UNIWERSYTET JAGIELLOŃSKI W KRAKOWIE

INSTYTUT FIZYKI IM. MARIANA SMOLUCHOWSKIEGO
Zakład Teorii Materii Skondensowanej i Nanofizyki

dr hab. Adam Rycerz

E-mail: rycerz@th.if.uj.edu.pl
WWW: http://th.if.uj.edu.pl/~adamr/

Kraków, 5 grudnia 2019

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Barbary Grygiel pt. "Zjawiska transportowe w układach ultrachłodnych bozonów w sieciach optycznych"

Recenzowana rozprawa doktorska została wykonana w Oddziale Teorii Materii Skondensowanej Instytutu Fizyki Niskich Tempertur i Badań Strukturalnych im. Włodzimierza Trzebiatowskiego Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu, promotorem był dr hab. Tomasz Zaleski. Rozprawa liczy 118 stron i ma formę klasycznej dysertacji; przedstawione wyniki naukowe zostały częściowo opublikowane w trzech artykułach (jeden z nich ukazał się w *Physical Review B* zaś dwa pozostałe w *Acta Physica Polonica A*), których doktorantka jest pierwszym autorem, a współautorami są: promotor rozprawy, oraz mgr inż. Konrad Patucha. Łącznie, na dorobek naukowy doktorantki składa się siedem artykułów (wszystkie trójautorskie z wymienionymi wyżej współautorami), co jest niewątpliwie dobrym wynikiem w przypadku osoby składającej rozprawę doktorską z fizyki teoretycznej materii skondensowanej.

Recenzowane rozprawa składa się z czterech obszernych rozdziałów zawierających prezentacje rozważanych zagadnień szczegółowych i wyników doktorantki (*2. Kondensacja Bosego-Einsteina, 3. Przejście fazowe superfluid — izolator Motta, 5. Metoda kwantowych rotatorów, 6. Przewodność silnie oddziałujących bozonów w sieci*), jak również czterech krótszych, o charakterze uzupełniającym (*1. Wstęp, 4. Cel pracy, 7. Podsumowanie, 8. Kierunki dalszych badań*). Prace dopełniają trzy dodatki matematyczne (*A. Korelator fazowy w modelu kwantowych*

rotatorów, B. Czasowa transformata Fouriera sumy statystycznej, C. Wyznaczenie ogólnej postaci przewodności), spis literatury liczący 112 pozycji, oraz *Streszczenie* w języku polskim i angielskim.

Zasadniczym celem badań przedstawionych w rozprawie było stworzenie spójnego opisu teoretycznego zjawisk transportu materii w układach silnie oddziałujących atomów bozonowych uwięzionych w sieciach optycznych. W takich układach, zależnie od wartości parametrów fizycznych zdeterminowanych przez zewnętrzne pole elektromagnetyczne (a zatem — stosunkowo łatwych do kontolowania w doświadczeniu) występują zasadniczo dwie fazy: *faza nadciekła*, której cechą charakterystyczną jest dalekozasięgowa koherencja (porządek) faz zespolonych funkcji falowych (formalnie rzecz ujmując, jest to uporządkowanie typu klasycznego, podobne do uporządkowań znanych z układów magnetycznych), oraz nieuporządkowana *faza izolatora Motta*, w której koherencja fazowa zanika. W obszarze pośrednim (tj. pomiędzy fazami) mamy do czynienia z kwantowym przejściem fazowym, które pozostaje w pewnej analogii z przejściem metal-izolator typu Motta-Hubbarda. Zastosowana w pracy metoda kwantowych rotatorów pozwoliła na stworzenie uniwersalnego opisu rozważanej klasy układów, odpowiedniego zarówno dla fazy nadciekłej jak również fazy izolatora Motta, a także zbadanie zachowania przewodnictwa w szerokim zakresie parametrów.

Spośród otrzymanych wyników, na uwagę zasługuje w szczególności precyzyjne rozróżnienie wkładu przewodnictwa wewnątrzpasmowego i międzypasmowego w układzie, w którym geometria sieci optycznej jest tak dobrana, że baza sieci staje się nietrywialna (tj. zawiera co najmniej dwa węzły). Odpowiednie obliczenia były prowadzone w ramach modelu Bosego-Hubbarda, a zostały opisane we wspomnianym wyżej artykule opublikowanym w *Physical Review B* w 2017 roku. Przedyskutowano także wpływ wzrostu temperatury na przewodnictwo, który okazuje się (w ujęciu jakościowym) zależny od fazy, w jakiej znajduje się układ.

Przystępując do oceny przedstawionej rozprawy, warto zwrócić uwagę na staranność i duży wkład pracy doktorantki w przygotowanie obszernych fragmentów wprowadzających, w których opisano zarówno aspekty fizyczne (w tym doświadczalne)

rozważanych zagadnień, jak również w przystępny sposób przedstawiono szczegóły modelu i stosowanych w dalszych częściach pracy metod obliczeniowych. Pracę czyta się z dużą łatwością, co z pewnością było efektem trudnym do osiągnięcia z uwagi na znaczne zróżnicowanie i stopień zaawansowania przedstawionego materiału. W szczególności, bardzo dobrze napisany jest rozdział 2., w którym przedstawiono zwięzły opis zjawiska kondensacji Bosego-Einsteina, z uwzględnieniem roli zewnętrznego potencjału pułapkującego, o którym nie wspominają klasyczne podręczniki. Na szczególne uznanie zasługuje także podrozdział 5.1, który zawiera znakomity (a przy tym krótki!) wykład dotyczący reprezentacji stanów koherentnych i jej zastosowania do modelu Bosego-Hubbarda.

Poniżej, zebrałem nieliczne uwagi krytyczne, które nasuwają się podczas lektury przedłożonej mi do oceny rozprawy.

- W *Streszczeniu*, niezbyt zręczne wydaje się zdefiniowanie bozonów jako "cząstek opisanych statystyką Bosego-Einsteina"; należałoby raczej wspomnieć o związku spinu (całkowitego lub połówkowego) ze statystyką.

- W rozdziale 1. (*Wstęp*) mamy uwagę o "oddziałujących bozonach w nadprzewodnikach" co wydaje się nadmiernym skrótem myślowym, pary Coopera nie są bowiem standardowymi bozonami.

- W rozdziale 2. (*Kondensacja B.-E.*), poniżej wzoru (2.14), zdefiniowano aktywność chemiczną (z), która "mówi o tym, jak bardzo układ przypomina gaz doskonały". Zapewne chodzi tutaj o gaz doskonały Bosego.

- W tytule rozdziału 3.: *Przejście fazowe superfluid — izolator Motta* termin "superfluid" zapewne warto byłoby zastąpić polskim odpowiednikiem (*stan nadciekły* lub *faza nadciekła*). Dalej, wzór (3.10) wprowadza zasadę nieoznaczoności dla fazy zespolonej funkcji falowej i liczby cząstek, brak jednak komentarza dotyczącego faktu, iż nieoznaczoność fazy jest ograniczona z góry przez 2π. (Analogicznie, w elementarnej mechanice kwantowej napotykamy problem poprawnego sformułowania zasady nieoznaczoności krętu i kąta, o którym wspomina np. Rudolf Peierls w książeczce *Niespodzianki w Fizyce Teoretycznej*.)

- W rozdziale 5. (*Metoda kwantowych rotatorów*) wysoce niefortunne wydaje się stwierdzenie: "wyraz kinetyczny będzie minimalizowany, gdy moment pędu […] będzie duży". Dalej, w podrozdziale 5.3 (*Diagramy fazowe dla wybranych sieci*) nie

znalazłem informacji, które spośród przedstawionych diagramów stanowią oryginalne wyniki Autorki rozprawy, które zaś odtwarzają wyniki literaturowe. Jestem jednak przekonany, że ta kwestia będzie łatwa do wyjaśnienia podczas publicznej obrony.

Pragnę podkreślić, że wskazane wyżej drobne uchybienia zostały wymienione wyłącznie z poczucia obowiązku recenzenta i w żadnym stopniu nie umniejszają wartości rozprawy, o której stanowią oryginalne wyniki fizyczne i staranna prezentacja rozważanych zagadnień, o czym wspomniano wyżej w recenzji.

W podsumowaniu, uważam, że przedstawiona mi do oceny praca spełnia wszelkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie mgr inż. Barbary Grygiel do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Adam Rycerz