

Dr hab. Wojciech Królas, profesor IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

Kraków, 14.04.2025 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Michała Stepaniuka
zatytułowanej „Badanie przemiany beta izotopów bromu o liczbach masowych
od A=87 do A=91 z wykorzystaniem Modularnego Spektrometru Pełnej Absorpcji”**

Rozprawa doktorska magistra Michała Stepaniuka zatytułowana „Badanie przemiany beta izotopów bromu o liczbach masowych od A=87 do A=91 z wykorzystaniem Modularnego Spektrometru Pełnej Absorpcji” powstała na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem prof. dr hab. Marka Karnego. Analizy będące tematem rozprawy wykonano w oparciu o dane uzyskane w latach 2012 i 2015 w eksperymentach przy użyciu Modularnego Spektrometru Pełnej Absorpcji (MTAS) w laboratorium HRIBF w Oak Ridge.

Pierwotną motywacją podjęcia badań rozpadów beta neutrono-nadmiarowych izotopów bromu i kryptonu powstających w procesie rozszczepienia jąder uranu była potrzeba dokładniejszego wyznaczenia ciepła powyłączeniowego reaktorów jądrowych. Używane przez energetykę jądrową bazy danych rozpadów powstały w większości w latach 60. i 70. ubiegłego stulecia. Ich kompletność i dokładność podawanych danych ograniczona jest przez dostępne wówczas techniki pomiarowe. Postęp w dziedzinie instrumentacji jądrowej, technik analizy i modelowania pozwala dziś znacznie dokładniej zbadać strukturę rozpadów beta, określić precyzyjnie udział kanałów rozpadu z emisją opóźnionego neutronu (β -n), oraz wykonać analizę polegającą na dopasowaniu zmierzonych widm gamma rozpadu z widmem symulowanym uzyskanym na podstawie wyznaczonego schematu rozpadu. Technika pomiarowa stworzona do takich badań to spektrometria pełnej absorpcji. Jej przykładem są pomiary przy użyciu spektrometru MTAS, który powstał w laboratorium w Oak Ridge przy wiodącym udziale grupy Zakładu Fizyki Jądrowej Uniwersytetu Warszawskiego. Poza aspektami związanymi z ciepłem powyłączeniowym reaktorów zaprezentowane wyniki rzucają nowe światło na problem deficytu antyneutrino reaktorowych czyli niezgodności pomiędzy strumieniem anty- ν_e z rozpadów β produktów rozszczepienia mierzonym przy reaktorze a strumieniem przewidywanym na podstawie danych jądrowych.

Wybór zagadnienia naukowego rozważanego w rozprawie jest moim zdaniem bardzo ciekawy i w pełni uzasadniony potrzebą lepszego poznania rozpadów beta jąder neutrono-nadmiarowych powstających w rozszczepieniu.

Przedstawiona praca składa się z siedmiu rozdziałów – w tym wstępu i podsumowania – oraz dodatku zawierającego uzyskane dane o strukturze rozpadów beta izotopów bromu i kryptonu w formacie bazy danych ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File). Autor w klarowny sposób wprowadza podstawowe wielkości i zależności związane z przemianą β^- oraz β^- z emisją neutronów opóźnionych, omawia konkurencję pomiędzy emisją kwantu γ a emisją neutronu ze stanu wzbudzonego jądra córki, tłumaczy zjawisko ciepła powyłączeniowego reaktora jądrowego oraz dyskutuje tak zwany efekt Pandemonium, który to postulat przyczynił się do powstania spektrometrii pełnej absorpcji. W kolejnym rozdziale autor przedstawia krótko układ eksperymentalny, który posłużył do wykonania pomiarów, posiłkując się przy tym odnośnikami do wcześniej opublikowanych prac. W pracy szczegółowo opisana jest metodyka analizy, konstrukcja widm eksperymentalnych przy użyciu różnych kombinacji modułów detektora MTAS oraz sposób uzyskania widm symulowanych, do których wyliczenia użyte były dane o rozpadach jądrowych i funkcja odpowiedzi detektora. Opisany jest mechanizm dopasowania widm symulowanych do eksperymentalnych przy pomocy dodawanych do schematu quasi-poziomów. Omówiona jest analiza koincydencyjna 2D oraz rejestracja w detektorze MTAS neutronów opóźnionych, w tym funkcja odpowiedzi detektora na neutrony.

W rozdziale prezentującym wyniki analizy omówiono rozpady β pięciu izotopów bromu $^{87,88,89,90,91}\text{Br}$ oraz izotopu ^{91}Kr . Dla każdego rozpadu przedstawiono wcześniejszy stan wiedzy, podstawowe informacje na temat rozpadu, energii Q_β , S_n , czasu połowicznego zaniku, postulowane w wyniku analizy zmiany i uzupełnienia do schematu rozpadu i porównanie wybranych widm zmierzonych i wyliczonych. W części poświęconej omówieniu wyników podkreślono znaczenie proponowanych uzupełnień schematów rozpadu, wyznaczone współczynniki konkurencji w emisji neutronów względem emisji kwantów γ i porównano te wyniki z otrzymanymi dla jąder $^{87,88}\text{Br}$ wynikami eksperymentu Rocinante TAGS z Walencji. Pokazano także, jak zmiana schematów rozpadów sześciu badanych izotopów wpływa na oszacowanie ciepła powyłączeniowego reaktora. W omówieniu znaczenia tych wyników dla zjawiska deficytu antyneutrino reaktorowych wskazano, że prezentowane dane w znacznym stopniu zmniejszają deficyt pomiędzy pomiarami a przewidywaniami.

Uzyskane wyniki mają istotne znaczenie dla uzupełnienia baz danych jądrowych, te zaś z kolei są istotne dla technologii reaktorowych. Dodatkowym wynikiem jest weryfikacja hipotezy deficytu antyneutrino reaktorowych. Wskazano, że efekt ten mocno zależy od kompletności dostępnych danych na temat rozpadów jądrowych co poddaje w wątpliwość jego fundamentalny charakter.

Istotną wartością recenzowanej pracy stanowi jej część obliczeniowa, w której autor porównuje wyniki pomiarów eksperymentalnych z widmami wyliczonymi na podstawie danych o rozpadach jądrowych z użyciem funkcji odpowiedzi detektora. Następnie, modyfikuje schematy rozpadu poprzez dodawanie do nich wirtualnych poziomów tak, aby uzyskać jak najlepszą zgodność porównywanych widm. Praca ta wymagała rozwinięcia dużego warsztatu obliczeniowego. Po przeczytaniu pracy mam wątpliwość czy i w jaki sposób ta procedura dopasowania różniła się od zastosowanej we wcześniejszych badaniach rozpadów β z użyciem danych ze spektrometru MTAS, w szczególności w cytowanych pracach Rasco et al. oraz Fijałkowska et al. W części dotyczącej sporządzenia widm

symulowanych autor powołuje się na programy wcześniej przygotowane, stwierdza, że stanowiły one podstawę do rozwoju narzędzi używanych w jego analizie natomiast, jak mi się wydaje, niewystarczająco podkreśla poprawki i zmiany, których jest autorem, i które stanowią jego własny wkład do procedury. Szczegółowe omówienie tych zmian i tego jak poprawiły one procedurę analizy będzie ciekawą informacją, o którą chciałbym zapytać podczas publicznej obrony pracy.

W złożonej procedurze porównania wyników eksperymentalnych z symulowanymi, tak jak ta zastosowana w pracy, kluczowym jest właściwa analiza niepewności. Autor poświęcił jej krótki rozdział, w którym wylicza składniki dodające się do niepewności, oraz proponuje metodę oszacowania niepewności pomiarowych wyników prezentowanych w pracy. W rozdziale, w którym dla każdego badanego rozpadu podane są ostateczne wyniki analizy – otrzymane wartości, na przykład średnie energie promieniowania γ i średnie energie β , czasy połowicznego zaniku – dane podane są z błędami, brakuje natomiast komentarza jakie są główne źródła tych niepewności. Wydaje mi się, że taka informacja jest zawsze cenna, szczególnie dla eksperymentatora rozważającego możliwości rozwoju układu pomiarowego czy inną metodę dopasowania danych.

Kluczowe znaczenie prezentowanych badań to wkład do bazy danych jądrowych rozpadów β . We wszystkich badanych rozpadach w wyniku analizy dodano szereg nowych poziomów wzbudzonych i przejść γ w jądrach córkach, a także wskazano na istnienie poziomów emitujących neutrony i określono prawdopodobieństwa emisji β -opóźnionych neutronów. W podsumowaniu pracy zabrakło mi informacji na temat tego czy wyniki te zostały zgłoszone i włączone do bazy ENSDF (Evaluated Nuclear Structure Data File) lub XUNDL (Experimental Unevaluated Nuclear Data List).

Podsumowując, przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgra Michała Stepianiuka porusza aktualną i istotną tematykę badań rozpadów beta jąder neutrono-nadmiarowych, która jest ciekawa dla zrozumienia struktury tych egzotycznych jąder oraz ma implikacje dla technologii reaktorów jądrowych. W pracy wykorzystano unikalny układ pomiarowy MTAS oraz zastosowano ciekawą metodę analizy. Przedstawienie wyników wskazuje na głębokie zrozumienie tematyki i wysoki poziom naukowy doktoranta.

Dysertacja w pełni spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (tekst jednolity: Dz. U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.). Wnioskuje o dopuszczenie mgra Michała Stepianiuka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Dr hab. Wojciech Królas, profesor IFJ PAN