

prof. dr hab. Konrad Czerski
Instytut Fizyki
Uniwersytet Szczeciński
ul. Wielkopolska 15
70-451 Szczecin

konrad.czerski@usz.edu.pl

Szczecin, 30.10.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Aleksandry Anny Ciemny

zatytułowanej:

„Exotic decay modes of medium mass proton drip-line nuclei”

Promotor: dr hab. Chiara Mazzocchi, prof. ucz.

Jednym z ważniejszych tematów badawczych fizyki jądrowej niskich energii ostatnich lat są prace poświęcone badaniom tworzenia i rozpadów jąder atomowych dalekich od ścieżki stabilności, posiadających duży nadmiar protonów bądź neutronów. Stało się to możliwe z jednej strony dzięki rozwojowi technik eksperymentalnych związanych przede wszystkim z możliwością przyspieszania jąder radioaktywnych, a z drugiej z dużym postępem metod teoretycznych pozwalających na opis stanów słabo związanych i niezwiązanych oraz ich roli w ważnych procesach astrofizycznych zachodzących we wnętrzu gwiazd. W przypadku jąder o nadmiarze protonów otwierają się tutaj możliwości badania egzotycznych rozpadów radioaktywnych typu emisji dwóch protonów lub bardziej skomplikowanych sekwencyjnych procesów jądrowych. Przykładem takich badań jest dysertacja pani mgr Aleksandry Ciemny.

W swojej pracy przedstawiła ona wyniki dwóch eksperymentów wykonanych na cyklotronie Texas A&M University oraz w National Superconducting Cyclotron Laboratory, Michigan State University, w których w wyniku fragmentacji cięższego pocisku stworzono neutronowo-deficytowe izotopy krzemu, germanu i cynku. Różnego typu rozpady radioaktywne prowadzące do emisji protonu, opóźnione poprzez pierwotny rozpad beta bądź wychwyt elektronu, obserwowano przy pomocy komory dryfowej z projekcją czasu i odczytem optycznym (optical time projection chamber, OTPC). Komorę tę zbudowano w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego i wykorzystywano wcześniej do badania

promieniotwórczości dwuprotonowej. Umożliwia ona rekonstrukcję śladów cząstek naładowanych powstałych w procesie rozpadu przy jednoczesnym wyznaczeniu ich energii i kąta emisji. W wyniku szczegółowej analizy zarówno eksperymentalnej jak i teoretycznej potwierdzono w przedstawionej pracy wcześniejsze wyniki otrzymane przez innych autorów w badaniach nad emisją jednego lub dwóch protonów przez jadra ^{22}Si i ^{23}Si , co stanowiło także pewną walidację zastosowanej metody eksperymentalnej. Głównym osiągnięciem było zaobserwowanie dwóch nowych kanałów rozpadu: emisji trzech protonów oraz sekwencyjnej emisji protonu i cząstki alfa. W przypadku badania jąder germanu i cynku określono przekroje czynne i współczynniki rozgałęzienia dla procesów z emisją jednego protonu dla izotopów $^{60-62}\text{Ge}$ i zaobserwowano po raz pierwszy nowy izotop ^{59}Ge . Emisję protonu zaobserwowano także po raz pierwszy z jadra ^{58}Zn , dla którego zmierzono współczynniki rozgałęzienia oraz siłę przejścia Gamowa-Tellera i porównano z obliczeniami teoretycznymi w ramach modelu QRPA. Praca wymagała zarówno zaawansowanych metod analizy danych eksperymentalnych jak i znajomości wielu teoretycznych modeli struktury jądra atomowego oraz opisu badanych procesów przemian jądrowych.

Praca doktorska mgr. A. Ciemny została wykonana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dr hab. Chiary Mazzocchi, prof. ucz. Liczy ona ogółem 86 stron i obejmuje 6 rozdziałów, w których zawarty jest dokładny opis układu detekcyjnego i eksperymentów akceleratorowych oraz przedstawione są ich wyniki w porównaniu z poprzednimi eksperymentami i modelami teoretycznymi. Szczególną uwagę zwrócono na opis nowo obserwowanych procesów i izotopów, które bazują na dokładnych symulacjach numerycznych wykorzystanych układów eksperymentalnych. Praca doktorska jest wykonana wyjątkowo starannie, napisana jasnym i precyzyjnym językiem, a prezentacja otrzymanych wyników i ich dyskusja jest bardzo szczegółowa. Opiera się na czterech recenzowanych publikacjach, trzech opublikowanych w *Physical Review C* i jednej *European Physical Journal A*, powstałych między rokiem 2015 i 2022.

Pierwsze dwa rozdziały dysertacji poświęcone są przedstawieniu motywacji i zakresu prowadzonych badań, ogólnych wiadomości na temat rozpadu beta i opóźnionych rozpadów wielocząstkowych oraz podsumowaniu stanu wiedzy na temat tworzenia i rozpadu wybranych nuklidów, stanowiących temat dysertacji. W części poświęconej rozpadowi beta ograniczono się do przedstawienia tylko ogólnych zarysów teoretycznych, pomijając np. rolę bariery kulombowskiej i centryfugalnej, które dla stanów słabo związanych mogą się znacznie różnić od standardowo przyjmowanych funkcji. W rozdziale drugim autorka przedstawiła szczegółowo układ eksperymentalny, opisała mechanizmy fragmentacji pierwotnej wiązki jonów i separacji masowej wybranych izotopów oraz zasadę działania komory OTC wraz z systemem zbierania danych pomiarowych. Zważywszy duży stopień skomplikowania

przedstawionych badań eksperymentalnych część aparaturowa wraz ze szczegółowym opisem konkretnych eksperymentów, gdzie autorka przedstawia metodykę ich analizy, ma decydujące znaczenie dla wysokiej jakości otrzymanych wyników.

Rozdział trzeci koncentruje się na przedstawieniu szczegółów identyfikacji nuklidów dla dwóch zrealizowanych eksperymentów wykorzystując z jednej strony pomiar straty energetycznej w cienkim detektorze krzemowym a z drugiej metodę czasu przelotu bądź określenie zasięgu implantowanych jonów w komorze OTPC.

Rezultaty eksperymentów są zaprezentowane w następnych dwóch rozdziałach i obejmują one zarówno wybór odpowiednich parametrów komory OPTC, pomiaru czasu dryfu elektronów i wydajności rejestracji protonów i cząstek alfa jak i symulacji numerycznych Monte Carlo. Zawierają one pomiary ilościowe badanych procesów, porównanie z poprzednimi badaniami eksperymentalnymi i przewidywaniami teoretycznymi oraz dyskusję otrzymanych wyników.

I tak w rozdziale czwartym autorka opisała wyniki eksperymentu przeprowadzonego na cyklotronie Texas A&M University, badając przede wszystkim rozpady jedno i dwuprotonowe izotopów ^{22}Si i ^{23}Si , dla których otrzymano współczynniki rozgałęzienia i czasy życia. Zmierzono także całkowitą energię emitowanych protonów i rozkład kątów emisji między nimi. Autorka dochodzi do wniosku, że kanał dwuprotonowy można opisać jako rozpad sekwencyjny. Nie przedstawia ona jednak argumentów, jak powinien wyglądać rozkład kątowy dla dwóch przeciwnych mechanizmów: rozpadu sekwencyjnego lub emisji diprotonu. Dyskusja tych przypadków byłaby bardzo ciekawa ze względu na otrzymane wyniki oraz porównanie z danymi literaturowymi – wykres 4.17 pokazuje, że oba emitowane protony mają stosunkowo bliskie energie kinetyczne. W rozdziale tym przedstawiono także analizę obserwowanych po raz pierwszy rozpadów ^{23}Si poprzez emisję trzech protonów lub cząstki alfa i protonu. W tym kontekście nie jest zrozumiała sugerowana rola izospinu stanu rozpadającego się w rozpadzie beta. Ponadto w oparciu o teoretyczne modele struktury jąder o liczbie masowej równej 23, mechanizm emisji protonów powinien uwzględnić rolę izobarycznego stanu analogowego, który znacznie wzmacniałby przejścia o wysokiej energii protonów, niestety nie obserwowanych w przedstawionym eksperymencie. Na koniec powstaje pytanie, dlaczego w eksperymencie nie udało się otrzymać przekrojów czynnych na produkcję badanych egzotycznych izotopów krzemu.

W przypadku eksperymentu przeprowadzonego w Michigan State University, przekroje czynne na produkcję izotopów germanu, włącznie z nowo obserwowanym nuklidem ^{59}Ge , udało się obliczyć i porównać z przewidywaniami teoretycznymi, wyraźnie wyższymi niż dane eksperymentalne. Do osiągnięć tego eksperymentu należy także obserwacja emisji

protonów przez jądro ^{28}Zn i identyfikacja dwóch grup energetycznych. Obliczono siłę przejść Gamowa-Tellera i porównano z danymi otrzymanymi w reakcji wymiany ładunkowej i obliczeniami rozkładu siły tych przejść otrzymanych w modelu QRPA.

Najważniejsze wyniki dysertacji podsumowano w ostatnim rozdziale tej pracy na szerszym tle postępów eksperymentalnych i teoretycznych w obszarze jąder atomowych o nadmiarowej liczbie protonów, dalekich od ścieżki stabilności.

Jak już wspomniałem wcześniej w opisie poszczególnych rozdziałów dysertacji, praca doktorska mgr A. Ciemny wyróżnia się znaczącymi osiągnięciami badawczymi, które znalazły swój wyraz w publikacjach w czołowych czasopismach naukowych. Na szczególne podkreślenie wymaga bardzo duży nakład pracy autorki przy analizie danych eksperymentalnych wynikających z konieczności wyseparowania odpowiednich zdarzeń z dużej liczby innych mierzonych i oparcia się na rozbudowanej analizie wielu parametrów detekcyjnych zastosowanej komory OTPC. Jeżeli chodzi o udział autorki w obliczeniach teoretycznych przy wykorzystaniu zaawansowanych modeli struktury jądra atomowego, nie jest on w pracy doktorskiej wyraźnie określony. Z natury prac zespołowych, wymagających współpracy wielu osób, jest ten udział prawdopodobnie względnie mniejszy. Niezależnie od tego dyskusja wyników eksperymentalnych i ich konsekwencji modelowych została przeprowadzona na bardzo wysokim poziomie naukowym i dokumentuje dojrzałość badawczą autorki. Potwierdza to również mała liczba uwag merytorycznych, które mi się nasunęły przy lekturze tej pracy – są one umieszczone przy omówieniu treści poszczególnych rozdziałów. W tym miejscu chciałbym zwrócić uwagę tylko na jedną jeszcze sprawę. Niepewność wydajności detektora w zależności od energii emitowanych protonów (rys. 4.6 i 5.5) wydaje się być jednym z kluczowych elementów składających się na niepewności pomiarowe końcowych obserwacji – nie zostały one jednak w pracy określone i chociaż wynikają one z symulacji numerycznych, wymagałaby pewnego oszacowania.

Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona praca w pełni spełnia wymagania ustawowe jak i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim w dyscyplinie nauk fizycznych. Dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie pani mgr Aleksandry Anny Ciemny do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Konrad Czerski

