



UNIWERSYTET
ZIELONOGÓRSKI

Dr hab. Piotr Jachimowicz, prof. UZ
Instytut Fizyki Uniwersytetu Zielonogórskiego
ul. Prof. Zygmunta Szafrana 4a,
65-516 Zielona Góra

Zielona Góra, 26.03.2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra José Marin Blanco, zatytułowanej „Study of spontaneous fission of actinide and super-heavy elements”

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska mgra José Marin Blanco pt.: „Study of spontaneous fission of actinide and super-heavy elements”, została napisana pod kierunkiem dra hab. Artura Dobrowolskiego. Praca ta poświęcona jest możliwości teoretycznego opisu zjawiska samorzutnego rozszczepienia nuklidu, które obok emisji cząstki alfa jest drugim równie ważnym sposobem rozpadu jąder najcięższych. W najprostszym ujęciu, w procesie tym jądro pokonuje pewną określoną sekwencję zmian kształtu, począwszy od swego stanu podstawowego, a kończąc na uformowaniu i rozdzieleniu się dwóch osobnych fragmentów. Bardzo ogólne, jakościowe wyjaśnienie tego zjawiska możliwe jest już nawet na gruncie modelu kropłowego, w którym energia jądra, będąca sumą energii powierzchniowej i kulombowskiej wraz z wydłużeniem nuklidu kolejno: stopniowo wzrasta, przechodzi przez maksimum, tj. punkt siodłowy, a następnie maleje. W praktyce umiejętność precyzyjnego wyznaczenia takiej ścieżki pokonywanej przez jądro, czy zlokalizowania punktu siodłowego w przestrzeni przyjętych parametrów deformacji, będzie mieć ogromny wpływ na wynik oszacowania prawdopodobieństwa samorzutnego rozszczepienia oraz związanego z nim czasu życia.

Aktualnie dostępna jest dość spora liczba publikacji zawierających teoretyczne oszacowania mas, barier na rozszczepienie oraz czasów życia względem spontanicznego rozszczepienia jąder z analizowanego w rozprawie obszaru, tj. $Z \geq 89$. Zasadniczo obliczenia te opierają się na wykorzystaniu dwóch głównych typów modeli. Jednym z nich jest czysto mikroskopowe podejście oparte na fenomenologicznych oddziaływaniach nukleon-nukleon typu Skyrmsa lub Gogny'ego, w którym energia jądra wyznaczana jest metodą samozgodnego rozwiązania równań Hartree'ego-Focka lub Hartree'ego-Focka-Bogoliubowa. Ze względu na konieczność wykonywania w tym przypadku często dość długotrwałych obliczeń metoda ta jest raczej stosowana do przeprowadzania bardziej lokalnych analiz i badania wybranych nuklidów. Drugą klasą modeli jest metoda makroskopowo-mikroskopowa, której pierwsze warianty stosowano już ponad pół wieku temu. W ramach niej energia jądra wyznaczana jest jako suma energii klasycznej kropli cieczy nukleonowej i poprawek: powłokowej oraz pairing. Mimo upływu czasu, podejście to, dzięki swojej prostej, hybrydowej konstrukcji, jest wciąż skutecznym narzędziem do opisu niskoenergetycznej struktury jądrowej i uzyskiwania realistycznych przewidywań w obszarze jąder

najcięższych. Dobrze sprawdza się ono zarówno przy wykonywaniu lokalnych, jak i bardziej systematycznych rachunków, tj. powtarzanych dla kolejnych nuklidów. Rozprawa doktorska mgra Blanco opiera się na wykorzystaniu drugiej ze wspomnianych metod.

Rozprawa liczy 126 numerowanych stron tekstu wraz z tabelami, rysunkami, referencjami oraz dodatkami. Podzielona jest na 13 rozdziałów, z których rozdziały 1-8 stanowią wprowadzenie do zagadnień poruszanych w pracy oraz wykorzystywanej w niej wersji metody makroskopowo-mikroskopowej. Opis oryginalnych rezultatów uzyskanych przez autora rozpoczyna rozdział 9. Autor zamieścił w pracy 63 ilustracje oraz 26 tabel. Spis cytowanej literatury liczy 61 pozycji, z czego pozycja [60] jest tam jedyną publikacją wykonaną przy współudziale autora. Jednakże proste sprawdzenie pokazuje, że znaczna część wyników opisywanych w rozprawie została także opublikowana w artykule „Spontaneous fission half-lives of actinides and superheavy elements”, Phys. Rev. C **108**, (2023) 044618, w którym mgr José Marin Blanco jest pierwszym autorem. Należy przypuszczać, że brak tej ważnej pozycji w spisie literatury jest po prostu konsekwencją czasami dość długotrwałego procesu publikowania w renomowanym czasopiśmie, jakim jest bez wątpienia Physical Review C.

W pierwszym rozdziale pracy (Introduction) autor zwraca uwagę na istotny wpływ zjawiska rozszczepienia jądra atomowego na różne dziedziny życia człowieka oraz na wynikającą stąd potrzebę możliwie dokładnego zrozumienia przebiegu tego procesu. Pokróctce przedstawiona jest tam historia odkryć związanych z rozszczepieniem oraz wybrane próby udoskonalania jego opisu. Fragment ten zamyka ogólny zarys metodyki, która będzie wykorzystywana w ramach pracy. Z tego też względu wstępnie zarysowana jest tam zawartość kolejnych rozdziałów. Rozdział drugi (Liquid Drop Model) odnosi się do modelowania części energii jądra, która gładko zmienia się w zależności od liczby protonów, neutronów i deformacji jądrowej. Przedstawiona jest tam historia ewolucji modelu kropłowego oraz szczegółowo opisana jedna z jego bardziej współczesnych wersji, tj. Lublin-Strasbourg Drop model, wraz z wyjaśnieniem i omówieniem jej parametrów. Model ten stanowić będzie bazę dla części makroskopowej podejścia makroskopowo-mikroskopowego wykorzystywanego w ramach niniejszej pracy. Rozdział trzeci (Description of nuclear shape parametrization) zawiera w sobie opis kilku wybranych typów parametryzacji kształtu jądra atomowego. Właściwy dobór takiej parametryzacji odgrywać będzie kluczową rolę przy wszelkiego rodzaju oszacowaniach stabilności, szczególnie względem rozszczepienia. Wśród omawianych tam lub wspomnianych typów parametryzacji na szczególną uwagę zasługuje parametryzacja Fouriera. Wykorzystując tylko cztery parametry, tj. η , q_2 , q_3 , q_4 , pozwala ona na realistyczny opis kształtów jądrowych, także tych charakteryzujących się bardzo dużym wydłużeniem. To właśnie ta parametryzacja wykorzystywana będzie przez autora w jego obliczeniach. Rozdział 4 (Liquid drop fission barriers) prezentuje ogólną możliwość wyjaśnienia zjawiska rozszczepienia na gruncie modelu kropłowego. Autor zwraca tam jednak uwagę, że uwzględnienie efektów kwantowych prowadzi będzie do istotnej modyfikacji wyznaczonej w takim podejściu bariery, w tym choćby do pojawienia się w niektórych przypadkach np. drugiego minimum energii potencjalnej. Podkreśla ponadto, że efekty te mają kluczowe znaczenie dla wyjaśnienia stabilności jąder najcięższych. Rozdział 5 (Yukawa-folding description of the structure of the nucleus) zawiera opis i charakterystykę średniego potencjału jednocząstkowego, jakim jest

efektywny potencjał Yukawy. Jego kształt jest bardzo zbliżony do równie często wykorzystywanego potencjału Woodsa-Saxona, co ilustruje Rys. 5.1. Otrzymywane w ramach niego poziomy jednocząstkowe stanowiąc będą bazę dla części mikroskopowej używanego przez autora podejścia makroskopowo-mikroskopowego. Rozdział 6 (Pairing correction) dotyczy tzw. poprawki pairing, która tak jak i poprawka powłokowa jest przejawem kwantowej natury jądra atomowego. Konieczność uwzględniania jej w obliczeniach wynika choćby z widocznych różnic w energiach wiązania między jądrami parzystymi a nieparzystymi. Różnice te są tłumaczone występowaniem krótkozasięgowych sił dwójkowania, które odpowiadają za łączenie się w pary nukleonów mających jednakowe co do wartości, ale przeciwnie skierowane wektory momentów pędu. Ponieważ zjawisko to wykazuje znaczne podobieństwo do nadprzewodnictwa niskotemperaturowego, może być ono z powodzeniem opisywane w ramach metody BCS, zapożyczonych z teorii ciała stałego. Z tego też względu autor szczegółowo opisuje związany z tym formalizm, który finalnie pozwala na uzyskanie układu 4 równań BCS. Dodatkowo opisywana jest tam także standardowa metoda blokowania, mająca zastosowanie w przypadku układów nieparzystych. Rozdział 7 (Deformed nuclei) zawiera w sobie krótkie omówienie metod, w ramach których historycznie podejmowane były kolejne próby opisu jąder charakteryzujących się kształtami niesferycznymi w stanach podstawowych. Ponieważ energia potencjalna nierotującego jądra wyznaczana w podejściu makroskopowym osiągać będzie zawsze minimum dla kształtu sferycznego, do opisu jąder zdeformowanych potrzebne było uwzględnienie efektów mikroskopowych (jednocząstkowych). Możliwe jest to np. w ramach wprowadzenia pewnej mikroskopowej poprawki. Realistyczną metodą wyznaczania takiej poprawki jest podejście zaproponowane przez Strutinskiego. To właśnie niemu poświęcona została końcowa część tego rozdziału oraz cały następny Rozdział 8 (Strutinsky shell correction). Metoda Strutinskiego łączy ze sobą efekty jednocząstkowe z kolektywnymi i jest powszechnie stosowana do obliczania energii potencjalnej jądra, w tym także i w niniejszej pracy. W rozdziale 9 (Results of the calculation of GS, saddle points and barrier heights) omawiane są powierzchnie energii potencjalnej dla wybranych jąder parzysto-parzystych z obszaru $Z=90-110$. Zgodnie z opisem, widoczne tam mapy są efektem rzutowania 4-wymiarowych sieci energii, zależnych od η , q_2 , q_3 , q_4 , kolejno na wymiary q_2 , q_3 oraz q_2 , q_4 , gdzie wartości pozostałych (niewidocznych) parametrów są zawsze równe zero. Prezentowane mapy są więc w praktyce wyłącznie dwuwymiarowe. Wydaje się, że mając do dyspozycji wygenerowane 4-wymiarowe sieci energii, bardziej właściwym (szczególnie w kontekście obrazowania minimów), byłoby wykonanie minimalizacji energii względem niewidocznych parametrów deformacji. Mimo wszystko rozumiem, że zamysłem autora było tu możliwie proste, wstępne zobrazowanie znaczenia i wpływu parametrów typu: q_3 , q_4 , na charakterystykę prezentowanych powierzchni. Sama specyfikacja wspomnianych 4-wymiarowych sieci, tj. przyjęty krok i zakres poszczególnych wymiarów, nie są podawane w tym rozdziale. Czytelnik może więc się tylko domyślać z kontekstu pracy, że zawarta w rozdziale następnym charakterystyka sieci odnosi się także do obliczeń prezentowanych w tym fragmencie. To samo odnosi się także do wykorzystywanej definicji natężenia sił pairing G. Ponadto, dopiero w Rozdziale 11 czytelnik ma szansę dowiedzieć się, że przedstawiana na licznych mapach energia potencjalna jądra jest normalizowana w taki sposób, że wchodząca w jej skład część makroskopowa

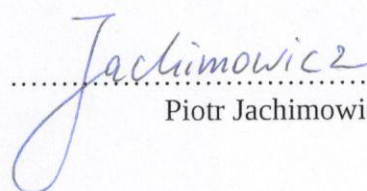
jest równa zero dla kształtu sferycznego. W rozdziale 10 (Fitting the average pairing strength G) opisywana jest modyfikacja stosowanych w Rozdziale 9 natężeń sił pairing dla protonów i neutronów, tj. odpowiednio G_p i G_n . Nowe wartości G otrzymane zostały z dopasowania protonowych i neutronowych delt pairingowych do empirycznych różnic w masach sąsiadujących ze sobą (względem liczb Z lub N) 39 jąder z obszaru Th-Fm. W rozdziale 11 (Recalculating potential energy surfaces to find the barrier heights) powtórzone zostały rachunki dla parzysto-parzystych jąder z Rozdziału 9 z wykorzystaniem nowych wartości G_p i G_n . Mimo pewnych ilościowych różnic, ogólna charakterystyka uzyskanych w ten sposób map pozostała niezmienną. Dodatkowo rozpatrywany wcześniej zakres nuklidów został tu rozszerzony aż do $Z=120$. Sposób wykonania aktualnych map oraz ich zależność od niewidocznych wymiarów nie są tu podawane. Z kontekstu pracy należy więc domyślać się, że mapy te zostały wykonane w analogi do tych z Rozdziału 9. Pewna niejasność dotyczy rysunku 11.1, przedstawiającego wyznaczone statyczne bariery na rozszczepienie w ramach przyjętych dwóch wersji natężeń sił pairing oraz porównania tych rezultatów do danych empirycznych. Wydaje się, że właściwsze byłoby umiejscowienie tego rysunku w rozdziale następnym, czyli w miejscu, gdzie podawanych jest więcej informacji na temat sposobu wyznaczania takich barier oraz przyjętej metody ich porównania z danymi empirycznymi. Rozdział 12 (Study of the GS, saddle points and barriers in odd nuclei) jest powtórzeniem wszystkich analiz z Rozdziału 11 dla pominiętych w poprzednich rozdziałach jąder nieparzystych. Ostatni rozdział, czyli Rozdział 13 (Calculations of spontaneous fission half-lives of actinide and super-heavy nuclei), stanowi zwieńczenie całej rozprawy. Bazując na opisanym w pracy podejściu makroskopowo-mikroskopowym autor wyznaczył tu czasy życia ze względu na samorzutne rozszczepienie jąder parzysto-parzystych z zakresu $Z=90-110$. Prawdopodobieństwo przeniknięcia bariery było obliczane w przybliżeniu kwaziklasycznym WKB. Wpływ masy jądra (parametrów masowych) na proces rozszczepienia został uwzględniony w sposób dynamiczny, tj. w ramach minimalizacji zredukowanego działania WKB. Przyjęta w obliczeniach przestrzeń deformacji była rozpięta na 4 współrzędnych kolektywnych, tj. η , q_2 , q_3 , q_4 . W pierwszym etapie wyznaczone zostały tu czasy życia parzysto-parzystych jąder Th-Fm, dla których dostępne były dane empiryczne. Pozwoliło to m.in. na ustalenie wartości parametru β , skalującego wykorzystywany w tym podejściu makroskopowy tensor masowy, wyznaczany w przybliżeniu hydrodynamicznym. Posługując się otrzymaną w ten sposób wartością $\beta=5$, w kroku następnym wykonane zostały rachunki czasów życia ze względu na spontaniczne rozszczepienie dla jąder jeszcze cięższych, tj. aż do Ds. Uzyskane w ten sposób rezultaty wykazały całkiem dobrą zgodność z dostępnymi w tym obszarze danymi empirycznymi, potwierdzając tym samym wysoką skuteczność prognostyczną zastosowanego podejścia. Dodatkowo celem przeanalizowania znaczenia parametru opisującego deformację nieosiową, rachunki te powtórzono z tak ustalaną wartością q_1 , aby minimalizowała ona energię potencjalną jądra w danym punkcie przestrzeni q_2 , q_3 , q_4 . Równolegle, przeprowadzono też wersję rachunków z wykorzystaniem tzw. fenomenologicznego parametru masowego (13.2).

Napisana przez mgra José Marin Blanco rozprawa doktorska jest momentami chaotyczna. Zdarzają się przypadki, gdzie sposób uzyskania rezultatów, omawianych w danym momencie pracy, podawany jest gdzieś indziej, np. w innym rozdziale, niż w miejscu ich prezentacji. Pojawiają się także literówki, błędne odwołania do literatury lub rozdziałów. Mimo że statyczna bariera

rozszczerpieniowa nie jest parametrem mierzalnym bezpośrednio, wydaje się, że w ramach formalności można było tu pokusić się o przeprowadzenie pełniejszego porównania z danymi empirycznymi, gdyż cytowany w pracy zbiór danych eksperymentalnych, dotyczący aktywności, zawiera informacje o wysokościach obu barier takich nuklidów. Dodatkowo dostępne w literaturze są także dane eksperymentalne dla wyznaczonych w pracy energii wzbudzeń drugich minimów. Odniesienie się do nich dawałoby dodatkową możliwość weryfikacji mocy prognostycznej używanego modelu. Posiadając wygenerowane 4-wymiarowe sieci energii w ramach parametryzacji, która dobrze sprawdza się w przypadku dużych wydłużeń, można było także przeprowadzić dokładniejszą i systematyczną analizę dotyczącą występowania oraz głębokości trzecich (hiperzdeformowanych) minimów. Prezentowane w pracy liczne mapy energii potencjalnej mogłyby uwzględniać zależność od niewidocznych parametrów deformacji, np. w ramach minimalizacji energii. Dodatkowo wyznaczone w pracy czasy życia ze względu na spontaniczne rozszczepienie mogłyby być podane jako wartości liczbowe, np. w tabeli. Ten istotny wynik jest prezentowany w pracy jedynie w postaci punktów umieszczonych na rysunku.

Mimo wszystko, w kontekście całej pracy, wymienione powyżej mankamenty należy uznać za drobne i mało znaczące. Ich pojawienie się jest raczej nieuniknioną konsekwencją omawiania tak obszernego i rozbudowanego materiału. Rozprawa doktorska prezentuje szeroką wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie nauki fizyczne i jak najbardziej zawiera oryginalne rezultaty, czego najlepszym potwierdzeniem jest wspomniane wcześniej opublikowanie ich w renomowanym czasopiśmie *Physical Review C*. Całościowo pracę oceniam więc bardzo dobrze.

Podsumowując, uważam, że praca doktorska napisana przez mgra Jose Marin Blanco „Study of spontaneous fission actinide” całkowicie spełnia wymogi określone w art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, dotyczące nadania stopnia naukowego doktora. W związku z tym oceniam ją bardzo dobrze i opowiadam się za dopuszczeniem kandydata do dalszych etapów wszczętego przewodu doktorskiego.


.....
Piotr Jachimowicz