

Kraków, 8 kwietnia 2024

dr hab. inż. Maria Kmieciak
Instytut Fizyki Jądrowej
im. H. Niewodniczańskiego
Polskiej Akademii Nauk

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr José Marin Blanco

pt. „Study of Spontaneous Fission of Actinide and Super-Heavy Elements”

Tematyka rozprawy doktorskiej mgr José Marin Blanco zatytułowanej „Study of Spontaneous Fission of Actinide and Super-Heavy Elements”, wykonanej pod kierunkiem dr hab. Artura Dobrowolskiego, dotyczy teoretycznego opisu spontanicznego rozszczepienia ciężkich jąder atomowych. Proces ten, jako jeden z możliwych sposobów rozpadu jądra (wraz z reakcją emisji lekkich cząstek naładowanych, neutronów bądź kwantów γ), odgrywa ważną rolę w badaniach własności jąder a zwłaszcza kwestii dotyczących ich stabilności. Zagadnienia te są szczególnie ważne dla poznawania własności jąder ciężkich i superciężkich. Dlatego też rozszczepienie ciężkich jąder jest jednym z kluczowych tematów aktualnie prowadzonych badań fizyki jądrowej.

W niniejszej dysertacji autor przedstawił opis teoretyczny zjawiska rozszczepienia oraz wyniki otrzymane w wyniku jego zastosowania dla jąder z obszaru aktynowców oraz jąder superciężkich. W swoich obliczeniach J. M. Blanco zastosował makroskopowo-mikroskopowy model opisu energii jądra, do wyznaczenia wysokości bariery na rozszczepienie, oraz metodę ścieżki najmniejszego działania i przybliżenie WKB (Wentzela-Kramersa-Brillouina), do obliczeń prawdopodobieństwa tunelowania przez barierę. Makroskopowa część energii jądra została opisana za pomocą modelu kropłowego LSD (Lublin – Strasbourg Drop). Energia mikroskopowa została obliczona przy użyciu potencjału Yukawa-folded z zastosowaniem poprawek powłokowych Strutinskiego oraz formalizmu BCS (Bardeena-Coopera-Schrieffer), służącego do opisu nadprzewodnictwa). Kształt jądra zdefiniowano stosując rozwinięcie w szereg Fouriera, dla 4 parametrów deformacji: wydłużenia - q_2 , asymetrii masowej - q_3 , szyjki - q_4 i parametru nieosiowości - q_1 .

Rozprawa doktorska mgr J. M. Blanco obejmuje 126 stron a jej treść zawiera się w 13 rozdziałach. Pierwszym jest wprowadzenie przedstawiające pokrótce tematykę pracy. Następnie w rozdziałach 2 - 8 opisane są założenia zastosowanych modeli teoretycznych. Kolejne rozdziały stanowią opis wykonanych obliczeń i otrzymanych wyników. Przeprowadzone obliczenia teoretyczne można podzielić na dwa etapy. W pierwszym z nich J. M. Blanco wyznaczył powierzchnie energii potencjalnych jąder i oszacował wartości wysokości barier energetycznych na rozszczepienie. Drugi etap obliczeń polegał na obliczeniu połowicznych czasów trwania rozszczepienia (fission half-life) korzystając z otrzymanych wartości barier.

Rozdział 9 przedstawia wyniki obliczeń energii potencjalnej w 4-wymiarowej przestrzeni dla jąder o liczbie protonów w zakresie $Z = 90 - 110$. Ich rezultatem było wyznaczenie wartości energii i deformacji punktów siodłowych oraz stanów podstawowych

i izomerycznych jąder, co pozwoliło na uzyskanie wartości wysokości barier energetycznych na rozszczepienie.

W rozdziale 10 opisana jest metoda i wyniki dopasowania sił pairing, przeprowadzonego tak, aby lepiej odtwarzane były przerwy energetyczne dla protonów i neutronów uzyskane z danych eksperymentalnych oraz energie stanów podstawowych. Uzyskane rezultaty zostały zastosowane do dokładniejszych obliczeń powierzchni energii potencjalnych dla parzysto-parzystych jąder atomowych z obszaru aktynowców ($Z = 90 - 108$) oraz jąder superciężkich ($Z = 110 - 120$).

Ich wyniki przedstawione w rozdziale 11 posłużyły do wyznaczenia wartości wysokości barier, które następnie porównano z wartościami otrzymanymi bez dopasowania sił pairingu oraz z danymi eksperymentalnymi. Wprowadzone poprawki oddziaływania pairing wywarły niewielki wpływ na wyniki obliczeń energii jąder, które okazały się jedynie nieznacznie różnić od otrzymanych poprzednio. Te niewielkie różnice odniosły jednak w kilku przypadkach znaczący wpływ na wartości wysokości barier na rozszczepienie (w przypadku jąder $^{224-234}\text{Th}$, $^{220-226}\text{U}$). Podobne obliczenia przeprowadzono także dla jąder nieparzystych, a ich wyniki przedstawia rozdział 12. Otrzymane wartości wysokości barier dość dobrze odtwarzają dane eksperymentalne.

Obliczone wartości barier zostały zastosowane do wyznaczenia połowicznego czasu trwania spontanicznego rozszczepienia parzysto-parzystych ciężkich jąder atomowych z obszaru aktynowców. Zastosowana metoda oraz otrzymane wartości przedstawione zostały w rozdziale 13. Obliczenia przeprowadzone zostały z zastosowaniem przybliżenia WKB oraz metody wyznaczenia ścieżki najmniejszego działania (LAP), w której do opisu efektów bezwładności korzystano z makroskopowego hydrodynamicznego tensora masowego lub fenomenologicznego parametru masowego. Wszystkie rachunki wykonano w 4-wymiarowej przestrzeni dla 4 parametrów deformacji a także przy założeniu minimalizacji energii potencjalnej dla parametru nieosiowości q_1 .

Dla obu podejść wyznaczono połowiczne czasy spontanicznego rozszczepienia dla wybranych jąder aktynowców oraz superciężkich pierwiastków, które porównano z danymi eksperymentalnymi wykazując dość dobrą zgodność, podobną dla obu sposobów obliczeń. Z tej obserwacji wywnioskowano, że nieosiowość jądra nie ma istotnego wpływu na połowiczny czas rozszczepienia ciężkich i superciężkich jąder atomowych. Lepszą zgodność z danymi eksperymentalnymi otrzymano dla obliczeń wykonanych z zastosowaniem hydrodynamicznego tensora masowego. W ostatnim rozdziale zamieszczone zostało także krótkie podsumowanie.

Rozprawa zawiera również 3 dodatki, które obejmują tabele z otrzymanymi wartościami energii stanów podstawowych, punktów siodłowych oraz barier otrzymane dla obu sposobów uwzględnienia sił pairingu, a także opis metody „waterflow” używanej do określenia tych wartości. Na końcu pracy doktorskiej umieszczono bibliografię obejmującą 61 pozycji a na początku znajduje się spis 63 rysunków oraz spis 26 tabel.

Pracy doktorska mgr José Marin Blanco stanowi ważny przyczynek do badań reakcji spontanicznego rozszczepienia, dostarczając informacji na temat modeli teoretycznych stosowanych do wyznaczania wielkości opisujących ten proces. Ze względu na to, że rozszczepienie jest jednym ze sposobów rozpadu jądra, ma on istotne znaczenie dla badań własności jąder atomowych. W szczególności poznanie mechanizmów spontanicznego rozszczepienia jąder superciężkich może posłużyć jako narzędzie do badania stabilności tych jąder. W tym kontekście istotną rolę ogrywają analizowane w niniejszej pracy wielkości, połowiczny czas trwania rozszczepienia czy wysokości barier.

Według mnie należy podkreślić, że w wyniku przeprowadzonych badań autor wypracował teoretyczny model opisu reakcji rozszczepienia, którego rezultaty obliczeń dość dobrze zgadzają się z wynikami eksperymentalnymi. Do opisu kształtu jądra zastosował jego parametryzację za pomocą rozwinięcia w szereg Fouriera. Przeprowadził systematyczne obliczenia powierzchni energii potencjalnych w przestrzeni 4-wymiarowej parametrów deformacji dla wielu jąder a wywnioskowane z nich wielkości umieścił w tabelach znajdujących się w dodatkach. Dzięki dopasowaniu sił pairing w celu lepszego odtworzenia przerw energetycznych otrzymał dokładniejszy opis energii jądra, co umożliwiło uzyskanie bardziej poprawnych wartości wysokości barier. Szczególnie podkreśliłabym wykonanie obliczeń energii potencjalnej i wysokości barier także dla jąder nieparzystych, co jest rzadko spotykana praktyką. Uwagę należy także zwrócić na ogrom pracy włożony w przeprowadzenie obliczeń w przestrzeni 4-wymiarowej parametrów deformacji (202500 punktów w przestrzeni) dla wielu (118) jąder atomowych.

W trakcie czytania nasunęły mi się następujące uwagi i pytania:

- Czy dla wartości eksperymentalnych wysokości barier czy połowicznych czasów trwania rozszczepienia używanych do porównań z wynikami obliczeń zostały wzięte pod uwagę błędy pomiaru (np. rys.11.1, rys.12.20, rys.13.3, rys. 13.5)?
- Czy zostały uwzględnione niepewności wyników obliczeń, np. wynikające z procedury dopasowania (rys 10.1c, rys 11.1)?
- Ciekawe byłoby połączenie informacji z rys 11.1 i 12.20 przedstawiające porównanie obliczeń wysokości barier z danymi eksperymentalnymi dla parzystych i nieparzystych izotopów ciężkich jąder.
- Stwierdzenie, że wysokości barier dla jąder superciężkich są większe, (co wynika z niższych energii stanów podstawowych) zamieszczone w rozdziale 11, mogłoby być zilustrowane poprzez dodanie do rys 11.1 i 12.20 wyników uzyskanych dla tych jąder.
- Wysokości barier dla nieparzystych jąder aktywnowców są dość dobrze odtwarzane przez obliczenia, szkoda, że nie policzono dla tych przypadków połowicznych czasów rozszczepienia.
- Czy podobnie jak dla składowych tensora masowego można przedstawić zależność fenomenologicznego parametru masowego od parametrów deformacji?
- Jak można wytłumaczyć różnice zmierzonych i obliczonych połowicznych czasów trwania rozszczepienia, widocznych na rys 13.3? Czy wynikają one z niezgodności wartości barier? W przypadku jąder Pu eksperymentalne i teoretyczne wartości wysokości barier (rys 11.1) są różne a wartości połowicznych czasów trwania rozszczepienia (rys. 13.3) się dobrze zgadzają. Dla jąder Cm lub U obie wielkości wykazują zgodność.

Praca napisana jest w ogólności w przejrzysty sposób. Bardzo dobrym pomysłem było przedstawienie w pracy map energii potencjalnych tylko dla wybranych przypadków. Rysunki oraz tabele są czytelne. Autor nie ustrzegł się jednak pewnych niedociągnięć redakcyjnych, które wymienione są poniżej:

- brak opisu w tekście tabel 2.1 i 5.1;
- brak opisu w tekście rysunku 3.1; szkoda też, że nie jest on umieszczony kilka stron wcześniej;
- w podpisie rysunku 3.2 przydałby się bardziej szczegółowy opis (np. co oznaczają poszczególne parametry);
- brak opisu w tekście rysunku 8.1;
- brak legendy dla rys 4.1, 4.2, 9.1-9.8, 11.2-11.17, 12.1-12.19;
- brak cytowania opisanych w tekście rysunków 9.1-9.8, 11.2-11.17, 12.1-12.19;

- podpis do rysunku 10.1 zawiera 'ground-state masses' a powinno być „ground-state energies”
- lakoniczny podpis do rys. 12.20 i brak cytowania danych eksperymentalnych
- rysunki 11.2-11.17 oraz rys 11.1 umieszczone są w odwrotnej kolejności niż omawiane zaprezentowane na nich wielkości
- rysunki 13.3 i 13.5 nie są podzielone na panele dolny i górny, jak sugeruje podpis
- podpis rysunku 13.4 opisuje jego układ dwukolumnowy, podczas, gdy rysunki są na nim umieszczone w trzech kolumnach
- tytuł rozdziału 9 sugeruje, że jego treść zawiera obliczenia powierzchni energii, punktów siodłowych u wysokości barier, natomiast przedstawione są w nim jedynie powierzchnie energii potencjalnej jąder;
- konfuzja oznaczeń parametrów h i B (str. 15), czy nie powinno być *deformation parameter B?*;
- drobne błędy literowe - uses (str. 60), q_3 (str. 79), ^{252}Pa (str. 82), ^{252}Pa (str. 84). Figures (str. 96);
- wydaje się ze lepszym określeniem rzutu wyników obliczeń na płaszczyznę parametrów (str. 63) byłoby słowo *projection* zamiast *cross-section*;
- nie zostały zdefiniowane skróty l.h.s. i r.h.s. używane na stronie 63;
- str. 80 powinno być „from... ^{230}Pa to ^{235}Pa the GS is *asymmetric*”;
- linki do map energii potencjalnych sugerują, że znajdziemy pod ich adresem rysunki, jednakże umieszczone są tam dane do ich wytworzenia i ich otrzymanie wymaga specjalnych umiejętności.

Wszystkie te wymienione braki, niedomówienia czy drobne usterki w żaden sposób nie umniejszają dużej wartości rozprawy doktorskiej.

Podsumowując stwierdzam z pełnym przekonaniem, że rozprawa mgr José Marin Blanco zatytułowana „Study of Spontaneous Fission of Actinide and Super-Heavy Elements” stanowi oryginalny, ciekawy i twórczy przyczynek do badań nad rozszczepieniem jąder atomowych.

Rozprawa w zupełności spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim w Polsce. Wnoszę o dopuszczenie mgr José Marin Blanco do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

K. Uusela