



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

Kraków, 18 września 2023 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr Natalii Sokołowskiej
pt. „Badanie emisji cząstek naładowanych w przemianie β ^{11}Be ”

Rozprawa doktorska Pani mgr Natalii Sokołowskiej jest opracowaniem prezentującym wyniki prac badawczych przeprowadzonych przez Doktorantkę w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierownictwem Promotora prof. dr. hab. Marka Pfütznera. Podjęty w dysertacji doktorskiej temat, dotyczący badania emisji cząstek alfa i protonów z niezwiązanych stanów jądra ^{11}B , po zasilaniu tych stanów w rozpadzie beta jądra ^{11}Be , jest niezwykle intrygujący, gdyż nuklid ^{11}Be jest układem szczególnym. Będąc jądrem posiadającym jednoneutronowe halo, ^{11}B charakteryzuje się bardzo niską energią wiązania neutronu, dzięki czemu energia dostępna w przemianie beta jest stosunkowo wysoka. Cecha ta warunkuje możliwość opóźnionej emisji cząstek po przemianie beta – w jądrze ^{11}B (dokąd prowadzi rozpad beta) są zasilane stany w kontinuum, powyżej progów na emisję cząstek alfa, protonów, trytonów i neutronów. Szczególnie interesującym zjawiskiem w tym przypadku byłaby opóźniona emisja protonów, gdyż odpowiadałaby ona sytuacji, kiedy to przemianie beta ulega słabo związany neutron halo, który następnie emitowany jest jako proton. Proces taki prowadziłby do końcowego jądra ^{10}Be . Ze względu na bardzo wąskie okno energetyczne na opóźnioną emisję protonów, 281 keV, oszacowane na gruncie modelu teoretycznego prawdopodobieństwo obserwacji takich protonów, a tym samym pojawienia się w rozpadzie jąder ^{10}Be jako końcowych produktów, jest bardzo małe. Wyjątkowo niespodziewanym wynikiem było więc doniesienie o obserwacji w pomiarach przemiany beta ^{11}Be dużej ilości produktów ^{10}Be (referencja nr 19; rok publikacji 2014), a później informacja o dużej ilości opóźnionych protonów (referencja nr 25; rok publikacji 2019), wskazująca na istnienie anomalii.

W prezentowanej pracy postawiono sobie za cel dokładne zbadanie opóźnionej emisji cząstek naładowanych w rozpadzie beta jądra ^{11}Be , co pomogłoby w wyjaśnieniu wspomnianej



zagadki. Zastosowano unikalną metodę eksperymentalną, polegającą na użyciu zbudowanej na Uniwersytecie Warszawskim komory dryfowej z projekcją czasu i z odczytem optycznym, OTPC, za pomocą której przeprowadzono dwa eksperymenty na wiązkach jąder radioaktywnych: pierwszy w Laboratori Nazionali del Sud w Katanii we Włoszech oraz drugi z wykorzystaniem infrastruktury ISOLDE w ośrodku badań CERN w Genewie.

Warszawska grupa badawcza, którą kieruje Prof. dr hab. Marek Pfützner, a w ramach której Pani Sokołowska prowadziła badania, należy do światowej czołówki zarówno na froncie badań promieniotwórczości protonowej, jak i opóźnionej emisji cząstek naładowanych w rozpadach beta. Osiągnięcia naukowe tego zespołu są imponujące. Prof. Pfützner jest np. jednym z odkrywców promieniotwórczości dwuprotonowej - to on wraz z grupą współpracowników zaobserwował po raz pierwszy emisję dwóch protonów z jądra ^{45}Fe . Jednym z kluczy do wspomnianych sukcesów było zastosowanie komory OTPC zaprojektowanej i zbudowanej na Uniwersytecie Warszawskim.

Wyniki przedstawione w rozprawie doktorskiej były prezentowane przez Doktorantkę na kilku międzynarodowych konferencjach, co świadczy o wiodącym jej udziale zarówno w pomiarach, jak i w analizie danych eksperymentalnych. Stanowią one również doskonały materiał do publikacji w prestiżowym czasopiśmie.

Praca doktorska została napisana według klasycznego dla tego typu opracowań schematu: liczy ona 91 stron i rozpoczynają ją „Spis treści”, po którym następuje „Wstęp” mający na celu poinformowanie czytelnika o kontekście podejmowanych badań. Znajdujemy tutaj informacje dotyczące struktury jądra ^{11}Be , która wykazuje anomalię spinu-parzystości stanu podstawowego: stan ten posiada $J^\pi=1/2^+$ zamiast oczekiwanego $J^\pi=1/2^-$, co związane jest z obsadzeniem przez walencyjny neutron wysoko leżącego stanu jednocząstkowego $s_{1/2}$, zamiast następującego w naturalnej kolejności orbitalu $p_{1/2}$ – odpowiedzialne są za to oddziaływania resztkowe. W rezultacie jądro ^{11}Be jest nuklidem o jednoneutronowym halo, co m.in. przekłada się na bardzo niską energię wiązania neutronu, 502 keV, oraz na wysoką wartość energii dostępnej na rozpad beta minus. To szerokie okno energetyczne dopuszcza możliwość obsadzania w przemianie beta stanów niezwiązanych w jądrze ^{11}B , które z kolei rozpadają się z emisją cząstek. Kanał z emisją cząstek alfa, który stanowi pokaźną część całości przemiany, ok. 3.3%, był badany we wcześniejszych eksperymentach. Z punktu widzenia energetycznego dostępny jest też egzotyczny kanał z opóźnioną emisją protonów – jądro ^{11}Be jest jednym z kilku tylko nuklidów, dla których możliwa jest **opóźniona emisja protonów w**



rozpadzie beta minus! Współczynnik rozgałęzienia na ten proces dla ^{11}Be został oszacowany na poziomie 10^{-8} , czyli bardzo niskim, niemniej jednak w ostatnich latach pojawiły się kontrowersje związane z pomiarem tego współczynnika.

Mając na uwadze wspomniany fakt, Autorka rozprawy w sposób bardzo przejrzysty przedstawia wyniki dotychczasowych pomiarów opóźnionych protonów w przemianie beta minus nuklidu ^{11}Be , które okazują się być rozbieżne. Eksperyment polegający na obserwacji jąder ^{10}Be jako końcowych produktów procesu „beta-proton” ustanawia na ten proces górny próg o wartości 2.2×10^{-6} wszystkich rozpadów, podczas gdy pomiar opóźnionych protonów podaje dużo wyższą wartość 1.3×10^{-5} . Ostatni wynik można próbować tłumaczyć istnieniem w oknie energetycznym na emisję protonu wąskiego rezonansu, na co wskazują kolejne pomiary mające na celu identyfikację takich niezwiązanych stanów. Z drugiej jednak strony modele struktury jądra, które przewidują w ^{11}B obecność stanów kwantowych tuż powyżej progu na emisję protonów, nie antycypują znaczącej ilości rozpadów protonowych z tych stanów. Staje się oczywiste, że mamy do czynienia z zagadką, której wyjaśnienie może mieć daleko idące konsekwencje w rozumieniu struktury nuklidów w okolicach progu na emisję cząstek.

Kolejna część to bardzo krótki rozdział 2 przedstawiający cel i zakres pracy oraz rozdział 3, który jest szczegółowym opisem użytego aparatu detekcyjnego, pomiarów przeprowadzonych na wiązkach akceleratorów oraz zastosowanej metody identyfikacyjnej cząstek naładowanych emitowanych po przemianie beta.

Na początku, w systematyczny sposób, Pani mgr Sokołowska 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 jądra wiązki, w tym przypadku ^{11}Be , jak i cząstek naładowanych emitowanych po rozpadzie beta z jądra córki. Dzięki zastosowaniu kamery CCD, rejestrującej rzut toru cząstki na płaszczyznę obserwacji, oraz fotopowielacza, który zapisuje przebieg czasowy sygnału, możliwe jest odtworzenie trójwymiarowego śladu cząstki oraz uzyskanie informacji o jej energii. Ważnym elementem tego procesu jest dopasowanie do danych pomiarowych (z użyciem metody Monte Carlo) długości toru oraz rozkładu depozycji energii wzdłuż toru cząstki, obliczonych za pomocą modelu opisującego straty energii tej cząstki w gazie. Detektor szczególnie dobrze nadaje się do rejestracji cząstek o niskich energiach, co nie jest możliwe przy użyciu standardowych detektorów krzemowych ze względu na dominujący wkład



promieniowania beta do niskoenergetycznej części widma. Własność ta jest kluczowa dla prezentowanych w rozprawie badań.

Dysponując wyrafinowanym narzędziem pomiarowym i techniką rekonstrukcji parametrów emitowanej cząstki, Doktorantka mogła przystąpić do realizacji programu badawczego - przeprowadzony on został w dwóch etapach. Najpierw odbył się precyzyjny pomiar współczynnika rozgałęzienia na opóźnioną emisję cząstek alfa w rozpadzie beta minus jąder ^{11}Be , produkowanych za pomocą metody fragmentacji i separacji w locie. Następnie przeprowadzono pomiar widma cząstek alfa emitowanych w przemianie beta ^{11}Be , w tym nieznanej, niskoenergetycznej części tego widma oraz podjęto próbę bezpośredniej obserwacji opóźnionej emisji protonów z nuklidów ^{11}Be , wytwarzanych metodą ISOL.

Pierwszy eksperyment miał miejsce w INFN LNS w Katanii. Autorka relacjonuje ten etap pomiarów, skupiając się na opisie wytworzenia i charakterystyki wiązki jonów ^{11}Be oraz ustawień komory OTPC. Ponieważ wiązka opuszczająca separator FRIBs cechowała się dużym pędem oraz szerokim jego rozkładem, należało tak dobrać grubości płytek aluminiowych degradujących energię, aby liczba produktów ^{11}Be zatrzymanych w komorze była maksymalna. W tej części Pani Sokołowska bardzo wnikliwie opisuje także czasowy schemat trybu pracy detektora, który pozwalał na jednoznaczłą rejestrację cząstek alfa po rozpadzie zaimplantowanego do komory jądra ^{11}Be . 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. 3.6.

Drugi eksperyment zrealizowany został w laboratorium CERN-ISOLDE w Genewie, gdzie do wytworzenia wiązki ^{11}Be zastosowano metodę ISOL. Metoda ta dostarcza intensywną wiązkę radioaktywnych izotopów o wysokiej czystości i dobrze ustalonej, niezbyt wysokiej energii. Warunki pracy detektora dobrano w taki sposób, aby mieć szansę na uchwycenie opóźnionej emisji protonu. Należało w tym celu maksymalnie zwiększyć statystykę, przy jednoczesnym zapewnieniu, aby cząstki alfa, które emitowane są z dużym w stosunku do protonów prawdopodobieństwem, nie pojawiały się w większych ilościach na poszczególnych zdjęciach. Także i w tym przypadku Doktorantka doskonale ilustruje czasowy schemat trybu pracy detektora OTPC.

Kolejny rozdział, rozdział 4, obejmuje opis analizy danych, która składała się z kilku etapów. W przypadku danych z eksperymentu w LNS w pierwszej kolejności przeprowadzona



musiała zostać identyfikacja jonów ^{11}Be , które docierały do detektora OTPC oraz zostawały w nim całkowicie zatrzymywane oraz identyfikacja przypadków emisji cząstek alfa z tych zatrzymanych jąder. Zadanie zostało wykonane dzięki zastosowaniu automatycznych procedur pozwalających wyselekcjonować tylko te zdjęcia z komory OTPC, które zawierały ślad zatrzymanego w komorze ^{11}Be z emisją cząstki alfa. Szczególną uwagę poświęcono na wyeliminowanie sygnałów od cząstek alfa ze źródła kalibracyjnego oraz z naturalnego tła promieniotwórczego.

Analiza danych z eksperymentu HIE-ISOLDE wymagała bardziej wyrafinowanych zabiegów, gdyż należało tutaj przeprowadzić dokładną identyfikację i rekonstrukcję energii zaobserwowanych cząstek alfa oraz wybrać kandydatów na protony. W ramach tego procesu, w pierwszej kolejności usunięto z analizy przypadki, które miały miejsce na katodzie detektora lub w obszarze folii GEM oraz te, dla których ślad znajdował się w pobliżu krawędzi zdjęcia lub był znacznie oddalony od miejsca implantacji ^{11}Be . Następnie przeprowadzono tzw. wycinanie sygnałów ze zdjęć CCD oraz sygnałów z fotopowielacza, powiązane z ustaleniem produkcji światła, a tym samym depozycji energii wzdłuż torów cząstek wyemitowanych w rozpadzie. W kolejnym kroku, do przygotowanych danych pomiarowych (z kamery CCD oraz z fotopowielacza) dopasowywano energię, kąt emisji cząstki oraz rozmycie toru i położenie jego początku na zdjęciu oraz na widmie fotopowielacza tak, aby obliczone wartości depozytu energii wzdłuż torów produktów rozpadu ^{11}B , czyli wzdłuż torów cząstki alfa i ^7Li dla kanału $^{11}\text{B} \rightarrow \alpha + ^7\text{Li}$ lub protonu i ^{10}Be dla kanału $^{11}\text{B} \rightarrow \text{p} + ^{10}\text{Be}$, jak najlepiej odtwarzały zarejestrowane ślady oraz rozkład deponowanej wzdłuż nich energii. Podczas dopasowywania użyto dwóch modeli opisujących straty energii naładowanych cząstek w gazie: SRIM i GEANT. W celu ostatecznej weryfikacji procedury dopasowującej, która pozwoliła na rekonstrukcję rozpadów, wykonano symulacje danych doświadczalnych za pomocą modelu GEANT oraz przeprowadzono ich analizę, stosując metodę użytą przy opracowaniu danych pomiarowych. Uzyskano pełne potwierdzenie poprawności procedury dopasowującej. Dodatkowo, analiza symulacji rozpadów ^{11}Be pozwoliła określić wydajność na rejestrację pełnych śladów cząstek w przypadkach, gdy emitowane są one w pobliżu ścianek komory lub w obszarach o niższej czułości detektora.

Ta część pracy pozwala rozpoznać w Doktorantce wnikliwego eksperymentatora w pełni rozumiejącego zjawiska zachodzące w detektorze podczas rejestracji zarówno implantowanych jąder ^{11}Be , jak i cząstek alfa emitowanych z opóźnieniem w rozpadzie beta.



Nie ma też wątpliwości, że Pani mgr Sokołowska wykonała wspaniałą pracę przy opracowaniu algorytmu dopasowania, co okaże się kluczowe podczas interpretacji wyników. Warto też dodać, że rozległy materiał przedstawiony jest w sposób zwarty, a jednocześnie bardzo przejrzysty.

Mając przygotowane narzędzie do opracowania zarejestrowanych w OTPC zdarzeń oraz dysponując wynikami części analiz danych pomiarowych opisanych wcześniej, Pani Natalia Sokołowska przystępuje do prezentacji finalnych wyników i ich dyskusji – jest temu poświęcony rozdział 5.

W początkowej fazie Autorka skupia się na wyznaczeniu współczynnika rozgałęzienia na opóźnioną emisję cząstki alfa z ^{11}Be . Korzystając z danych liczbowych będących wynikiem wstępnych analiz danych zebranych w laboratorium LNS, opisanych w podrozdziale 4.1, Pani Sokołowska otrzymuje wynik 3.26(45)% zgodny z wartością literaturową 3.30(10)%, co świadczy o poprawności przeprowadzonych identyfikacji i właściwym uwzględnieniu czynników zaburzających.

Kluczowa natomiast dla uzyskania pełnego i bogatego w statystykę widma energii cząstek alfa była detaliczna analiza danych z eksperymentu w CERN-ISOLDE. W tym celu do każdego zdarzenia zakwalifikowanego jako spełniające warunki przedstawione w podrozdziale 4.2, Doktorantka dopasowuje (używając modelu SRIM oraz, osobno, GEANT) dwa kształty sygnału, jeden, zakładając scenariusz opóźnionej emisji alfa oraz drugi, biorąc pod uwagę emisję protonu. Analiza różnicy wartości χ^2 dla obu dopasowań pozwoliła wydzielić zdarzenia niekompletne, dla których żaden z rozważanych scenariuszy emisji opóźnionej nie dawał zadowalającego wyniku. Po odrzuceniu zdarzeń niekompletnych oraz dodatkowej selekcji z wymogiem dobrej jakości dopasowania otrzymano końcowe widma cząstek alfa. Ze względu na dużo lepsze dopasowania kształtów sygnałów uzyskanych za pomocą modelu SRIM, do dalszej analizy wybrano widmo uzyskane z zastosowaniem tego właśnie podejścia.

Dokładne zapoznanie się z tą częścią pracy doktorskiej wskazuje na silne zaangażowanie, a jednocześnie rzetelne podejście Doktorantki do prowadzonych badań. Ocena poprawności odtwarzania kształtów sygnałów zapewne wymagała od Pani Sokołowskiej przeglądania wielu tysięcy zdjęć, zwłaszcza tych zawierających sygnały zniekształcone. Benedyktyńska praca przyniosła sukces. Udało się zrekonstruować widmo cząstek alfa, poczynając od ok. 200 keV, czyli od bardzo niskich energii, co do tej pory było nieosiągalne – dolny próg detekcji uzyskany we wcześniejszych badaniach znanych z literatury wynosił ok.



500 keV. Wynik ten jest niesłychanie ważny, gdyż dokładna znajomość kształtu widma cząstek alfa przy niskich energiach jest absolutnie kluczowa do oceny obecności w badanym rozpadzie opóźnionej emisji protonów, których energia powinna być bliska 200 keV.

Moja jedyna uwaga tutaj dotyczy rysunku 5.1 i ma charakter kosmetyczny: w podpisie rysunku $\Delta(\chi^2)$ powinno być zdefiniowane jako różnica $\chi^2_{\text{(alfa)}} - \chi^2_{\text{(proton)}}$, gdyż tylko przy takiej konwencji maksimum widoczne na rysunku, odpowiadające cząstkom alfa, mogłoby znajdować się przy ujemnych wartościach $\Delta(\chi^2)$.

Autorka nie poprzestaje na prezentacji eksperymentalnego wyniku. Korzystając z formalizmu macierzy R, stara się uzyskać jak najwięcej informacji o stanach jądrowych w ^{11}B , do których prowadzi rozpad beta ^{11}Be i z których następuje emisja cząstek alfa. Danymi eksperymentalnymi, do których dopasowuje założenia modelowe dotyczące liczby stanów pośrednich, ich energii, współczynników zasilania oraz zredukowanej szerokości, jest w tym przypadku uzyskane wcześniej sumaryczne widmo cząstek alfa. Bardzo dobre odtworzenie zmierzonego widma zapewnia scenariusz, w którym przemiana beta zasila w jądrze ^{11}B trzy stany $3/2^+$ przy energiach 9902, 11642 i 9842 keV, z których emitowane są cząstki alfa. Wzbudzenia te można przypasować w granicach niepewności do zlokalizowanych wcześniej w ^{11}B stanów przy 9873, 11450 i 9820 keV, chociaż ich szerokości wyznaczone w obecnej pracy są znacznie większe niż wartości zmierzone w eksperymentach reakcyjnych. Można by zastanowić się, skąd bierze się ta różnica.

Ostatni etap analizy, który prezentuje Pani Natalia Sokołowska, dotyczy poszukiwania kandydatów na wyemitowane, z bardzo wąskiego okna energetycznego w jądrze-córce ^{11}B , protony. Przypomnieć tutaj należy o kontrowersji: według oszacowań teoretycznych gałąź opóźnionej emisji protonów powinna być znikoma, rzędu 10^{-8} , i niemożliwa do zaobserwowania w prezentowanym pomiarze, podczas gdy eksperyment mający za zadanie bezpośrednią obserwację opóźnionych protonów przyniósł pozytywny wynik na poziomie 10^{-5} . Z zagadką tą wiąże się także fundamentalnej natury pytanie o pojawianie się w rozpadzie beta minus jądra ^{11}Be produktów ^{10}Be . Jeżeli takie produkty byłyby obecne w ilości przekraczającej o dwa rzędy wielkości poziom 10^{-8} , co sugerowała praca z 2014 r. posiadająca nr 19 w spisie referencji, i gdyby nie stwierdzono odpowiednio silnej gałęzi na opóźnione protony, musiałby istnieć nieznan proces rozpadu neutronu, inny niż przemiana beta.



W celu rozwikłania zagadki Doktorantka wyizolowała grupę zdarzeń, która charakteryzowała się lepszym dopasowaniem sygnału, gdy zakładana była emisja protonu. Przypadki te, w liczbie kilku tysięcy Autorka przeglądała skrupulatnie zdarzenie po zdarzeniu, odrzucając sygnały wyraźnie uszkodzone. Zrekonstruowana energia wyselekcjonowanych w ten sposób zdarzeń podejrzanych, że są związane z emisją protonu, koncentruje się przy energiach 300 – 350 keV, co jest wartością znacznie przewyższającą możliwą maksymalną energię protonów dostępną w rozpadzie beta (281 keV). Pani Sokołowska przeprowadziła również symulację sytuacji dopuszczającą emisję protonów zgodną z wynikiem pomiaru z pracy [25], czyli ze współczynnikiem rozgałęzienia 1.3×10^{-5} oraz energią i szerokością stanu odpowiednio 196 keV i 12 keV. Zmierzone widmo nie zawiera praktycznie żadnych zliczeń, które są oczekiwane w wyniku takiej symulacji – stawia to pod dużym znakiem zapytania wynik pomiaru pokazanego w referencji [25]. Idąc o krok dalej i biorąc pod uwagę zdarzenia w liczbie 14, dla których energia oraz rekonstrukcja sygnału byłaby kompatybilna z opóźnioną emisją protonów, Autorka obliczyła górną granicę rozgałęzienia 2×10^{-6} na rozpad protonowy, co pozostaje w idealnej zgodności z wynikiem drugiego pomiaru (artykuł nr 20 z roku 2020) ilości jąder ^{10}Be produkowanych w rozpadzie ^{11}Be .

Rozprawę doktorską zamyka rozdział 6 zatytułowany „Podsumowanie i perspektywy”, gdzie Pani Sokołowska przedstawia także wizję usprawnień aparatu detekcyjnego, między innymi poprzez wprowadzenie możliwości pomiaru przy niższym ciśnieniu gazu, co pomogłoby osiągnąć dużo większą czułość przy odróżnianiu śladów wywołanych przez protony od zdarzeń z emisją cząstki alfa. Po rozdziale 6 zamieszczony jest Dodatek A zawierający wzory wykorzystane w formalizmie macierzy R, a w dalszej kolejności „Spis tablic”, „Spis rysunków” oraz „Bibliografia” zawierająca 62 pozycje.

Podsumowując, pragnę stwierdzić, że Autorce należą się słowa szczególnego uznania za podjęcie badań, które wymagały niezwykle detalicznej pracy związanej z wizualną inspekcją tysięcy fotografii wykonanych przez kamerę CCD. Wyniki uzyskane przez Panią mgr Sokołowską i zaprezentowane w pracy doktorskiej, są wynikami niezwykle wartościowymi w kontekście szeroko zakrojonych i prowadzonych w wielu światowych laboratoriach poszukiwań w jądrze ^{11}B stanu leżącego w pobliżu progu na emisję protonów, który mógłby być odpowiedzialny za opóźnioną emisję protonów w przemianie beta ^{11}Be . Brak sygnałów, które potwierdzałyby rozpad takiego stanu z emisją protonów, pozostaje w pełnej zgodności z górnym ograniczeniem na opóźnione rozpady protonowe uzyskanym podczas pomiarów



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

końcowych produktów rozpadu beta-proton ^{10}Be . Jest również zgodny z obliczeniami teoretycznymi, które, co prawda, przewidują istnienie w ^{11}B , w pobliżu energii wiązania protonu, stanu okołoprogowego, ale nie dopuszczają rozpadu tego stanu poprzez znaczącą gałąź protonową.

Zaprezentowana technika pomiarowa, oparta na udoskonalonej przez Autorkę metodzie rekonstrukcji rejestrowanych w komorze dryfowej OTPC zdarzeń, otwiera nowy rozdział w badaniach stanów położonych w okolicy progów na emisję cząstek naładowanych. Rozpad takich stanów wiąże się z reguły z emisją cząstek o bardzo niskich energiach, które, dzięki usprawnieniom zaprezentowanym w rozprawie doktorskiej, będą mogły być z powodzeniem rejestrowane. Biorąc pod uwagę jądrowe reakcje odwrotne, stany okołoprobowe w dużej mierze decydują o radiacyjnym wychwycie cząstek, co jest z kolei kluczowe dla pełnego opisu procesów nukleosyntezy.

Chciałbym dodać, że rozprawa napisana jest doskonałym językiem z idealną interpunkcją.

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 Pani mgr Natalii Sokołowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie, biorąc pod uwagę bardzo wysokie walory poznawcze i metodyczne pracy, składam wniosek do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego o jej wyróżnienie.

Bogdan Fornal