

Dr hab. Wojciech Królas

Instytut Fizyki Jądrowej im. H. Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk
ul. Radzikowskiego 152
31-342 Kraków

Kraków, 30.12.2021 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Moniki Piersy-Siłkowskiej zatytułowanej
„Beta-decay studies of very neutron-rich indium isotopes”**

Rozprawa doktorska powstała na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dr hab. Agnieszki Korgul.

1. Wprowadzenie

Recenzję rozprawy doktorskiej pt. „Beta-decay studies of very neutron-rich indium isotopes” autorstwa Pani mgr. Moniki Piersy-Siłkowskiej opracowałem na podstawie pisma Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego prof. dr. hab. Wojciecha Satuły z dnia 10.11.2021 r. Przewód doktorski w związku z art. 179 ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r. poz. 1669, z późniejszymi zmianami), prowadzony jest na podstawie ustawy z dnia 18 marca 2011 r. Recenzję rozprawy doktorskiej wykonałem zgodnie z wymogami wskazanej ustawy. Zgodnie z jej treścią rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wykazywać głęboką wiedzę kandydata w danej dyscyplinie naukowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Problem naukowy rozprawy dotyczy eksperymentalnych badań rozpadów β neutrono-nadmiarowych izotopów indu ^{133}In , ^{134}In oraz ^{135}In , które to badania pozwoliły na uzyskanie nowych informacji o strukturze jądrowej nuklidów z rejonu podwójnie magicznego jądra ^{132}Sn . Badania zostały przeprowadzone w laboratorium CERN-ISOLDE gdzie neutrono-nadmiarowe izotopy indu były produkowane w procesie rozszczepienia jąder uranu indukowanego przez neutrony.

Wybór zagadnienia naukowego rozważanego w dysertacji jest moim zdaniem w pełni uzasadniony potrzebą lepszego poznania i modelowania astrofizycznego procesu

syntezy pierwiastków na drodze szybkiego wychwytu neutronów, czyli tak zwanego procesu *r*. Silny zamknięty charakter powłoki $N=82$ uwidocznia się w rozkładzie rozpowszechnienia izotopów powstających w przebiegu tego procesu. Rozpad większości jąder atomowych biorących udział w procesie *r* zachodzi na drodze przemiany β z następującą po niej emisją neutronu (rozpad βn). Nowe informacje dotyczące struktury stanów wzbudzonych jąder będących emiterami neutronów są kluczowe dla weryfikacji i poprawy przewidywań modeli opisujących taki rozpad. Dodatkowo, w jądrach z tego obszaru zaobserwowano nietypową konkurencję między dwiema drogami rozpadu stanów niezwiązanych w jądrach produktach rozpadu β : pomiędzy emisją neutronu oraz deekscytacją przez emisję promieniowania γ . Preferowany sposób rozpadu jest funkcją struktury jądrowej stanów wzbudzonych rozpadającego się jądra, natomiast sam fakt istnienia takiej konkurencji przy energiach wzbudzenia znacznie przekraczających energię separacji neutronu wymaga dalszych badań, gdyż zjawisko to może mieć istotny wpływ na przewidywany przebieg procesu *r*. Neutrono-nadmiarowe izotopy indu stanowią ciekawe przypadki do badania tej konkurencji, gdyż w ich rozpadach dostępne są duże okna energetyczne na populację stanów niezwiązanych. Izotopy te, położone w bezpośrednim sąsiedztwie zamkniętych powłok neutronowej $N=82$ i protonowej $Z=50$ są w stosunkowo prosty sposób opisywane przez model powłokowy jądra atomowego. Pozwala to na łatwiejsze określenie wpływu efektów struktury jądrowej na wzmocnienie emisji promieniowania γ ze stanów położonych powyżej energii separacji neutronu. Stwierdzam, że tematyka pracy doktorskiej jest aktualna i doskonale wpisuje się we współczesne zagadnienia z pogranicza badań fizyki jądrowej, w szczególności struktury jąder atomowych oraz astrofizyki, teorii powstania ciężkich nuklidów.

Eksperymenty przeprowadzono w laboratorium CERN-ISOLDE przy użyciu wiązek niestabilnych izotopów indu produkowanych w procesie rozszczepienia jąder uranu. Wiązki jonów zostały poddane jonizacji laserowej oraz separacji masowej. Dodatkowo, w przypadku izotopu ^{133}In zastosowana została jonizacja z selekcją stanu jądrowego co pozwoliło na niezależne zbadanie rozpadu β stanu podstawowego i izomerycznego tego jądra. W badaniach wykorzystano stację badania rozpadów „ISOLDE decay station” składającą się z układu detektorów germanowych HPGe, scyntylacyjnego detektora cząstek β oraz dodatkowych detektorów scyntylacyjnych $\text{LaBr}_3(\text{Ce})$ rejestrujących kwanty γ , przeznaczonych do pomiarów czasów życia stanów jądrowych. Użyty układ jest jednym z najbardziej zaawansowanych współczesnych zestawów pomiarowych służących do badania rozpadów jądrowych co pozwoliło na uzyskanie bogatych wyników eksperymentalnych. Przedstawione w pracy metody analizy przeprowadzonych pomiarów są dobrze dobrane i świadczą o głębokiej znajomości aparatu eksperymentalnego.

Istotną wartość recenzowanej pracy stanowi jej część interpretacyjna, w której opisane zostało porównanie wyników eksperymentalnych z obliczeniami modelu powłokowego. Przeprowadzono przy tym obszerną analizę różnych, znanych z literatury podejść do obliczeń w tym obszarze jąder, w tym różniących się zastosowaniem odmiennych przestrzeni walencyjnych jak i różnych potencjałów oddziaływania nukleon-nukleon. Analiza i interpretacja wyników przedstawiona przez Autorkę jest jasna i oparta na właściwej ocenie stosowanych technik modelowania.

2. Analiza i ocena rozprawy

Rozprawa napisana jest w języku angielskim, zawiera 135 stron tekstu, 85 rysunków i wykresów, 5 tabel oraz bogatą bibliografią zawierającą 178 pozycji. Z samego porównania liczby stron oraz liczby rysunków i wykresów wynika, że praca napisana jest zwięzłym i konkretnym językiem naukowym, zaś główne wyniki zaprezentowano w formie licznych wykresów i schematów poziomów. Rozprawa opatrzona jest krótkim wprowadzeniem prezentującym udział Autorki w kampaniach eksperymentu IS610 CERN-ISOLDE wraz z listą 3 publikacji powstałych na bazie prezentowanych w pracy wyników, w których Pani Monika Piersa-Siłkowska jest pierwszą autorką.

Właściwa część rozprawy podzielona jest na 4 rozdziały: wstęp, opis eksperymentu, analizę danych i omówienie uzyskanych wyników, oraz dyskusję połączoną z porównaniem wyników z przewidywaniami teoretycznymi.

W pierwszej części rozprawy wprowadzony jest opis teoretyczny badanych zjawisk: model powłokowy jądra atomowego, teoria rozpadu β , a także opisane są zjawiska rozpadu stanów wzbudzonych jąder poprzez emisję kwantu γ , wewnętrzna konwersja i emisja następująca po rozpadzie β (β delayed emission). Opisane jest położenie badanych izotopów indu na mapie nuklidów, w sąsiedztwie jądra ^{132}Sn o dwóch zamkniętych powłokach, oraz jego implikacje. Wreszcie, dużą część wstępu zajmuje omówienie wcześniejszego stanu badań: istniejących danych na temat rozpadów izotopów ^{133}In , ^{134}In i ^{135}In oraz znanej struktury stanów wzbudzonych jąder Sn, produktów ich rozpadów. We wstępie bardzo klarownie określono motywację prezentowanych badań: i) określenie konkurencji pomiędzy emisją kwantów γ ze stanów wzbudzonych populowanych w rozpadzie β a rozpadem tych stanów poprzez emisję neutronów, a także ii) uzyskanie danych potrzebnych do lepszego modelowania procesu r w tym obszarze, takich jak prawdopodobieństwa rozpadu βn , struktura stanów wzbudzonych jąder. Informacje zawarte w tej części stanowią ciekawy i syntetyczny opis podstaw teoretycznych. Określenie motywacji prowadzonych badań pozwala wnioskować, iż Doktorantka zna bieżące osiągnięcia we wskazanym obszarze badań oraz potrafi właściwie ocenić doniosłość poruszanych problemów. Pewien niedosyt pozostawia brak stwierdzenia, które informacje teoretyczne są najistotniejsze i będą wykorzystane do odniesienia do nich uzyskanych wyników eksperymentów i analiz.

W części poświęconej eksperymentowi omówiono mechanizm produkcji i separacji jonów indu w CERN-ISOLDE przy użyciu techniki rezonansowej jonizacji laserowej. Opisano także stację badania rozpadów „ISOLDE Decay Station”, użytą metodę pomiarową, wykorzystane detektory promieniowania oraz metody zbierania i analizy danych. Przedstawiono parametry całego układu, jego wydajność oraz zastosowane metody kalibracji. Przedstawiony opis dowodzi opanowania przez Autorkę omawianej techniki eksperymentalnej i sposobu analizy danych. Ponieważ prowadzone badania były częścią większej współpracy, ciekawym byłoby zwrócenie uwagi na to, za które elementy kalibracji, prowadzenia pomiarów, analizy danych, odpowiadała wyłącznie Autorka rozprawy, a które z nich stanowiły rutynową część eksploatacji eksperymentu „ISOLDE Decay Station” pozostająca pod kontrolą lokalnej grupy fizyków i techników CERN-ISOLDE.

W trzecim rozdziale pracy omówiono kolejno wyniki badań rozpadów jąder ^{133}In , ^{134}In i ^{135}In . Pokazano widma kwantów γ emitowanych ze stanów wzbudzonych w jądrach produktach rozpadów β oraz wyznaczone schematy rozpadów. Dla izotopu ^{133}In przeprowadzono osobne badania rozpadu stanu podstawowego o spinie/parzystości $9/2^+$ jak i stanu izomerycznego ^{133m}In o spinie/parzystości $1/2^-$. Było to możliwe dzięki zastosowaniu

rezonansowej jonizacji laserowej z selekcją stanu jądrowego. Dla wszystkich badanych rozpadów wyznaczono stosunek rozpadów βn „ βn branching ratio”. W przypadku rozpadów ^{133}In i ^{133m}In zaobserwowano dwa kanały rozpadu: β i βn , zaś w przypadku rozpadów izotopów ^{134}In i ^{135}In zaobserwowano aż trzy kanały rozpadu: β , βn i $\beta 2n$. We wszystkich obserwowanych rozpadach zidentyfikowano nowe stany wzbudzone w jądrach produktach, zaś korzystając z analizy koincydencyjnej $\beta\gamma\gamma$ określono schematy poziomów tych izotopów. Na podkreślenie zasługuje zidentyfikowanie po raz pierwszy rozpadów β i $\beta 2n$ izotopu ^{134}In oraz rozpadów izotopu ^{135}In . Szczególnie doniosłą obserwacją jest stwierdzenie populacji stanów niezwiązanych emitujących promieniowanie γ w ^{133}Sn oraz ^{134}Sn przy energiach wzbudzeń przekraczających o 1 MeV energię separacji neutronu. Znakomity sposób przedstawienia uzyskanych wyników i opracowania tej części pracy wskazuje na to, że Pani Monika Piersa-Siłkowska wykonała ją w grupie badawczej o najwyższym poziomie merytorycznym, która stworzyła Doktorantce doskonałe warunki do rozwinięcia zaawansowanego warsztatu, niezbędnego do wykonania tak skomplikowanej i wielowątkowej analizy.

W części będącej dyskusją wyników dokonano gruntownego przeglądu dostępnych w literaturze obliczeń modelu powłokowego dotyczących badanego obszaru jąder. Opierając się na porównaniu wyników eksperymentalnych z obliczeniami wskazano najbardziej prawdopodobne konfiguracje stanów podstawowych ^{133}In , ^{134}In i ^{135}In oraz stanu izomerycznego ^{133m}In . Omówiono mechanizmy obserwowanych rozpadów β : Gamowa-Tellera oraz przejścia wzbronione pierwszego rzędu (first-forbidden). Mimo, że przejścia Gamowa-Tellera zasilają głównie poziomy powyżej energii separacji neutronu w izotopach Sn, rozpad z emisją jednego neutronu jest dominującym kanałem rozpadu ^{134}In oraz ^{135}In . Dominujący kanał z emisją jednego neutronu jest przewidywany jedynie przez te modele teoretyczne, które, poza rozważaniem przejść wzbronionych, uwzględniają także wszystkie możliwe drogi rozpadu stanów niezwiązanych w jądrach produktach. Eksperymentalne schematy poziomów w izotopach cyny ^{133}Sn , ^{134}Sn oraz ^{135}Sn , wyznaczony po raz pierwszy w opisanym eksperymencie, zostały porównane z obliczeniami modelu powłokowego, w tym z obliczeniami, w których uwzględniono wzbudzenia typu cząstka-dziura ponad szczelinę energetyczną odpowiadającą powłoce neutronowej $N=82$.

Stwierdzam, że dyskusja wyników jest konsekwentna, jasna i zawiera szereg ciekawych wniosków. W szczególności na podkreślenie zasługuje wyznaczenie energii poziomu odpowiadającego konfiguracji orbitala neutronowego $i_{13/2}$ w dwóch niezależnych pomiarach – z rozpadu ^{134}In oraz ^{135}In . Uzyskane wyniki wskazują na konieczność uwzględnienia stanów niezwiązanych, leżących wysoko (o kilka MeV) powyżej energii separacji neutronów o konfiguracjach zawierających jednocześnie neutrony walencyjne jak i wzbudzenia rdzenia neutronowego. To jest bardzo ważny wniosek dla przyszłych obliczeń, okazuje się, że bez uwzględnienia takich stanów nie jest możliwe odtworzenie schematów deekscytacji obserwowanych w izotopach Sn po rozpadzie. Otwiera się zatem możliwość znacznego ulepszenia modelowania procesów astrofizycznych.

Dysertacja zakończona została krótkim, wręcz skrótowym podsumowaniem. Autorka wskazuje w nim najważniejsze uzyskane rezultaty eksperymentalne i wynikające z analiz konkluzje. Pewien niedosyt budzi brak w tej części pracy choć krótkiego paragrafu wskazującego na możliwe rozwinięcie prezentowanej linii badań, możliwe ulepszenia aparatu eksperymentalnego czy alternatywne metody modelowania.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr Moniki Piersy-Siłkowskiej zawiera wartościowe i oryginalne wyniki. Autorka dysertacji wykazała dogłębną znajomość dziedziny przeprowadzonych badań. Na podkreślenie zasługuje bardzo dobra znajomość aparatu eksperymentalnego i biegłe użycie metod analizy danych. Część interpretacyjna rozprawy świadczy o znajomości danych opublikowanych w bieżącej literaturze przedmiotu oraz o świadomości wagi prezentowanych odkryć.

Oceniając pozytywnie stronę naukową rozprawy doktorskiej nie mogę powstrzymać się od wyrażenia opinii na temat warsztatu redakcyjnego i edytorskiego Autorki. Uważam, że także pod tym względem praca wyróżnia się i może stanowić przykład właściwej, niezwykle klarownej redakcji pracy doktorskiej. W szczególności podział rozprawy na cztery duże rozdziały o jasno określonej, nie mieszającej się treści, znakomicie ułatwia jej przyswojenie, właściwą ocenę zawartości, w tym także ocenę, która część przekazywanych informacji stanowi wynik eksperymentalny czy wynik analiz przeprowadzonych przez Autorkę, a która jest elementem interpretacji opartym na obliczeniach. Kolejnym aspektem rozprawy zasługującym na docenienie jest niezwykle staranne i klarowne przygotowanie wszystkich zawartych w pracy rysunków, wykresów i schematów poziomów.

3. Wniosek końcowy

Na podstawie analizy treści przedstawionej do recenzji rozprawy doktorskiej pt. „Beta-decay studies of very neutron-rich indium isotopes” autorstwa mgr Moniki Piersy-Siłkowskiej stwierdzam, że Doktorantka wykazała odpowiedni poziom wiedzy w zakresie problematyki badawczej objętej niniejszą dysertacją, dowiodła, że posiada umiejętność samodzielnego formułowania problemów naukowych oraz organizacji i prowadzenia procesu badawczego w celu efektywnego rozwiązania postawionych problemów. Przedstawiona w pracy analiza wyników i prezentacja końcowych rezultatów badań dowodzi dojrzałości naukowej Autorki. Dyskusja oraz wyniki końcowe sformułowane w dysertacji przekonują, iż Doktorantka zrealizowała założone cele naukowe.

Uważam, że recenzowana rozprawa doktorska mgr Moniki Piersy-Siłkowskiej spełnia wymagania ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. – przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2018 r. poz. 1669, z późniejszymi zmianami). Na tej podstawie wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Uniwersytetu Warszawskiego o dopuszczenie Pani mgr Moniki Piersy-Siłkowskiej do publicznej obrony przedmiotowej rozprawy doktorskiej.

Jednocześnie wnioskuję o przyznanie wyróżnienia przedłożonej do oceny rozprawie doktorskiej mgr Moniki Piersy-Siłkowskiej.

Tematyka badawcza doktoratu jest częścią ważnej i szybko rozwijającej się dziedziny jaką jest struktura egzotycznych, neutrono-nadmiarowych jąder atomowych. Badanie tych obiektów poprzez obserwację rozpadów β i rozpadów β^- z następującą po nich emisją neutronu czy neutronów dostarcza unikalnych informacji na temat struktury jąder, pozwala, w oparciu o obliczenia modelu powłokowego, na wyciągnięcie wniosków na temat struktury obserwowanych wzbudzeń jądrowych. Wyniki badań mają ogromne znaczenie dla lepszego

zrozumienia i opisu procesów astrofizycznych. Doktorantka uzyskała w pracy szereg nowych rezultatów, które poszerzyły stan wiedzy w tej dziedzinie. Ponadto, na wyróżnienie zasługuje dobrze zaplanowany i zorganizowany proces badawczy oraz analiza i interpretacja bardzo szerokiego zestawu wyników. Potwierdzenie doniosłości wyników i dobrego warsztatu zaprezentowanego w pracy stanowią liczne publikacje z tematyki objętej pracą doktorską, których Doktorantka jest autorką i współautorką. Stwierdzam zatem, że zarówno tematyka jak i całokształt prac badawczych, wykonanych i przejrzyście przedstawionych przez Doktorantkę w rozprawie, zasługuje na wyróżnienie.



Dr hab. Wojciech Królas, prof. IFJ PAN