

Dr hab. Michał Matuszewski  
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk  
Al. Lotników 32/46, Warszawa  
[mmatu@ifpan.edu.pl](mailto:mmatu@ifpan.edu.pl)  
tel. 22 116 3224

Warszawa, 26.08.2016

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Arkadiusza Kosiora "Manipulacja ultrazimną materią kwantową: od układów z polem cechowania po lokalizację fal materii"**

W recenzowanej rozprawie autor przedstawia wyniki badań teoretycznych nad układami ultrazimnych gazów atomowych w potrząsanych sieciach optycznych. Technika ta, stosowana od niedawna doświadczalnie, pozwala na manipulację stałymi sprzężenia pomiędzy poszczególnymi oczkami sieci. Dzięki temu możliwe staje się zaobserwowanie nowych stanów kwantowych i ciekawych zjawisk fizycznych, co jest tematem zainteresowania rozprawy.

Rozprawa liczy 90 stron, podzielona jest na sześć rozdziałów i dodatki. Pierwszy rozdział stanowi krótki wstęp, zawierający motywację badań pod kątem prowadzenia symulacji kwantowych, oraz wprowadzenie do metody potrząsania siecią optyczną. Kolejne cztery rozdziały zawierają streszczenie najważniejszych wyników czterech artykułów naukowych stanowiących podstawę rozprawy. Szósty rozdział to podsumowanie rozprawy, a następnie mamy bibliografię, oświadczenia współautorów prac oraz załączone wspomniane cztery prace naukowe.

Trzy prace zostały opublikowane wspólnie z promotorem doktoranta w bardzo dobrych czasopismach naukowych o wysokim Impact Factor (po jednej w Physical Review Letters, Physical Review A i Europhysics Letters) a czwarta jest pracą zbiorową czterech autorów w Physical Review A. We wszystkich tych artykułach doktorant występuje na pierwszym miejsc listy autorów. Z załączonych oświadczeń współautorów wynika, że wkład naukowy doktoranta w każdym przypadku był przeważający.

Tematyka rozprawy wpisuje się w nurt najnowszych osiągnięć w dziedzinie fizyki materii skondensowanej i ultrazimnych gazów. W mojej ocenie uzyskane wyniki są bardzo interesujące i oryginalne, i stanowią istotny wkład w rozwój dziedziny. Drugi rozdział przedstawia propozycję symulacji klasycznego modelu XY na trówymiarowej sieci trójkątnej zawierającej kondensat ultrazimnych gazów. Propozycja polega na utożsamieniu fazy funkcji falowej kondensatu w danym oczku sieci z kierunkiem wektora modelu XY. W szczególności przedstawiono analizę anizotropowego modelu, w którym tunelowania między oczkami zostały zmodyfikowane za pomocą wspomnianej techniki potrząsania siecią. Uzyskany diagram fazowy wykazał, że przy odpowiednim doborze stałych sprzężenia można uzyskać frustrację w układzie, oraz szczególne formy stanów podstawowych. Następnie przeanalizowano stabilność rozwiązań stacjonarnych w obecności oddziaływań (w szczególności stanu o kwazipędzie  $k = 0$ ) za pomocą metody linearyzacji.

*Mef*

Dodatkowo pokazano, że łamanie uogólnionej symetrii odbicia w czasie nie jest warunkiem koniecznym ani dostatecznym dla uzyskania zespolonych sprzężeń w modelu Bosego-Hubbarda.

Rozdział trzeci zawiera opis metody uzyskania nieabelowych pól cechowania za pomocą oryginalnej i ciekawej metody. Propozycje uzyskania tego typu pól zazwyczaj wymagają sprzężenia z wewnętrznymi stopniami swobody (spinem), natomiast metoda zaproponowana w rozprawie bazuje na jednoskładnikowym gazie w odpowiednio skonstruowanej sieci, będącej odpowiednią superpozycją kilku fal laserowych, także sieci potrząsanych. Pozwala to na uzyskanie imitacji sieci atomów ze spinem, i w konsekwencji skonstruowanie pól nieabelowych. W przypadku gazu fermionów pozwala to także na pominięcie niechcianego wpływu oddziaływań międzyatomowych, co niewątpliwie jest istotne z punktu widzenia eksperymentów. Nietrywialne własności układu są zademonstrowane poprzez obliczenie pętli Wilsona na podstawowej plakietce, widma energetycznego mającego cechy motyla Hofstadtera i niezerowego przewodnictwa stanów brzegowych.

W rozdziale czwartym przedstawiono metodę mikroskopii fazy kondensatu, czyli odzyskiwania amplitudy i fazy funkcji falowej na podstawie obrazów gęstości w przestrzeni położeń i przestrzeni pędów. Według mojej wiedzy jest to pierwsza tego typu metoda w kontekście ultrazimnych gazów. Procedura polega na zastosowaniu kolejnych przybliżeń, gdzie w każdym kroku dostosowywany jest moduł funkcji falowej kolejno w przestrzeni rzeczywistej i przestrzeni pędów. Na kilku przykładach pokazano, że metoda ta jest zbieżna i pozwala na rekonstrukcję fazy, co może pozwolić na zobrazowanie domen w przypadku układu z podwójnie zdegenerowanym stanem podstawowym. Możliwość odzyskania fazy za pomocą tej metody jest moim zdaniem bardzo interesującym i nietrywialnym rezultatem. Zaprezentowana realizacja tego algorytmu na podstawie danych doświadczalnych nie jest jednak w pełni przekonująca, co nie jest spowodowane słabością metody, ale ograniczoną zdolnością rozdzielczą, znacznie mniejszą od założonej teoretycznie na rysunku 4.2.

W rozdziale piątym opisano wpływ korelacji na lokalizację Andersona w modelu Dual Random Dimer Model (DRDM), w szczególności korelacji spowodowanych oddziaływaniami z dalszymi sąsiadami. Obecność korelacji w nieporządku może prowadzić do wystąpienia rezonansowych energii, dla których istnieją stany zdelokalizowane. W dyskutowanym modelu DRDM mamy do czynienia z nieporządkiem w stałych sprzężenia (niediagonalnym), co również prowadzi do występowania rezonansowych energii, o ile „defekty” nie znajdują się obok siebie. W tej części pracy pokazano numerycznie, że wprowadzenie oddziaływań pomiędzy cząstkami które nie sąsiadują bezpośrednio prowadzi, nawet w przypadku bardzo słabych oddziaływań, do osłabienia bądź zaniku rezonansów. Jest to ciekawy wynik obrazujący że wyidealizowany model może w istocie posiadać zupełnie inne własności niż model nieco bardziej realistyczny.

Po omówieniu głównych wyników przejdę do bardziej szczegółowych uwag. W mojej ocenie w kilku

Mont

aspektach brakuje w rozprawie odpowiedniego wprowadzenia teoretycznego. Nie chodzi tutaj o małą objętość pierwszego rozdziału, ponieważ w każdym z następnych rozdziałów wyodrębniono osobne wprowadzenie, ale o brak omówienia tak istotnych dla rozprawy zagadnień jak realizacja fizyczna ultrazimnych gazów, kondensacja Bosego-Einsteina, czy metoda uzyskiwania sieci optycznych za pomocą oddziaływania światło-materia. Brakuje także omówienia metod, jakie stosował doktorant w celu uzyskania wyników numerycznych.

Założenia do rozumowania przedstawionego w rozdziale wstępnym nie są w pełni dobrze zdefiniowane. W rozprawie posłużono się warunkiem szybko zmiennej częstości drgań sieci w formie  $\omega \gg 1$ , który jest nieprawidłowy, ponieważ częstość nie jest wielkością bezwymiarową. W pracy PRA 87, 023602 (2013) warunek ten jest sformułowany w nieco inny sposób, tj. „we assume now a high frequency regime, when  $\hbar\omega$  is considerably larger than all energy scales in the Hamiltonian”. Warunek ten jest poprawny, ale nie zadowalający, ponieważ w tym przypadku małe w porównaniu z  $\hbar$  będą także ekstremalne wartości stałych  $W_{ij}(t)$  w równaniu (1.12), co nie pozwala na uzyskanie stałych sprzężenia  $J_{ij}^{\text{eff}}$  znacząco różnych od  $J_{ij}$ . Tymczasem w pracy podstawowym założeniem jest możliwość uzyskania sprzężeń nawet ujemnych. Pojawia się zatem pytanie, czy jest to możliwe przy jednoczesnym zaniedbaniu sprzężeń pomiędzy różnymi blokami  $V_{m,m}$ ? Eksperyment wskazuje, że jest to możliwe, jednak warunki na to pozwalające powinny zostać bardziej precyzyjnie sformułowane.

W rozdziale 4 autor twierdzi, że w przecięciu funkcji które mają odpowiedni moduł w przestrzeni rzeczywistej i odwrotnej występują tylko rozwiązania równoważne, uzyskane przez odbicie współrzędnych i zamianę fazy. Twierdzenie to nie zostało poparte argumentacją, a jest o tyle istotne, że istnienie takich funkcji może prowadzić do błędnego odtworzenia funkcji falowej.

W rozdziale 5 brakuje wyprowadzenia wzorów (5.4), a przekształcenia w rozdziale (5.2) zawierają kilka drobnych błędów. Nie jest jasne, dlaczego autor skupił się na wyprowadzeniu energii rezonansowych w modelu N-merów, a nie modelu DRDM, który jest przedmiotem tej pracy.

Powyższe szczegółowe uwagi nie obniżają w sposób znaczący wartości naukowej pracy. Pod względem edytorskim i płynności wywodu praca prezentuje się bardzo dobrze. Podsumowując, rozprawa doktorska mgr. Kosiora stanowi, moim zdaniem, istotny wkład w rozwój dziedziny i świadczy o jego wysokich umiejętnościach badawczych. W mojej ocenie spełnia ona formalne i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim, wnoszę więc o dopuszczenie jej do publicznej obrony. Ze względu na wysoki poziom naukowy, stawiam również wniosek o wyróżnienie tej pracy.

Michał Matuszewski

