



prof. dr hab. Bogdan Fornal
Instytut Fizyki Jądrowej
im. H. Niewodniczańskiego
Polska Akademia Nauk

Kraków, 27 grudnia 2023 r.

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ
mgr. Jakuba Wiśniewskiego
p.t. „Badanie struktury stanów wzbudzonych w jądrach atomowych z obszaru $N > 50$ ”

Rozprawa doktorska Pana mgr. Jakuba Wiśniewskiego stanowi liczące 179 stron opracowanie, prezentujące wyniki prac badawczych przeprowadzonych przez Doktoranta w Instytucie Fizyki Doświadczalnej Uniwersytetu Warszawskiego pod kierownictwem prof. dr. hab. Waldemara Urbana. Praca miała na celu pogłębienie informacji na temat struktury jąder ^{87}Br i ^{89}Br , z wykorzystaniem rozpadów β^- neutrononadmiarowych jąder ^{87}Se oraz ^{89}Se (produkowanych w reakcji indukowanego protonami rozszczepienia naturalnego toru (Th)), a także struktury jądra ^{98}Mo otrzymywanego w reakcji wychwytu neutronów termicznych przez ^{97}Mo . Podjęty w dysertacji doktorskiej temat dotyczy zjawiska pojawiania się struktur kolektywnych w obszarze jąder o masach $A \sim 100$, powyżej zamkniętej powłoki $N = 50$, oraz konkurowania tych struktur ze wzbudzeniami jednocząstkowymi.

Warszawska grupa specjalizująca się w badaniach z wykorzystaniem precyzyjnej spektroskopii gamma, którą kieruje Prof. dr hab. Waldemar Urban, a której Pan Wiśniewski był członkiem, posiada wysoką renomę międzynarodową na polu badań struktury jąder atomowych. Zespół uzyskał wiele bardzo ważnych rezultatów dotyczących ewolucji charakteru stanów wzbudzonych, np. w neutrononadmiarowych jądrach z obszaru $Z=40$, gdzie, przy $N=60$, dochodzi do gwałtownej zmiany kształtu stanu podstawowego jąder Zr i Sr ze sferycznego na zdeformowany. Jednym z kluczy do wspomnianych sukcesów było opracowanie specjalistycznych programów komputerowych pozwalających na efektywną i wyrafinowaną obróbkę zebranych danych pomiarowych.

Wyniki przedstawione w rozprawie doktorskiej w dużej części zostały opublikowane w pięciu artykułach, które ukazały się w recenzowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym: trzy w Physical Review C oraz po jednym w Journal of Instrumentation i Acta Physica Polonica B. W trzech spośród tych publikacji Doktorant jest pierwszym autorem,



co świadczy o jego wiodącym udziale zarówno w pomiarach, jak i w analizie danych eksperymentalnych.

Na początku opracowania umieszczone zostały informacje o publikacjach Autora, (zarówno o tych, które obejmują materiał zawarty w rozprawie, jak i o pozostałych), informacje o grantach, które wspierały realizowane badania, a także krótkie streszczenie prezentujące strukturę i zawartość rozprawy.

W dalszej części mamy klasyczny dla tego typu opracowań schemat: pojawia się „Spis treści”, po którym następuje rozbudowany „Wstęp” zawierający tekst wprowadzający oraz pięć kolejnych podrozdziałów. Część ta jest zgrabnym kompendium wiedzy na temat ewolucji kształtu jąder atomowych w obszarze $A \sim 100$. Autor przedstawia m.in. historię odkrycia występowania w łańcuchach izotopów Zr i Sr, przy $N=60$, gwałtownej zmiany konfiguracji stanu podstawowego od sferycznej do zdeformowanej oraz omawia mechanizmy odpowiedzialne za ten efekt. Przywołuje koncepcję orbitali partnerskich oraz ideę współlistnienia kształtów. W świetle tej drugiej koncepcji zjawisko pojawienia się struktur zdeformowanych w jądrach z $Z \sim 40$ i $A \sim 100$ wiąże się z utworzeniem na powierzchni energii potencjalnej, rozpostartej na współrzędnych deformacji jądrowej, wzbudzonego i zdeformowanego drugiego minimum (współlistniejącego z głównym minimum sferycznym), którego energia ulega obniżeniu tak, aby dla $N = 60$ stać się stanem podstawowym. Scenariusz ten posiada silne wsparcie ze strony obliczeń teoretycznych. Jeden z typów obliczeń pokazuje, że kluczową rolę w pojawieniu się dwóch minimów na powierzchni energii potencjalnej (Potential Energy Surface – PES) w izotopach Sr i Zr odgrywa populacja zdeformowanych orbitali, neutronowego $h_{11/2}$ oraz protonowego $g_{9/2}$. Inne, niedawno zaproponowane podejście teoretyczne, które doskonale opisuje współlistnienie kształtów w izotopach Zr oraz zmianę deformacji stanu podstawowego przy $N=60$, oparte jest na tzw. mechanizmie ewolucji powłok Typu II. Mechanizm ten polega na utworzeniu, pod wpływem tensorowej części oddziaływania proton-neutron, drugiego, zdeformowanego minimum na PES dla konfiguracji z promocją protonów na orbital $g_{9/2}$ i neutronów na orbitele $g_{7/2}$ i $h_{11/2}$.

W kolejnych krokach Autor skupia się na opisie fenomenologicznego schematu powstawania deformacji poprzez obsadzanie przez neutrony aktywnych orbitali modelu Nilssona. Główną rolę odgrywają tutaj neutrony znajdujące się na rozszczepionych przez deformację orbitalach wywodzących się ze stanu jednocząstkowego $vh_{11/2}$ oraz te, które leżą na „wznoszącym się” orbitalu typu ekstruder, $9/2[404]$, biorącym początek w jednocząstkowym



stanie $vg_{9/2}$. Ze szczególną uwagą Doktorant analizuje systematykę stanów wzbudzonych 0^+ w łańcuchach izotopowych jąder z okolic $Z=40$ i $N=60$, jako że stany te zazwyczaj w bardzo dobrym stopniu odzwierciedlają współlistnienie kształtów w jądrach atomowych. Rozważania prowadzą do jakościowego zobrazowania pojawienia się deformacji typu prolate w izotopach Zr i Sr, jako efektu będącego wynikiem wzbudzenia pary neutronów z ekstrudera $9/2^+[404]$ na zdeformowany orbital $3/2^- [541]$. Dochodzi do tego możliwość kreowania nisko leżących stanów 0^+ o deformacji typu oblate związana z przeniesieniem pary neutronów na zdeformowany orbital $11/2^- [505]$, po stronie oblate. Obrazy te wpisują się w bardziej ogólną interpretację generacji deformacji jądrowej zakładającą sekwencyjne przenoszenie pary neutronów na kolejne, przecinające się orbitale Nilssona, jeżeli taka operacja jest korzystna energetycznie. W przypadku jąder z okolicy $A \sim 100$ główną rolę podczas takiego sposobu kreowania zdeformowanych minimów w energii potencjalnej jąder pełni ekstruder $9/2^+$, nazwany „katalizatorem” deformacji.

Podczas lektury tej części pracy Pan mgr Wiśniewski daje się poznać jako osoba starająca się dogłębnie wniknąć w badany problem fizyczny oraz umiejętnie przekazująca czytelnikowi skomplikowane zagadnienia dotyczące tego problemu. Pomimo dużej złożoności omawianych efektów związanych z pojawianiem się współlistniejących struktur jądrowych o różnych deformacjach oraz obecnych w literaturze różnych podejść interpretacyjnych tego procesu, Doktorantowi udaje się wytworzyć przystępny i spójny obraz zjawiska, co ułatwi rozumienie i śledzenie obserwacji gromadzonych w wyniku przeprowadzonych eksperymentów.

Następujący po części wprowadzającej rozdział 2 zawiera opis oraz wyniki pomiarów struktur wzbudzonych w neutrononadmiarowych nuklidach ^{87}Br i ^{89}Br , Badane nuklidy, co prawda, położone są w pobliżu obszaru $A \sim 100$ i $Z \sim 40$, niemniej jednak efekty kolektywne w ich strukturze jeszcze nie dominują, co sprawia, że mogą stanowić źródło cennych informacji o stanach jednocząstkowych, a w szczególności o protonowym orbitalu $\pi g_{9/2}$, który odgrywa ważną rolę w powstawaniu deformacji w pobliżu $Z=40$. W celu uzyskania dostępu do omawianych nuklidów bromu, użyto rozpadów β^- jąder ^{87}Se oraz ^{89}Se , produkowanych w indukowanej protonami reakcji rozszczepienia naturalnego Th. Pan mgr Wiśniewski w wyczerpujący sposób prezentuje zainstalowany w Instytucie JYFL w Jyväskylä (Finlandia) sprzężony z układem detektorów germanowych system eksperymentalny IGISOL-4, który umożliwia separacjężądanego jądra za pomocą pułapki Penninga oraz pomiar kwantów gamma



emitowanych podczas rozpadu tego jądra. Następnie Doktorant omawia pokrótce sposób analizy zebranych danych koincydencyjnych gamma. Tutaj sprawa jest klarowna. Pomimo że widma zawierają także linie należące do izobarów badanych nuklidów (innych niż badany nuklid), poprzez nałożenie odpowiednich warunków czasowych, a przede wszystkim koincydencyjnych, tzn. poprzez bramkowanie na znanych przejściach w rozpatrywanym jądrze, uzyskuje się bardzo czyste spektra gamma. Dokładna analiza danych koincydencyjnych zarejestrowanych w przypadku jądra ^{87}Br pozwoliła Panu mgr. Wiśniewskiemu zidentyfikować 51 nowych stanów wzbudzonych oraz umiejscowić w schemacie rozpadu 114 nowych przejść gamma. Dla wielu zlokalizowanych stanów przyporządkowane zostały liczby kwantowe spinu i parzystości. Na szczególną uwagę zasługuje w tym przypadku potwierdzenie istnienia stanu wzbudzonego ($3/2^-$) przy energii zaledwie 6.02 keV oraz obserwacja protonowego stanu jednocząstkowego $9/2^+$.

Większym wyzwaniem był pomiar ^{89}Br , gdyż zgromadzona w tym przypadku statystyka okazała się znacznie niższa w porównaniu z liczbą zdarzeń zarejestrowanych dla ^{87}Br . Dodatkowo, przejścia gamma pochodzące z izobarów $A = 89$, w tym z ^{89}Br , zostały zdominowane przez linie tła naturalnego, co komplikowało analizę. Przeciwności te nie stanowiły jednak dla Doktoranta przeszkody. Udało mu się rozbudować schemat rozpadu jądra ^{89}Br , w którym umieścił 12 nowych poziomów oraz wkomponował 31 nowych przejść. Dla wielu stanów zaproponował oznaczenie spinu i parzystości, biorąc pod uwagę zasilanie w rozpadzie beta, populację w reakcji rozszczepienia (z danych literaturowych) oraz charakter rozpadu. Pozwoliło to m.in. na zidentyfikowanie kandydatów na stany jednocząstkowe $\pi p_{3/2}$ oraz $\pi f_{5/2}$. Podczas konstruowaniu schematu bardzo pomocne okazało się zastosowanie opracowanej przez Grupę Warszawską specyficznej techniki analizy danych opartej na macierzy koincydencyjnej, która na jednej osi gromadziła indywidualne energie obu kwantów uczestniczących w zdarzeniu, a na drugiej ich sumę.

Struktury zlokalizowane w ^{87}Br i ^{89}Br w pierwszym podejściu zinterpretowane zostały na gruncie konfiguracji jednocząstkowych oraz sprzężeń tych konfiguracji z kolektywnymi wzbudzeniami parzysto-parzystego rdzenia. Szczególnie pomocna w określeniu natury wzbudzeń okazała się analiza systematyk izotonów $N=50$, $N=52$ oraz $N=54$. Bardzo zgrabne jest też wyjaśnienie braku obserwacji stanu $9/2^+$ w ^{89}Br w rozpadzie beta minus ^{89}Se . Zaprezentowane rozważania posiadają jednak charakter jakościowy, a szereg obserwowanych stanów wymyka się z prowadzonej w ten sposób klasyfikacji. W celu uzyskania ilościowego



opisu przeprowadzono obliczenia za pomocą wielkoskalowego modelu powłokowego (Large Scale Shell Model – LSSM). W przypadku ^{87}Br obliczenia dobrze opisują dane eksperymentalne, w szczególności stan wzbudzony $9/2^+$. Także dla ^{89}Br wszystkie stany wzbudzone o niskich spinach zostały odtworzone przez obliczenia teoretyczne. Rzuca się natomiast w oczy duża fragmentacja funkcji falowych – posiadają one dużą liczbę komponent i tylko w ogólnym zarysie oddają interpretacje natury stanów prezentowane na gruncie schematycznym w początkowej części dyskusji. Doktorant słusznie zauważa, że rozszerzenie badań struktur wzbudzonych na bardziej neutrononadmiarowe izotony $N=52$ i 54 z nieparzystym protonem pozwoliłoby na jeszcze bardziej restrykcyjny test oddziaływań modelu powłokowego opartych o podwójnie magiczny rdzeń ^{78}Ni .

Omawiana część pracy pozwala rozpoznać w Doktorancie wnikliwego eksperymentatora rozumiejącego mechanizm reakcji użytej do produkcji badanych jąder, posiadającego solidną wiedzę o systemie separacji i identyfikacji tych jąder, dogłębnie kontrolującego procesy detekcji oraz prowadzącego opracowanie danych z dużą starannością i pieczołowitością.

Z obowiązku recenzenckiego wymienię kilka drobnych uchybień tekstowych zauważonych podczas lektury. Na stronie 55 (wiersze 16 i 17 od dołu) przyporządkowanie jednocząstkowych orbitali z niesparowanym protonem, a tym samym oznaczeń spinu dla stanu podstawowego i pierwszego stanu wzbudzonego w ^{89}Br powinny być odwrócone: $\pi p_{3/2}$ zamienione z $\pi f_{5/2}$ oraz $3/2^-$ z $5/2^-$. Na stronie 58 wkradła się „literówka”: w tekście „...w izotonach $N=53$, o parzystej liczbie neutronów [7].” słowo „neutronów” powinno zostać zamienione na „protonów”. Na stronie 59 należy zamienić „neutronowe” na „protonowe” oraz „protonowe” na „neutronowe” w czwartym wierszu od góry. Antycypując, na stronie 112 zamiast „ $Z=64$ ” powinno być „ $Z=44$ ”.

Kolejny rozdział, rozdział 3, poświęcony jest badaniu struktury nuklidu ^{98}Mo . Wybór obiektu badań jest dobrze przemyślany. Jak pokazano w Rozdziale 1, powstawanie deformacji w obszarze $A \sim 100$ można interpretować na gruncie obsadzania przez nukleony walencyjne nilssonowskich orbitali neutronowych $h_{11/2}$ typu intruder oraz $g_{9/2}$ typu ekstruder, jak również orbitalu protonowego $g_{9/2}$. Aby zbadać wpływ orbitali protonowych, a w szczególności orbitalu $\pi g_{9/2}$ na pojawienie się i ewolucję deformacji, należy zminimalizować wpływ neutronów przy



jednoczesnym dostępie do wzbudzeń protonowych. Jądro ^{98}Mo , posiadające zamkniętą podpowłokę neutronową $d_{5/2}$ oraz walencyjne protony na orbitalu $g_{9/2}$, spełnia powyższe wymagania.

W celu identyfikacji i lokalizacji jak największej liczby nisko leżących stanów wzbudzonych w jądrze ^{98}Mo , zastosowano reakcję wychwytu neutronów termicznych (n,γ) . Pomiary przeprowadzono na wiązce neutronów z reaktora w Instytucie Laue-Langevin (ILL) w Grenoble z wykorzystaniem wielolicznikowego układu detektorów germanowych typu Clover: Fission Product Prompt γ -ray Spectrometer (FIPPS). Bardzo ważną zaletą układu FIPPS była jego geometria pozwalająca na wydajne pomiary korelacji kątowych, podczas gdy zastosowanie detektorów typu Clover umożliwiało użycie ich jako polarymetrów komptonowskich. W ramach gromadzenia materiału do omawianej pracy doktorskiej wykonano dwa pomiary reakcji $^{97}\text{Mo}(n_{\text{th}},\gamma)^{98}\text{Mo}$ (przy różnych konfiguracjach układu FIPPS) oraz serię pomiarów kalibracyjnych. Zebrane dane, w postaci tysięcy cząstkowych plików, stanowiły ogromne wyzwanie dla analizy ze względu na niestabilność wzmocnienia detektorów. Istniejące wcześniej procedury zgrywania kalibracji energetycznych poszczególnych detektorów wykonywane były w dużej mierze ręcznie, co wydłużało czas opracowywania danych do nierozsądnych rozmiarów. Doktorant podjął się usprawnienia tego procesu. Na potrzeby opracowania danych do obecnej pracy stworzył zestaw programów, które umożliwiały automatyczne przeprowadzenie dopasowania zarówno kalibracji czasowej, jak i energetycznej widm każdego detektora, osobno dla każdego spośród tysięcy cząstkowych plików zawierających rejestrowane zdarzenia. Wprowadził także zależną od energii „kompresję” skali energetycznej gamma, co warunkowało stałą szerokość piku w pełnym zakresie energii, bez straty rozdzielczości. Nowy software pozwolił na doskonałą kontrolę jakości danych oraz na uzyskanie wysokiej dokładności wyznaczania energii przejść i poziomów – w wielu przypadkach do drugiego miejsca po przecinku w skali keV.

Wyposażony w nowatorskie narzędzia do analizy danych, Pan mgr Wiśniewski przystąpił do zaawansowanej analizy danych. Przede wszystkim skonstruował trójwymiarowe macierze koincydencji gamma-gamma-gamma oraz specyficzną, wspomnianą wcześniej macierz dwuwymiarową (E_{gamma1} lub E_{gamma2} , $E_{\text{gamma1}}+E_{\text{gamma2}}$), analiza których umożliwiła lokalizację 148 stanów wzbudzonych oraz 712 przejść gamma, w tym 130 przejść schodzących ze stanu po wychwycie neutronu. Była to niewątpliwie praca herkulesowa, a „dolna” część



schematu rozpadu, czyli przy energiach wzbudzenia do ok. 4 MeV oraz dla spinów ≤ 6 , może być nazwana schematem kompletnym.

Kolejny krok to przypisanie spinów i parzystości do stanów wzbudzonych. Doktorant używa do tego korelacji kątowych kwantów gamma. Technika ta sprowadza się do analizy zależności intensywności koincydencji dwóch emitowanych po sobie w kaskadzie kwantów od kąta pomiędzy kierunkami ich emisji. Pan mgr Wiśniewski w bardzo pedagogiczny sposób prezentuje formalizm matematyczny metody oraz demonstrowuje jej perfekcyjne funkcjonowanie dla par przejść pomiędzy znanymi stanami. Szczególną uwagę poświęca wyznaczeniu współczynników atenuacji i normalizacji, które zależą od układu detekcyjnego oraz mogą zmieniać się wraz z energią przejść. Stosuje tutaj kaskady E2-E2 zmierzone podczas pomocniczych pomiarów wychwytu neutronów prowadzących do parzystych jąder cyny $^{116,118,120}\text{Sn}$ oraz minimalizację funkcji χ^2 ze względu na cztery parametry: dwa współczynniki atenuacji i dwa współczynniki normalizacji. Analiza rozkładów kątowych z wykorzystaniem uzyskanych w powyżej opisany sposób wartości współczynników, pozwala na wyznaczenie polowości przejść elektromagnetycznych wraz ze współczynnikiem zmieszania, nie daje jednak informacji o tym, czy przejście jest typu elektrycznego, czy magnetycznego. Informację tę dostarczyć może pomiar polaryzacji liniowej emitowanych kwantów gamma, który jest możliwy przy wykorzystaniu układu FIPPS – układ FIPPS składa się z detektorów typu CLOVER, które można użyć jako polarymetry komptonowskie. Podobnie jak w przypadku pomiaru korelacji kątowych, pomiar polaryzacji liniowej opiera się na analizie kaskady dwóch kwantów γ_1 i γ_2 , z których jeden generuje orientację spinu stanu pośredniego, co skutkuje polaryzacją drugiego kwantu w odniesieniu do płaszczyzny wyznaczonej przez kierunki obu kwantów. Polaryzacja ta jest różna dla różnych typów przejść i może być zmierzona poprzez wyznaczanie kierunku rozproszonego komptonowsko drugiego kwantu w detektorze Clover.

Także i w tym przypadku Doktorant prezentuje w sposób bardzo klarowny i precyzyjny metodę określenia polaryzacji kwantów gamma rejestrowanych przez detektory układu FIPPS. Wyczerpująco opisuje sposób dokładnego wyznaczenia współczynnika asymetrii, co jest kluczowe dla pomiaru anizotropii rozpraszania komptonowskiego. Ostatnim krokiem niezbędnym do określania wartości polaryzacji jest wyznaczenie czułości polarymetru – można tego dokonać poprzez pomiar anizotropii dla przejść o znanej polaryzacji.

Przygotowane dużym nakładem pracy narzędzie do analizy korelacji kątowych i polaryzacji liniowej kwantów gamma, z wyznaczonymi dla układu detekcyjnego FIPPS



współczynnikami atenuacji, normalizacji, asymetrii oraz czułości polarymetru, Pan mgr Wiśniewski używa do określenia spinu i parzystości stanów wzbudzonych populowanych w reakcji $^{97}\text{Mo}(n_{\text{th}},\gamma)^{98}\text{Mo}$. Nowe wyniki dotyczące polowości kwantów gamma uzyskane zostały dla 80 przejść gamma. Z kolei polaryzację liniową zmierzono po raz pierwszy dla 54 takich przejść.

Omówiona część pracy może być wzorem, jeśli chodzi o wymagające niecodziennego zaangażowania, cierpliwości i precyzji podejście do analizy zestawu bogatych danych spektroskopowych, zgromadzonych w koincydencyjnych pomiarach kwantów gamma na wiązce. Z kolei tekst zawierający opis techniki analizy korelacji kątowych oraz polaryzacji promieniowania gamma stanowi wspinały materiał edukacyjny dla osób, które będą zgłębiały arkana dyskretnej spektroskopii promieniowania gamma.

Uzyskany schemat stanów wzbudzonych jądra ^{98}Mo charakteryzuje się znacznie większym stopniem złożoności niż odpowiednie schematy lżejszych izotonów $N=56$. Tę złożoność, przejawiającą się m.in. zwiększoną gęstością poziomów, można wyjaśnić dużą liczbą orbitali aktywnych w pobliżu energii Fermiego.

Autor analizuje po kolei systematyki stanów wzbudzonych 2^+ i 0^+ w poszukiwaniu przejawów rozwoju kolektywności. Wyniki sugerują, że stany 2^+_1 w jądrach, których stan podstawowy jest niezdeformowany, posiadają strukturę jednocząstkową. Bardziej symptomatyczne dla śledzenia rozwoju kolektywności są natomiast wzbudzenia 0^+ . Duży wzrost całkowitej liczby stanów wzbudzonych 0^+ obserwowany w nuklidzie ^{98}Mo można interpretować w kontekście przecinania się grupy „wznoszących się” (typu ekstruder) zdeformowanych orbitali protonowych $\pi f_{5/2}$ ($3/2^-[301]$, $5/2^-[303]$ oraz $1/2^-[301]$), ze zdeformowanymi orbitalami $\pi g_{9/2}$ ($3/2^+[431]$ oraz $1/2^+[440]$) typu intruder – stany 0^+ mogą być łatwo generowane poprzez przeniesienie pary protonów pomiędzy tymi orbitalami. W rezultacie wzbudzenia te mogą charakteryzować się różną deformacją, co sprzyja wystąpieniu zjawiska współlistnienia kształtów. Wysnuć można więc wniosek: pojawienie się deformacji w bogatych w neutrony jądrach z $Z>40$ i $A\sim 100$ jest wynikiem nie tylko szczególnej roli orbitalu neutronowego $9/2^+[404]$, ale również zdeformowanych orbitali protonowych mogących posiadać „katalityczne” dla rozwoju deformacji własności.

W ostatnich podrozdziałach Pan Wiśniewski omawia kolektywność gamma, stany o zmieszanej symetrii oraz wzbudzenia o charakterze oktopolowym w izotonach $N=56$. W



szczegółności zwraca uwagę na zidentyfikowane w obecnej pracy pasmo składające się ze stanów $2^+_{2, 3^+_{1, 4^+_{2}}$ oraz $6^+_{2,}$ które może zostać zinterpretowane albo jako formujące się pasmo gamma, albo jako efekt wzbudzeń neutronów na powłokach walencyjnych. Można się tutaj także zastanowić, czy omawiane pasmo nie jest związane z pojawieniem się deformacji trójosiowej – coraz częściej w literaturze można natknąć się na sygnały, że struktury, które są interpretowane jako przejaw wibracji gamma, mogą być strukturami budowanymi na stanach o deformacji trójosiowej.

Rozprawę doktorską zamykają „Podsumowanie”, sekcja „Dodatki” zawierająca tabele z zestawami zidentyfikowanych stanów jądrowych (wraz z przypisanymi im liczbami kwantowymi spinu i parzystości oraz przejść gamma z ich intensywnościami), tabelę z obliczonymi obsadzeniami orbitali dla jąder ^{87}Br i ^{89}Br , tabelę ze współczynnikami korelacji kątowych dla kaskad gamma w ^{98}Mo oraz tabelę z wyznaczonymi wartościami polaryzacji liniowej dla przejść w ^{98}Mo . Na końcu znajdują się „Spis rysunków”, „Spis tabel” oraz wykaz cytowanych prac zawierający 185 pozycji.

Podsumowując, pragnę stwierdzić, że Autorowi należą się słowa szczególnego uznania za podjęcie badań struktury jąder neutrononadmiarowych $^{87,89}\text{Br}$ i ^{98}Mo , które wymagały niezwykle detalicznej, wręcz benedyktyńskiej pracy. Kompletna spektroskopia nisko leżących i nisko spinowych stanów w ^{98}Mo , populowanych przy użyciu reakcji wychwytu neutronów termicznych, była możliwa dzięki wyjątkowej systematyczności i precyzji Doktoranta podczas analizy danych. Te same cechy zadecydowały o sukcesie wyznaczenia charakterystyk rozpadu beta jąder ^{87}Se i ^{89}Se , a tym samym o wzbogaceniu informacji o strukturach wzbudzonych w nuklidach ^{87}Br i ^{89}Br .

Wyniki zaprezentowane w pracy doktorskiej, są wynikami bardzo wartościowymi w kontekście szeroko zakrojonych badań struktury jąder z okolic $Z=40$ i $A=100$, gdzie obserwuje się bezprecedensową, nagłą zmianę deformacji stanu podstawowego, ze sferycznej do zdeformowanej, przy przekraczaniu liczby neutronów $N=60$. Lokalizacje nowych stanów w ^{98}Mo , ^{87}Br i ^{89}Br pozwalają, jak zostało pokazane, na dalszą weryfikację modeli opisujących pojawienie się struktur zdeformowanych w obszarze $Z=40$, $A=100$. Stanowiły będą także podstawę do testowania nowych podejść teoretycznych opartych na obliczeniach modelu powłokowego typu wielkoskalowego lub Monte Carlo, które są obecnie intensywnie rozwijane.



**INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK**

Chciałbym dodać, że rozprawa napisana jest doskonałym językiem.

Oceniana praca doktorska, moim zdaniem, stanowi oryginalny i trwały wkład do nauki w zakresie struktury jądra atomowego i w pełni spełnia wymagania stawiane dysertacjom na stopień doktora nauk fizycznych. Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr. Jakuba Wiśniewskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie, biorąc pod uwagę bardzo wysokie walory poznawcze i metodyczne pracy, składam do Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego wniosek o jej wyróżnienie.

Bogdan Fornal