



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Dziękuję Wydziału Fizyki UW
Seksja ds. pracowniczych
Wpłynęło dn. 7.10.2015
podpis _____

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

Kraków, 5 października 2015 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. Marcina Pomorskiego

p.t. „Badanie nuklidów w otoczeniu ^{48}Ni przy pomocy komory dryfowej z projekcją czasu i z odczytem optycznym”

Rozprawa doktorska Pana mgr. Marcina Pomorskiego stanowi liczące sto cztery strony opracowanie, prezentujące wyniki prac badawczych przeprowadzonych przez Doktoranta w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego pod kierownictwem prof. dr. hab. Marka Pfütznera (głównego promotora) oraz dr. Krzysztofa Miernika (promotora pomocniczego). Praca miała na celu wytworzenie i zbadanie pod kątem obserwacji promieniotwórczości dwuprotonowej (2p) izotopu niklu ^{48}Ni . Podjęty w dysertacji doktorskiej temat jest niezwykle interesujący, gdyż nuklid ^{48}Ni jest jedynym podwójnie magicznym jądrem leżącym poza linią odpadania protonu, dostępnym do eksperymentalnego badania promieniotwórczości 2p. Otwiera to drogę do sprawdzenia, w jaki sposób zamknięcie powłok jądrowych, a w szczególności powłoki protonowej przy $Z=20$, wpływa na emisję 2p. Stanowi też wspaniałe laboratorium do rygorystycznej weryfikacji teoretycznych modeli promieniotwórczości 2p. W badaniach zastosowano unikalną metodę eksperymentalną, polegającą na użyciu zbudowanej na Uniwersytecie Warszawskim komory dryfowej z projekcją czasu i z odczytem optycznym, OTPC, którą zainstalowano i za pomocą której przeprowadzono pomiar na wiązce produktów radioaktywnych w National Superconducting Cyclotron Laboratory w Michigan State University.

Warszawska grupa specjalizująca się w pomiarach promieniotwórczości dwuprotonowej, którą kieruje Prof. dr hab. Marek Pfützner, a w ramach której Pan Pomorski prowadził badania, należy do światowej czołówki na froncie badań rozpadów 2p. Osiągnięcia naukowe tego zespołu badawczego są imponujące. Prof. Pfützner jest jednym z odkrywców promieniotwórczości dwuprotonowej - to on wraz z grupą współpracowników zaobserwował po raz pierwszy emisję dwóch protonów z jądra ^{45}Fe . Zespół ten dokonał też przełomowych pomiarów przestrzennych korelacji protonów emitowanych z ^{45}Fe oraz emisji trzech protonów



opóźnionych po rozpadzie beta ^{45}Fe i ^{43}Cr . Kluczem do sukcesu w przypadku eksperymentów korelacyjnych oraz detekcji zdarzeń z emisją trzech protonów było zastosowanie komory OTPC zaprojektowanej i zbudowanej we współpracy między grupą Prof. Pfütznera z Zakładu Spektroskopii Jądrowej i grupą Prof. Wojciecha Dominika z Zakładu Fizyki Cząstek i Oddziaływań Fundamentalnych IFD Uniwersytetu Warszawskiego.

Wyniki przedstawione w rozprawie doktorskiej zostały opublikowane w czterech artykułach, które ukazały się w recenzowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym: trzy w *Physical Review C*, oraz jeden w *AIP Conference Proceedings*. We wszystkich tych publikacjach Doktorant jest pierwszym autorem, co świadczy o wiodącym jego udziale zarówno w pomiarach, jak i w analizie danych eksperymentalnych.

Praca doktorska została napisana według klasycznego dla tego typu opracowań schematu: rozpoczynają ją „Spis treści”, po którym następuje „Wstęp” mający na celu poinformowanie czytelnika o kontekście oraz zakresie podejmowanych badań.

Kolejna część to rozdział 2 przedstawiający cel i zakres pracy oraz rozdział 3, który jest zgrabnym kompendium wiedzy na temat badań rozpadów protonowych w jądrach egzotycznych. Autor przedstawia tutaj metody produkcji i separacji nuklidów leżących w pobliżu linii odpadania protonu, omawia obecny stan badań opóźnionej emisji protonów ze względu na rozpad beta, opisuje dotychczasowe osiągnięcia na polu badania promieniotwórczości 2p oraz prezentuje modele teoretyczne tego zjawiska. W szczególności, w sposób bardzo pedagogiczny, przybliży czytelnikowi zagadnienie emisji 2p w rozpadach jądrowych: opisuje emisję ze stanów rezonansowych w lekkich jądrach (gdzie bariera kulombowska jest bardzo niska) i kontrastuje to zjawisko z sytuacją, która ma miejsce w jądrach cięższych, gdzie wyższa bariera kulombowska wydłuża czas emisji 2p do milisekund – emisja taka nosi nazwę promieniotwórczości 2p. W dalszej części Doktorant podkreśla trudności z jakimi musi zmierzyć się eksperymentator, jeżeli chce zarejestrować sygnał od protonu emitowanego w akcie rozpadu promieniotwórczego, po implantacji w detektorze półprzewodnikowym separowanego w locie egzotycznego jądra – sygnał od protonu jest niezmiernie słaby w porównaniu z sygnałem wyzwolonym przez implantowany produkt. Dodatkowa trudność to możliwość sumowania się z sygnałem od pozytonów z rozpadu beta plus. Doktorant nakreśla rozwiązanie problemu: użycie komory dryfowej z projekcją czasu prowadzące do możliwości jednoznacznej rejestracji każdego z emitowanych protonów, także nisko energetycznych. Podczas prezentacji modeli teoretycznych Autor szczególny nacisk



kładzie na fakt, że pomiar promieniotwórczości $2p$ dostarcza unikalnych informacji na temat charakterystyk funkcji falowej emitera, dzięki czemu może stanowić cenne narzędzie do badania struktury jąder egzotycznych. Podczas lektury tej części pracy Pan mgr Pomorski daje się poznać jako osoba dogłębnie wnikająca w badany problem fizyczny oraz umiejętnie przekazująca czytelnikowi złożone zagadnienia z nim związane - dobór przykładów oraz ujęcie tematu są niezwykle przejrzyste.

Następujące po części wprowadzającej rozdziały 4, 5 i 6 są szczegółowym opisem użytego aparatu detekcyjnego, pomiaru przeprowadzonego na wiązce akceleratora oraz zastosowanej metody identyfikacyjnej produktów. Na początku, w bardzo systematyczny i wyczerpujący sposób, Autor prezentuje budowę i zasadę działania detektora – komory dryfowej z projekcją czasu i z odczytem optycznym (Optical Time Projection Chamber – OTPC) – który pozwala na rejestrację torów zarówno implantowanego produktu reakcji, jak i protonów emitowanych w rozpadach promieniotwórczych. Tak szeroki zakres dynamiczny mierzonych sygnałów możliwy jest dzięki zastosowaniu elektrody bramkującej, która reguluje ilość dryfującego w stronę anody ładunku generowanego bądź przez ciężki produkt, bądź przez proton. Szczególnie dużo uwagi poświęca sterowaniu i wyzwaniu układu. Detalicznie przedstawia tzw. tryb wydłużonej ekspozycji, który został zastosowany podczas pomiaru. To dzięki tej innowacji, czyli przedłużeniu ekspozycji klatki o zadaną wartość od momentu wyzwolenia, uzyskać można było stały czas oczekiwania na rozpad (w poprzednio stosowanym rozwiązaniu czas oczekiwania na rozpad był zmienny, zależny od momentu przyjścia sygnału wyzwalającego w stosunku do czasu początku ekspozycji klatki).

Następnie Doktorant prezentuje przebieg eksperymentu przeprowadzonego na wiązce produktów radioaktywnych w NSCL MSU. Przybliża czytelnikowi układ akceleracyjny oraz zasadę produkcji i separacji żądanych jąder. Dużo uwagi poświęca tarczy, która narażona była na zniszczenie ze względu na bardzo wysoki prąd wiązki pierwotnej, w związku z czym użyto tarczy obrotowej. Opisuje warunki pracy komory zastosowane podczas pomiaru, warunki logiczne wyzwiania zdarzenia oraz układ zbierania danych. W sposób wyjątkowo przejrzysty pokazuje wzajemne zależności zarówno czasowe, jak i amplitudowe pomiędzy sygnałami rejestrowanymi przez komorę OTPC – służy temu doskonale dobrany przykład pokazany na rys. 6.3.

Ta część pracy pozwala rozpoznać w Doktorancie bardzo wnikliwego eksperymentatora w pełni rozumiejącego mechanizmy reakcji, w których produkowane są jądra - obiekty badań,



posiadającego głęboką wiedzę o systemie separacji i identyfikacji tych jąder, dogłębnie kontrolującego procesy detekcji oraz pieczołowicie przygotowującego swój instrument badawczy. Rozległy materiał przedstawiony jest w sposób zwarty, a jednocześnie niezwykle przejrzysty.

Kolejny rozdział, rozdział 7, obejmuje opis algorytmu, który opracowany został do rekonstrukcji kierunków emisji i energii protonów rejestrowanych w OTPC. Skupiono się na analizie kształtów obserwowanych na zdjęciu torów oraz przebiegu amplitudy sygnału z fotopowielacza w funkcji czasu. Nie rozważano bezwzględnej wartości amplitudy, gdyż jej kalibracja byłaby bardzo trudna. Dopasowaniu do danych eksperymentalnych, czyli do obrazu torów na zdjęciu z CCD oraz do widma sygnału z fotopowielacza, podlegały rozkłady otrzymane w wyniku symulacji przy zastosowaniu takich parametrów jak: energia protonu, kąty emisji w stosunku do płaszczyzny komory i kierunku lotu implantowanego jądra, rozmycie toru, a także położenie początku toru protonu na zdjęciu oraz na widmie fotopowielacza. Procedura dopasowania polegała na poszukiwaniu takiego zestawu parametrów, dla których funkcja oceny prawdopodobieństwa zdarzenia, skonstruowana na potrzeby rozważanej analizy, przyjmowała wartość minimalną. Doktorant demonstruje działanie algorytmu minimalizacji funkcji oceny prawdopodobieństwa na przykładzie zdarzenia z emisją jednego oraz dwóch protonów. Pokazuje w tym celu mapy tych funkcji, które wskazują na dużą stabilność dopasowań. W przypadku gdy znajdowane są dwa minima funkcji oceny prawdopodobieństwa, o przyjęciu ostatecznego rozwiązania decyduje głębokość minimum. Pan mgr Pomorski podaje też sposób na ocenę niepewności uzyskanych wyników – stosuje tutaj zabieg techniczny polegający na normalizacji funkcji oceny w minimum do wartości 1, a za niepewność wyznaczenia danego parametru przyjmuje różnicę pomiędzy jego wartością w minimum i wartością, dla której funkcja oceny przyjmuje wartość 2.

Nie ma wątpliwości, że Doktorant wykonał wspaniałą pracę przy opracowaniu algorytmu dopasowania. Nie ma też wątpliwości, że parametry wyznaczone w wyniku zastosowania opisanej procedury charakteryzują w pełni protony zarejestrowane w opisanym eksperymencie. Jedyną radą, którą można by skierować do Autora na temat tej części rozprawy, to prośba o podanie, do kompletu, bardziej szczegółowych informacji na temat strategii zastosowanej podczas poszukiwania minimum – było ono w końcu wyznaczane przy użyciu 8 (w przypadku jednego protonu) niezależnych parametrów. O ile w przypadku klarownych obrazów torów protonów prezentowanych w obecnej rozprawie zastosowana procedura



pozwoiliła na jednoznaczne wyznaczenie charakterystyk emitowanych protonów, o tyle, mając na myśli bardziej skomplikowane dane eksperymentalne z innych pomiarów z OTPC, można by pomyśleć o skonstruowaniu dla opracowywanych danych funkcji χ^2 , którą analizowałoby się za pomocą dostępnych kodów statystycznych, skonstruowanych w celu prowadzenia dopasowań funkcji o wielu parametrach.

Mając przygotowane narzędzie do analizy danych z OTPC, Pan Pomorski przystępuje do prezentacji wyników – jest temu poświęcony rozdział 8. Dokładne zapoznanie się z tą częścią pracy doktorskiej wskazuje na entuzjastyczne, a jednocześnie bardzo rzetelne podejście Doktoranta do prowadzonych badań. W początkowej fazie Autor skupia się na analizie danych dotyczących charakterystyk rozpadu jąder ^{44}Cr i ^{46}Fe , które, oprócz ^{48}Ni , znajdowały się w widmie identyfikacyjnym jonów zarejestrowanych przez OTPC. Zaczyna od wyznaczenia czasu połowicznego zaniku dla jądra ^{44}Cr . Stosuje tutaj metodę opartą na funkcji największej wiarygodności. Otrzymany wynik pozostaje w zgodzie (w zakresie trzech odchyleń standardowych) z rezultatem uzyskanym we wcześniejszych pomiarach wykonanych inną techniką, w których zarejestrowano dziesiątki tysięcy rozpadów ^{44}Cr (w porównaniu do 183 obecnie analizowanych przypadków). Autor wyznacza też współczynnik rozgałęzienia na beta-opóźnioną emisję protonu dla ^{44}Cr (10.3(8)%). Uzyskana wartość jest znacząco niższa od wartości literaturowej (14.0(9)%). Pomimo o ponad rząd wielkości niższej statystyki prezentowany w rozprawie wynik dotyczący rozgałęzienia jest dużo bardziej wiarygodny, gdyż nie jest zaburzany przez pozytony, które stanowiły źródło niepewności w użytym do porównania eksperymencie. Także widmo energii beta-opóźnionych protonów, będąc niezakłócone przez wspomniane tło oraz zarejestrowane z nieosiągalną wcześniej czułością na protony niskoenergetyczne, pozwoliło na zidentyfikowanie dodatkowej linii energetycznej przy 742 keV.

Podobną analizę Autor przeprowadza dla jądra ^{46}Fe i również osiąga sukces: określa czas połowicznego rozpadu, współczynnik rozgałęzienia na emisję protonu po rozpadzie beta oraz, po raz pierwszy w ogóle, obserwuje beta-opóźniony rozpad dwuprotonowy nuklidu ^{46}Fe .

Wyposażony w zdobyte doświadczenie, Pan Pomorski przystępuje do opracowania najtrudniejszego i najbardziej egzotycznego przypadku, nuklidu ^{48}Ni , produkowanego w użytej reakcji ze znikomym przekrojem czynnym ok. 150 fb - dane z komory OTPC zawierają jedynie 9 przypadków rejestracji ^{48}Ni . Doktorant detalicznie analizuje każde zdarzenie: 2 z nich przypisuje emisji opóźnionego protonu βp , a 4 przypadki kwalifikuje jako emisję



dwuprotonową. Na początku wyznacza czas połowicznego zaniku ^{48}Ni , $T_{1/2}=2.1 (+1.4, -0.6)$ ms, co jest wartością bardziej dokładną niż dotychczasowe dane literaturowe. Określa też współczynnik rozgałęzienia na emisję $2p$ i βp , odpowiednio $0.7(2)$ i $0.3(2)$. Jest to pierwsza dla jądra ^{48}Ni spójna i obarczona stosunkowo niedużą niepewnością pomiarową wartość tego rozgałęzienia. Następnie przeprowadza rekonstrukcję wszystkich 4 zdarzeń zakwalifikowanych jako emisja dwuprotonowa, używając procedury, którą opracował i która jest omówiona w rozdziale 4 dysertacji (dokładny opis analizy zawarty jest w dodatku A). Autor uzyskuje wspaniały wynik: we wszystkich 4 zdarzeniach suma energii emitowanych protonów jest stała (w granicach niepewności pomiarowej) i wynosi średnio $1.29(4)$ MeV, co jest zgodne z hipotezą emisji dwuprotonowej. Dodatkowo wartość ta pozostaje w doskonałej zgodności z przewidywaniami trzech niezależnych modeli teoretycznych.

Autor nie poprzestaje na prezentacji eksperymentalnego wyniku - sprawdza, jak na jego tle wyglądają przewidywania różnych podejść teoretycznych dotyczące połowicznego czasu oraz energii dwuprotonowego rozpadu nuklidu ^{48}Ni . Jedynie dla jednego z rozważanych modeli, modelu trójciałowego L. Grigorienki, przewidywania są zgodne z wynikiem eksperymentu przy założeniu struktury funkcji z dominującą składową p^2 .

Ostatnim etapem analizy, który podejmuje Pan Pomorski, są korelacje kątowe emitowanych w rozpadzie dwuprotonowym protonów – niosą one informację o strukturze wewnętrznej jądra. Dzięki zastosowaniu OTPC oraz procedury rekonstrukcji torów, informacja na temat kierunków emisji jest dostępna. Doktorant przeprowadza więc analizę korelacji kątowych w rozpadzie $2p$ jądra ^{48}Ni – wykonuje to w układzie współrzędnych Jacobiego. Wyniki eksperymentalne naniesione na mapę we współrzędnych: podział energii protonów – kąt pomiędzy wektorami pędu protonów (w układzie Jacobiego), są w zasadzie zgodne z przewidywaniami modelu trójciałowego, zakładając dominujący wkład konfiguracji p^2 (do porównania użyto przewidywań dla sąsiedniego emitera $2p$, ^{45}Fe , gdyż obliczenia dla ^{48}Ni nie były dostępne). Ze względu jednak na niską statystykę (4 przypadki) nie jest się w stanie w pełni potwierdzić ten scenariusz - żaden z zaobserwowanych rozpadów nie wskazuje na dużą wartość energii podziału, która, według modelu, powinna być realizowana z prawdopodobieństwem około 0.2.

Rozprawę doktorską zamykają „Podsumowanie”, dwa dodatki, jeden dotyczący rekonstrukcji emisji $2p$ z ^{48}Ni oraz drugi, zawierający schematy blokowe algorytmów



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

rekonstrukcji torów w OTPC, a w dalszej kolejności „Spis tabel”, „Spis rysunków” oraz wykaz cytowanych prac zawierający 71 pozycji.

Podsumowując, pragnę stwierdzić, że Doktorantowi należą się słowa najwyższego uznania za spójną i dogłębną prezentację nowatorskiej techniki do detekcji protonów emitowanych w rozpadach radioaktywnych oraz za uzyskanie pionierskich wyników dotyczących promieniotwórczości dwuprotonowej najbardziej neutrono-deficytowego izotopu niklu ^{48}Ni , jaki do tej pory został zaobserwowany. Wagę tych wyników podnosi fakt, że jądro ^{48}Ni jest jedynym podwójnie magicznym nuklidem leżącym poza linią odpadania protonu, którego zbadanie stało się możliwe właśnie dzięki zaprezentowanemu w rozprawie eksperymentowi.

W szerszym kontekście, przedstawione w rozprawie prace badawcze należą do jednego z głównych nurtów badań w zakresie struktury jądra prowadzonych w wiodących laboratoriach fizyki jądrowej na świecie, a uzyskane rezultaty stanowią osiągnięcie na najwyższym poziomie. Zaprezentowana technika pomiarowa, oparta na udoskonalonej wersji detektora OTPC oraz na nowo opracowanej metodzie rekonstrukcji rejestrowanych w nim zdarzeń, do czego tak znacznie przyczynił się Autor, otwiera nowy rozdział w badaniach promieniotwórczości dwuprotonowej. Jest oczywiste, że będzie mogła być stosowana z powodzeniem na wiązkach jąder radioaktywnych o dużych intensywnościach, które niedługo się pojawią, np. w ośrodku FRIB w USA, gdzie intensywność produkcji np. ^{48}Ni będzie wyższa o 2-3 rzędy wielkości w porównaniu do intensywności dostępnych obecnie.

Chciałbym dodać, że rozprawa napisana jest doskonałym językiem.

Oceniana praca doktorska, moim zdaniem, stanowi oryginalny i trwały wkład do nauki w zakresie struktury jądra atomowego i w pełni spełnia wymagania stawiane dysertacjom na stopień doktora nauk fizycznych. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. Marcina Pomorskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie, biorąc pod uwagę bardzo wysokie walory poznawcze i metodyczne pracy, wnoszę wniosek do Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego o jej wyróżnienie.

Bogdan Fornal