

prof. dr hab. Józef Andrzejewski

Łódź, 03 stycznia 2022

Uniwersytet Łódzki

Katera Fizyki Jądrowej i Bezpieczeństwa Radiacyjnego

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr Moniki Piersy-Silkowskiej na temat

Beta-decay studies of very neutron-rich indium isotopes

Rozprawa przygotowana w języku angielskim przez mgr M. Piersa-Silkowską pod kierunkiem promotor dr hab. Agnieszki Korgul, stanowi wnikliwą analizę wyników eksperymentalnych dotyczących przemiany beta trzech bardzo egzotycznych, neutronowo nadmiarowych jąder indu $^{133,134,135}\text{In}$. Eksperyment został przeprowadzony z wykorzystaniem układu pomiarowego ISOLDE Decay Station (IDS) w wiodącym światowym ośrodku badawczym ISOLDE w CERN. Wytworzenie wymienionych jąder uzyskano z zastosowaniem bardzo zaawansowanej metody selekcji fragmentów rozszczepienia jąder uranu. Polegała ona na selektywnym, laserowym zjonizowaniu atomów danego pierwiastka, z następującym po nim wydzieleniu badanego izotopu za pomocą separatora mas o wybranej selektywności.

Rozprawa napisana na 149 stronach składa się z wprowadzenia, opisu eksperymentu, analizy uzyskanych wyników, wraz z przedstawieniem wyników dla każdego z trzech badanych izotopów indu oraz z wnikliwej dyskusji wyników i podsumowania. Na podkreślenie zasługuje bardzo obszerny spis odnośników literaturowych (178 pozycji). Wyniki badań stanowiące podstawę ocenianej rozprawy są przedstawione w trzech publikacjach o zasięgu międzynarodowym, w tym dwóch o wysokim IF. Mgr M. Piersa-Silkowska jest ich wiodącą autorką, co wskazuje na Jej wysokie kwalifikacje.

Badania przeprowadzono za pomocą specjalnie do tego celu zastosowanego układu detekcyjnego w IDS składającego się z czterech detektorów germanowych o wysokiej czystości (HPGe) typu clover, scyntylacyjnego detektora plastycznego

do zarejestrowania cząstek beta służącego faktycznie jako tryger (bez określania energii cząstek) oraz dwóch scyntylacyjnych detektorów promieniowania gamma typu $\text{LaBr}_3(\text{Cr})$. Szybkie detektory scyntylacyjne obu typów pozwoliły na przeprowadzenie pomiarów koincydencyjnych między cząstkami β i fotonami γ . W celu ograniczenia tła pochodzącego od jąder domieszek o krótkim i długim czasie życia, w porównaniu do spodziewanego czasu życia badanego jądra, wykorzystano czasową strukturę implantowanych na taśmie jonów przez dobranie optymalnego dla detekcji okna czasowego. Detektory wnikliwie skalibrowano energetycznie i określono ich efektywność.

Badane silnie neutronowo nadmiarowe jądra indu w rozpadach beta charakteryzują się populacją wysokoenergetycznych stanów niezwiązanych w jądrach pochodnych o energii przekraczającej 10 MeV, czyli znacznie przekraczającej energię wiązania neutronu. W przypadku jąder neutronowo nadmiarowych występujących na mapie nuklidów poniżej ^{132}Sn zaobserwowano wcześniej konkurencyjną deekscytację takich stanów przez emisję neutrów oraz fotonów γ . Ma to zapewne wpływ na przebieg procesu r nukleosyntezy, dlatego podjęte badania przyczyniają się do lepszego zrozumienia tego procesu przy jednoczesnym określeniu wpływu na wspomnianą konkurencję stanów jądrowych w pobliżu zamkniętej powłoki neutronowej.

Po dwóch pierwszych rozdziałach, wprowadzeniu i opisie eksperymentu, Autorka w trzecim rozdziale rozprawy – *Analiza i wyniki* szczegółowo przedstawia analizę uzyskanych danych eksperymentalnych dotyczących rozpadu trzech izotopów indu oraz opisuje otrzymane wyniki. Analiza danych koincydencyjnych typu $\beta\gamma$ i $\beta\gamma\gamma$ dotycząca rozpadu beta ^{133}In dostarczyła nowej informacji o stanach wzbudzonych w dwóch jądrach pochodnych, ^{133}Sn i ^{132}Sn . Pozwoliła także na ustalenie schematu rozpadu beta tego nuklidu, zarówno ze stanu podstawowego jak również wzbudzonego metastabilnego, poprzez zastosowanie selekcji jonów za pomocą promieniowania laserowego, co należy uznać za duże osiągnięcie. Określone zostały przejścia energetyczne i ich względne intensywności w jądrach pochodnych w rozpadzie $\beta\gamma$ oraz βn , w tym po raz pierwszy w rozpadzie ze stanu izomerycznego dla czterech przejść. Autorka

określiła również czas połowicznego rozpadu jądra ^{133}In ze stanu podstawowego, wykorzystując trzy najintensywniejsze przejścia w wyniku rozpadów $\beta\gamma$ oraz βn . Uzyskany czas 162(2) ms dobrze zgadza się z wynikami innych autorów. Czas półrozpadu stanu izomerycznego został również wyznaczony. Bardzo skrupulatne porównanie liczby rozpadów beta z następującą emisją jednego neutronu w stosunku do wszystkich rozpadów pozwoliło stwierdzić dominację takiego rozpadu w stosunku do przejścia typu $\beta\gamma$ (stosunek rozgałęzienia). Ustalono, że rozpady jądra ^{133}In ze stanu podstawowego i izomerycznego z emisją jednego neutronu stanowiły odpowiednio 90(3)% i 93(3)%.

Badanie rozpadu beta kolejnego jądra ^{134}In potwierdziło obecność najsilniejszych linii gamma w jądrze pochodnym po emisji jednego neutronu, ukazanych we wcześniejszych dwóch publikacjach. Koincydencja najintensywniejszej z nich z sygnałami od cząstek beta w wybranych oknach czasowych względem impulsu protonowego pozwoliła na wyznaczenie czasu półrozpadu jądra ^{134}In . Jego wartość $T_{1/2} = 118(6)$ ms jest zgodna z wartością opublikowaną niedawno przez grupę z RIKEN. Zaobserwowano także kilka linii powyżej energii separacji neutronu w jądrze ^{133}Sn .

Przejścia gamma po rozpadzie beta ^{134}In (rozpady typu $\beta\gamma$) analizowano stosując także różne okna czasowe względem impulsu protonowego. Pozwoliło to na wyselekcjonowanie po raz pierwszy trzech wzbudzonych stanów jądra ^{134}Sn . Również po raz pierwszy dla tego jądra zaobserwowano odgałęzienie w rozpadzie beta typu $\beta 2n$ z emisją dwóch neutronów, prowadzące do stanów wzbudzonych w jądrze ^{132}Sn . Wyniki skrupulatnej analizy uzupełniły schemat rozpadu ^{134}In przedstawiony na rys. III.23. Określenie prawdopodobieństwa emisji typu $\beta\gamma$, $\beta 1n$ oraz $\beta 2n$ pozwoliło Autorce rozprawy wyznaczyć stosunek rozgałęzienia dla trzech kanałów rozpadu, pokazując zdecydowaną dominacją kanału $\beta 1n$ na poziomie 89(3)%.

Badanie rozpadu beta najbardziej egzotycznego izotopu indu ^{135}In zakończyło się sukcesem pomimo wielkich trudności związanych z występowaniem w wiązce jonów domieszki ^{135}Cs o identycznej liczbie masowej. Wnikliwa analiza danych ujawniła po raz pierwszy dwie linie gamma przypisane jądru

^{135}Sn w rozpadzie $\beta\gamma$. Wykorzystując czasowy zanik intensywności tych linii została wyznaczona średnia ważona czasu półrozpadu beta ^{135}In równa 89(7) ms. Wartość ta jest zgodna z wynikami uzyskanymi przez dwie inne grupy badawcze. Analiza widm gamma otrzymanych przez zastosowanie różnych warunków bramkowania pozwoliła także określić inne przejścia, będące następstwem rozpadu beta jądra ^{135}In , oraz wyznaczyć ich względną intensywność. Sumaryczne dane dotyczące zarejestrowanych przejść gamma, ich energii i względnej intensywności w trzech rozgałęzieniach rozpadu beta ^{135}In - $\beta\gamma$, $\beta 1n$ oraz $\beta 2n$ podane są w tabeli III.3. Posłużyły one do sporządzenia schematu rozpadu beta ^{135}In przedstawionego na rys. III.40, uzupełnionego kilkoma nowymi liniami nie obserwowanymi dla lżejszych izotopów indu.

Rozdział IV zawiera obszerną i szczegółową dyskusję uzyskanych wyników. W pierwszej części dotyczy ona ustalenia spinu i parzystości stanu podstawowego badanych jąder indu, dotąd eksperymentalnie nieokreślonych. Autorka rozprawy bazując na podobieństwie cech nieparzystych, lżejszych izotopów indu oraz izotopów indu o nieparzystej liczbie atomowej z większą niż 82 liczbą neutronów, a także na systematyce jąder z $Z=49$ zaproponowała dla jąder ^{133}In i ^{135}In spin i parzystość równą $9/2^+$. Natomiast po analizie wyników eksperymentalnych i w połączeniu z wcześniej opublikowanymi danymi wnioskuje, że spin i parzystość stanu podstawowego jądra ^{134}In wynosi najprawdopodobniej 7. W następnej sekcji tego rozdziału wnikliwie omawiane są przejścia G-T w rozpadzie beta jąder $^{133,134,135}\text{In}$. Możliwość takich przejść warunkuje bardzo duża energia rozpadu tych jąder przekraczająca wartość 13 MeV. Dominacja przejść G-T do stanów niezwiązanych w jądrach pochodnych była analizowana w oparciu o ich strukturę pasmową. Dane eksperymentalne pokazują, że trzy badane izotopy ulegają rozpadowi beta z dominującym rozgałęzieniem βn , pomimo zasilania poziomów jądrowych w jądrach pochodnych powyżej energii separacji dwóch neutronów. Ważnym faktem był obserwowany znaczący wkład emisji gamma ze stanów niezwiązanych w jądrach ^{133}Sn i ^{134}Sn , znajdujących się powyżej energii wiązania neutronu. Autorka rozprawy uzasadnia to słabym nakładaniem się funkcji falowych stanów zaangażowanych w rozpad βn . W końcowej sekcji tego rozdziału Autorka porównuje otrzymany

eksperymentalnie schemat poziomów w trzech jądrach $^{133,134,135}\text{Sn}$ ze schematem wynikającym z obliczeń opartych na wybranych wariantach modelu powłokowego z zastosowaniem różnych oddziaływań. Tego rodzaju porównanie stanowi znakomity test dla stosowanych modeli oraz wnosi istotną pomoc w identyfikowaniu nowo obserwowanych stanów. Stanowi także podstawę dla przewidywania właściwości jąder egzotycznych dotąd niezbadanych.

Bogaty materiał eksperymentalny przedstawiony w rozprawie, dotyczący rozpadu beta trzech izotopów indu $^{133,134,135}\text{In}$, istotnie rozszerza wiedzę o silnie neutronowo nadmiarowych jądrach w okolicy podwójnie magicznego jądra ^{132}Sn . Uzyskane wyniki mają duże znaczenie dla badania struktury jąder z liczbą neutronów powyżej zamkniętej powłoki $N=82$, co przyczynia się do efektywniejszego testowania modelu powłokowego jąder w pobliżu tej powłoki. Wyniki przyczynią się także do lepszego zrozumienia dynamiki procesu r z uwzględnieniem strumienia neutronów z rozpadów beta jąder z dużym nadmiarem neutronów, w okolicy występowania piku dla $A=130$ w rozkładzie obfitości pierwiastków. Proces r syntezy pierwiastków chemicznych w kosmosie przebiega w strumieniu o bardzo dużej gęstości neutronów w środowisku, które nie zostało do tej pory pewnie określone i dlatego Amerykańska Akademia Nauk zalicza to zagadnienie do jednego z 11 najważniejszych problemów do rozwiązania w fizyce.

Rozprawa została starannie zredagowana, napisana z użyciem fachowej terminologii. Zawiera wiele rysunków i schematów rozpadu dobrze ilustrujących opisywane problemy. Nieliczne uwagi to: nietypowe przedstawienie reguł wyboru dla orbitalnego momentu pędu i parzystości dla przejść elektromagnetycznych na stronie 7. Nie jest także jasne dlaczego w tabeli I.1 na s.8 w kolumnie z multipolowością 0 podane są najbardziej prawdopodobne przejścia elektromagnetyczne.

Na podkreślenie zasługuje duża aktywność naukowa mgr M. Piersy-Silkowskiej w postaci wielokrotnego promowania uzyskanych wyników badań na międzynarodowych konferencjach, z czego trzy prezentacje były nagrodzone. Autorka brała również udział w badaniach ściśle związanych z główną tematyką

rozprawy, czego rezultatem są trzy artykuły o wysokim IF z Jej współautorstwem. Była także aktywna w pozyskiwaniu środków na prowadzenie badań, uzyskując dla dwóch kierowanych przez siebie projektów finansowanie przez Narodowe Centrum Nauki.

W podsumowaniu stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr Moniki Piersy-Silkowskiej zawiera szczegółową analizę i interpretację wyników eksperymentalnych dotyczących rozpadu beta trzech silnie neutronowo nadmiarowych jąder indu. Badania prowadziła w jednym z najlepszych światowych laboratoriów, wykorzystując najbardziej zaawansowaną aparaturę detekcyjną oraz metodę eksperymentalną w zakresie spektroskopii jądrowej. Uzyskała nowe, ważne wyniki, stanowiące istotny postęp w badaniu egzotycznych jąder atomowych z bardzo dużym nadmiarem neutronów. Zostały one opublikowane w prestiżowych czasopismach o zasięgu międzynarodowym.

Stwierdzam zatem, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymogi ustawowe i zgłaszam wniosek o dopuszczenie mgr Moniki Piersy-Silkowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Biorąc pod uwagę bardzo wysokie walory poznawcze, metodyczne i dydaktyczne rozprawy, zgłaszam wniosek do Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego o jej wyróżnienie.

Uzasadnienie

Recenzowana rozprawa doktorska wnosi duży i oryginalny wkład do badań spektrometrycznych egzotycznych jąder z dużym nadmiarem neutronów przyczyniając się do lepszego określenia struktury powłokowej jąder z $N > 82$ oraz do lepszego zrozumienia przebiegu procesu r nukleosyntezy. Ponadto, bardzo skrupulatna analiza wyników świadczy o osiągnięciu przez Autorkę rozprawy wysokiego poziomu profesjonalizmu.

J. Andrzejewski