



Dr hab. Adam Kozela, Prof. IFJ PAN
tel. 12 6628290
NZ24 IFJ PAN

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Pawła Lasko
pt. „Isotopic effects in nuclear multifragmentation:
Studies with the Lattice Gas Model”

Rozprawa doktorska magistra Pawła Lasko została złożona na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu Jagiellońskiego w czerwcu 2024 roku. Jest napisana w języku angielskim, składa się z siedmiu rozdziałów, liczy 111 stron. Jej tematem jest badanie reakcji multifragmentacji, przy pomocy symulacji materii jądrowej z wykorzystaniem dwuskładnikowego Modelu Gazu Sieciowego. Promotorem pracy jest prof. dr hab. Janusz Brzychczyk.

Multifragmentacja jądrowa w zderzeniach ciężkojonowych przy wysokich energiach i niewielkich wartościach parametru zderzenia jest przedmiotem badań od wielu dekad. Olbrzymia złożoność stanów końcowych tych reakcji wymusza szerokie stosowanie metod statystycznych, a do centralnych punktów tych badań należy poszukiwanie efektów świadczących o występowaniu przejścia fazowego – analogu przejścia ciec-z-gaz w konwencjonalnej termodynamice. Koncepcję diagramu fazowego dla materii jądrowej Autor prezentuje w rozdziale drugim pracy.

Na przestrzeni dekad zaproponowano wiele różnych sygnatur przejścia pomiędzy stanami interpretowanymi jako ciecz i gaz jądrowy. Rozdział trzeci pracy magistra Pawła Lasko zaznajamia z nimi czytelnika, podając jednocześnie odpowiednie odnośniki do literatury. Jako ostatnie zaprezentowane jest podejście zaproponowane przez promotora pracy, Profesora Brzychczyka, bazujące na szczególnych własnościach kumulant rozkładów wielkości największego z fragmentów powstałych w reakcji multifragmentacji. Podejście to doskonale sprawdzało się w opisie danych eksperymentalnych oraz w symulacjach prowadzonych w ramach modelu rozwijanego przez promotora „three-dimensional Bond Percolation Model”. Zaprezentowany przez Autora w rozdziale czwartym dwuskładnikowy Model Gazu Sieciowego, stanowi istotne rozszerzenie tamtego modelu, wzbogacając go o efekty kulombowskie oraz o przyczynę związany z asymetrią izospinową tak stanów początkowych jak i końcowych. Dodatkowo bardzo ważną cechą wprowadzoną do konstrukcji Modelu Gazu Sieciowego jest możliwość badania efektów związanych z gęstością materii jądrowej. Ta cecha modelu

doprowadziła Autora do sformułowania niezwykle istotnego wniosku, sprzecznego z wcześniej przyjmowaną hipotezą, że reakcja multifragmentacji zachodzi przy stosunkowo małej gęstości odpowiadającej około jednej trzeciej gęstości niewzbudzonej materii jądrowej. Otrzymane w pracy wyniki są zaskakujące gdyż wskazują na gęstość ponad dwukrotnie większą.

Autor wykazał się dużą starannością w testowaniu poprawnego działania modelu. W Appendiksie, oprócz schematycznego opisu działania algorytmu, zaprezentowane zostało badanie zbieżności ewolucji czasowej symulowanych zdarzeń dla skrajnie różnych stanów początkowych, odpowiadających minimalnej i maksymalnej energii konfiguracji nukleonów. Badanie to pozwoliło określić liczbę kroków wystarczającą do osiągnięcia ekwilibrium oraz tak skonstruować algorytm ewolucji by zagwarantować osiągnięcie stabilnego stanu końcowego. Autor wykazał też, że energia tego stanu, niezależnie od wylosowanej konfiguracji stanu początkowego, osiąga stabilną wartość odpowiednią dla założonej temperatury.

Dużo uwagi Autor poświęcił testom dwóch różnych metod klasteryzacji, z których jedna, Coniglio-Klein, opiera się na zależnym od temperatury, rozkładzie prawdopodobieństwa zerwania wiązania, a druga decyduje o zaliczeniu danego nukleonu do klastra wykorzystując w tym celu jego względną energię w stosunku do rozpatrywanego klastra. Przeprowadzone w rozdziale piątym porównanie wyników różnych charakterystyk rozkładów wielkości klastrów otrzymanych z zastosowaniem obu metod do rozkładów eksperymentalnych ostatecznie pozwoliło wybrać metodę Coniglio-Klein, czyli metodę zastosowaną także uprzednio w modelu Bound Percolation.

Inny test, opisany w rozdziale czwartym, polegał na wykonaniu obliczeń z wyłączeniem opcji dwuskładnikowości, czyli dla jednego składnika. W granicy maksymalnej gęstości, zgodnie z oczekiwaniem, Autor uzyskał wyniki identyczne do prekursora Modelu Gazu Sieciowego - modelu Bound Percolation. Podobnie zgodne z oczekiwaniem okazało się porównanie wyników obliczeń dla Modelu z włączonym i wyłączonym oddziaływaniem kulombowskim.

Oczywiście najistotniejszym testem Modelu Gazu Sieciowego było zastosowanie go do opisu danych eksperymentalnych. Do tego celu zostały użyte dane z eksperymentu ALADIN S114, przeprowadzonego w GSI, już wcześniej z dużym powodzeniem opisane przez Bound Percolation Model. Do analizy Autor zastosował wprowadzoną przez swojego promotora sygnaturę przejścia fazowego opartą o punkty charakterystyczne kumulant 3- i 4-rzędu rozkładów wielkości fragmentów. Zdecydowanie najgorszą zgodność z eksperymentem Autor dostał dla obliczeń wykonanych z gęstością 0.3 normalnej gęstości jądrowej. Dla większych gęstości opis był już zupełnie poprawny, przy czym najlepszą zgodność z eksperymentem w szerokiej gamie badanych obserwacji Autor wykazał dla największej badanej gęstości: 0.9 gęstości jądrowej. Ten wynik, choć nawiązuje do modelu Bound Percolation, który odpowiada maksymalnej gęstości jądrowej, jest dość kontrowersyjny gdyż wiele innych szeroko stosowanych w tej dziedzinie modeli statystycznych do prawidłowego opisu danych eksperymentalnych wymaga gęstości poniżej 0.5 normalnej gęstości jądrowej.

W rozdziale szóstym Autor zastosował dwuskładnikowy Model Gazu Sieciowego do opisu danych eksperymentu z ALADIN S254, w którym badano efekty izotopowe z

wykorzystaniem neutrononadmiarowego izotopu ^{124}Sn oraz izotopów ^{108}Sn , ^{124}La ubogich w neutrony. Wyniki przeprowadzonej analizy ponownie potwierdziły preferowaną dużą gęstość materii jądrowej dla wyliczonego punktu pseudokrytycznego. Okazało się, że otrzymana temperatura tego punktu słabo zależy od składu izotopowego i jest zgodna z temperaturą wyznaczoną eksperymentalnie.

Badając rozkłady izotopowe produktów reakcji Autor natknął się na poważne ograniczenia swojego modelu, który przecież nie zawiera w sobie efektów tak istotnych dla budowy jąder jak pairing, czy struktura powłokowa. Ograniczenia te doprowadziły do produkcji nieistniejących izotopów, czy niemożności opisanego staggeringu dla jąder o liczbie nukleonów różniącej się o jeden. Poza tymi mankamentami Model był w stanie zaskakująco dobrze opisać eksperymentalne rozkłady izotopowe. Udało mu się również zreprodukować tak zwany izoscaling, czyli niezwykle charakterystyczne rozkłady wartości parametru R_{12} , stosunku krotności izotopów dla różnych wartości liczby protonów i neutronów otrzymanych w dwóch podobnych reakcjach, wykazujących asymetrię izospinową kanału wejściowego.

Z obowiązku recenzenta czytając dysertację magistra Lasko starałem się zbierać uwagi krytyczne. W rozdziale szóstym w części dotyczącej isoscalingu komentarz Autora o niedoszacowaniu eksperymentalnej wartości parametru α nie współgra z przytoczoną na stronie 81 wartością tego parametru, 0.34, co jest chyba błędem drukarskim, bo rysunek 65 przedstawia już sytuację zgodną z twierdzeniem Autora.

Rysunek 28 przedstawia wysymulowany w Modelu Gazu Sieciowego oraz otrzymany w eksperymencie ALADIN dwuwymiarowy rozkład wielkości największego fragmentu względem fragmentu drugiego co do wielkości. W rozkładzie wysymulowanym pojawia się bardzo wyraźna składowa od rozszczepienia, ledwie widoczna w danych eksperymentalnych. Autor zauważa oczywiście tę różnicę, usuwa zdarzenia odpowiadające rozszczepieniu z obu rozkładów aby poprawić działanie sygnatury punktu pseudokrytycznego, ale komentarz co do natury i pochodzenia tej różnicy jest już dość lakoniczny.

Lektura pracy nasunęła mi dodatkowe pytania, na które nie znalazłem w niej odpowiedzi. Według mnie ciekawe byłoby zbadać wpływ innych rodzajów siatki na otrzymane wyniki. Naturalnym wyborem byłaby sieć oparta o czworościan foremny, charakteryzująca się gęstszym upakowaniem składników. Byłoby interesujące dowiedzieć się co Autor sądzi o takim porównaniu.

Inne pytanie muszę zadać niejako z obowiązku. W swojej pracy dużo uwagi poświęcam tropieniu efektów oddziaływań 3-nukleonowych. Bez uwzględnienia ich wpływu trudno otrzymać poprawne wartości dla najprostszych obserwabli w układach kilkunukleonowych, a wpływ ten pozostaje istotny także dla cięższych systemów. Czy Autor myślał o zaimplementowaniu takich oddziaływań w swoim modelu, bądź słyszał o próbach ich uwzględnienia w modelach podobnych?

Moje ogólne odczucie po przeczytaniu tej pracy jest bardzo pozytywne. Strona graficzna nie pozostawia wiele do życzenia – parę rysunków mogłoby być większych. Zainteresowany czytelnik z łatwością może pogłębiać studia korzystając z bogatej bibliografii. Praca napisana jest językiem zrozumiałym z niewielką ilością błędów.

Reasumując, przedstawiona mi do recenzji praca w sposób istotny wzbogaca nasze rozumienie reakcji ciężkojonowych zachodzących przy dużych energiach i małych parametrach zderzenia, prowadzących do multifragmentacji jądrowej. Jej zakres, w mojej ocenie, w zupełności wyczerpuje zwyczajowo akceptowalny zakres prac doktorskich. Nie mam żadnych wątpliwości, że magister Paweł Lasko opanował i osiągnął dużą biegłość w posługiwaniu się metodami statystycznymi wykorzystywanymi do opisu tych bardzo złożonych procesów, jak również warsztatem programistycznym koniecznym do wykonania i analizy wyników wielkoskalowych symulacji komputerowych. Osiągnął także wszystkie zamierzone cele, a wyniki zaprezentował w sposób bardzo przekonujący. Analizując działanie skonstruowanego przez siebie Modelu Gazu Sieciowego wskazał się dużą dbałością o szczegóły konfrontując go z wynikami eksperymentów oraz z innymi dostępnymi na rynku modelami. Biorąc pod uwagę także znaczenie naukowe osiągniętych wyników oceniam, że praca jest bardzo wartościowa, a Autor spełnia kryteria stawiane kandydatom w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2020r. poz 85) oraz wnioskuję o dopuszczenie go do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Kraków, 11.08.2024

Adam Kozelc