV a dla wyższych energii literatura podaje tylko uśredniony przekrój czynnny. Autorka podsumowuje, że realizacja celu pracy, którym jest uzyskanie informacji na temat przekroju czynnego na radiacyjny wychwyt dla neutronów o szerokim zakresie energii przez jądra ^{70}Ge pozwoli na pogłębienie wiedzy na temat procesu s. Następnie przedstawione zostają skład, rodzaj, masy i rozmiary materiałów zastosowanych w przeprowadzonych pomiarach. Pokrótce opisany jest eksperyment, w którym wiązką neutronów naświetlano próbkę germanu zawierającą 97.71 % izotopu ^{70}Ge . Rozdział kończy wymienienie narzędzi zastosowanych do analizy danych.

Rozdział piąty pt.: „Data analysis” jest najdłuższym i moim zdaniem najciekawszym rozdziałem rozprawy. Pani A. Gawlik przedstawia w nim metody zastosowane podczas analizy danych eksperymentalnych. Dotyczą one między innymi kalibracji energetycznej detektorów C_6D_6 , uwzględnienia rozdzielczości energetycznej oraz zależności wydajności tych detektorów od energii rejestrowanego kwantu gamma.

Osobny podrozdział obejmuje przedstawienie metody czasu przelotu służącej do wyznaczania energii neutronu. W pomiarach przekrojów czynnych na rezonansowy wychwyt neutronu bardzo ważne jest jak najdokładniejsze określenie energii neutronu. Na niepewność wyznaczenia tej wartości mają wpływ niepewności wyznaczenia czasu oraz drogi przelotu neutronu. Istotną wielkością dla tej procedury jest długość drogi przelotu neutronu, która określona została poprzez dopasowanie znanych rezonansów w jądrach ^{197}Au za pomocą programu SAMMY. Program ten, dostępny dla użytkowników CERN, stosowany jest do dopasowania kształtów rezonansów (rozkładów liczby zliczeń) w celu uzyskania parametrów rezonansów takich jak energia i szerokości Γ_γ i Γ_n (wychwytu radiacyjnego i rozpraszania elastycznego). Pozwala on również na obliczenie przekroju czynnego na wychwyt neutronu w szerokim zakresie energii, dzięki możliwości uwzględnienia w obliczeniach rozdzielczości

energetycznej detektorów, składu naświetlanej próbki, jej geometrii i rozmiarów oraz konfiguracji spinowych dla tworzących ją izotopów.

Ważna część rozdziału piątego dotyczy tła pomiaru i sposobu jego analizy. Tło zostało rozróżnione ze względu na jego powstawanie związane z reakcją oraz pochodzące z otoczenia. Podczas analizy od danych pomiarowych odejęte zostało tło zmierzone przy wyłączonej wiązce, a także pochodzące z reakcji rozpraszania neutronów w hali eksperymentalnej oraz na badanej próbce.

W dalszym ciągu pracy doktorskiej Autorka przedstawia metodę wyznaczania kształtów rezonansu poprzez dopasowanie obliczeń wykonanych z zastosowaniem kodu SAMMY do eksperymentalnych nasileń rezonansów. Nasilenia zmierzone z zastosowaniem poszczególnych detektorów C_6D_6 były sumowane po znormalizowaniu, a współczynniki normalizacji wyznaczone przez pomiar znanych rezonansów dla ^{197}Au . Analiza została przeprowadzona dla dwóch obszarów energii: dla rezonansów rozdzielonych (Resolved Resonance Region) oraz rezonansów nierozdzielonych (Unresolved Resonance Region). W obszarze rezonansów rozdzielonych, czyli w przedziale energii od 0.1 do 40 keV, dla którego odległości pomiędzy rezonansami są większe niż ich szerokości, w wyniku dopasowania uzyskano parametry rezonansów. W oparciu o wyznaczone parametry rezonansów, z zastosowaniem programu SAMMY obliczono przekrój czynny, który posiada wyraźny rezonansowy charakter dla wielu wartości energii. Dla obszaru rezonansów nierozdzielonych oznaczającego zakres energii, dla których oddzielne rezonanse nie są obserwowane (25 do 300 keV), wyznaczono zależność przekroju czynnego od energii neutronu.

Wyniki przeprowadzonej analizy danych eksperymentalnych przedstawione są w rozdziale szóstym pt.: „Results”. Przede wszystkim są nimi parametry rezonansów oraz wielkości określające charakterystyczne parametry reakcji – tzw. *capture kernels*, związane z przekrojem czynnym. W obszarze do 25 keV (Resolved Resonance Region) zidentyfikowano 73 rezonanse, których parametry zebrane zostały w tabeli. Większość z nich zaobserwowano po raz pierwszy. Dla tego obszaru wyznaczono średnią szerokość radiacyjną $\bar{\Gamma}_\gamma = 205 \pm 12$ meV oraz średnią odległość między rezonansami $\bar{D}_0 = 830 \pm 100$ eV. Otrzymana wartość szerokości jest zgodna z opublikowanymi wcześniej wynikami, natomiast średnia odległość pomiędzy rezonansami otrzymana z eksperymentu n_TOF jest mniejsza, co wskazuje na uzyskanie w wyniku tego pomiaru większej liczby rezonansów. W zakresie 25 – 40 keV zaobserwowano 37 rezonansów, które mogą nie być dobrze rozdzielone ze względu na pogarszającą się ze wzrostem energii zdolność rozdzielczą oraz wzrost szerokości rezonansu. Wartości przekrojów czynnych obliczonych z zastosowaniem kodu SAMMY (dla rozdzielonych i nierozdzielonych rezonansów) wraz z danymi z bazy ENDF posłużyły do obliczenia maxwellowsko uśrednionych przekrojów czynnych w przedziale od 5 do 100 keV. Uzyskane wyniki są zgodne z opublikowanymi w latach 80-tych wartościami zmierzonymi w przedziale 20 – 50 keV.

Pracę kończy „Podsumowanie” w języku angielskim i polskim, w którym podkreślone zostały najważniejsze wyniki pracy. Następnie umieszczona została bibliografia zawierająca 67 pozycji oraz spis publikacji Autorki rozprawy. Można zauważyć, że pani Gawlik jest już współautorką 25 opublikowanych prac oraz główną autorką pracy wysłanej do druku, dotyczącej tematyki pracy doktorskiej.

Poniżej przedstawiam moje główne refleksje, uwagi i pytania, dotyczące rozprawy doktorskiej pani mgr Aleksandry Gawlik zatytułowanej: “Radiative neutron capture cross

section measurement of ^{70}Ge at the n_TOF CERN facility and its relevance for stellar nucleosynthesis”.

Zarówno opis celu pracy jak i wyników jego realizacji dotyczą pomiaru przekroju czynnego na wychwyt neutronu. W rozprawie brakuje zgodnego z tytułem opisu znaczenia otrzymanych wyników dla procesu nukleosyntezy („... and its relevance for stellar nucleosynthesis”). W podsumowaniu rozprawy możemy znaleźć jedynie stwierdzenie, że wpływ zmierzonych wartości uśrednionego przekroju czynnego na produkcję izotopów w wyniku procesu s w układzie słonecznym będzie zbadany, gdy zakończona zostanie analiza danych dla pozostałych izotopów Ge. Z tego wnioskuję, że tytuł został podany trochę „na wyrost”. Uwaga ta nie umniejsza jednak wartości rozprawy doktorskiej Pani mgr Aleksandry Gawlik.

Celem pracy był pomiar przekroju czynnego na radiacyjny wychwyt neutronu przez jądra ^{70}Ge dla neutronów o energiach od 0.1 keV do 300 keV. Został on w pełni zrealizowany z wykorzystaniem eksperymentu wykonanego na urządzeniu n_TOF w ośrodku CERN. Dla energii neutronu od termicznych do 25 keV jego wyznaczenie opierało się na dokładnych pomiarach parametrów rezonansów. Powyżej energii 25 keV rezonanse traktowane były jako nierozdzielone i dla tego obszaru obliczono uśredniony przekrój czynny. Na podstawie otrzymanych wyników obliczono maxwellowsko uśredniony przekrój czynny dla energii neutronu w zakresie od 5 keV do 100 keV, odpowiadającym temperaturom gwiazd, w których zachodzi proces s . Z tego względu rezultat ten jest istotny dla zrozumienia procesu s oraz abundancji cięższych pierwiastków ($A < 90$). Podkreślić należy, że większość ze 110 rezonansów o energiach do 40 keV opisanych w niniejszej rozprawie, zostało zmierzonych po raz pierwszy. Wymagało to przeprowadzenia drobiazgowej analizy danych obejmującej dokładną kalibrację i odjęcie tła oraz wykonania wielu obliczeń w celu dopasowania parametrów rezonansów.

Zastosowanie w przedstawionym eksperymencie do pomiaru promieniowania gamma detektorów C_6D_6 było kluczowe, gdyż umożliwiało badanie rezonansów do energii kilkuset keV. Czy wykorzystywana była tylko informacja o czasie rejestracji kwantu gamma? Jaka jest rozdzielczość czasowa tych detektorów?

Nie znalazłam też w pracy informacji na temat dokładności pomiaru czasu przelotu neutronu.

Dla wyznaczenia energii neutronu ważna jest także precyzja pomiaru długości drogi jego przelotu. Długość ta wyznaczana była z dopasowania danych eksperymentalnych zmierzonych dla znanych rezonansów izotopu ^{197}Au a przykład takiej analizy znajduje się na rysunku 5.7. Nie zostało wyjaśnione, co oznaczają na tych rysunkach krzywe referencyjne (reference). Czy zamiast porównania z referencją do określenia najlepszego dopasowania nie można podać wartości χ^2 ?

Czy podanie wartości χ^2 w przypadku dopasowania widm energii neutronów dla reakcji wychwytu pomogłoby w ocenie jakości dopasowania? Dopasowane widma wyglądają bardzo dobrze, lecz Autorka pisze, że ocena wzrokowa może być myląca.

Praca doktorska pani mgr Aleksandry Gawlik zredagowana jest starannie, chociaż część rysunków (3.1, 4.2) bądź legend na rysunkach (3.8, 4.4) jest nieczytelnych. Rysunki też dzielą się na części znajdujące się na sąsiednich stronach (5.7, 5.11, 5.16). Bardzo pomocne dla czytelnika są zamieszczone na początku rozprawy spisy tytułów 53 rysunków, 17 tabel, oraz skrótów stosowanych w pracy.

Autorka nie uniknęła drobnych pomyłek, braków lub powtórzeń wyrazów. Są to np.:

- str. 9 – zamiast: „may escapes” powinno być „may escape”;
- str. 12 – jest dwukrotnie „during”;
- str. 31 – zamiast: „the only scientific complex” powinno być: “the only one scientific complex”;
- str. 36 – zamiast: „A other few conditions” powinno być: „Other few conditions”;
- str. 43 – brak słowa: “section” w „capture cross section”;
- str. 43 – zamiast “was the form” powinno być: „was in the form”;
- str. 66, 67 – w cytowaniach rysunków 6.2, 6.3 i 6.4 oraz tabel 6.1 i 6.2 numery powinny być podane raczej oddzielnie (są np. 6.2/3/4) a słowa „Figures” i „Tables” w liczbie mnogiej;
- str. 76 – na rysunku 6.1 na osi Y wartości wielkości *capture kernel* powinny być podane w meV a nie w mb.

Wszystkie wymienione braki, niedomówienia czy drobne usterki w żaden sposób nie umniejszają wartości rozprawy doktorskiej pani Aleksandry Gawlik.

Podsumowując stwierdzam z pełnym przekonaniem, że rozprawa mgr Aleksandry Gawlik stanowi ważny i oryginalny wkład w badania przekrojów czynnych na wychwyt neutronu, które potencjalnie są ważne dla astrofizyki. Wyniki uzyskane przez Autorkę z pewnością posłużą do lepszego zrozumienia procesu s oraz będą miały istotne znaczenie dla badań powstawania pierwiastków cięższych od ^{70}Ge , choć trochę szkoda, że pani Aleksandra nie pokusiła się tak, jak obiecywane jest w tytule rozprawy, o krótką analizę wpływu uzyskanych wyników na zrozumienie gwiazdnej nukleosyntezy.

Rozprawa w zupełności spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim w Polsce. Wnoszę o dopuszczenie Pani mgr Aleksandry Gawlik do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Anna Ulwer