

Warszawa, 14.04.2019 r.

Prof. dr hab. Mariusz Gajda

Instytut Fizyki PAN

Al. Lotników 32/46

02-668 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Biedronia

zatytułowanej

Topological cold atom models in optical lattices

Rozprawa doktorska mgr. Krzysztofa Biedronia ma formę spójnego tematycznie zbioru artykułów opublikowanych w renomowanych czasopismach międzynarodowych. W skład tego cyklu wchodzi:

1. K. Biedroń, O. Dutta, J. Zakrzewski, Topological-Rice-Mele model in an emergent lattice: Exact diagonalization approach, Phys. Rev. A **93**, 033631 (2016).
2. T. Duric, K. Biedroń, J. Zakrzewski, Fibonacci anyon excitations of one-dimensional dipolar lattice bosons, Physical Review B **95**, 085102 (2017).
3. K. Biedroń, M. Łącki, J. Zakrzewski, Extended Bose-Hubbard model with dipolar and contact interactions, Phys. Rev. B **97**, 245102 (2018).

Prace te są pracami zbiorowymi.

Z dołączonych oświadczeń współautorów jasno wynika, że mgr Krzysztof Biedroń był głównym, jeśli nie jedynym, wykonawcą wszystkich obliczeń numerycznych, a także wniósł wkład w koncepcje prac, dyskusję rozwiązań i analizę oraz opracowanie wyników. Wkład dr. K. Biedronia jest więc stosunkowo łatwy do zidentyfikowania i można go ocenić. Jest to typowy wkład doktoranta w badania naukowe prowadzone przez kilkuosobowe zespoły badawcze.

Udział kandydata w pracach wymienionych powyżej jest niewątpliwie bardzo istotny, aczkolwiek nadzór merytoryczny promotora i innych doświadczonych członków zespołu jest oczywisty. Ale to właśnie tak powinno wyglądać kształcenie młodych pracowników naukowych współcześnie, kiedy to praca w dużych zespołach jest wymuszona przez kryteria oceny pracowników naukowych, oparte głównie o parametry bibliometryczne. W mojej ocenie cykl przedstawionych prac naukowych w zupełności spełnia wszystkie formalne wymagania rozprawy doktorskiej.

W szczególności rozprawa doktorska wypełnia warunki określone w ustawie z dnia 18 marca 2011 r. o zmianie ustawy – Prawo o szkolnictwie wyższym, ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz o zmianie niektórych innych

ustaw. Art.13 p.4 mówi „Rozprawę doktorską może także stanowić samodzielna i wyodrębniona część pracy zbiorowej, jeżeli wykazuje ona indywidualny wkład kandydata przy opracowywaniu koncepcji, wykonywaniu części eksperymentalnej, opracowaniu i interpretacji wyników tej pracy, odpowiadający warunkom określonym w ust. 1.”

Wspomniany powyżej cykl prac jest opatrzony opisem w języku angielskim. Opis jest dość obszerny. Miałem więc pewne wątpliwości, czy czasem to nie ów opis pełni funkcję rozprawy doktorskiej. Posiada wszak wszystkie elementy „staromodnej” rozprawy. Zawiera spis treści, jest podzielony na wstęp, 3 rozdziały, podsumowanie, dwa załączniki i spis literatury.

Gdyby jednak ten opis miał być rozprawą doktorską, to jest on zbyt lakoniczny i bez analizy artykułów źródłowych nie byłbym w stanie zrozumieć wszystkich wyników rozprawy. W szczególności w rozdziale 3. mgr K. Biedroń nie pokusił się o przedstawienie Hamiltonianu układu. O ile byłby to poważny mankament w przypadku staromodnych rozpraw doktorskich, to gdy rozprawa stanowi cykl publikacji, jest to w zupełności poprawne.

Nie rozumiem natomiast jednak jaki jest powód napisania tego wprowadzenia do cyklu artykułów w języku angielskim. Nie wydaje mi się aby nadawał się on do szerszego rozpowszechniania. Jedynym uzasadnieniem może być obcojęzyczny drugi recenzent. Czy tak jest ? Nie wiem.

Przechodząc do oceny merytorycznej chcę stwierdzić, że wszystkie prace mgr. Krzysztofa Biedronia dotyczą układów wielu skorelowanych bozonów w jednowymiarowych potencjałach periodycznych. Ograniczenie rozważań do jednego wymiaru podyktowane jest tym, że można wtedy zastosować metody numeryczne pozwalające na uzyskanie ścisłych rozwiązań. Jest to bez wątpienia wielki walor pracy. Autor używał zarówno metody ścisłej diagonalizacji jak i metody DMRG. Ze względu na ograniczenia komputerowe, metoda ścisłej diagonalizacji może być zastosowana do stosunkowo niewielkich układów. Znacznie większe układy można badać stosując metodę DMRG. W wielu przypadkach badając własności układów w funkcji wielkości układu, autor był w stanie ekstrapolować otrzymane wyniki i znaleźć wartości odpowiednich korelatorów w granicy nieskończonego układu.

W pierwszej pracy mgr Krzysztof Biedroń bada układ dwóch rodzajów silnie oddziałujących fermionów o różnej liczności. Mgr K. Biedroń rozważa sytuację kiedy obsadzenie sieci przez mniejszościowe fermiony jest bliskie $\frac{1}{2}$. Na dodatek mgr K. Biedroń zakłada, że silne, przyciągające oddziaływanie powoduje, że tworzą się dwuatomowe kompozyty zbudowane z różnych fermionów, które lokują się w stanie podstawowym Wannier'a. Pozostała część większościowych fermionów znajduje się w stanie „p” i może tunelować między węzłami. Sprzężenie do stanu p-Wanniera jest osiągnięte poprzez rezonansowe potrząsanie siecią. Większościowe fermiony poruszają się w sieci utworzonej przez kompozyty okupujące stan podstawowy Wanniera. Badany model przypomina pod wieloma względami model znany jako model Rice-Mele.

Stan podstawowy został wyznaczony metodą ścisłej diagonalizacji. Praca jest kontynuacją wcześniejszych badań prowadzonych w zespole prof. J. Zakrzewskiego. Mgr K. Biedroń pokazał, że w zależności od amplitudy potrząsania siecią K, układ może być w fazie DW (density wave) – fala gęstości, CL (clustered) – kompozyty mogą upakować się gęsto w pewnym obszarze sieci optycznej, a dla przejściowych wartości K, pojawia się faza z defektami w tym gęstym upakowaniu, którą autor nazywa fazą MX- mieszaną. Wykrycie

takiej fazy jest ciekawym wynikiem. Pojawiają się wtedy ściany między domenami, które mogą być ważne z punktu widzenia zastosowań do obliczeń kwantowych.

W drugiej i trzeciej pracy cyklu autor zastosował metodę DMRG co pozwoliło na badanie znacznie większych układów, rzędu kilkuset węzłów sieci, w jednym wymiarze przestrzennym.

Praca "Fibonacci anyon excitations of one-dimensional dipolar lattice bosons", jest poświęcona bardzo zaawansowanym technicznie zagadnieniom dotyczącym nieabelowych wzbudzeń o ułamkowej statystyce w jednowymiarowym łańcuchu oddziałujących bozonów. Takie topologiczne układy mają potencjalnie duże możliwości zastosowań jako uniwersalne komputery kwantowe. Układ opisany jest rozszerzonym hamiltonianem Bose-Hubbarda. Oprócz standardowych wyrazów opisujących tunelowanie do najbliższych sąsiednich węzłów oraz oddziaływania kontaktowego między bozonami w tym samym węźle, dr K. Biedroń uwzględnił również oddziaływanie typu gęstość-gęstość między atomami w sąsiadujących węzłach. Źródłem takiego oddziaływania może być np. oddziaływanie dipolowe.

Autor ograniczył się do podstawowego stanu Wanniera co jest uzasadnione dla głębokich sieci. Założył również, że wypełnienie sieci wynosi $3/2$. Model posiada znane, analityczne rozwiązanie dla szczególnych wartości parametrów: braku tunelowania i dwukrotnie silniejszego oddziaływania w węźle w porównaniu do oddziaływania między atomami w sąsiednich węzłach. W takim przypadku, stan podstawowy posiada cztery zdegenerowane stany własne typu fal gęstości z różnymi obsadzeniami sąsiednich węzłów, które mogą się różnić między sobą o ± 1 lub ± 2 .

Najniższe stany wzbudzone odpowiadają ścianom domenowym między dwoma różnymi ułożeniami atomów. Posiadają one własności nieabelowych anyonów Fibbonacciego. Mgr K. Biedroń pokazał, że również w bardziej realistycznych układach, czyli dla różnego od zera tunelowania, charakter stanu podstawowego jest zbliżony. Nie zmienia się on istotnie, jeśli siły oddziaływań zmieniają się w pewnym zakresie. Aby pokazać, że nieabelowe anyony są również wzbudzeniami w ogólniejszym, niż wspomniany uprzednio, przypadku, mgr K. Biedroń zastosował metodę ścisłej diagonalizacji dla małych układów i badał przekrycie otrzymanych nisko-leżących stanów wzbudzonych ze ścisłymi stanami mającymi własności anyonów Fibbonacciego, odpowiednio wygenerowanych z trzech kopi stanów podstawowych o obsadzeniu $1/2$. Te badania pokazują, że nieabelowe własności ścian domenowych występują również dla innych, niż szczególnie wybrane, parametry modelu.

W badanym układzie następuje kwantowe przejście fazowe od fazy DW – fale gęstości do fazy nadciekłej (SF). Badania wykorzystujące ansatz Gutzwillera sugerowały, że dla parametrów bliskich tego przejścia, istnieje faza „supersolid”. Najciekawszym wynikiem pracy jest pokazanie, że taka faza nie występuje w ściślych wielociałowych rozwiązaniach.

Na koniec tej części ciekawym elementem jest pokazanie jak można „zapłatać” anionowe wzbudzenia w układach jednowymiarowych, takich jak badane przez mgr K. Biedronia. Autor pokazał najpierw, że rodzaj wzbudzeń można przelączać zmieniając lokalnie potencjał chemiczny w wybranym węźle, a „zaplatanie” anyonów jest możliwe gdy przejściowo przechowa się wzbudzenia w bocznym odgałęzieniu łańcucha o kształcie złącza T. Ten element pracy pokazuje, że autor starał się, przynajmniej częściowo, zadbać o elementy realizmu.

Omawiana praca obfituje w szereg bardzo technicznych elementów, wymaga od autora bardzo dobrego zrozumienia problemu i kontroli numeryki. Kandydat rozwiązuje stosunkowo prosty teoretyczny model, prowadzący jednak do bardzo nietrywialnych, topologicznych faz układu. Wydaje mi się, że droga do praktycznej realizacji modelu będzie długa, ale przywilejem badań teoretycznych jest wybieganie w przyszłość i odrobina fantazji.

W ostatniej pracy z przedstawionego cyklu, mgr Krzysztof Biedroń rozważa bardzo bogaty, rozszerzony hamiltonian typu Bose-Hubbarda, gdzie oprócz standardowych procesów, uwzględniono oddziaływanie z pierwszymi oraz drugimi sąsiadami, tunelowanie do drugich sąsiadów i również tunelowanie między najbliższymi sąsiadami, aktywowane jeśli w stanie początkowym lub końcowym znajdują się atomy. Kandydat uwzględnia wkład do lokalnych oddziaływań w węzle pochodzący od oddziaływań dipolowych. Zakłada, że dipole się odpychają, a lokalne oddziaływanie krótko-zasięgowe jest przyciągające. W ten sposób obydwie wkłady znoszą się w dużym stopniu i lokalne oddziaływanie może być porównywalne z oddziaływaniem dipolowym między sąsiadami.

W tej pracy autor zauważa, że liczbę parametrów modelu można ograniczyć, gdyż w realistycznych przypadkach zadane są przez zewnętrzny potencjał oraz rodzaj atomów. Rysunek 1 pokazuje jak powinna zmieniać się głębokość potencjału sieci oraz długość rozpraszania aby oddziaływanie lokalne oraz między sąsiadami miało zadaną wartość. Ta analiza bardzo mnie cieszy, gdyż czyni badany model bardziej realistyczny, niż te badane uprzednio. Jest to wielka zaleta pracy.

Tym niemniej nie jest dla mnie jasne jak mgr Krzysztof Biedroń uzyskał rysunek 1. Czy wyznaczył on funkcje Wannier? Jakie były parametry potencjału sieci w pozostałych kierunkach, czy uwzględnił trójwymiarowy charakter węzła, i jakim atomom ten wykres odpowiada?

W celu identyfikacji rozlicznych faz układu, mgr Krzysztof Biedroń rozważa szereg korelatorów oraz związane z nimi parametry porządku.

Przy małych wartościach parametru d mierzącego względną siłę oddziaływania dipolowego i przy średnim obsadzeniu sieci równym jeden atom na węzeł, autor wykazał istnienie stabilnej fazy izolatora Haldane'a. Dla większych wartości parametru d , wykres fazowy przedstawiony na rys. 7 wykazuje bardzo bogatą strukturę. Wyraźne są fazy odpowiadające różnym falom gęstości (dwa rodzaje), a także faza nadciekła, izolator Haldane'a, oraz faza „supersolid”. Na dodatek, w przypadku większych obsadzeń sieci pojawiają się bardzo ciekawe fazy jak: nadciekłe pary (pair superfluid), a także „supersolid par” (pair supersolid), oraz egzotyczna faza: „niewspółmierny supersolid par (incommensurate pair supersolid). Faza ta charakteryzuje niewspółmierny z siecią falę gęstości i jej istnienie jest bardzo ciekawym wynikiem omawianej pracy.

Aby uwolnić się od wpływu periodycznych warunków brzegowych i konieczności wykonywania obliczeń dla bardzo dużych sieci, dr Krzysztof Biedroń użył deformacje Hamiltonianu (istotną szczególnie w oczkach na brzegu) typu sinus-kwadrat. Muszę tutaj zauważyć, że dr K. Biedroń znakomicie kontroluje bardzo zaawansowane techniki numeryczne, w szczególności starannie dobiera parametry metody tak aby zapewnić zbieżność ale też poprawny opis procesów fizycznych zachodzących w układzie.

Podsumowując wysoko oceniam rezultaty przedstawione we wszystkich trzech publikacjach naukowych stanowiących pracę doktorską mgr. Krzysztofa Biedronia. Dotyczą one bardzo ciekawej i obecnie intensywnie badanej zarówno doświadczalnie jak i teoretycznie problematyki związanej z topologicznymi stanami materii. Ultra zimne atomy bozonowe w periodycznych sieciach optycznych stanowią doskonałe laboratorium do badania fizyki wielu skorelowanych ciał. Kwantowe symulatory rozważane przez mgr. Krzysztofa Biedronia są elementem rozwijanych aktualnie technologii kwantowych.

Kandydat zbadał cały szereg różnorodnych układów i wyznaczył ich stany podstawowe, a w niektórych przypadkach również stany wzbudzone dla różnych parametrów opisujących układ. Mgr Krzysztof Biedroń pokazał istnienie fazy MX, z dużą liczbą ścian domenowych w przypadku układu dwóch rodzajów fermionów, pokazał istnienie nieabelowych anyonów Fibonacciego w przypadku bozonów z oddziaływaniami dipolowymi, oraz brak fazy supersolid w badanym układzie, a także wyznaczył bogaty diagram fazowy, z fazami takimi jak fale gęstości, nadprzewodnik, nadprzewodnik par, supersolid, pair-supersolid, izolator Haldane'a czy też niewspółmierny pair-supersolid.

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. Krzysztofa Biedronia zawiązką spełnia wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi i stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. Krzysztofa Biedronia do kolejnych etapów postępowania doktorskiego. Wnoszę również o wyróżnienie rozprawy.


Mariusz Gajda

Prof. dr hab. Mariusz Gajda

Warszawa, 14.04.2019 r.

Instytut Fizyki PAN

Al. Lotników 32/46

02-668 Warszawa

Uzasadnienie wniosku o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. Krzysztofa Biedronia
zatytułowanej

Topological cold atom models in optical lattices

Rozprawa doktorska mgra Krzysztofa Biedronia to zbiór artykułów naukowych opublikowanych w prestiżowych czasopismach fizycznych takich jak Physical Review A, i Physical Review B. Już sam fakt publikacji aż trzech prac naukowych w latach w krótkim czasie, w tak renomowanych czasopismach, mówi o jakości rozprawy. Są to obszerne prace i każda z nich ma odmienną specyfikę. Tematyka pracy należy do głównego nurtu współczesnych badań ultra zimnych atomów oraz materii topologicznej, wpisując się w flagowy program Unii Europejskiej poświęcony kwantowym technologiom.

Mgr Krzysztof Biedroń wykonał samodzielnie wszystkie obliczenia i uczestniczył we wszystkich etapach tworzenia prac, od koncepcji po analizę wyników. Bardzo mi zaimponowała duża dojrzałość mgr. Krzysztofa Biedronia, zrozumienie skomplikowanych problemów fizycznych dotyczących topologicznych modeli atomowych, oraz umiejętność zastosowania nowoczesnych technik badania układów wielu skorelowanych ciał.

Uzyskanie ścisłych rozwiązań i pełna kontrola parametrów metody DMRG zasługuje na szczególne uznanie. Bardzo cenię umiejętność mgr K. Biedronia posługiwania się tymi zaawansowanymi metodami numerycznymi w sposób pozwalający na kontrolowanie zbieżności algorytmów, co czyni uzyskane rezultaty bardzo wiarygodnymi. Mgr Krzysztof Biedroń doskonale rozumie problemy fizyczne a także nietrywialną kuchnię używanych metod numerycznych.

Biorąc pod uwagę powyższe argumenty, stawiam wniosek o wyróżnienie rozprawy.

Mariusz Gajda