

Prof. dr hab. Wiktor Zipper
(Profesor emerytowany)
Instytut Fizyki
Uniwersytet Śląski

Katowice, 2023.09.15

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr Natalii Sokołowskiej
pt. „Badanie emisji cząstek naładowanych w przemianie β ^{11}Be ”.**

Badania własności stanów jader atomowych dostarczają stale nowych, ważnych i często spektakularnych informacji o budowie wewnętrznej struktury jader, o prawach rządzących w bardzo szerokim obszarze zjawisk kwantowych, zasadach zachowania związanych z rozpadem promieniotwórczym jader i reakcjami jądrowymi.

Badania rzadkich rozpadów promieniotwórczych są przedmiotem stale rozwijającej się spektroskopii jądrowej zarówno w pracach doświadczalnych jak i modelowo teoretycznych.

Celem rozprawy doktorskiej Pani mgr Natalii Sokołowskiej było zbadanie opóźnionej emisji cząstek naładowanych po przemianie β neutrono-nadmiarowego izotopu berylu ^{11}Be . Opis struktury jądra ^{11}Be , ze względu na pewne wyjątkowe właściwości tego jądra wśród innych jader, wymaga dalszych badań. Już we „Wstępie” autorka pracy bardzo precyzyjnie, z dużą znajomością tematyki swoich badań, pokazuje trudności w zrozumieniu struktury prostego układu nukleonów izotopu berylu ^{11}Be . Zwraca uwagę na: inwersję stanów jedno cząstkowych, gdzie stan podstawowy ma spin $1/2^+$, a pierwszy jedyny znany stan wzbudzony o energii 320 keV, ma spin $1/2^-$, na przejście elektromagnetyczne $E1$, dla którego zredukowany element macierzowy $B(E1)$ mierzony między stanami związanymi ma największą wartość wśród wszystkich znanych jader. Rozpady jądra ^{11}Be są dobrym kandydatem do testowania modeli i nowych hipotez. Pewne problemy próbowano wyjaśnić nawet poprzez próbę postulowanego rozpadu swobodnego neutronu z emisją nieznanych cząstek tzw. „ciemnej” materii.

Dotychczasowe eksperymenty o charakterze pośrednim, gdzie o emisji protonów wnioskuje się z powstania jądra końcowego ^{10}Be , są obarczone dużym błędem i dały dziwnie dużą wartość współczynnika rozgałęzienia. Uwzględnienie oddziaływań trójciałowych i „halo” neutronowego, a także badania bezpośrednie przemiany β opóźnionej emisji naładowanych cząstek mogą przyczynić się do zrozumienia wyjątkowych własności jądra berylu ^{11}Be . Wyniki badań pracy doktorskiej mgr N. Sokołowskiej są znaczącym przyczynkiem do bezpośredniej obserwacji opóźnionej emisji cząstek naładowanych w rozpadzie β izotopu ^{11}Be .

Promotorem pracy doktorskiej Pani mgr Natalii Sokołowskiej jest profesor Marek Pfützner z Uniwersytetu Warszawskiego.

Praca doktorska Pani mgr Natalii Sokołowskiej, powstała w ramach Studiów Doktoranckich w Zakładzie Fizyki Jądrowej, Instytutu Fizyki Doświadczalnej, na Wydziale Fizyki, Uniwersytetu Warszawskiego. Podstawą tej pracy są dwa oddzielne, niezależne, ale w sposób istotny uzupełniające się eksperymenty, które zostały zrealizowane w *Laboratori Nazionali del Sud (LNS)* w Katanii, na przełomie listopad i grudzień 2019 roku oraz w Laboratorium *HIE-ISOLDE* w CERN w Genewie, na przełomie sierpnia i września 2018 roku. Badania rozpadu izotopu ^{11}Be przeprowadzono z wykorzystaniem różnych metod produkcji jonów wiązki ^{11}Be . W pomiarach w LNS do produkcji jader ^{11}Be wykorzystano metodę fragmentacji pozwalającą na pełną identyfikację pojedynczych jonów w locie. W pomiarach w CERN do produkcji wiązki jonów ^{11}Be wykorzystano metodę ISOL, gdzie

dzięki selektywnej jonizacji i spektroskopii masowej, można było uzyskać bardzo intensywną wiązkę badanego izotopu berylu ^{11}Be . Projekt badań został znakomicie zaplanowany. Do bezpośrednich obserwacji rozpadów ^{11}Be z opóźnioną emisją cząstek naładowanych wykorzystano detektor OTPC (Optical Time Projection Chamber), który został wcześniej zaprojektowany i zbudowany na Wydziale Fizyki UW. To unikalne urządzenie było z powodzeniem wykorzystywane do badania bardzo rzadkich kanałów rozpadu (np. z emisją promieniowania dwu protonowego (2p)). Detektor ten jest nieczuły na promieniowanie β i pozwala na pomiar energii cząstek naładowanych o bardzo małych energiach. Cel i zakres pracy został bardzo dobrze określony i przedstawiony. Pani mgr A. Sokołowska wniosła duży wkład w przygotowaniach pomiarów oraz w zbieraniu danych do swojej pracy doktorskiej.

Przedłożona do oceny, praca doktorska Pani mgr Natalii Sokołowskiej napisana jest w języku polskim, składa się z sześciu rozdziałów wraz z dobrze napisanym streszczeniem i obszernym wstępem uzasadniającym wybór tematu pracy oraz zwięzłego dobrze napisanego podsumowania uzyskanych wyników, wraz z dyskusją perspektyw dalszych badań. Praca zawarta jest na 91 stronach, wraz z dodatkiem i znakomicie wybranym spisem literatury (62 pozycje). Rozprawa doktorska ma typowy układ dla prac eksperymentalnych i jest podzielona na trzy zasadnicze części (Rozdziały 3, 4 i 5).

Rozdział 3 „Techniki eksperymentalne” związany z opisem detektora OTPC (Optical Time Projection Chamber), który jest komorą dryfową z projekcją czasu oraz rejestracją optyczną przy pomocy kamery CCD i fotopowielacza PMT. Doktorantka bardzo dobrze przedstawiła zasadę działania detektora (OTPC) i techniki pomiarowe przeprowadzonych eksperymentów, wytwarzania i identyfikacji jonów ^{11}Be oraz zbierania danych w LNS Catania i w CERN-ISOLDE.

Rozdział 4 „Analiza danych” poświęcony jest szczegółowemu opisowi kolejnych kroków analizy danych pomiarowych uzyskanych w obydwu eksperymentach. Pierwszym krokiem było określenie profilu zatrzymanych jonów ^{11}Be w komorze detektora, następnie pełną selekcję zdarzeń z rekonstrukcją zdarzeń rozpadu. Niezbędnym krokiem w selekcji i redukcji zdarzeń były modelowe symulacje odpowiedzi detektora na rejestrację pełnych śladów zdarzeń w detektorze.

Rozdział 5 „Wyniki i ich dyskusja”, gdzie przedstawiono wynik eksperymentalny współczynnika rozgałęzienia na opóźnioną emisję cząstek α z jądra ^{11}Be i rekonstrukcję widma energetycznego $\beta\alpha$ wraz z szczegółową dyskusją. Rozdział ten zamyka analiza widma cząstek w ramach modelu macierzy R. W rozdziale tym przeprowadzono również analizę ewentualnych hipotetycznych kandydatów na opóźnioną emisję protonów βp z jądra ^{11}Be .

Badania eksperymentalne bardzo rzadkich przypadków są trudne i wymagają bardzo pracochłonnych analiz redukcji danych, często wspomaganych symulacjami przy pomocy sprawdzonych i akceptowanych procedur komputerowych. W tej pracy doktorskiej korzystano z dwóch modeli oferowanych przez programy pakietu SRIM i oprogramowania GEANT4. Skalę różnych trudności w trybie pomiarowym zbierania danych, które nadawały się do analizy właściwych, interesujących zdarzeń, pokazują zestawienia ilościowe redukcji danych z pomiarów w LNS w Katanii i w laboratorium CERN w Genewie.

W Katanii w trakcie 176 godzin pomiarów zebrano ok. 11TB danych, wśród których było ok. 4milionów zdjęć, z czego ponad 110 tysięcy to dane zbierane z rozpadów ^{11}Be , podczas implantacji jonów w komorze detektora. Część śladów pochodziła z pozostałości po źródle diagnostycznym cząstek α . Po automatycznym odrzuceniu tych charakterystycznych śladów tła, do dalszej analizy zostało ok. 20 tysięcy zdjęć. W celu usunięcia zdarzeń pochodzących z naturalnego tła promieniotwórczego ustawiono kryterium selekcji tak, by odrzucać zdarzenia o bardzo długich torach (5-6MeV), lub znajdujące się w pobliżu ramek detektora. Po takiej selekcji pozostało już ok. 2 tysiące zdjęć. Ostatecznie po wyczyszczeniu danych, pozostało

1837 zdjęć, zakwalifikowanych jako zdarzenia rozpadu ^{11}Be z opóźnioną emisją cząstek α . Liczba tych przypadków była podstawą do wyznaczenia rozgałęzienia na emisję opóźnionych cząstek α z ^{11}Be .

W Genewie w trakcie 129 godzin pomiaru zebrano ok. 9TB danych, wśród których znalazło się ok. jednego miliona zdjęć, dla których zapisano równocześnie sygnał z fotopowielacza. Po zastosowaniu podobnych automatycznych procedur redukcji danych jak w eksperymencie w Katanii, wybrano jeszcze 14-cie kandydatów na emisję protonów. Obserwacja opóźnionych protonów w rozpadzie ^{11}Be jest bardzo cennym testem dla przewidywań teoretycznych stanów w jądrze boru ^{11}B i stanu podstawowego w berylu ^{11}Be . Energia jonów ^{11}Be z akceleratora HIE-ISOLDE była dobrana tak, by wszystkie jony zostały zatrzymane w objętości czynnej detektora OTPC. Po redukcji przypadków związanych z budową detektora pozostało ok. 250 tysięcy pojedynczych przypadków zakwalifikowanych do dalszej analizy. Rekonstrukcja zdarzeń rozpadu jonu ^{11}Be przeprowadzono poprzez porównanie eksperymentalnych profili światła z zapisu PMT i zdjęć CCD z odpowiednimi profilami modelowymi depozycji energii w gazie detektora OTPC. Dla każdego z 250 tysięcy zdarzeń przeprowadzono analizę modelową dopasowania dla czterech możliwości jako rozpad $\alpha+^7\text{Li}$ oraz $p+^{10}\text{Be}$ przy pomocy pakietu SRIM i GEANT4. Do analizy rekonstrukcji rozpadów autorka recenzowanej pracy doktorskiej skorzystała z procedury, która została wcześniej sprawdzona w programie GEANT4 przez Viktora Guadilla. Wyniki tego testu symulacji zostały szczegółowo opisane i opublikowane w Acta Phys. Pol. B Proc. Suppl., vol 16. pp 54-A37, 2023, w której Natalia Sokołowska jest współautorką. Przez warunek jakości dopasowania ($\chi^2 < 10$), część przypadków została odrzucona, Z zapisu położenia na zdjęciach CCD zarejestrowanych rozpadów oraz zakładając, że w obu kierunkach x i y implantowane chmury jonów mają ten sam rozkład, zrekonstruowano prawdopodobieństwo rejestracji pełnego śladu w przestrzeni 3D. Wykonując taką symulację dla szerokiego zakresu energii otrzymano prawdopodobieństwo rejestracji pełnego śladu cząstek w detektorze OTPC w funkcji energii rozpadu, Wyniki dla obydwu modeli SRIM i GEANT były bardzo podobne. Analiza symulacji na wygenerowanych rozpadach ^{11}Be w detektorze OTPC o znanych parametrach pozwoliła na poznanie jakie zdarzenia w rzeczywistej analizie danych pomiarowych rozpadów możemy odrzucić, ze względu na położenie śladów w pobliżu ścianek i w obszarach niskiej czułości detektora (przerwy folii GEM). Przykłady zdarzeń odrzucanych i zaakceptowanych jako zdarzeń rozpadu ^{11}Be z opóźnioną emisją cząstek naładowanych w obu eksperymentach, Autorka pracy doktorskiej pokazała na wybranych zdjęciach z filmów powstałych zgodnie ze schematem trybu pracy detektora OTPC.

W pracy nie znalazłem błędów, mających istotny wpływ na moją bardzo wysoką ocenę otrzymanych wyników i bardzo staranną redakcję pracy doktorskiej. Wszystkie procedury, zarówno związane z eksperymentami, jak i z analizą oraz interpretacją wyników zostały bardzo dobrze opisane. Wyniki badań zostały znakomicie przedstawione w starannych i dobrze przygotowanych rysunkach, wykresach oraz zdjęciach i tabelach.

Podsumowując, stwierdzam że rozprawa doktorska Pani mgr Natalii Sokołowskiej zawiera cenne i nowe informacje o emisji cząstek naładowanych w przemianie beta jądra ^{11}Be . Eksperyment przeprowadzony w LNS INFN w Katanii pozwolił na wyznaczenie wartości współczynnika rozgałęzienia na opóźnioną emisję cząstek α z jądra ^{11}Be wynoszącą 3.26(45)%. Drugi eksperyment przeprowadzony w HIE-ISOLDE w CERN umożliwił na pomiar pełnego widma energetycznego cząstek alfa z jądra ^{11}Be , w sposób bezpośredni, po raz pierwszy również dla energii poniżej 500 keV. Otrzymane widmo cząstek α zostało poddane analizie w ramach formalizmu macierzy R. Z parametrów najlepszego dopasowania do eksperymentalnego widma energetycznego cząstek α , uzyskano cenne informacje o

wartości energii oraz szerokości poszczególnych stanów w jądrze ^{11}B oraz ich zasilaniu w przemianie β . Wyniki tej analizy potwierdziły wcześniej uzyskane dane, choć nie można wykluczyć, że w procesie opóźnionej emisji cząstek α z jądra ^{11}Be może mieć udział także dodatkowy stan $3/2^+$ o energii 9 841(1) keV.

Z wyselekcjonowanych 14-tu zdarzeń pochodzących z rozpadów z opóźnioną emisją protonów wyznaczono jedynie górną granicę na współczynnik rozgałęzienia $b\beta p < 2 \cdot 10^{-6}$ dla procesu βp , w zakresie energii poniżej 230 keV. Wynik ten jest sprzeczny z wynikiem pomiarów bezpośrednich przedstawionych w jedynej jak dotąd publikacji (*Y. Ayyad et.al., „Direct observation of proton emission in ^{11}Be .” Phys Rev. Lett., Vol.123, p.082501, 2019.* Bardzo dobrze przeprowadzone pomiary oraz wnikliwa analiza zebranych danych pozwoliła na uzyskanie wiarygodnych wyników.

Większość wyników zostało już opublikowanych w dobrych czasopismach naukowych i była przedstawiona przez doktorantkę na kilkunastu międzynarodowych konferencjach naukowych. Poza uzyskaniem ważnych znaczących wyników fizycznych badania struktury jądra ^{11}Be i jego rozpadu, Pani mgr Natalia Sokołowska szczegółowo opisała w swojej pracy bezpośrednie metody pomiarowe emisji bardzo rzadkich przypadków cząstek naładowanych z wykorzystaniem detektora dryfowego z projekcją czasu i odczytem optycznym. Chcę jednocześnie podkreślić, że zarówno obszerna część opisowa jak i przeprowadzenie pomiarów i analiz, mogą stanowić bardzo pomocny materiał przydatny przyszłym adeptom eksperymentalnych badań struktury i własności jąder atomowych.

Doceniam znaczący wkład pracy wniesiony przez Autorkę do projektu badania procesów opóźnionej emisji cząstek naładowanych z nutrono-nadmiarowego jądra ^{11}Be , realizowanego przez wieloosobową grupę badawczą. Stwierdzam z pełnym przekonaniem, że rozprawa Pani mgr Natalii Sokołowskiej zasługuje na wysoką ocenę i spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim w Polsce. Wnoszę o dopuszczenie Panią mgr Natalię Sokołowską do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ponadto stawiam wniosek o wyróżnienie pracy doktorskiej Pani mgr Natalii Sokołowskiej za szczegółowe przedstawienie metodologii badań emisji cząstek naładowanych w przemianie beta ^{11}Be oraz uzyskanie cennych, nowych informacji spektroskopowych dla badanych jąder.



Prof. dr hab. Wikto Zipper