

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Anny Abramuk

**p.t. „Properties of exotic nuclei with a high excess of neutrons
in the mass region $A = 110$ ”**

Rozprawa doktorska mgr Anny Abramuk przedstawia wnikliwą analizę wyników badań spektrometrycznych przeprowadzonych w Laboratorium Akceleratorowym Uniwersytetu Jyväskylä w Finlandii dla trzech silnie neutrono-nadmiarowych jąder: ^{107}Mo , ^{117}Ag i ^{119}Ag . Wymienione jądra powstawały w stanach wzbudzonych w wyniku rozpadu beta minus jąder ^{107}Nb , ^{117}Pd i ^{119}Pd produkowanych w reakcji rozszczepienia jąder ^{238}U wywołanego za pomocą protonów. Wyselekcjonowanie tak egzotycznych nuklidów z ciągłego rozkładu mas fragmentów rozszczepienia uranu wymagało zastosowania najbardziej zaawansowanej metody ich separacji - izobarycznej, a następnie izotopowej, z wykorzystaniem systemu separacji jonów IGISOL i jonowej pułapki Penninga JYFLTRAP. Sposób otrzymywania pożądaných jąder Autorka dobrze przedstawiła w Rozdziale 4.

Motywacją badań spektrometrycznych dla jąder silnie neutrono-nadmiarowych jest zaobserwowana zmienność ich struktury i kształtu w oddaleniu od liczby magicznej dla neutronów, a także wpływ tych jąder na przebieg procesu- r nukleosyntezy. Gromadzenie danych eksperymentalnych jest ważne dla obserwacji ewolucji struktury jąder w badanym obszarze liczb masowych $A=100$ w przypadku występowania dużego nadmiaru neutronów, a także dla poprawy teoretycznych modeli jąder atomowych.

Rozprawa doktorska p. A. Abramuk została przygotowana w Zakładzie Fizyki Jądrowej IFD Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem promotora dr. hab. Jana Kurpety, w postaci opracowania liczącego 123 strony. Wcześniej Autorka jako członek zespołu badawczego prezentowała główne wyniki badań zawarte w rozprawie, w trzech artykułach opublikowanych w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym (Phys. Rev. C), w tym w jednym jako pierwszy autor.

Na podkreślenie zasługuje Rozdział 3 zawierający opis podstawowych definicji i pojęć z zakresu fizyki jądra atomowego, będących wstępem dla rozważań w dalszej części rozprawy. Chodzi o takie zagadnienia jak energia wiązania i separacji jąder, ich stany wzbudzone, rozpad beta i przejścia elektromagnetyczne, podstawowe modele jąder atomowych. Wprowadzenie to ma także znaczenie dydaktyczne, co jest ważnym elementem rozpraw doktorskich.

Rejestrację rozpadów β^- wyselekcjonowanych jąder oraz następującej po nich deekscytacji stanów wzbudzonych jąder pochodnych prowadzono z użyciem układu detekcyjnego składającego się z plastykowego detektora scyntylacyjnego rejestrującego sygnały od elektronów oraz z użyciem czterech spektrometrów germanowych typu LEGe zbierających sygnały od fotonów γ . Zastosowany system gromadzenia danych Digital Gamma Finder (GDF) rejestrował wszystkie zdarzenia, każde ze stemplem czasowym, aby później w analizie offline utworzyć widma amplitudowe singlowe oraz koincydencyjne typu $e-\gamma$ i $\gamma-\gamma$, służące do określenia poziomów energetycznych i intensywności przejść w radioaktywnych jądrach. Układ detekcyjny Autorka opisała w Rozdziale 4, natomiast w Rozdziale 5 *Spectroscopy Techniques* jest ukazana szczegółowo procedura tworzenia widm amplitudowych, ich kalibracji energetycznej, korekty wzmocnienia sygnałów z poszczególnych spektrometrów germanowych w celu ich zsumowania, identyfikacji linii pochodzących od naturalnego tła promieniotwórczego oraz od innych izobarów, a także metody obliczania zasilania poziomów jądrowych w rozpadzie beta.

W dalszych trzech rozdziałach, a mianowicie 6, 7 i 8 Autorka szczegółowo przedstawia wyniki przeprowadzonej analizy badań spektrometrycznych dla trzech jąder, a mianowicie ^{107}Mo , ^{117}Ag i ^{119}Ag , oraz porównuje uzyskane wyniki z dotychczas dostępnymi w literaturze danymi. Dla analizy widm promieniowania γ posłużyły widma singlowe wykorzystywane do określenia intensywności pojedynczych pików. Natomiast widma koincydencyjne typu $\beta-\gamma$ posłużyły do wzmocnienia linii emitowanych ze stanów wzbudzonych jąder powstałych z rozpadu beta, w wyniku tłumienia fotonów promieniowania tła oraz fotonów z rozpadu stanów izomerycznych. Koincydencje typu $\gamma-\gamma$ pozwalały określić sekwencje przejść radiacyjnych. Przy określeniu intensywności przejść o niskiej wartości energii zastosowano korektę uwzględniającą teoretyczne współczynniki konwersji wewnętrznej, które są istotne dla takich przejść.

Szczególnie ważne było określenie schematu poziomów wzbudzonych w jądrze ^{107}Mo jako pochodnym w rozpadzie β^- ^{107}Nb , gdyż w bazie danych jądrowych Evaluated Nuclear Structure Data File (ENDSF) nie znajdowały się żadne dane spektrometryczne wyznaczone w oparciu o rozpad beta. Dostępne w bazie informacje dla tego jądra uzyskano dotąd w badaniach spontanicznego rozszczepienia dwóch super ciężkich jąder i jednej reakcji jądrowej.

Wynikiem przeprowadzenia bardzo szczegółowej analizy widm koincydencyjnych typu $e-\gamma$ i $\gamma-\gamma$ jest wyznaczenie nowych przejść γ , oraz porównanie i skorygowanie pozycji kilku poziomów i przejść radiacyjnych zgromadzonych w bazie ENDSF. Uzyskane dane są przedstawione Tabeli 2 w Podrozdziale 6.3. Znalazły się w niej wartości energii obserwowanych fotonów γ , ich względne intensywności, sugerowane multipolowości przejść, energie fotonów związane koincydencyjnie z daną linią. Na podstawie uzyskanych wyników sporządzony został po raz pierwszy dla jądra ^{107}Mo szczegółowy schemat nisko położonych poziomów i ich dróg deekscytacji, z przybliżonym uwzględnieniem intensywności przejść w postaci grubości linii, a także z podziałem na trzy pasma rozpadu (do tej pory nie publikowanym). Wnikliwa analiza widm koincydencyjnych rozszerzyła dostępne do chwili

obecnej dane dotyczące omawianego jądra o 15 wzbudzonych poziomów i 28 nowych przejść radiacyjnych. Fakt ten można uznać jako duży sukces badawczy. Autorka rozprawy podjęła się także trudnego zadania, jakim jest określenie spinu i parzystości poziomów ^{107}Mo przedstawionych na schemacie w Rys. 28, przyjmując, że rozpad beta uprzywilejowuje obsadzanie w jądrze pochodnym nisko położone poziomy o małym spinie, po drugie - wykorzystując systematykę, po trzecie - w oparciu o wartości spinów i parzystości poziomów opisanych wcześniej w literaturze. Dodatkowo pomocne okazało się wyznaczenie współczynników zasilania danego poziomu, które zawęziło określenie wartości przypisanego spinu i parzystości. Dla niektórych poziomów proponowane wartości opierały się na założeniu, że najbardziej prawdopodobne przejścia elektromagnetyczne są typu E1, M1 i E2. Dla dwóch najniższych stanów, w tym dla podstawowego analiza doprowadziła do zamiany miejscami spinu z przypisaną do niego parzystością.

Nowa wiedza o strukturze poziomów i drogach deekscytacji w jądrze ^{107}Mo posłużyła do porównania z dostępną wiedzą o strukturze i przejściach radiacyjnych sąsiednich jąder. Autorka konkluduje, że pomimo pewnych podobieństw między molibdenem a sąsiednimi pierwiastkami, trudno jednak zaobserwować wyraźną systematykę w rozpatrywanym regionie liczb masowych.

Podobnie wnikliwą analizę, jak dla pierwszego omawianego jądra ^{107}Mo , mgr Abramuk wykonała dla przejść radiacyjnych w jądrze ^{117}Ag powstającym w rozpadzie β^- ^{117}Pa . W bazie danych ENSDF są dostępne uzyskane wcześniej wyniki badań dla tego rozpadu. Dlatego przeprowadzone badania pozwoliły Autorce rozprawy porównać, skorygować i istotnie uzupełnić te dane. Wyniki precyzyjnej i drobiazgowej analizy, w oparciu o zastosowanie metody koincydencji typu $e-\gamma$ i $\gamma-\gamma$, są zawarte w Tabeli 4. Przedstawiono w niej energie obserwowanych fotonów γ , ich względne intensywności, multipolowości przejść, linie związane koincydencyjnie z poziomem o danej energii. Również w przypadku tego jądra do określenia intensywności przejść o niskiej energii oceniono teoretyczne współczynniki konwersji wewnętrznej. Rezultatem tych badań było wyznaczenie 15 nowych poziomów na ogólną ich liczbę 29 zawartych w Tabeli 4, oraz 18 nowych przejść radiacyjnych. Na podstawie uzyskanych wyników sporządzony został dla jądra ^{117}Ag istotnie wzbogacony schemat stanów wzbudzonych i ich dróg deekscytacji zaprezentowany na Rys. 32. Został także określony spin i parzystość dla pięciu najniżej położonych poziomów energetycznych w oparciu o wnikliwą analizę uzyskanych danych i dostępne dotąd wartości literaturowe.

Analizując otrzymane oraz wcześniej dostępne w bazie danych wyniki Autorka konkluduje, że struktura stanów wzbudzonych w jądrze ^{117}Ag sugeruje występowanie w nim (koegzystencję) dwóch struktur typu prolate. Jednej bazującej na poziomie podstawowym o spinie i parzystości $1/2^-$, oraz drugiej opartej na pierwszym wzbudzonym poziomie w tym jądrze o energii 28,6 keV i spinie i parzystości $7/2^+$.

Warunki prowadzonego eksperymentu pozwoliły na określenie współczynników zasilania poziomów w jądrze ^{117}Ag dla najsilniejszych przejść w rozpadzie beta ze stanu podstawowego ^{117}Pd o $T_{1/2}=4,3(3)$ s. Jednak zbyt krótki czas życia stanu izomerycznego

w ^{117}Pd uniemożliwił określenie zasilania jądra pochodnego z tego poziomu. W Tabeli 6 podano eksperymentalne oszacowania wartości współczynników zasilania jak również zredukowane czasy półrozpadu. Kończąc rozdział dotyczący ^{117}Ag Autorka rozprawy dokonuje przeglądu porównawczego odnoszącego się do sąsiednich jąder. Przedstawia systematykę dla nisko położonych poziomów w jądrach srebra o ujemnej i dodatniej parzystości (Rys. 35), która pokazuje zgodność przebiegu energii wzbudzenia dla pierwszego i podstawowego stanu w zakresie $N=60 \div 70$.

Kolejny Rozdział 8 przedstawia wyniki badania stanów wzbudzonych jądra ^{119}Ag powstającego w rozpadzie β^- ^{119}Pd . Wnikliwa analiza przeprowadzona została w analogiczny sposób jak dla jądra ^{117}Ag . Ujawniła ona istnienie w tym jądrze dwóch struktur stanów wzbudzonych oznaczonych jako pasmo A i B. Oba pasma są prawie niezależne, przy czym pasmo A kończy kaskadę przejść na stanie podstawowym o spinie i parzystości $1/2^-$, natomiast pasmo B na nisko położonym stanie izomerycznym o energii 33,4 keV oraz spinie i parzystości $7/2^+$. Autorka dysertacji wydzieliła 33 nowe stany wzbudzone oraz 57 nowych przejść między nimi. Uzyskane wyniki przedstawiono w Tabelach 7 i 8, oddzielnie dla obu pasm. Sporządzony został także nowy schemat poziomów wzbudzonych w ^{119}Ag w wyniku rozpadu β^- ^{119}Pd . Ważnym osiągnięciem jest zaproponowanie przypisania na podstawie przeprowadzonej systematyki dla jąder srebra o nieparzystej liczbie masowej w pobliżu $A=100$, spinu i parzystości $1/2^-$ dla stanu podstawowego, natomiast dla stanu izomerycznego kończącego deekscytację stanów w paśmie B, wartości $7/2^+$. Oba stany zmieniły miejscami powyższe wartości spinów i parzystości w stosunku do zawartych we wcześniejszej publikacji. Na podkreślenie zasługuje także precyzyjne wyznaczenie okresu półrozpadu β^- ^{119}Pd , opisane szczegółowo w Podrozdziale 8.7. W tym celu wyznaczono $T_{1/2}$ dla sześciu najsilniejszych linii γ w widmie singlowym, obsadzanych w wyniku rozpadu β^- ^{119}Pd . Obliczony został oddzielnie czas połowicznego zaniku dla pasm A i B oraz średnio ważony, równy $0,87 \pm 0,02$ s. Wcześniej opublikowane $T_{1/2}$ dla tego jądra zgadzają się w granicach błędów z podaną w rozprawie wartością, jednak ta ostatnia jest obciążona najmniejszym błędem. Precyzja ta ma duże znaczenie jako istotna wartość w analizie procesu- r nukleosynazy. Porównując nowe dane spektrometryczne dla jądra ^{119}Ag i ^{117}Ag z dotychczas dostępnymi danymi dla jąder z rozpatrywanego obszaru mas atomowych, mgr A. Abramuk dochodzi do ważnego wniosku, że stany typu intruder $1/2^+$ tworzące rotacyjne pasma dla izotopów Ag o niższej nieparzystej liczbie atomowej, nie tworzą takich konfiguracji w obu badanych jądrach srebra.

Osiągnięty, znaczący postęp w badaniu struktury stanów wzbudzonych i przejść radiacyjnych w jądrach ^{110}Mo , ^{117}Ag i ^{119}Ag uzyskany przez naukowy zespół, do którego prac Autorka rozprawy wnosi istotny wkład, przyczynia się do lepszego zrozumienia ewolucji struktury jądrowej neutrono-nadmiarowych izotopów. Zaowocuje to rozwojem prac nad teoretycznym opisem ich stanów wzbudzonych. Perspektywę dalszego postępu tego rodzaju badań eksperymentalnych, przedstawioną w Dodatku A, widzi Autorka rozprawy w połączeniu metod jądrowych z optycznymi.

Rozprawa doktorska mgr Anny Abramuk jest napisana starannie, z dużą liczbą rysunków, tabel i schematów, oraz liczącą 140 pozycji Bibliografią. Występują jednak pewne redakcyjne niedociągnięcia takie jak:

- w kilku podpisach rysunków występują zbędne opisy, np. w Rys. 30 ostatnie zdanie,
- pierwsze zdanie od góry na s. 64 jest niedokończone,
- niektóre rysunki oddalone są od tekstu komentującego go.

Ponadto:

- w podpisie Rys.31 określono dwa piki o energiach 1140 i 1215 keV jako backscattering ?,
- wzór 2.38 zawiera stałe rozpadu,
- zdanie na s.31 *Experimentally, the coefficient is obtained by measuring the intensity ratio of conversion electrons to γ -rays*, nie jest precyzyjną definicją współczynnika konwersji wewnętrznej.

Podsumowując uważam, że rozprawa doktorska p. Anny Abramuk jest obszerną i bardzo szczegółową analizą wyników badań spektrometrycznych dla trzech egzotycznych, silnie neutrono-nadmiarowych jąder. Badania przeprowadzono z wykorzystaniem bardzo zaawansowanej technicznie aparatury naukowej w jednym z najlepszych laboratoriów akceleratorowych na świecie. Uzyskane nowe, liczne i ważne wyniki z zakresu eksperymentalnej spektrometrii jądrowej, dają bodziec do rozszerzenia badań dla sąsiednich jąder. Dane te wspomagają także teoretyczne badania procesów zachodzących w jądrach silnie oddalonych od ścieżki stabilności beta, stanowiąc jednocześnie ważny przyczynek do pełniejszego zrozumienia procesów-*r* nukleosyn-tezy zachodzących w ekstremalnych, kosmicznych zdarzeniach z emisją intensywnych strumieni neutronów. Wyniki badań zostały opublikowane w 3 artykułach w czasopiśmie o zasięgu międzynarodowym i wysokim IF.

Stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymogi ustawowe i zgłaszam wniosek o dopuszczenie mgr Anny Abramuk do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

J. Andrzejewski