dr hab. Leszek Próchniak
Środowiskowe Laboratorium Ciężkich Jonów
Uniwersytet Warszawski

Warszawa, 8.01.2022

Recenzja rozprawy doktorskiej p. mgr Amelii Kosior-Romanowskiej

Teoretyczny opis parzysto-parzystych superciężkich jąder atomowych z wykorzystaniem metody Hartree'ego-Focka-Bogolubowa z jądrowym funkcjonałem gęstości Skyrme'a

Recenzowana praca przedstawia wyniki obliczeń dotyczących kilkudziesięciu układów protonów i neutronów o szczególnych własnościach. Szczególnych dlatego, że po pierwsze, zdecydowana większość badanych układów zawiera co najmniej 114 protonów i odpowiednio dużo (więcej niż 184) neutronów. Układy takie są więc kandydatami na jądra superciężkie, które od wielu lat są obiektem intensywnych badań, zarówno eksperymentalnych jak i teoretycznych. Spośród układów badanych w pracy tylko trzy z nich zostały zaobserwowane w doświadczeniu (^{284,286,288}Fl). Po drugie, w pracy analizowane są także układy o ekstremalnych rozkładach materii (w kształcie torusa) i wysokich spinach. Używam, ale tylko na początku, nazwy układ protonów i neutronów (może nieco pedantycznie) zamiast jądro atomowe, żeby podkreślić, że stwierdzenia, które występują w pracy oraz w mojej recenzji typu „deformacja stanu podstawowego jądra", „możliwe ścieżki do rozszczepienia danego jądra", „jądro przybiera kształt torusa" itp. odnoszą się do własności wynikających z zastosowanego modelu teoretycznego, a nie własności doświadczalnych.

Z historii badań jąder superciężkich wiadomo, jak ważna jest współpraca między fizyką doświadczalną i teoretyczną, i że często postęp możliwy jest dzięki teoretycznym badaniom egzotycznych czy „hipotetycznych" jąder, a więc bez wątpliwości tematyka pracy dotyczy zagadnień ważnych i interesujących dla fizyki jądrowej.

Zasadniczą treść pracy można krótko opisać jako szczegółową analizę zależności całkowitej energii jądra od deformacji rozkładu materii przeprowadzoną dla dużej liczby (68) parzysto-parzystych jąder superciężkich. Zestaw jąder badanych w pracy obejmuje izotopy Fl, Z=114, N=154−196; izotopy Z=120, N=160−196; izotony N=184, Z=106−126 oraz 18 neutronodeficytowych jąder z obszaru Z=118−124, N=158−174.

Wyniki przedstawione przez doktorantkę podzieliłbym na dwie grupy: pierwsza dotyczy zagadnień standardowych w fizyce jądrowej, takich jak badanie deformacji stanu podstawowego, oszacowanie wysokości barier na rozszczepienie, wyznaczenie punktów siodłowych, analiza typu ścieżki do rozszczepienia. Druga grupa wyników dotyczy zjawisk dość egzotycznych, mianowicie zachowania się jąder przy bardzo dużych deformacjach osiowych typu *oblate* (kształty spłaszczone), które mogą prowadzić nawet do kształtu torusa. O ile dla stanów podstawowych takie deformacje nie wydają się bardzo interesujące, to uwzględnienie spinu skierowanego prostopadle do płaszczyzny torusa może prowadzić do hipotetycznych toroidalnych izomerów wysokospinowych (THSI).

Podstawowym narzędziem teoretycznym wykorzystanym w pracy jest dobrze ugruntowana teoria średniego pola z efektywnymi oddziaływaniami międzynukleonowymi typu Skyrme'a. Obliczenia numeryczne typu Hartree-Focka-Bogolubowa z różnymi rodzajami

więzów zostały przeprowadzone przy użyciu znanego i rozwijanego od wielu lat programu HFODD.

Pierwsza grupa wyników. Omawiając pierwszą grupę wyników warto zwrócić uwagę na kilka spraw. Po pierwsze, dobrze wybrany zestaw jąder. Izotopy Z=114, Z=120 oraz izotony N=184 są interesujące ze względu na możliwą zwiększoną stabilność, spowodowaną przez efekty powłokowe. Natomiast badany obszar jąder neutronodeficytowych jest ciekawy ze względu na wskazywane w obliczeniach makroskopowo-mikroskopowych duże deformacje *oblate* dla stanów podstawowych, co może prowadzić do zwiększonej stabilności na rozpad α.

Po drugie — całościowy charakter analizy. Sugestie dotyczące większej stabilności niektórych izotopów Z=114 lub 120 i izotonów N=184 były znane z wielu poprzednich prac, ale brak w literaturze tak kompletnej analizy długich szeregów tych izotopów/izotonów w ramach teorii średniego pola. Dla wszystkich rozpatrywanych jąder zostały zbadane energie kształtów nieosiowych w zakresie $\beta \lesssim 0.5$ oraz zbadano wpływ złamania symetrii odbiciowej dla deformacji osiowych. Efekt nieosiowości w wielu przypadkach prowadzi do istotnego zmniejszenia wysokości pierwszych barier na rozszczepienie, natomiast odrzucenie warunku symetrii odbiciowej dla deformacji osiowych umożliwia badanie niesymetrycznych ścieżek do rozszczepienia.

Po trzecie — spośród wielkości obliczonych w pracy najbliższe konfrontacji z doświadczeniem są energie rozpadów α i, ewentualnie, czasy życia ze względu na ten rozpad oszacowane ze wzorów fenomenologicznych. Takiego porównania można obecnie dokonać dla 2 jąder ^{286,288}Fl, p. rys. 3.26 w pracy. Zgodność z doświadczeniem jest, jak na model nie zwierający żadnych parametrów dopasowanych do badanego obszaru, bardzo dobra. Nieco dziwi mnie brak podkreślenia tego faktu w pracy.

Po czwarte — wysokości „statycznych" barier na rozszczepienie mogą dać jakościowe wskazówki co do czasów życia na rozszczepienie i ewentualnej konkurencji z rozpadem α, a wyznaczenie zależności energii od deformacji nieosiowych jest ważnym krokiem wstępnym do ewentualnych rachunków dynamicznych dotyczących tego procesu.

Dla jakościowej analizy ewolucji kształtów równowagi badanych jąder autorka zastosowała także klasyfikację wykorzystującą tzw. symetrie dynamiczne w modelu oddziałujących bozonów (IBM). Choć samo zastosowanie tego formalizmu tym przypadku jest moim zdaniem dość dyskusyjne, to świadczy to dobrze o orientacji doktorantki w zagadnieniach nie związanych bezpośrednio z tematem pracy.

Druga grupa wyników. W pracy dość przekonująco pokazano, że dla bardzo dużej deformacji *oblate* konfiguracja toroidalna staje się korzystniejsza energetycznie od spłaszczonego kształtu jednospójnego, ale zasadniczy wynik tej części pracy to wykazanie, że dla odpowiednio dużych wartości spinu prostopadłego płaszczyzny torusa mogą wystąpić wcale liczne lokalne minima energii, nazywane w pracy toroidalnymi izomerami wysokospinowymi (THSI). Pytanie, czy i w jakich sytuacjach takie stany będzie można kiedykolwiek zaobserwować w doświadczeniu, pozostaje nierozstrzygnięte. Zarówno w pracy, jak i w dołączonych publikacjach, nie podjęto próby odpowiedzi na to pytanie. Ciekawym rezultatem w tej części pracy jest obserwacja, że gęstość w hipotetycznym torusie superciężkim jest prawie równa standardowej gęstości jądrowej, w przeciwieństwie do znacznie niższej gęstości dla hipotetycznych torusów w obszarze lekkich jąder.

Warto dodać, że uzyskanie wyników prezentowanych w pracy wymagało bardzo intensywnych rachunków numerycznych. Dla każdego z 68 nuklidów należało wykonać ra-

chunki samozgodne dla co najmniej 200 punktów w przestrzeni deformacji (wg mojego oszacowania). Ponadto zastosowanie skomplikowanego programu HFODD dla różnych wariantów obliczeń obejmujących kształty nieosiowe, kształty bez symetrii odbiciowej, jak również obliczenia z wymuszonym obrotem, wymagało od autorki dobrej znajomości tego narzędzia teoretycznego zarówno od strony teorii fizycznej, jak i implementacji metod numerycznych.

Stron redakcyjna pracy. Praca zawiera cztery rozdziały, z których pierwszy — Wstęp zawiera m.in. ciekawy, krótki zarys historii badań jąder superciężkich oraz przedstawia obecny stan badań doświadczalnych. Rozdział drugi to zwięzły opis stosowanej metody teoretycznej, natomiast wszystkie otrzymane wyniki są przedstawione w trzecim, najdłuższym, rozdziale. Rozdział czwarty to krótkie podsumowanie. Bibliografia zawiera 138 pozycji, dobrze dobranych do tematu pracy Dołączone są także trzy prace, których współautorką jest doktorantka: jeden artykuł z Phys. Rev. C oraz dwa obszerne materiały konferencyjne z Acta. Phys. Pol. B Suppl. Praca jest bardzo zwięzła — na 109 stronach (bez bibliografii) mieści 12 tabel i 64 rysunki, część z nich zajmujących więcej niż pół strony i ta lakoniczność ma czasem pewne ujemne konsekwencje, o czym poniżej. Prezentacja wyników jest na ogół bardzo dobra, tabele i rysunki są czytelne i starannie wykonane.

Przedstawiając moją ogólną pozytywną ocenę pracy nie mogę nie wspomnieć o kilku zastrzeżeniach czy postulatach, m.in. do strony redakcyjnej pracy.

1. Brak mi komentarza na temat wyboru konkretnego wariantu oddziaływań Skyrme'a tj. SkM*. Argumenty za takim wyborem można zapewne znaleźć w pozycjach z bibliografii, ale należałoby je konkretnie wskazać.

2. Brakuje informacji na temat szczegółów stosowanego oddziaływania *pairing*, na szczęście można je znaleźć w dołączonej pracy z Phys. Rev. C

3. Opis stosowanego modelu teoretycznego jest zbyt zwięzły, np. interesujące byłoby wskazanie, które elementy teorii są ważne dla wybranego oddziaływania SkM*, co jest istotne dla obliczeń „statycznych", a co dla obliczeń z wymuszonym obrotem (cranking). Warto byłoby dokładniej wypisać symetrie zachowane/złamane w poszczególnych typach obliczeń, np. podać numery ścieżek symetrii na rys. 3.2 i 3.3. Przy okazji, treść rysunku 3.1 jest niejasna.

4. Biorąc pod uwagę, że stosowanie programu HFODD wymaga ustalenia wielu parametrów dotyczących zarówno badanych własności fizycznych, jak i stosowanych metod numerycznych sądzę, że warto byłoby zamieścić dodatek z takimi informacjami technicznymi. Interesujące są też dane dotyczące np. liczby iteracji potrzebnych do uzyskania rozwiązania samozgodnego. Dodatek tego typu byłby bardzo przydatny dla osób chcących kontynuować badania w kierunku nakreślonym w pracy.

5. Warto byłoby dodać kilka przykładowych rysunków energii wokół toroidalnych izomerów wysokospinowych w odpowiednio dobranej skali.

Sądzę, że spełnienie powyższych postulatów podniosłoby znacznie walor dydaktyczny pracy.

6. Nieco zagadkowy jest tytuł podrozdziału 3.2. W tekście trudno znaleźć konkretne argumenty za określeniem „jądro podwójnie magiczne" dla nuklidu $^{304}120_{184}$.

Ostatnie drobna uwaga. Moim zdaniem rozdział 3 jest zbyt obszerny i umieszczenie dyskusji zagadnienia dużych deformacji oblate i izomerów THSI w oddzielnym rozdziale ułatwiłoby lekturę pracy.

Praca napisana jest poprawnym językiem, rzadko można znaleźć pewne niezręczności czy brak precyzji. Niektóre terminy są używane w wersji angielskiej, ale trudno z tego robić zarzut autorce, bo w wielu wypadkach brak jest ustalonego słownictwa polskiego. Przychodzi mi na myśl tylko jedna sugestia: może zamiast deformacja *prolate/oblate* mówić czasem o kształtach wydłużonych/spłaszczonych. W tekście występuje wiele skrótów, objaśnionych w oddzielnym wykazie. Kilka drobnych niezręcznych czy niejasnych sformułowań:

1. „obcięcie barier" zamiast poprawniej redukcji czy zmniejszenia, podpis do rys. 3.19.
2. „włączenie wiązania na Q_{20}" zamiast zwolnienia czy wyłączenia więzów, s. 91
3. „Rzut [...] I_z [...] , może przyjmować skwantowane i nietrywialne wartości", s. 83.

Poważniejszym błędem jest użycie sformułowania „kształty elipsoidalne", które można znaleźć w kilku miejscach pracy. Tylko dla małych deformacji typu kwadrupolowego możemy mówić o kształtach elipsoidalnych (i to w przybliżeniu), natomiast dla większych wartości momentu kwadrupolowego kształty te odbiegają daleko od elipsoidy, co widać choćby na wielu rysunkach w recenzowanej pracy.

Podsumowując uważam, że mimo kilku wspomnianych krytycznych uwag, autorka zaprezentowała dobrą znajomość przedmiotu rozprawy, który dotyczy ciekawego i ważnego problemu fizyki jądrowej. Wykazała się dobrym opanowaniem odpowiednich metod teoretycznych i narzędzi obliczeniowych, dzięki czemu uzyskała szereg nowych i oryginalnych wyników. Część z nich została już opublikowana w czasopismach naukowych. W mojej opinii przedstawiona rozprawa doktorska spełnia formalne i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim, w szczególności spełnia warunki wymienione w ustawie o stopniach naukowych. Wnoszę o dopuszczenie p. mgr Amelii Kosior-Romanowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Leszek Próchniak