

prof. dr hab. Mirosław Brewczyk
Wydział Fizyki
Uniwersytet w Białymstoku
Białystok

Białystok, 29 sierpnia 2016 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej pana mgra Arkadiusza Kosiora pt. „Manipulacja ultrazimną materią kwantową: od układów z polem cechowania po lokalizację fal materii”

Praca doktorska pana mgra Arkadiusza Kosiora zawiera wyniki badań wykonanych przez mgra A. Kosiora pod kierunkiem prof. dr hab. Krzysztofa Sachy. Napisana jest w języku polskim, składa się ze streszczenia (również w języku angielskim), pięciu rozdziałów oraz podsumowania. Całość liczy 90 stron. Spis literatury obejmuje 86 pozycji. Do pracy dołączone zostały kserokopie oświadczeń o współautorstwie oraz kserokopie artykułów, które stanowią podstawę rozprawy doktorskiej. Rozprawa oparta jest na wynikach zawartych w czterech artykułach opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych. We wszystkich mgr A. Kosior jest pierwszym autorem.

Tematem rozprawy doktorskiej mgra A. Kosiora są kwantowe symulatory działające w oparciu o ultra zimne gazy atomowe. Sama idea badania układów kwantowych polegająca na wykorzystaniu innych, „prostszych” układów została sformułowana na początku lat osiemdziesiątych przez R. Feynmana. Owe „prostsze” układy dostępne są już od około dwudziestu lat. Zimne gazy atomowe spulapkowane w sieci optycznej doskonale nadają się do badania zjawisk zachodzących w periodycznych potencjałach, w szczególności zjawisk fizyki materii skondensowanej. Chodzi o to, że w takich układach możemy łatwo zmieniać parametry charakteryzujące zarówno sieć optyczną (jej głębokość i geometrię) jak i oddziaływania między atomami. Co więcej, atomami wykorzystywanymi w symulatorze mogą być fermiony jak też i bozony. To oznacza, że możemy badać układy nieosiągalne w eksperymentalnej fizyce fazy skondensowanej.

W poszczególnych rozdziałach rozprawy doktorskiej mgr A. Kosior dyskutuje odmienne zagadnienia, każdy rozdział skojarzony jest z innym artykułem. I tak badane jest zjawisko magnetyzmu w trójwymiarowej sieci trójkątnej, analizowany jest pomysł symulacji nieabelowych pól cechowania z wykorzystaniem tylko jednoskładnikowego gazu, sformułowany został przepis pozwalający zrekonstruować fazę funkcji falowej kondensatu w dwuwymiarowej trójkątnej sieci oraz dyskutowana jest rola korelacji w binarnym nieporządku diagonalnym i pozadiagonalnym. We wszystkich tych przypadkach kluczową rolę odgrywa możliwość zmiany parametrów badanego układu poprzez wprowadzenie odpowiednio szybkiego, periodycznego w czasie zaburzenia. Podstawy formalizmu teorii Floqueta umożliwiającej opis układu w oparciu o efektywne, niezależne od czasu parametry podane zostały w rozdziale pierwszym.

Inspiracją dla rozważań przeprowadzonych w rozdziale drugim było niewątpliwie doświadczenie wykonane w grupie K. Sengstocka na Uniwersytecie w Hamburgu. W eksperymencie badano własności układu opisanego uproszczoną wersją modelu Heisenberga zwaną klasycznym modelem XY, wykorzystując do tego celu kondensat atomów

rubidu 87 uwięzionych w dwuwymiarowej trójkątnej sieci optycznej. Model XY opisuje układ klasycznych dwuwymiarowych spinów sztywno zaczepionych w oczkach sieci o dowolnej geometrii. W eksperymencie w każdym oczku sieci atomy mają określoną fazę i właśnie tę fazę utożsamiamy z klasycznym wektorem spinu z modelu XY. Potrząsając siecią optyczną w odpowiedni sposób można zmieniać niezależnie stałe sprzężenia występujące w modelu XY. Dostępny zakres zmian wartości tych parametrów jest na tyle duży, że można nawet odwrócić ich znak co pozwala badać uporządkowanie nie tylko ferromagnetyczne ale również antyferromagnetyczne jak też i zjawisko frustracji magnetycznej. Zmieniając stałe sprzężenia jesteśmy w stanie badać możliwe przejścia fazowe a jest co badać bo diagram fazowy układu spinów w dwuwymiarowej sieci trójkątnej jest niezwykle bogaty.

W rozdziale drugim mgr A. Kosior analizuje bardziej złożony układ jakim są spiny w trójwymiarowej sieci trójkątnej, zakładając przy tym, że wszystkie stałe sprzężenia mogą być zmieniane niezależnie. Diagram fazowy jest w tym przypadku oczywiście jeszcze bogatszy. Jak przyznaje sam Autor, wyniki te stanowiły podstawę jego pracy magisterskiej, a w rozprawie doktorskiej zostały streszczone w podrozdziale 2.1. W dalszej części rozdziału 2 dyskutowana jest stabilność rozwiązań stacjonarnych metodą Bogoliubova-de Gennesa. Stabilność ta ma znaczenie przy badaniu przejść fazowych. Według mnie jednak, analizę stabilności również można znaleźć w pracy magisterskiej Autora. Istotnie nowe wyniki dotyczą raczej badania relacji między łamaniem symetrii odbicia w czasie a zespolonością amplitud tunelowania występujących w efektywnym modelu opisującym układ.

Problem rozważany przez mgra A. Kosiora w rozdziale czwartym również wiąże się z eksperymentem przeprowadzonym w Hamburgu. W eksperymencie tym w szczególności badano przejście fazowe z fazy romboidalnej do fazy spiralnej, dla której stan podstawowy jest podwójnie zdegenerowany. Degenerację tę potwierdza mierzony rozkład w przestrzeni pędów. W większości przypadków układ wybiera jedną z dwóch możliwych konfiguracji spinów. Jednakże w około 10% przypadków dzieje się tak, że różne części układu „wybierają” jeden z dwóch zdegenerowanych stanów. Autorzy eksperymentu sugerują powstawanie domen przestrzennych w układzie. Mgr A. Kosior podjął się zadania rekonstrukcji domen w oparciu o algorytm odzyskiwania fazy funkcji falowej. Elementy tego algorytmu opisane są w podrozdziale 4.2. Zakładamy znajomość zarówno rozkładu w przestrzeni położeń jak i rozkładu w przestrzeni pędów. Następnie postępujemy zgodnie z opisaną procedurą iteracyjną, w wyniku której znajdujemy szukaną funkcję falową, w szczególności jej fazę. Nie znajduję jednak żadnej informacji dotyczącej zbieżności tej iteracji. Autor odsyła czytelnika do materiałów uzupełniających do artykułu [59], których jednak nie dołącza do rozprawy. W podrozdziale 4.3 metoda odzyskiwania domen przestrzennych zostaje przetestowana dla przykładowego stanu złożonego z kilku domen. Pod koniec tego rozdziału metoda została zastosowana do rzeczywistych danych doświadczalnych uzyskanych od grupy z Uniwersytetu w Hamburgu. W szczególności rys. 4.3 (lewy panel) pokazuje przykładowy rozkład w przestrzeni pędów uzyskany metodą czasu przelotu. Nie jest dla mnie do końca jasne jakie założenia zostały uczynione w stosunku do rozkładu w przestrzeni położeń, który jest również wykorzystywany w algorytmie.

Możliwości zastosowania ultra zimnych gazów atomowych jako kwantowych symulatorów ogromnie wzrosły z chwilą, gdy fizycy pokonali ograniczenia będące konsekwencją tego, że atomy nie są cząstkami naładowanymi. Nauczono się, wykorzystując światło laserowe, wytwarzać sztuczne pole magnetyczne działające na neutralne atomy siłą analogiczną do siły Lorentza działającej na naładowane cząstki poruszające się w polu magnetycznym. To otwiera możliwości badania jakościowo nowych zjawisk takich jak np.

kwantowy efekt Halla. W eksperymencie przeprowadzonym w grupie I. Spielmana z NIST-u i Uniwersytetu Maryland w 2009 roku wytworzono po raz pierwszy sztuczne pole magnetyczne w kondensacie Bosego-Einsteina atomów rubidu. W konsekwencji obserwowano powstanie kwantowych wirów w układzie.

Sztuczne pola cechowania to bardzo modny i intensywnie rozwijany kierunek badań. W naturalny sposób w kolejnym kroku zainteresowania fizyków skupiły się na możliwości wytwarzania sztucznych nieabelowych pól cechowania w układach zimnych gazów. Nieabelowe pola cechowania stwarzają dalsze możliwości, mogą okazać się istotne np. z punktu widzenia budowy kwantowego komputera. Podano szereg propozycji realizacji nieabelowych pól cechowania w przypadku atomów w trójwymiarowej pułapce jak też i atomów uwięzionych w sieci optycznej. We wszystkich tych schematach istotne jest to, że atom posiada wewnętrzne stopnie swobody (spin, pseudospin, itp.), z którymi sprzęga się ruch atomu. W rozdziale trzecim mgr A. Kosior przedstawia propozycję symulacji nieabelowych pól cechowania w gazie atomów w sieci optycznej bez potrzeby wykorzystywania wewnętrznych stopni swobody atomów. Jedną z głównych zalet zaproponowanej metody jest niewątpliwie to, że nie musimy eliminować oddziaływania między atomami z różnych frakcji (gdybyśmy np. chcieli symulować nieabelowy odpowiednik kwantowego efektu Halla) bo pracujemy tylko z jedną frakcją atomów. Propozycję mgra A. Kosiora uważam za bardzo ciekawą. Z propozycją tą wiąże się jednak konieczność odpowiedniego kontrolowania procesu tunelowania atomów. Szczegóły tej kontroli można znaleźć w artykule [53] (niestety, nie w rozprawie), w którym rozpatrywany jest przypadek dwuwymiarowej kwadratowej sieci Bravais'go. Niezbędna jest niezależna kontrola procesu tunelowania w różnych kierunkach bazowych sieci optycznej. W tym celu proponuje się wykorzystać zjawisko wymuszonego laserem tunelowania oraz mechanizm potrząsania siecią optyczną. W artykule [53] podane są przykładowe wartości parametrów osiągalne eksperymentalnie. Ciekaw jestem na ile przedstawiona propozycja ma szanse doczekać się realizacji eksperymentalnej ze względu na jednoczesne zaangażowanie wielu technik doświadczalnych, a przecież propozycja jako taka dotyczy „zaledwie” zbudowania układu opisywanego hamiltonianem z lokalną symetrią $U(2)$. W kolejnym kroku chcielibyśmy zapewne badać np. mody Hofstadtera bądź kwantowy efekt Halla.

W ostatnim rozdziale mgr A. Kosior bada wpływ korelacji występujących w nieporządku na lokalizację Andersona. Zjawisko lokalizacji funkcji falowej cząstki w obecności nieporządku zostało przewidziane wiele lat temu. Analiza przeprowadzona przez Andersona dotyczyła układu elektronów. Ze względu na oddziaływania między elektronami oraz między elektronami i fononami obserwacja lokalizacji Andersona w ciele stałym jest niemożliwa. Ponieważ jednak zjawisko to ma ogólniejszy charakter, jest wynikiem interferencji w wyniku wielokrotnych rozproszeń, lokalizacji Andersona poszukiwano w innych układach. Została ona zaobserwowana w eksperymentach ze światłem, mikrofalami czy też falami dźwiękowymi. Parę lat temu w grupie A. Aspecta przeprowadzono doświadczenie wykorzystujące kondensat Bosego-Einsteina w jednowymiarowym potencjale z nieporządkiem, w którym po raz pierwszy zaobserwowano eksponencjalną lokalizację fal materii.

W artykule [71] diskutowanym w ostatnim rozdziale Autorzy analizują model z dwiema frakcjami atomów w sieci optycznej, w którym nieporządek bierze się z oddziaływań pomiędzy atomami różnych frakcji. Atomy jednej z frakcji pozostają nieruchome w sieci stając się źródłem diagonalnego nieporządku binarnego. Zakłada się, że atomy te nie oddziałują ze sobą – mogą to być więc fermiony lub bozony z wyłączonym, np. wykorzystując optyczny rezonans Feshbacha, oddziaływaniem. Magnetyczny rezonans

Feshbacha jest wykorzystywany w modelu do periodycznej w czasie zmiany oddziaływania między atomami różnych frakcji. Zakładając, że pole magnetyczne zmienia się bardzo szybko można, w oparciu o teorię Floqueta wprowadzić efektywny hamiltonian, w którym pojawia się nieporządek w tunelowaniach (tzn. pozadiagonalny).

W podrozdziale 5.2 mgr A. Kosior analizuje korelacje w układzie wyłącznie z nieporządkiem diagonalnym. Zakłada, że atomy nieporuszające się mogą występować jedynie w sekwencjach o zadanej długości. Oczekuje, że w układzie pojawią się rezonanse oznaczające brak lokalizacji związany z bezstratną transmisją cząstek przez rozważane segmenty cząstek nieruchomych. Rzeczywiście, analiza oparta o metodę macierzy transferu pokazuje istnienie rezonansów transmisyjnych czyli również istnienie zdelokalizowanych stanów. W artykule [71] badany jest w istocie inny model, zawierający zarówno diagonalny jak i pozadiagonalny nieporządek. Istotny wkład mgra A. Kosiora w tę pracę polegał na obliczeniu długości lokalizacji Andersona z uwzględnieniem tunelowań do kolejnych (drugich) sąsiadów. Okazało się, że nie można skorzystać z metody macierzy transferu (tu brakuje mi paru zdań wyjaśniających), mgr A. Kosior zaproponował więc inny oryginalny sposób obliczenia długości lokalizacji bazujący na formalizmie funkcji Greena. Wynik jest taki, że tunelowania do dalszych sąsiadów mogą niszczyć rezonanse transmisyjne. To oznacza, że tracimy informację o korelacjach występujących w nieporządku. Czy w związku z tym użyteczność dyskutowanej w artykule [71] metody badania korelacji w nieporządku nie jest mocno ograniczona?

Na zakończenie chciałbym podkreślić, że praca doktorska mgra Arkadiusza Kosiora dotyczy bardzo aktualnej i modnej tematyki związanej z wykorzystaniem ultra zimnych gazów atomowych jako kwantowych symulatorów umożliwiających badanie innych, często inaczej nieosiągalnych, układów. Wyniki prezentowane przez mgra Arkadiusza Kosiora opublikowane zostały w międzynarodowych czasopismach o dużej renomie. Dodam jeszcze, że praca doktorska pana mgra Arkadiusza Kosiora napisana jest bardzo starannie. Znalazłem jedynie nieliczne błędy różnej natury, przykładem może być tytuł rozdziału piątego, wzór (2.2) bądź brak ostatniej strony w jednym z dołączonych do rozprawy artykułów.

Podsumowując, uważam, że przedstawiona praca doktorska spełnia wszelkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie pana mgra Arkadiusza Kosiora do dalszych etapów przewodu doktorskiego.


Mirosław Brewczyk