



## Ocena rozprawy doktorskiej pani mgr Agnieszki Góreckiej

Praca doktorska pani mgr Agnieszki Góreckiej poświęcona jest analizie wybranych problemów dynamiki kondensatu Bosego-Einsteina w niezerowej temperaturze. W pierwszej części rozprawy Autorka naszkicowuje, tytułem wprowadzenia, sposób eksperymentalnego otrzymania kondensatu i wspomina niektóre eksperymenty na nim przeprowadzone. Kolejny rozdział poświęcony jest omówieniu teoretycznych metod opisu kondensatu ze szczególnym uwzględnieniem tzw. metody pól klasycznych. Tę metodę Autorka stosuje w kolejnych rozdziałach do modelowania dwóch znanych eksperymentów z grupy Ketterlego, tzw. destylacji kondensatu i interferencji dwóch kondensatów.

Wspomniana wyżej metoda pól klasycznych została zaproponowana na początku obecnego tysiąclecia przez promotora obecnej rozprawy i jego współpracowników. Od tego czasu była ona intensywnie rozwijana i stosowana do opisu szeregu zjawisk związanych z zachowaniem kondensatu w skończonej temperaturze. Omówienie metody przedstawione przez Autorkę w rozdziale 3 jest przystępne i intuicyjne, co jest niewątpliwą zaletą. Z drugiej strony nadmierna skrótowość opisu czasami prowadzi do ogólników. Przykładowo cytując ze str.26 "W przypadku, gdy układ nie ma takiej symetrii powinno się korzystać ze stanów własnych odpowiedniej macierzy gęstości. Często wyliczenie tych stanów jest skomplikowane. Pokazano, że dobre wyniki daje obliczenia prowadzone w bazie składającej się z pewnej liczby fal płaskich..." I tu mam pytania a/ Dlaczego jest skomplikowane i kiedy? b/ Kto, gdzie i kiedy pokazał? c/ Z jakiej liczby fal płaskich, a raczej od czego ta liczba zależy? Aż prosi się tu o szersze wyjaśnienie i/lub odsyłacze literaturowe. Na zakończenie części wprowadzającej Autorka wspomina inne podejścia do opisu kondensatu w niezerowej temperaturze. Brak mi trochę porównania zalet i wad różnych metod.

Najważniejszą część rozprawy stanowią oczywiście rozdziały opisujące symulację numeryczną problemów, w których potencjał pułapujący atomy zależy w sposób jawny od czasu. Jest to istotnie nowe zastosowanie metody pól klasycznych. Trudno mi się pogodzić z twierdzeniem Autorki, że dotychczasowe zastosowania dotyczyły jedynie

przypadków stacjonarnych (takimi na pewno nie są dyssypacyjna dynamika wirów czy zanik wiru o ładunku większym od jedności opisywane w przeglądowym artykule [26]) - ale nie zmienia to faktu, że prezentowana analiza dotyczy nietrywialnych problemów z jawną silną zależnością od czasu parametrów układu. W tym kontekście zatem badania przedstawione w recenzowanej pracy są istotnie nowatorskie.

Główny IV rozdział pracy zawiera model destylacji kondensatu. Znane doświadczenie Ketterlego polegało na modyfikacji potencjału, w którym utrzymywany jest kondensat, poprzez dodanie nowego minimum, oddzielonego od miejsca zlokalizowania kondensatu wysoką barierą. Pomimo dobrania tak parametrów układu by tunelowanie do nowego minimum było zanedbywalne, atomy po pewnym czasie poplują nowe minimum, co zostało zinterpretowane jako destylacja - kondensat w oryginalnym minimum paruje, atomy termiczne przedostają się nad barierą w okolicy nowego globalnego minimum i tam kondensują.

Ten ciekawy dynamiczny efekt doczekał się teoretycznego opisu dopiero w pracy p. Góreckiej. Zastosowany został uproszczony jednowymiarowy model. Nie opisując szczegółów pracy muszę podkreślić dogłębną fizyczną analizę dynamiki problemu, która pozwoliła Autorce pokazać bardzo ciekawy i trochę nieoczekiwany charakter obsadzania nowego minimum. Po stosunkowo długim czasie, w którym pierwsze atomy, po przejściu nad barierą potencjału, schładzają się do nowego makroskopowo obsadzanego minimum następuje gwałtowny wzrost obsadzenia kondensatu w tym nowym minimum. W przekonujący sposób zostaje pokazane, że ten proces ma spójny, kolektywny charakter. Dopiero w dalszej kolejności następuje termalizacja w nowej studni potencjału związana ze zmniejszeniem obsadzenia kondensatu kosztem wytworzenia chmury termicznej. Warto podkreślić, że zaobserwowane w symulacjach zachowanie jest istotnie różne od niespójnego typowego procesu destylacji sugerowanego w oryginalnej pracy doświadczalnej. Otrzymane rezultaty zostały opublikowane w *Physical Review A*.

Przeprowadzona analiza na pewno nie jest doskonała. Najwięcej wątpliwości można mieć do sposobu wyboru klasycznych modów. Uznane wcześniejsze zastosowania metody sugerują, że obsadzenia ich powinny być rzędu jedności. W dynamicznym problemie rozpatrywanym przez Autorkę wraz z ewolucją czasową populacji podlega coraz więcej modów. Stosowanie typowego kryterium obsadzeń modów dla końcowych etapów ewolucji prowadzi do sytuacji, w której Autorka jest zmuszona klasycznie traktować mody o początkowym obsadzeniu rzędu  $10^{-4}$ . Populowanie tak obsadzonych modów jest zdominowane przez procesy spontaniczne, pominięte w analizie. Podobnie ograniczenie problemu do jednego tylko wymiaru i pominięcie niskich energetycznie wzbudzeń w kierunku prostopadłym do linii wyznaczanej przez minima potencjału zmienia znacznie skale cza-

sowe problemu i ogranicza stosowalność analizowanego modelu do opisu eksperymentu.

Z drugiej jednak strony należy podkreślić, że Pani Górecka doskonale zdaje sobie sprawę z ograniczeń stosowanego modelu i sama je wypunktowuje w rozprawie. Świadczy to o Jej dojrzałości i uczciwości badawczej.

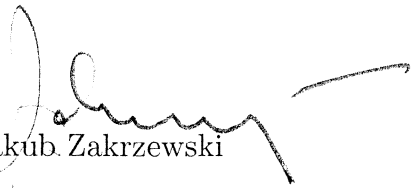
Drugim problemem zaatakowanym przez p. Górecką metodą pól klasycznych jest interferencja kondensatów. Cechą wyróżniającą podejście Autorki jest uwzględnienie oddziaływania między atomami w procesie łączenia kondensatów. Podobnie jak w poprzednim rozdziale analiza jest stymulowana eksperymentalnymi rezultatami, które pokazały, że proces łączenia kondensatów może zależeć od ich wzajemnej fazy w sytuacji gdy nie jest on ani adiabatyczny ani bardzo szybki. Otrzymane rezultaty są jakościowo zgodne z wynikami eksperymentalnymi. W tym rozdziale Autorka stosowała dwuwymiarowy model, który pozwalał zachować do pewnego stopnia geometrię układu - kondensaty łączono wzdłuż krótszej osi kondensatów. Nasuwa się od razu pytanie - dlaczego podobnego, dwuwymiarowego modelu nie stosowano do omawianego wcześniej problemu destylacji?

Podstawową moją wątpliwość budzi przygotowanie stanu początkowego. Z kwantowych rozważań w  $T = 0$  można wysnuć wniosek, że adiabatyczny podział kondensatu prowadzi do dwóch odrębnych kondensatów, każdy o określonej liczbie cząstek. Interpretując to w języku "modów klasycznych" powinny występować dwa mody o zbliżonym dużym obsadzeniu, jeden zlokalizowany w lewej, drugi w prawej studni potencjału. W  $T > 0$  dochodzą znacznie słabiej obsadzone mody termiczne ale te dwa mody powinny dominować. Czy tak rzeczywiście jest w analizowanym modelu? Autorka pisze, str. 57, że liczba atomów skondensowanych wynosiła około 90% - ale to sugeruje *jeden* mod makroskopowy dla danego stanu początkowego. A to z kolei by świadczyło o nadmiernych korelacjach fazowych pomiędzy "dwoma" kondensatami. Z technicznego punktu widzenia nie jest dla mnie jasne dlaczego Autorka przygotowuje 11 stanów początkowych, choć nie tłumaczy jak je wykorzystuje. Nie jest też dla mnie jasne (str.57) dlaczego rozmiary siatki w kierunkach  $x$  i  $y$  różnią się nieznacznie - mogłyby być równe choć naiwnie sędzę, że rozmiar siatki wzdłuż długiej osi kondensatu mógłby być znacznie większy bez szkody dla obliczeń. Skąd biorą się oscylacje widoczne na Rys. 5.4, 5.6 czy 5.7? Dlaczego przy powolnym łączeniu kondensatów początkowa frakcja kondensatowa zmniejsza się znacznie bardziej niż dla czasów pośrednich? To tylko kilka z szeregu pytań jakie można postawić do tej części rozprawy, która sprawia wrażenie zdecydowanie niedopracowanej.

Podsumowując, po przeczytaniu rozprawy mam bardzo mieszane uczucia. Z jednej strony pani mgr Agnieszka Górecka zastosowała z sukcesem metodę pól klasycznych do

nowych problemów inspirowanych niedawnymi wynikami eksperymentalnymi. Analiza procesu destylacji (choć prowadzona w bardzo, może przesadnie uproszczonym modelu) jest głęboka, intuicyjna i pokazuje duże zrozumienie fizyki problemu. Otrzymane rezultaty są ciekawe i mogą (i mam nadzieję, że będą) stymulować nowe eksperymenty. Z drugiej strony praca sprawia wrażenie niekompletnej i pisanej w pośpiechu. Szczególnie dotyczy to łączenia dwóch kondensatów gdzie naszkicowano jedynie osiągnięte rezultaty numeryczne. Nie ułatwia czytania duża liczba literówek, stosowanie czasami niestandardowych skrótów na oznaczenie np. sekundy (rozdział czwarty). Zrozumienie tekstu utrudniają niektóre uproszczenia. I tak występująca w równaniu Grossa-Pitajewskiego (3.34) funkcja falowa  $\Psi$  traci jawną zależność od czasu w kolejnym równaniu (3.35) definiującym jednocząstkową macierz gęstości. To, w połączeniu z (3.37) sugeruje niezależność od czasu diagonalizujących macierz gęstości modów. Konfuzji dodaje fakt, że definiowana macierz gęstości (poprzez proces uśrednienia po małym przedziale czasu) powstaje we wzorze (3.36) z jakiejś innej funkcji  $\psi_i(r, t)$ . Mam nadzieję, że należy utożsamić "małe"  $\psi_i$  z funkcją falową  $\Psi$ .

Przy tych wszystkich niedociągnięciach stwierdzam, że rozprawa doktorska pani mgr Agnieszki Góreckiej spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie pani Góreckiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Jakub Zakrzewski