

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

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr Anny Zdeb

pt. „Badanie rozkładu mas fragmentów rozszczepienia”

Rozprawa doktorska pani mgr Anny Zdeb zatytułowana „Badanie rozkładu mas fragmentów rozszczepienia” dotyczy teoretycznego opisu procesu rozszczepienia jąder atomowych, a w szczególności rozkładu mas fragmentów powstałych w tym procesie. Opisane badania przeprowadzone zostały w oparciu o model Hartree’go - Focka - Bogoliubova (HFB) dla wybranych jąder ^{252}Cf , ^{256}Fm , ^{180}Hg , dla których obserwowane jest rozszczepienie asymetryczne i ^{258}Fm , którego rozszczepienie posiada charakter bimodalny.

Zawierająca 68 stron praca podzielona jest na cztery rozdziały, do których należą: wstęp wraz z wprowadzeniem, dwa rozdziały zawierające opis prowadzonych badań i ich wyników oraz krótkie podsumowanie zawierające także perspektywy kontynuacji badań.

W pierwszej części wstępu autorka przedstawia cel pracy oraz pokrótce opisuje tematykę poszczególnych rozdziałów. Głównym zadaniem prowadzonych prac jest zbadanie wpływu mechanizmów kolektywnych (takich, jak deformacja, gęstość nukleonów) oraz efektów dynamicznych (zmiana w czasie deformacji czy prawdopodobieństwa rozszczepienia) na rozkład mas fragmentów rozszczepienia.

Druga część wstępu – „Wprowadzenie” – zawiera opis historii badań prowadzących do odkrycia zjawiska rozszczepienia oraz przedstawia motywację studiowania tego procesu zarówno metodami doświadczalnymi jak i teoretycznymi. Jedną z podstawowych obserwacji procesu rozszczepienia jest rozkład mas fragmentów powstających w jego wyniku. Jednakże, jak zauważa autorka, wciąż brakuje modelu teoretycznego umożliwiającego odtworzenie zmierzonych eksperymentalnie rozkładów mas fragmentów. Po tej uwadze następuje krótka prezentacja modeli teoretycznych stosowanych do tej pory do opisu rozszczepienia oraz wyznaczenia rozkładu mas fragmentów. Moim zdaniem część ta powinna stanowić osobny rozdział, a modele teoretyczne zostać przedstawione szerzej, co miałoby wpływ na wzrost wartości edukacyjnej pracy.

Rozdział drugi, zatytułowany „*Podejście statyczne*”, zawiera opis stosowanego modelu teoretycznego a także wyniki jego zastosowania. W badaniach wykorzystano model Hartree’go - Focka - Bogoliubova (HFB) z oddziaływaniem typu Gogny’ego. W rezultacie uzyskano informację na temat kształtów jąder przed i po rozszczepieniu oraz gęstości materii jądrowej, która posłużyła do wyznaczenia rozkładu mas fragmentów. Rachunki prowadzone dla wzrastającej wartości momentu kwadrupolowego jądra umożliwiały śledzenie kształtu jądra podczas przechodzenia od stanu podstawowego do rozszczepienia. Dla pewnej wartości momentu kwadrupolowego przewidywana jest gwałtowna zmiana kształtu jądra, które z konfiguracji wydłużonej składającej się z dwóch części połączonych szyjką staje się dwoma odseparowanymi fragmentami. Kształty te odpowiadają stanom przed i po rozszczepieniu (pre- i post-scission). Zarówno dla asymetrycznie rozszczepiających się jąder ^{252}Cf oraz ^{256}Fm jak i dla izotopu ^{258}Fm posiadającego dwie możliwe ścieżki rozszczepienia – symetryczną i asymetryczną – uzyskano dobrą zgodność rozkładów gęstości materii jądrowej przed rozerwaniem oraz gęstości powstałych fragmentów. Różnice widoczne jedynie w obszarze szyjki (nadmiar dla jądra macierzystego) wytłumaczone zostały obecnością nukleonów nieprzyłączonych

jeszcze do żadnego z fragmentów. Zaobserwowano także zachowanie stosunku N/Z jądra macierzystego przez powstające fragmenty, co wytłumaczono wpływem energii symetrii na rozkład materii jądrowej.

Aby przyporządkować nukleony tworzące szyjkę do odpowiednich fragmentów istotnym okazało się uwzględnienie hipotezy Brosy, zgodnie z którą możliwe jest rozerwanie szyjki w innym miejscu niż wyznaczone przez jej najmniejszy przekrój poprzeczny. Pani Anna Zdeb przeanalizowała rozkłady mas produktów rozszczepienia dla izotopów ^{252}Cf , ^{256}Fm , ^{180}Hg oraz ^{258}Fm uzyskane przy założeniu odpowiednich wartości prawdopodobieństwa pęknięcia szyjki w dowolnym punkcie wzdłuż osi symetrii jądra. Zgodność wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi nie jest bardzo dobra. Rozkład teoretyczny jest węższy i odtwarza najbardziej prawdopodobne wartości mas z dokładnością do czterech nukleonów. Wyniki uzyskane dla izotopu ^{180}Hg wskazują na dominującą rolę asymetrycznego kanału rozszczepienia oraz konieczność uwzględnienia w obliczeniach faktu, że jądro to tworzone jest w stanie wzbudzonym. Także opis teoretyczny rozszczepienia jądra ^{258}Fm daje wyniki odbiegające od danych zmierzonych. Rozkład mas fragmentów będący złożeniem wyników dla obu ścieżek: rozszczepienia symetrycznego i asymetrycznego, przy założeniu równych ich wkładów dobrze opisuje położenie maksimum rozkładu symetrycznego, ale jest znacznie węższy i posiada nadmiar w dwóch maksimach odpowiadających masom fragmentów powstałych w wyniku rozszczepienia asymetrycznego.

Za główny powód tej niezgodności autorka uważa pominięcie efektów dynamicznych - bezwładności, tarcia, dyssypacji energii. Ze względu na to, że wartość energii potencjalnej jest zbliżona dla szerokiego zakresu jąder o parametrach deformacji bliskich obszarowi występowania rozszczepienia asymetrycznego, Pani Anna zaproponowała uwzględnienie w obliczeniach również jąder o parametrach sąsiadujących z konfiguracją najbardziej prawdopodobną.

Zastosowanie modelu dynamicznego do wyznaczenia rozkładu mas fragmentów rozszczepienia przedstawione zostało w rozdziale trzecim zatytułowanym „*Dynamika rozszczepienia*”. Do obliczeń opisanych w tej części pracy pani mgr Anna Zdeb wykorzystwała model ATDHF TDGCM+GOA (*Adiabatic Time-dependent Hartree-Fock; Time-dependent Generator Coordinate Method, Gaussian Overlap Approximation*) – czyli zależną od czasu metodę współrzędnej generującej z przybliżeniem przekryć gaussowskich. W oparciu o ten model zostały policzone parametry masowe, kolektywne stany własne oraz gęstość prawdopodobieństwa uzyskania przez jądro w danej chwili określonej deformacji (definiowanej przez wartości momentu kwadrupolowego i momentu oktopolowego). Obliczenia przeprowadzono dla jąder ^{240}Pu , ^{252}Cf oraz ^{256}Fm i ^{258}Fm . Dość dobrą zgodność z eksperymentalnym rozkładem mas fragmentów rozszczepienia jądra ^{240}Pu otrzymano dla obliczeń z uwzględnieniem oprócz efektów dynamicznych także efektów makroskopowych, czyli mechanizmu przypadkowego rozerwania szyjki (metoda Brosy). Niezgodności wytłumaczone zostały gwałtowną zmianą kształtu jądra przed rozszczepieniem, którą można zniwelować zdaniem autorki poprzez dodanie do opisu dodatkowego stopnia swobody.

Na przykładzie jądra ^{252}Cf , dobrze poznanego eksperymentalnie, pani Anna zbadała zależność rozkładu mas produktów rozszczepienia od stanu początkowego jądra macierzystego. Uzyskane wyniki pokazały, że rozkład mas fragmentów nie zależy od energii stanu i jedynie w niewielkim stopniu – od jego parzystości. W tym przypadku uwzględnienie w obliczeniach mieszania wielu stanów własnych nie ma wpływu na rozkład mas.

Podobnej analizie poddane zostały procesy rozszczepienia izotopów ^{256}Fm i ^{258}Fm . Wyniki uzyskane w tych przypadkach wskazują na zależność rozkładów mas fragmentów zarówno od parzystości stanu początkowego jak i jego energii. Rezultaty obliczeń dla stanów mieszanych jąder ^{256}Fm nie opisują dobrze najbardziej prawdopodobnych wartości mas, natomiast dobrze oddają wysokość doliny rozkładu mas powstałych w wyniku rozszczepienia indukowanego. Dla ^{258}Fm , którego rozszczepienie ma charakter bimodalny, najlepszą zgodność z doświadczeniem wykazują wyniki obliczeń dla stanów o parzystości dodatniej. Porównanie wyników obliczeń dla stanów zmieszanych do danych eksperymentalnych nie jest miarodajne, gdyż istniejące dane nie odpowiadają rozszczepieniu ze stanów wzbudzonych.

W rozdziale czwartym zatytułowanym „*Podsumowanie*” zebrane zostały obserwacje i wnioski wypływające z wyników przedstawionych w pracy. Autorka wyraziła w nim stwierdzenie, że tematyka pracy jest jedynie częścią problemu badań rozkładu mas fragmentów rozszczepienia.

Zaproponowała także metodę kontynuacji tej tematyki, poprzez dodanie do opisu rozszczepienia dodatkowego stopnia swobody – momentu heksadekapolowego, co może mieć istotny wpływ na poprawę zgodności z wynikami pomiaru. Trochę szkoda, że część dotycząca perspektyw nie jest bardziej rozwinięta.

Pracę kończy Bibliografia zawierająca bogaty spis cytowanej literatury liczący 94 pozycje. Następnie, w formie załącznika autorka umieściła spis własnych publikacji w liczbie 11 prac. Podziękowania znajdują się na początku pracy, zaraz po stronie tytułowej.

Poniżej przedstawiam moje główne refleksje, uwagi i pytania, dotyczące rozprawy doktorskiej pani mgr Anny Zdeb.

Rozprawa doktorska pani mgr Anny Zdeb zredagowana jest starannie, zawiera 39 czytelnych, kolorowych rysunków. Napisana jest w języku polskim, w ładnym stylu, co sprawia, że czyta się ją z przyjemnością. Tytuł rozprawy jest ogólny, lecz adekwatny do opisanych w pracy badań, które dotyczyły różnych czynników mających wpływ na rozkład mas fragmentów rozszczepienia.

Celem pracy było zbadanie kolektywnych mechanizmów mających znaczenie w procesie opisu rozkładu nukleonów jądra macierzystego pomiędzy fragmenty rozszczepienia. W szczególności wpływ czynników makroskopowych takich jak deformacja jądra oraz jej ewolucja w czasie. Cel ten został osiągnięty na przykładzie badanych izotopów ^{252}Cf , ^{256}Fm , ^{180}Hg (rozszczerzenie asymetryczne) i ^{258}Fm (bimodalny charakter rozszczepienia) z zastosowaniem modelu statycznego i dynamicznego. Wykazano, że ważne informacje można uzyskać analizując rozkłady gęstości przestrzennych nukleonów w jądrze przed rozszczepieniem oraz produktów utworzonych w tym procesie. Ponadto autorka zauważyła istotne znaczenie makroskopowych efektów hydrodynamicznych związanych z energią powierzchniową rozszczepiającego się jądra.

Następnie w wyniku analizy wpływu struktury propagowanego w czasie stanu własnego jądra macierzystego na rozkład mas produktów rozszczepienia zaobserwowano niewielką zależność od parzystości czy energii tego stanu. Najlepszą zgodność obliczeń teoretycznych z danymi doświadczalnymi uzyskano stosując model dynamiczny w połączeniu z metodą Brosy podziału jądra, co wskazuje na istotne znaczenie efektów dynamicznych w procesie rozszczepienia.

Podzielałam zdanie autorki, że pomimo rozbieżności pomiędzy wynikami obliczeń a danymi eksperymentalnymi, rezultaty prowadzonych badań teoretycznych są obiecujące. Przedstawione wyniki osiągnięto przy założeniu tylko dwóch stopni swobody, co może powodować pewne ograniczenia.

Wartościowymi wynikami pracy są porównania wyników obliczeń z danymi eksperymentalnymi. Brakuje mi jednak zaznaczenia na rysunkach wartości błędów dla punktów doświadczalnych. Oprócz tego, podczas czytania pracy nasunęło mi się pytanie a także zauważyłam kilka następujących nieścisłości:

- W procesie rozczepienia jądro ulega wzbudzeniu. A nawet przy niewielkich energiach wzbudzenia, opisując kształt jądra, należy wziąć pod uwagę tzw. termiczne fluktuacje kształtu. Czy ten efekt został uwzględniony w obliczeniach? Być może mogłoby to zwiększyć szerokość obliczanych rozkładów masowych i zbliżyć je do rozkładów eksperymentalnych.
- Termin „*temperatura deformacji przedrozszerzeniowej*” wydaje mi się nieścisły. Może lepiej go określić temperaturą jądra przed rozszczepieniem?
- Na początku rozdziału 2.5 napisano, że metoda Brosy „*była stosowana do obliczenia rozkładów mas izotopów ^{252}Cf , ^{180}Hg oraz $^{256,258}\text{Fm}$* ”. Raczej była ona używana do obliczeń rozkładów mas fragmentów ich rozszczepienia?
- Wartości energii potencjalnej na osi rysunku 2.15 wydają się za duże
- Stwierdzenie na początku rozdziału 3: „*Modyfikacje wprowadzone zostały tam, gdzie to było niezbędne*” nie jest precyzyjne. Jakie modyfikacje były konieczne?

- f) Na stronie 45 powinno być „...Badania wpływu stanu początkowego...” nie „podstawowego”
- g) Rysunek 3.21 zawiera wyniki obliczeń przedstawione za pomocą trzech linii. Wyjaśnione jest znaczenie tylko dwóch z nich. Dodatkowo nie jestem pewna, czy właściwy jest opis: „(iii) linia niebieska”

Mniej istotne, drobne pomyłki, które powstały przez niedopatrzenie to:

- a) w podpisie pod rysunkiem 2.3 linia zielona, a nie niebieska
- b) na stronie 39 odnośnik do rysunku 3.5 jest podany w sposób „domyślny”
- c) str. 43 – powinno być linia niebieska na rysunku 3.10
- d) niestaranne cytowanie rysunku 3.21
- e) w kilku miejscach zdanie zaczyna się małą literą
- f) kilka błędów typu: jednakże, niemalże
- g) kilka błędów typu: brak zaimka, zła końcówka, zmiana litery

Nie mają one wpływu na wartość pracy, podaję je tylko dla kompletności.

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

Podsumowując stwierdzam z pełnym przekonaniem, że rozprawa mgr Anny Zdeb stanowi oryginalny, ciekawy i twórczy wkład w zrozumienie mechanizmów mających wpływ na własności fragmentów rozszczepienia, a w szczególności na rozkłady ich mas. Przedstawiona w niej metoda badań teoretycznych stanowi podstawę do kontynuacji tej tematyki w szerszej przestrzeni konfiguracyjnej.

Rozprawa w zupełności spełnia ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim w Polsce. Wnoszę o dopuszczenie Pani mgr Anny Zdeb do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

M. Umech