

AUTOREFERAT

dr Tomasz Zaleski

Zakład Teorii Nadprzewodnictwa i Nadciekłości

Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych im. W. Trzebiatowskiego

Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu

Wrocław, 29 maja 2012

Spis treści

1. Dane personalne	3
2. Wykształcenie i stopnie naukowe.....	3
3. Informacje o zatrudnieniu w jednostkach naukowych.....	3
4. Osiągnięcie stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego	4
4a. Dane bibliograficzne	4
4b. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania	5
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych.....	12
5a. Staże i praca naukowa za granicą	12
5b. Nagrody i wyróżnienia	12
5c. Działalność recenzencka	13
5d. Udział w projektach badawczych.....	13
5e. Dorobek publikacyjny	13
5f. Prezentacja referatów i komunikatów naukowych na konferencjach międzynarodowych i krajowych	14
6. Przebieg pracy naukowej.....	16
6a. Okres przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora.....	16
6b. Okres po uzyskaniu stopnia naukowego doktora.....	17



1. Dane personalne

Imię i nazwisko: Tomasz Zaleski

Miejsce pracy: Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych im. W. Trzebiatowskiego
Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu
Oddział Teorii Materii Skondensowanej
Zakład Teorii Nadprzewodnictwa i Nadciekłości
ul. Okólna 2, 50-422 Wrocław
tel.: 71 395 4316

Stanowisko: adiunkt

2. Wykształcenie i stopnie naukowe

dr nauk fizycznych 2003, Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN
Rozprawa doktorska: "*Theory of unification of superconductivity and antiferromagnetism based on the $SO(5)$ symmetry group in the physics of high-temperature superconductors*"
Promotor: Prof. dr hab. Tadeusz Kopec

mgr inż. fizyki 1999, Politechnika Wrocławska
Specjalność: fizyka ciała stałego
Praca magisterska: "*Teoria nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego: unifikacja nadprzewodnictwa i antyferromagnetyzmu w ramach grupy symetrii $SO(5)$* "

3. Informacje o zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2004-obecnie adiunkt, Zakład Teorii Nadprzewodnictwa i Nadciekłości,
Oddział Teorii Materii Skondensowanej,
Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych im. W. Trzebiatowskiego
Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu

2011-obecnie Pełnomocnik Dyrektora ds. Popularyzacji Nauki
Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych im. W. Trzebiatowskiego
Polskiej Akademii Nauk we Wrocławiu

4. Osiągnięcie stanowiące podstawę postępowania habilitacyjnego

Osiągnięciem naukowym wynikającym z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 roku o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) jest jednotematyczny cykl publikacji naukowych pt. *Stany uporządkowane i własności spektralne układów silnie oddziałujących bozonów i fermionów*.

4a. Dane bibliograficzne

- [H1] **T. A. Zaleski**, T. K. Kopeć: *Néel order in the Hubbard model within a spin-charge rotating reference frame approach: Crossover from weak to strong coupling*, Phys. Rev. B **77**, 125120 (2008).
- [H2] **T. A. Zaleski**, T. K. Kopeć: *Spectral functions in the two-dimensional Hubbard model within a spin-charge rotating frame approach*, Eur. Phys. J. B **76**, 405 (2010).
- [H3] **T. A. Zaleski**, T. K. Kopeć: *Quasi-particle peak due to magnetic order in strongly correlated electron systems*, Ann. Phys. (Berlin) **522**, 584 (2010).
- [H4] **T. A. Zaleski**, T. K. Kopeć: *Effect of next-nearest-neighbour hopping on Bose–Einstein condensation in optical lattices*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **43**, 085303 (2010).
- [H5] **T. A. Zaleski**, T. K. Kopeć: *Superfluid-to-Mott transition in optical lattices with restricted geometry*, J. Phys. A: Math. Theor. **43**, 425303 (2010).
- [H6] **T. A. Zaleski**, T. P. Polak: *Synthetic magnetic field effects on neutral bosonic condensates in quasi-three-dimensional anisotropic layered structures*, Phys. Rev. A **83**, 023607 (2011).
- [H7] **T. A. Zaleski**, T. K. Kopeć: *Atom-atom correlations in time-of-flight imaging of ultracold bosons in optical lattices*, Phys. Rev. A **84**, 053613 (2011).
- [H8] **T. A. Zaleski**, T. K. Kopeć: *Scaling of the density profiles of cold atoms near the quantum critical point in two- and three-dimensional optical lattices*, Phys. Rev. A **85**, 043622 (2012).
- [H9] **T. A. Zaleski**: *Momentum-resolved spectral function of ultra-cold bosons in two-dimensional optical lattices*, Phys. Rev. A **85**, 043611 (2012).

Indywidualny, dokładnie określony wkład habilitanta w autorstwo powyższych prac oraz oświadczenia współautorów określające indywidualny wkład każdego z nich w powstanie publikacji cyklu prac: *Stany uporządkowane i własności spektralne układów silnie oddziałujących bozonów i fermionów* znajdują się w osobnym załączniku.

4b. Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wiele podstawowych koncepcji kwantowej fizyki wielociałowej zostało zainspirowanych intrygującymi własnościami ciał stałych. W szczególności układy silnie skorelowane są podstawą najbardziej interesujących i często niezrozumianych zjawisk takich jak np. nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe. Najbardziej charakterystyczną cechą układów silnie oddziałujących jest fakt, że składniki tworzące układ (elektrony lub atomy) nie mogą być opisane w terminologii obiektów nieoddziałujących. Każda cząstka wywiera skomplikowany wpływ na pozostałe cząstki i w rezultacie, nie może zostać opisana jako obiekt "zanurzony w morzu" uśrednionych sąsiadów. Nakłada to duże wymagania na teorie opisujące takie układy, ponieważ korelacje pomiędzy cząstkami muszą zostać właściwie uwzględnione. W efekcie szeroko używana klasa podejść średniopoloowych nie może zostać użyta. Z tego powodu od roku 1986, w którym odkryto nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe w miedzianach pojawiło się wiele prób sformułowania teorii układów silnie skorelowanych elektronów w języku nowych kolektywnych lub złożonych stopni swobody.

Efektywne teorie niskoenergetyczne są często wykorzystywane w wielu istotnych zagadnieniach fizyki. W domenie układów silnie oddziałujących elektronów Hamiltoniany spinowe są przykładami nisko-energetycznych teorii, które znajdują zastosowanie w granicy silnego oddziaływania. Jednak do rozwiązania tych modeli niezbędne są złożone obliczenia numeryczne, szczególnie dla odpowiednio dużych sieci. Problemem jest też fakt, że obliczenia te są ograniczone do układów skończonych, co wymaga często problematycznej ekstrapolacji do granicy termodynamicznej. Jest więc niezwykle pożądanym szukanie metod opierających się na zaawansowanych obliczeniach analitycznych. Kluczowym pytaniem tego zagadnienia jest sposób powstawania oddziaływań o niskiej energii, o wiele niższej niż oddziaływania kulombowskie pomiędzy elektronami, które decydują o powstawaniu i współzawodnictwie różnych faz uporządkowanych. Z tego powodu celem prezentowanych prac [H1-H9] było:

1. Zastosowanie i rozwijanie metody opierającej się na rozpoznaniu symetrii obecnych w układach silnie oddziałujących cząstek, co prowadzi do właściwego opisu niskoenergetycznej dynamiki takich układów. Metoda powinna umożliwiać wyjście poza przybliżenie pola średniego, w szczególności musi właściwie uwzględniać fluktuacje przestrzenne, kwantowe i termiczne wielkości opisujących układ. Powinna także prowadzić do właściwego opisu efektów korelacji, co jest niezbędną podstawą modelowania układów silnie oddziałujących cząstek.
2. Analiza modelu Hubbarda i Bose-Hubbarda w celu określenia niskoenergetycznych faz uporządkowanych w zależności od parametrów układu w obszarze średniego i silnego sprzężenia. Podejście powinno umożliwiać uwzględnienie różnych geometrii sieci i zasięgu oddziaływań, które mogą wystąpić w układach doświadczalnych.
3. Zbadanie własności spektralnych układu poprzez wyznaczenie funkcji korelacyjnej i sprawdzenie, czy odtwarzane są charakterystyczne cechy obserwowane metodami doświadczalnymi (np. widma fotoemisyjne w przypadku miedzianów, lub obrazy "time-of-flight" w przypadku atomów w sieciach optycznych).

Początkowo projekt był kierowany w stronę układów fermionowych, w szczególności wysokotemperaturowych nadprzewodzących miedzianów. Jednak w momencie uzyskania przez grupę doświadczalne dostępu do znacznie "czystszych" układów ultraciekłych atomów w sieciach

optycznych, cele zostały rozszerzone także na analizę układów bozonowych. Układy te pozwalają na znacznie dokładniejsze porównywanie otrzymanych wyników z danymi eksperymentalnymi, dzięki brakowi zanieczyszczeń i możliwości łatwej i pełnej kontroli nad ich parametrami. Umożliwiło to stwierdzenie, iż użyta metoda nie tylko daje znacznie więcej możliwości niż inne podejścia teoretyczne, ale także jest znacznie dokładniejsza. Ponadto, ponieważ długoterminowym celem naukowym jest dalsze badanie silnie skorelowanych układów fermionowych, wykorzystywane metody dopierane były przy zastosowaniu kryterium ich przydatności w fizyce ciała stałego.

Prace [H1-H3] są poświęcone ilościowej analizie efektów korelacyjnych w układzie silnie oddziałujących elektronów. Do opisu stanu antyferromagnetycznego modelu Hubbarda wykorzystywane jest podejście kwantowych rotatorów, które zachowuje rotacyjną symetrię spinową Hamiltonianu oraz zachowuje pełną zgodność z twierdzeniem Mermin-Wagnera, które dla układów o ciągłej symetrii parametru porządku i oddziaływaniach o ograniczonym zasięgu, w skończonych temperaturach przewiduje istnienie przejścia fazowego typu porządek-nieporządek tylko dla wymiaru sieci wyższego niż 2. Podstawowym elementem metody jest rozpoznanie obecnych w modelu symetrii związanych z obecnością ładunku i spinu. W efekcie własności skalarne cząstki są opisane potencjałem cechowania $U(1)$, naturalnie związanym z ładunkiem elektrycznym, podczas gdy nietrywialna dynamika związana z ewolucją spinu -- przez potencjał cechowania $SU(2)$. Efektywna teoria pola dla układu silnie skorelowanego jest więc charakteryzowana grupą symetrii $U(2)=U(1)\times SU(2)$ i opisuje cząstki złożone, które unifikują w sobie własności fermionowe oraz fluktuujące pola cechowania $U(1)$ i $SU(2)$. Z technicznego punktu widzenia te pola są wprowadzane poprzez transformację Hubbarda-Stratonovicha rozprzegającą wyraz z oddziaływaniem w Hamiltonianie Hubbarda. Taka procedura prowadzi jednak zwykle do utraty niezmienniczości spinowo-obrotowej. Jednak opis układu silnie skorelowanego, który właściwie uwzględnia naturę elementarnych wzbudzeń, zachowania symetrii istniejących w Hamiltonianie. Z tego powodu Hamiltonian Hubbarda jest w prezentowanym podejściu transformowany do modelu kwantowych rotatorów i zapisywany w postaci rotacyjnie niezmienniczej poprzez wprowadzenie osi kwantowania spinu, która zachowuje obrotową symetrię spinu.

Praca [H1] zawiera badania fazy antyferromagnetycznej dwu- i trójwymiarowego modelu Hubbarda na sieci dwudzielnej z oddziaływaniem najbliższych sąsiadów. Wykorzystywana metoda kwantowych rotatorów $SU(2)\times U(1)$ pozwala na w pełni samozgodną analizę stanu antyferromagnetycznego, przy uwzględnieniu symetrii obecnych w modelu Hubbarda. Wyznaczane jest efektywne działanie zdefiniowane za pomocą rotatorów spinowo-ładunkowych oraz pól fermionowych dla dowolnego odpychania kulombowskiego U i całki przeskoku t . W zerowej temperaturze metoda poprawnie przewiduje ewolucję od antyferromagnetyka Slatera ($U \ll t$) do Motta-Heisenberga ($U \gg t$). Uzyskane wyniki obejmują zero-temperaturową magnetyzację (2D) oraz diagram fazowy w skończonych temperaturach (3D) obrazujący ewolucję stanu antyferromagnetycznego (AF) w modelu Hubbarda w funkcji parametru oddziaływania U/t z uwzględnieniem spinowej fazy Berry. W dwóch wymiarach długozasięgowy porządek antyferromagnetyczny nie jest obserwowany w związku z twierdzeniem Mermin-Wagnera. W układzie trójwymiarowym, w przypadku uporządkowanego stanu podstawowego, wzbudzenia termiczne zmniejszają korelacje spinowe w skończonych temperaturach. Gdy temperatura wyrażona w jednostkach energii znacznie przekroczy charakterystyczną wartość stałej sprzężenia J , dalekozasięgowe korelacje spinowe słabną i, w przypadku braku zewnętrznego pola porządkującego, namagnesowanie znika. Prowadzi to do istnienia przemiany fazowej typu porządek-nieporządek w pewnej skończonej temperaturze, co zostało zaprezentowane w pracy. W granicy słabego sprzężenia teoria opisuje antyferromagnetyk typu Slatera z eksponencjalnie małą przerwą antyferromagnetyczną. Wraz ze wzrostem sprzężenia pomiędzy elektronami, antyferromagnetyk ewoluuje w kierunku antyferromagnetyka typu Motta-Heisenberga z przerwą energetyczną rzędu U . Jednocześnie w obszarze słabego sprzężenia niszczenie stanu antyferromagnetycznego występuje dla krytycznej wartości $U/t=0.676$ i jest związane z topologicznym wyrazem zawierającym fazę Berry, której wartość odchyła się od charakterystycznej



dla zlokalizowanych spinów $S=1/2$. Maksymalna obserwowana temperatura krytyczna stanu antyferromagnetycznego występuje przy $U/t=3.78$.

Prace [H2-H3] zostały zainspirowane badaniami kątowno-rozdzielczej spektroskopii fotoemisyjnej (ARPES), które ukazały skomplikowany charakter struktury elektronowej oraz wzbudzeń kwazicząstkowych w miedziowych nadprzewodnikach wysokotemperaturowych. W analizie danych spektroskopowych ciał stałych, w szczególności silnie skorelowanych układów elektronowych, najlepszą i najczęściej stosowaną metodą jest formalizm funkcji Greena. W tym kontekście propagacja pojedynczego elektronu opisana jest uporządkowanym czasowo jednoelektronowym propagatorem Greena, który może być wyznaczony w zaproponowanym podejściu kwantowych rotatorów. Pozwala to na wyliczenie jedno-elektronowej funkcji spektralnej i wynikającej z niej (po wyciągnięciu po pędach) gęstości stanów. Funkcje te zawierają dwa składniki. Pierwszy z nich odpowiada za maksimum koherencyjne związane z długozasięgowym porządkiem AF i jest iloczynem gęstości kondensatu oraz pseudo-fermionowej funkcji spektralnej. Ponieważ maksimum to może być wyznaczone niezależnie od tła (drugi składnik), możliwe jest stwierdzenie iż jego waga jest równa unormowanemu parametrowi porządku stanu antyferromagnetycznego. Po przekroczeniu granicy przejścia fazowego AF można zaobserwować ważny efekt na wykresach gęstości stanów: w konwencjonalnym układzie cieczy Fermiego widmo powinno zawierać wąskie maksimum, które jest świadectwem występowania dobrze zdefiniowanych kwazicząstek. W stanie AF takie maksimum jest właśnie obserwowane, widoczne jest także jego znikanie wraz ze zbliżaniem się do linii przemiany fazowej. O ile wraz z opuszczeniem stanu AF maksimum przestaje być widoczne, zachowana zostaje jednak przerwa energetyczna. W tym samym czasie waga spektralna maksimum AF jest przenoszona do niekoherentnej części widma tła. Ważnym wnioskiem, który można wyciągnąć jest to, iż istnienie kwazicząstek jest związane z obecnością dalekozasięgowego uporządkowania antyferromagnetycznego, a nie z samą obecnością przerwy energetycznej. Zachowanie to jest podobne do wyników eksperymentów ARPES wykonywanych na niedodomeszkowanych próbkach nadprzewodników miedziowych z zastrzeżeniem, iż w ich przypadku parametr porządku jest związany z nadprzewodnictwem: elektronowa funkcja spektralna wykazuje szerokie maksimum powyżej przejścia nadprzewodzącego. Jednak w niższych temperaturach, dla energii nieco powyżej przerwy energetycznej pojawia się ostre maksimum kwazicząstkowe, po którym następuje obniżenie wartości funkcji spektralnej i kolejne, szerokie maksimum. Nazywane jest to strukturą „peak-dip-hump” i przypomina wyniki uzyskane w pracach [H2-H3]. Otrzymane rezultaty ukazują najważniejszy aspekt metody kwantowych rotorów, którym jest możliwość wyjścia poza czysto lokalne przybliżenie pola średniego poprzez uwzględnienie korelacji przestrzennych. Pozwala to na zbadanie wpływu obecności stanów uporządkowanych na własności spektralne układu. Należy wspomnieć, iż obliczenia gęstości stanów wymagały wykorzystania metod numerycznych zarówno do określenia samozgodnych parametrów modelu, jak i wykonania podwójnych konwolucji, niezbędnych do określenia widm. Obliczenia te zostały wykorzystane przy użyciu samodzielnie napisanych programów.

Zaawansowane prace doświadczalne dotyczące pułapkowania i badania ultra-chłodnych gazów atomowych doprowadziły do powstania nowej gałęzi badań: fizyki fazy skondensowanej przy użyciu światła i atomów. Lokalizacja przestrzenna atomów następuje na skutek ich oddziaływania z wybraną konfiguracją wiązek laserowych, które są w stanie wytworzyć wiele różnorodnych geometrii sieci oraz pozwalają na szeroką modyfikację oddziaływań pomiędzy cząstkami. Prowadzi to do elastyczności w modelowaniu właściwości układu atomów, która nie jest dostępna w przypadku ciał stałych. Umożliwia także osiągnięcie reżimu silnych oddziaływań przez co kondensat Bose-Einsteina umieszczony w potencjale sieciowym jest niemal idealnym eksperymentalnym odwzorowaniem modelu Bose-Hubbarda, który opisuje dynamikę bozonów z lokalnym odpychaniem w potencjale periodycznym. Układ taki wykazuje przemianę fazową od stanu nadciekłego do izolacyjnego (tzw. izolatora Motta) dla pewnej wartości oddziaływania, co zostało zarówno zaobserwowane doświadczalnie, jak i przewidziane teoretycznie za pomocą różnych metod. Powoduje to, iż

doświadczalna weryfikacja otrzymywanych wyników jest dużo łatwiejsza, niż w przypadku ciał stałych, co umożliwia zaprezentowanie silnych stron omawianego w niniejszej pracy podejścia kwantowych rotatorów w stosunku do innych metod teoretycznych.

Prace [H4-H9] dotyczą zastosowania zaproponowanego podejścia kwantowych rotatorów do układu bozonów w sieci optycznej. Zapisany w terminach drugiej kwantyzacji Hamiltonian Bose-Hubbarda jest transformowany przy użyciu formalizmu topologicznie ograniczonych całek po trajektoriach z reprezentacji liczb obsadzeń do reprezentacji sprzężonych z nimi faz. Odpowiednia transformacja pól bozonowych prowadzi do efektywnego wyrażenia zagadnienia silnie skorelowanych bozonów przez układ słabo oddziałujących bozonów związanych z silnie fluktuującymi polami cechowania $U(1)$ o charakterystycznej skali energetycznej określonej energią odpychania atomów. Metoda uwzględnia fluktuacje przestrzenne i kwantowe, co jest wyraźną przewagą nad metodami opartymi o przybliżenie pola średniego, w których parametry krytyczne zależą jedynie od liczby najbliższych sąsiadów, a nie od geometrii i wymiarowości sieci. W efekcie, w układzie dwuwymiarowym znajdującym się w skończonej temperaturze, metody średniopółowe przewidują istnienie przemiany fazowej, podczas gdy prezentowane podejście -- w zgodzie z twierdzeniem Mermin-Wagnera -- nie przewiduje jej.

Celem prac [H4-H5] było określenie, w jaki sposób wybrane modyfikacje geometrii sieci i oddziaływań w stosunku do typowych wartości (sieć kwadratowa, kubiczna, oddziaływania najbliższych sąsiadów) wpływają na własności atomów w sieci optycznej. Stany atomowe w sieciach optycznych są opisywane funkcjami Wanniera, które są dobrze zlokalizowane: całki przeskoku gwałtownie spadają wraz ze wzrostem odległości w sieci. W większości konfiguracji doświadczalnych, współczynniki tunelowania do drugich sąsiadów są od dwóch do czterech rzędów niższe niż odpowiadające najbliższym sąsiadom. W efekcie opis silnego wiązania powinien znakomicie sprawdzać się w takich układach. Okazuje się jednak, iż stany wannierowskie w dwuwymiarowej sieci kwadratowej mogą być zlokalizowane słabiej, gdy natężenie wiązek laserowych jest mniejsze. Praca [H4] uwzględnia obecność przeskoków do dalszych sąsiadów (t') i koncentruje się na badaniu jej wpływu na diagram fazowy układu w zerowej temperaturze. W przybliżeniu średniego pola, uwzględnienie drugich przeskoków powinno być jedynie prostą poprawką do bezpośrednich przeskoków. Jednak w układzie silnie skorelowanym, rzeczywisty parametr porządku nadpłynnego jest określony przez koherencję fazową pomiędzy bozonami, a nie nieznikającą amplitudę pól bozonowych. W efekcie, przy wyjściu poza teorię średniego pola, wyniki uzyskane w podejściu kwantowych rotatorów nie muszą być trywialne, szczególnie w sieci dwuwymiarowej, w której fluktuacje fazowe są istotne. Zostało to potwierdzone w obliczeniach, które wykazały, iż dla t' będącego 1,6% wartości całki bezpośrednich przeskoków (typowa wartość w okolicy przejścia pomiędzy stanem nadciekłym, a izolatorem Motta), zmiana rozmiaru obszarów izolatora na diagramie fazowym układu przekracza 3% w porównaniu w czystym układem dwuwymiarowym z przeskokami jedynie pomiędzy najbliższymi sąsiadami. Dodatkowo zmienia się kształt tych obszarów wraz ze wzrostem całki t' . Widoczne jest jednak także to, iż pomimo zmiany znacząco większej niż wynikająca z przybliżenia pola średniego, efekt dalszym przeskoków może być pominięty w większości sytuacji.

Efekty rozmiarowe odgrywają dużą rolę w badaniach układów silnie oddziałujących, ponieważ definicyjne kwantowe przejście fazowe ma miejsce jedynie w granicy termodynamicznej, w zerowej temperaturze. Istotnym jest więc badanie w jaki sposób efekty związane ze skończonym rozmiarem wpływają na statykę i dynamikę układu silnie oddziałującego oraz na cechy charakterystyczne kwantowej przemiany fazowej. Praca [H5] zawiera badanie wpływu ograniczenia rozmiarów w kwazi-trójwymiarowej sieci optycznej zawierającej ultra-chłodne atomy. Podejście kwantowych rotatorów zastosowane zostało do modelu Bose-Hubbarda zawierającego L -warstwową sieć hiperkubiczną ($\infty \times \infty \times L$) celem określenia, w jaki sposób ograniczenie geometrii wpływa na przemianę fazową pomiędzy stanem nadciekłym a izolatorem Motta. Dla wzrastających wartości L zarówno podejście analityczne (rozwiniecie dla dużych wartości L), jak i metoda opierająca się na bezpośrednim



wyznaczeniu sieciowej gęstości stanów, skuteczna dla dowolnej wartości L (w szczególności małej) pokazują, iż sieć ograniczona staje się nieodróżnialna od pełnej sieci kubicznej już dla bardzo małej liczby warstw ($L \approx 10$). Może to stanowić istotne usprawiedliwienie dla stosowania do opisu skończonych układów bozonów w sieciach optycznych metod fizyki statystycznej, które są ściśle jedynie w granicy termodynamicznej, czyli dla układu nieskończonego.

Bozony w sieci optycznej umieszczone w zewnętrznym polu magnetycznym nie będą wykazywać efektów charakterystycznych dla cząstek naładowanych, ponieważ pułapkowane atomy wykorzystywane w układach doświadczalnych są neutralne, przez co ich dynamika nie jest bezpośrednio modyfikowana przez pole (mimo tego, iż pole magnetyczne prowadzi do rozszczepienia Zeemana, które jest wykorzystywane przy pułapkowaniu atomów). Istnieją jednak różnorodne techniki doświadczalne, które pozwalają na badanie umieszczonych w sieciach optycznych neutralnych atomów, które znajdują się w tak dobranych warunkach, iż opisywane są dokładnie takimi samymi Hamiltonianami, jak naładowane cząstki oddziałujące z zewnętrznym polem magnetycznym. Jedną z tych technik bazuje na formalnym podobieństwie pomiędzy siłą Lorentza, a siłą Coriolisa. W efekcie rotacja kondensatu (zwykle poprzez rotację maski z otworami umieszczonej na drodze wiązek laserowych tworzących kwazi-dwuwymiarową sieć optyczną) prowadzi do powstania syntetycznego pola magnetycznego (w tym przypadku obrotu) działającego na neutralne atomy w identyczny sposób, jakby na cząstki naładowane działało pole magnetyczne. Inne techniki, którymi można uzyskać podobny efekt, to wymuszanie określonej fazy kwantowo-mechanicznej (imprinting), które sprowadza się do nałożenia dodatkowego zewnętrznego potencjału na kondensat (np. za pomocą obracającego się pola magnetycznego), mieszanie kondensatu przy pomocy dodatkowej wiązki laserowej, lub użycie laserów Ramanowskich do koherentnego transferowania atomów pomiędzy wybranymi stanami. W efekcie tych działań powstaje niezerowa faza, którą nabywa cząstka poruszając się po zamkniętych trajektoriach, co imituje obecność strumienia magnetycznego przenikającego sieć. Opisany efekt może zostać także uwzględniony w prezentowanym podejściu kwantowych rotatorów poprzez modyfikację sieciowej gęstości stanów. Gdy strumień syntetycznego pola magnetycznego przypadający na pojedynczą komórkę sieciową mierzony jako ułamek strumienia elementarnego odpowiada prostym ułamkom $f \equiv p/q = 1/2, 1/3, 1/4, 1/6, 1/8$ i $3/8$ odpowiednia gęstość stanów może być wyznaczona dokładnie, analitycznie. Podczas gdy w ciałach stałych pola magnetyczne odpowiadające przytoczonym wartościom f są eksperymentalnie niedostępne, w układach na sieciach optycznych są łatwo osiągalne w związku z dużo większym rozmiarem komórki elementarnej. Praca [H6] zawiera analizę układu gazu bozonowego umieszczonego w sieci optycznej składającej się z zadanej liczby warstw (sieć kwazi-trójwymiarowa). Uzyskany diagram fazowy charakteryzuje się niemonotoniczną zależnością stosunku całki przeskoku do oddziaływania wewnątrzwęzłowego w funkcji syntetycznego pola magnetycznego. Efekt jest redukowany w miarę dodawania kolejnych warstw do układu, co odtwarza geometryczne przejście od układu dwu- do trójwymiarowego. Dodatkowo określona została zgodność pomiędzy anizotropowym układem nieskończonym (kwazi-trójwymiarowym), a izotropowym skończonym (o zadanej liczbie warstw) w taki sposób, aby obydwa układy posiadały dokładnie identyczne wartości krytyczne. Może to prowadzić do tworzenia układów eksperymentalnych, które są technicznie prostsze, lecz wciąż posiadają założone właściwości. Ponadto wykazano, iż właściwości nieskończonego trójwymiarowego gazu bozonowego mogą być z dużą dokładnością odtworzone przez układ warstwowy już przy tylko 10 warstwach w przypadku izotropowym, lub nawet mniejszej ich liczbie, gdy warstwy są słabo sprzężone.

Koncepcja krytycznej przemiany fazowej pomiędzy różnymi stanami materii w zerowej temperaturze jest podstawą opisu wielu złożonych zjawisk w układach silnie skorelowanych. Kwantowe punkty krytyczne dają początek nietypowym własnościom w pewnym zakresie temperatur i mogą być odpowiedzialne za odstępstwa od teorii cieczy Fermiego w przypadku ciężkich fermionów, czy anomalne właściwości stanu normalnego miedziowych nadprzewodników wysokotemperaturowych. W przypadku bozonów w sieciach optycznych obecność nietemperaturowego parametru ułatwia



teoretyczną analizę zagadnienia, jednak z doświadczalnego punktu widzenia dostęp do kwantowej krytyczności w tych układach jest jednak skomplikowany. Jedną z podstawowych wielkości mierzonych w układach eksperymentalnych jest profil gęstości spulapkowanych cząstek znajdujących się w sieci optycznej. Profil ten wiąże się z jednocząstkową funkcją Greena wycałkowaną po pędach. Celem pracy [H7] było analityczne wyznaczenie takich profili w obszarze kwantowo-krytycznym dla układu bozonów w sieci dwu- i trójwymiarowej. Wykazane zostało, iż istotne właściwości układów występują w bliskości kwantowego punktu krytycznego: przeskalowana gęstość cząstek, jako funkcja przeskalowanego potencjału chemicznego wykazuje w modelu kwantowych rotatorów bardzo dobrą zbieżność z uniwersalną funkcją skalującą w szerokim zakresie temperatur, w zgodzie z wynikami obliczeń kwantowego Monte Carlo. Zaprezentowany model jest w stanie pokazać, w jakim zakresie temperatur uniwersalne skalowanie powinno być widoczne w warunkach doświadczalnych.

W eksperymentach dotyczących bozonów w sieciach optycznych, rozkład pędów poszczególnych atomów w pułapce może być zobrazowany poprzez obrazy absorpcyjne metody time-of-flight (TOF - swobodnej ekspansji). Dla układu jednorodnego, pomiary TOF są miarą jednocząstkowej funkcji Greena dla tych samych czasów (jednociąłowej macierzy gęstości). Naturą pomiaru TOF jest nagłe wyłączenie potencjału pułapkującego atomy (zarówno pułapki magnetycznej, jak i optycznej). Powoduje to, iż atomy zaczynają swobodnie opadać w polu grawitacyjnym, a na skutek gwałtownego zmniejszenia oddziaływań pomiędzy nimi, rozkład ich prędkości zostaje chwilowo zamrożony. Gdy po pewnym czasie ekspansji chmury atomowej dokonany zostanie pomiar absorpcyjny położeń atomów, ich odległości od środka chmury atomowej będą proporcjonalne do pędów cząstek. Pomiar ten dokonywany jest za pomocą dodatkowej wiązki laserowej oraz kamery CCD rejestrującej obraz pokazujący bezpośrednio rozkład pędów w przestrzeni odwrotnej. Celem pracy [H8] było wyznaczenie rozkładów pędowych rejestrowanych w TOF przy użyciu metody kwantowych rotatorów uzupełnionej o podejście Bogoliubova. Wykorzystując obecność makroskopowo obsadzonego stanu kwantowego, zagadnienie zostało rozdzielone na problem istnienia amplitudy pola bozonowego oraz fluktuacji fazowych, które były nieobecne w oryginalnej metodzie Bogoliubova. Pozwoliło to na wyznaczenie przestrzennej zależności funkcji korelacyjnej oraz odpowiadających jej rozkładów TOF dla dwuwymiarowej sieci optycznej, a następnie porównanie ich z danymi eksperymentalnymi. W następnym kroku układ niejednorodny (z paraboliczną pułapką magnetyczną) został przybliżony przy odpowiednim wykorzystaniu uśrednień rozwiązań układu jednorodnego. Uzyskany wynik mógł zostać bezpośrednio porównany z obrazami TOF zarejestrowanymi doświadczalnie dla identycznych parametrów. Uzyskana zgodność była bardzo wysoka. W celu wyznaczenia profili TOF niezbędne było obliczenie pełnej przestrzennej zależności jednocząstkowej funkcji korelacyjnej, co wymagało złożonych obliczeń numerycznych. Obliczenia te zostały wykonane przy użyciu samodzielnie stworzonego oprogramowania.

Znajomość niskoenergetycznych stanów wzbudzonych układu wielociąłowego jest niezwykle istotna dla poznania jego podstawowych właściwości. Stany te wiążą się z jednocząstkową funkcją spektralną oraz lokalną (wycałkowaną po pędach) gęstością stanów. Celem pracy [H9] było wyznaczenie pierwszej z tych wielkości i jej zmian związanych z obecnością nadciekłej fazy uporządkowanej przy życiu podejścia kwantowych rotatorów rozszerzonego o metodę Bogoliubova. Dla pośrednich wartości współczynnika oddziaływania (t/U), układ jest w stanie nadciekłym z dalekozasięgowym uporządkowaniem fazowym. Otrzymane funkcje spektralne nie posiadają przerwy i zawierają dwie wąskie linie koherencyjne: wewnętrzną wynika z obecności niezerowej amplitudy Bogoliubova, podczas gdy zewnętrzna odzwierciedla obecność stanu uporządkowanego fazowo. Pozostała część widma jest rozmyta i pochodzi od niekoherentnych (aczkolwiek silnie oddziałujących) atomów. W miarę, gdy sprzężenie pomiędzy atomami jest zwiększane, faza nadciekła zaczyna zanikać. Na linii krytycznej, zewnętrzna linia koherencyjna znika w związku z zerowaniem parametru porządku. Jednocześnie niekoherentna część widma zostaje wzmocniona wypełniając regułę sum i zachowując stałą wagę całego spektrum. W końcu, po minięciu linii krytycznej, następuje otwarcie przerwy energetycznej w $k=0$, co oznacza pojawienie się stanu izolatora Motta. W tym samym czasie część



wagi widma niekoherentnego zostaje przeniesiona w kierunku granicy strefy Brillouina, w szczególności w okolicy punktu (π, π) . W przeciwnym reżimie słabego oddziaływania, fluktuacje fazowe stają się nieistotne i odtworzone zostaje widmo Bogoliubova z charakterystyczną liniową dyspersją dla małych pędów. Dodatkowo waga rozmytego widma pochodzącego od cząstek niekoherentnych ze spadkiem oddziaływania staje się coraz mniejsza, aż do całkowitego zaniku tej części funkcji spektralnej. Istotne jest to, iż zaproponowana metoda pozwala na wyliczenie widma wzbudzeń z dużą rozdzielczością pędową i energetyczną ograniczoną jedynie ilością pamięci potrzebnej do wykonania numerycznej konwolucji funkcji składowych. Otrzymane widma zależą bardzo silnie od wybranej geometrii sieci optycznej. Podobnie, jak w przypadku pracy [H8], otrzymanie wyników wymagało złożonych obliczeń numerycznych wykonanych za pomocą samodzielnie stworzonego oprogramowania.

Podsumowując, zaproponowane podejście kwantowych rotatorów umożliwia analityczną analizę modelu Hubbarda oraz Bose-Hubbarda. Wykracza poza przybliżenie pola średniego poprzez uwzględnienie fluktuacji przestrzennych, termicznych i kwantowych prowadząc do wyników, które są zależne od wymiarowości, geometrii sieci i oddziaływań. Właściwie opisuje obszar średniego i silnego sprzężenia, co czyni je niezwykle użytecznym do badania różnorodnych zjawisk fizyki ciała stałego (nadprzewodnictwo, antyferromagnetyzm) oraz układów ultra-chłodnych atomów w sieciach optycznych. Podejście pozwala na uwzględnienie efektów orbitalnych wywieranych przez pole magnetyczne na elektrony, lub syntetyczne pole magnetyczne – na neutralne atomy. Szczególnie drugi przypadek jest bardzo interesujący w związku z proponowanym wykorzystaniem układów w sieciach optycznych jako komputerów kwantowych. Użyta metoda pozwala także na wyznaczenie korelacji układów silnie oddziałujących, jednak w przeciwieństwie do metod numerycznych, pozwala na bezpośrednią identyfikację faz uporządkowanych i badanie ich wpływu na własności widm wzbudzeń. W opisanych pracach zrealizowane zostały następujące cele:

1. Zastosowano podejście kwantowych rotatorów do Hamiltonianu Hubbarda oparte na rozpoznaniu symetrii obecnych w modelu pozwalające na wyrażenie zagadnienia w postaci rotacyjnie niezmienniczej ze względu na symetrię cechowania ładunku $U(1)$ oraz obrotu osi kwantowania spinu $SU(2)$ i prowadzące do opisu w języku złożonych cząstek będących połączeniem właściwości fermionowych z potencjałami cechowania $U(1)$ i $SU(2)$ [H1-H3].
2. Wyznaczono temperaturę krytyczną modelu w obszarze średniego oddziaływania, który jest niedostępny przez dla innych metod. Określono wartość krytyczną oddziaływania prowadzącą do kwantowego przejścia fazowego pomiędzy stanem antyferromagnetycznym, a fazą paramagnetyczną [H1].
3. Zbadano własności spektralne modelu Hubbarda (gęstość stanów) i ich zależność od obecności fazy antyferromagnetycznej w różnych reżimach oddziaływania i temperaturach [H2-H3].
4. Zastosowano metodę kwantowych rotatorów do modelu Bose-Hubbarda celem opisanie układu bozonów w sieci optycznej. Wykorzystano elastyczność podejścia do opisu układów ze zmodyfikowanymi oddziaływaniami i zmiennej geometrii sieci (oddziaływania następnych sąsiadów, układy wielowarstwowe) i zbadania ich wpływu na stan podstawowy układu oraz przejście fazowe pomiędzy stanem nadciekłym i izolatorem Motta [H4-H5].
5. Zbadano zależność właściwości stanu podstawowego układu od syntetycznego pola magnetycznego działającego na neutralne cząstki analogicznie do siły Lorentza oddziałującej na elektrony. Określono zależności pomiędzy różnymi konfiguracjami układów doświadczalnych pozwalające na eksperymentalną weryfikację otrzymanych wyników [H6].



6. Wyznaczono jednocząstkową funkcję korelacyjnej układu silnie skorelowanych bozonów w metodzie kwantowych rotatorów uzupełnioną o metodę Bogoliubova. Zbadano skalowanie profili gęstości od otoczeniu kwantowego punktu krytycznego. Zweryfikowano otrzymane rezultaty poprzez wyznaczenie przewidywanych obrazów TOF i porównanie ich z odpowiednimi danymi doświadczalnymi. Wyliczono inne wielkości oparte na funkcji korelacyjnej, w szczególności jednocząstkową funkcję spektralną [H7-H9].

Użyta metoda okazała się skutecznym narzędziem do badania zjawisk występujących w układach silnie skorelowanych.

Badana tematyka ma duże znaczenie nie tylko z powodu możliwości lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących w układach silnie skorelowanych, takich jak nadprzewodniki wysokotemperaturowe. Atomy w sieciach optycznych, szczególnie znajdujące się pod wpływem (syntetycznego) pola magnetycznego mogą potencjalnie znaleźć bardzo istotne zastosowanie: głęboko w obszarze izolatora Motta energia kinetyczna jest na tyle mała w stosunku do energii oddziaływania, że energetycznie opłacalną jest lokalizacja atomów przy zaniku tunelowania. Zaniedbywalne fluktuacje liczby obsadzeni umożliwiają przygotowanie dobrze określonych stanów o ściśle zadanej liczbie atomów przypadających na węzeł niezbędnych do inicjalizacji komputera kwantowego. Ponadto, duża skalowalność, niskie szумы i wysoka doświadczalna kontrola parametrów układu czynią z ultrachłodnych atomów w sieciach optycznych bardzo atrakcyjnego medium dla zastosowań w informatyce kwantowej.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

5a. Staże i praca naukowa za granicą

2004-2005 Staż "post-doc"
12-miesięczne stypendium Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej
Grupa Prof. Anthony J. Leggett'a
Loomis Laboratory of Physics
Uniwersytet Illinois w Urbana-Champaign, IL, USA

5b. Nagrody i wyróżnienia

2006 Grant wspomagający Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej
dla Stypendystów Zagranicznych

2004-2005 Stypendium zagraniczne Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej
na 12-miesięczny staż na Uniwersytecie Illinois w Urbana-Champaign, IL, USA

2004 Stypendium krajowe Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej dla młodych naukowców

1999 Nagroda Rektora Politechniki Wrocławskiej dla najlepszych absolwentów

1996, 1997, 1998 Stypendia Ministra Edukacji Narodowej



5c. Działalność recenzencka

Recenzje artykułów naukowych publikowanych między innymi w:

1. Physical Review Letters
2. Physical Review B
3. Physical Review A
4. New Journal of Physics
5. Journal of Physics B: Atomic, Molecular & Optical Physics
6. Acta Physica Polonica
7. Central European Journal of Physics

5d. Udział w projektach badawczych

- 2011-2014 **Wykonawca** w grantie 2011/01/B/ST3/04553: "*Krytyczność Kwantowa w Ferromagnetycznych Gęstych Sieciach Kondo i Nadprzewodnikach Ciężkofermionowych*"
- 2009-2012 **Główny wykonawca** w grantie No. N N202 045537: "*Własności spektralne, a powstawanie faz uporządkowanych w układach silnie skorelowanych fermionów w odniesieniu do badań nadprzewodzących miedzianów przy użyciu kątowo-rozdzielczej spektroskopii fotoemisyjnej (ARPES)*"
- 2002-2003 **Wykonawca** w grantie promotorskim 2 P03B 049 22: "*Teoria nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego: unifikacja nadprzewodnictwa i antyferromagnetyzmu w ramach grupy symetrii $SO(5)$* "

5e. Dorobek publikacyjny i spis publikacji

Dorobek naukowy habilitanta obejmuje 26 publikacji, w tym:

- 17 prac oryginalnych w czasopismach z Listy Filadelfijskiej, 9 prac pokonferencyjnych;
- 1 praca jednoautorska;
- 8 prac [1-8] opublikowanych przed uzyskaniem stopnia doktora;
- 18 prac [9-26] opublikowanych po uzyskaniu stopnia doktora.

Całkowity impact factor opublikowanych prac wyliczony na podstawie współczynników czasopism na rok publikacji (poza latami 2011-12, gdzie użyte zostały IF z 2010 roku) wyniósł: **55,76**. Sumaryczny impact factor prac składających się na habilitację: **20,74**. Szczegółowa lista publikacji znajduje się w załączniku nr 2.



5f. Prezentacja referatów i komunikatów naukowych na konferencjach międzynarodowych i krajowych

Poniżej przedstawiona została lista tematów prezentowanych przeze mnie na konferencjach krajowych i międzynarodowych. Prezentacje, których byłem współautorem, jednak osobiście ich nie przedstawiałem, nie zostały umieszczone na poniższej liście.

1. *Ultra-cold bosons in optical lattice: time-of-flight imaging of atom-atom correlations*, **wykład**
XV Krajowa Szkoła Nadprzewodnictwa: 100 lat nadprzewodnictwa (Kazimierz Dolny 2011)
2. *Effects of restricted geometry on Bose-Einstein condensation in optical lattices*, **plakat**
26th International Conference on Low Temperature Physics LT26 (Beijing, China 2011)
3. *Spectral properties of ultra-cold atoms in two-dimensional optical lattices*, **plakat**
SCES2011 - Strongly Correlated Electronic Systems (Cambridge, UK 2011)
4. *Quasi-particle peak due to magnetic order in strongly correlated electron system*, **plakat**
Emergent Quantum States in Complex Correlated Matter (Dresden, Germany 2010)
5. *Effects of hopping range and restricted geometry on Bose-Einstein condensation in optical lattices*, **wykład**
XXXIV International Conference of Theoretical Physics: Correlations & Coherence at Different Scales (Ustroń, 2010)
6. *Bose Condensation In Optical Lattice: Effect Of Next-nearest Neighbors Hopping*, **plakat**
35th Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics, (Pont-à-Mousson, France, 2010)
7. *Electronic spectral functions vs antiferromagnetic order in two-dimensional Hubbard model (Elektronowe funkcje spektralne a porządek antyferromagnetyczny w dwuwymiarowym modelu Hubbarda)*, **wykład**
XIV Krajowa Szkoła Nadprzewodnictwa: nadprzewodnictwo i niejednorodne układy skondensowane, (Ostrów Wielkopolski 2009)
8. *Néel order and correlations in the two- and three-dimensional Hubbard model: crossover from weak to strong interaction regime*, **plakat**
XXXII International Conference of Theoretical Physics: Coherence and Correlations in Nanosystems, (Ustroń 2008)
9. *Antiferromagnetic order in the Hubbard model: Spin-charge rotating reference frame approach*, **plakat**
Unconventional Phases and Phase Transitions in Strongly Correlated Electron Systems, (Dresden, Germany 2008)

10. *Mott transition in the half-filled Hubbard model of high- T_c superconductor*, **plakat**
32nd Conference of the Middle European Cooperation in Statistical Physics, (Łądek Zdrój 2007)

11. *Antiferromagnetic order in the Hubbard model: spin-charge rotating reference frame approach*, **plakat**
XIII Krajowa Szkoła Nadprzewodnictwa: nadprzewodnictwo, uporządkowanie spinowe i ładunkowe, (Łądek Zdrój 2007)

12. *The Existence of the 60 K Plateau in the $YBa_2Cu_3O_{6+y}$ Phase Diagram: the Role of Oxygen Ordering and Charge Imbalance*, **plakat**
XII Krajowa Szkoła Nadprzewodnictwa: Układy skorelowanych elektronów wczoraj i dziś (Ustroń 2006)

13. *Influence of oxygen ordering and charge imbalance on the existence of the 60-K plateau in the $YBa_2Cu_3O_{6+y}$ phase diagram*, **plakat**
Materials and Mechanisms of Superconductivity, (Dresden, Germany 2006)

14. *Dependence of the critical temperature on the number of CuO layers in homologous series of high-temperature superconductors (Zależność temperatury krytycznej od liczby warstw miedziowo-tlenowych w szeregach homologicznych nadprzewodników wysokotemperaturowych)*, **wykład**
X Krajowa Szkoła: Nadprzewodnictwo wysokotemperaturowe i inne zjawiska w perowskitach, (Warszawa 2004)

15. *Magnetic correlations in the $SO(5)$ theory of high-temperature superconductivity*, **plakat**
Quantum Phase Transitions, (Dresden, Germany 2003)

16. *$SO(5)$ superconductor in a Zeeman magnetic field*, **plakat**
Third International Workshop on Magnetism and Superconductivity of Advanced Materials, (Łądek Zdrój 2002)

17. *Phase diagrams in the $SO(5)$ quantum rotator theory of the high- T_c superconductivity*, **plakat**
The 6th International Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors", (Houston, TX, USA 2000)



6. Przebieg pracy naukowej

6a. Okres przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora

W roku 1994 rozpocząłem 5-letnie studia z fizyki na Politechnice Wrocławskiej, specjalizacja: fizyka ciała stałego. W roku 1999 obroniłem pracę magisterską zatytułowaną: *"Teoria nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego: unifikacja nadprzewodnictwa i antyferromagnetyzmu w ramach grupy symetrii $SO(5)$ "*, której promotorem był prof. Tadeusz Kopeć z Instytutu Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych (INTiBS) PAN. W tym samym roku rozpocząłem studia doktoranckie w INTiBS, gdzie kontynuowałem prace nad modelem opisu nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego w ramach grupy symetrii $SO(5)$. Pracę doktorską pod tytułem *"Theory of unification of superconductivity and antiferromagnetism based on the $SO(5)$ symmetry group in the physics of high-temperature superconductors"* (promotor: prof. Tadeusz Kopeć) obroniłem w roku 2003. Celem pracy doktorskiej (zainicjowanym w czasie tworzenia pracy magisterskiej) było zbadanie podstawowych własności modelu nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego zaproponowanego przez Zhanga, którego istotą była unifikacja nadprzewodnictwa i antyferromagnetyzmu w ramach grupy symetrii $SO(5)$. Wstępna analiza wykonana w oryginalnej pracy Zhanga wskazywała na obiecujące właściwości modelu: w szczególności przewidywane scenariusze diagramów fazowych zdawały się odtwarzać podstawowe zachowania nadprzewodzących miedzianów. Wyniki te zostały uzyskane jednak w bardzo uproszczonym klasycznym podejściu, w granicy zerowej temperatury. Wymagały więc sprawdzenia w bardziej realistycznym przybliżeniu. Ponieważ w teorii $SO(5)$ wewnętrzne stopnie swobody znajdują się pod wpływem zarówno fluktuacji termicznych, jak i kwantowych, efekt tego współzawodnictwa może być wysoce nietrywialny. Z tego powodu analiza teorii $SO(5)$ uwzględniająca te fluktuacje oraz ich wpływ na rotację superspinu pomiędzy podprzestrzeniami AF (antyferromagnetyzm) i SC (nadprzewodnictwo) była niezwykle interesująca nie tylko z powodu ogólnego zrozumienia teorii kwantowych przemian fazowych i związanych z nimi zjawisk krytycznych. Bardzo istotna była także możliwość wpływu kwantowego punktu krytycznego o symetrii $SO(5)$ na pojawienie się własności stanu normalnego odbiegających od opisu cieczy Fermiego, nadprzewodnictwa ze szczeliną typu d oraz silnej zależności temperatury krytycznej stanu nadprzewodzącego od domieszkowania. Systematyczne sformułowanie zagadnienia w ujęciu kwantowym napotykało dwie trudności: natura problemu wymagała uwzględnienia jego dynamiki, a także obecność fluktuacji kwantowych i termicznych uniemożliwiała zastosowanie przybliżeniu średniego pola. W związku z tym zastosowanie mapowania kwantowego Hamiltonianu $SO(5)$ pozwoliło na wyznaczenie różnorodnych własności modelu, zbadanie możliwych scenariuszy diagramu fazowego temperatura-domieszkowanie oraz temperatura-potencjał chemiczny. Uwzględniony został przypadek anizotropii i zweryfikowane zostały przybliżone wyniki zasugerowane przez autora modelu – Zhanga. Dodatkowo zbadane zostały właściwości termodynamiczne modelu zarówno przy braku, jak i w obecności zewnętrznego pola magnetycznego, ewolucja magnetycznych funkcji korelacyjnych oraz wynikających z nich wielkości mierzalnych eksperymentalnie: przesunięcia Knighta, współczynników relaksacji NMR, itd. Przystudiowany został także scenariusz kwantowego punktu krytycznego, a uzyskane rezultaty zostały porównane z danymi doświadczalnymi celem sprawdzenia przydatności modelu. Wszystkie cele założone przy tworzeniu pracy doktorskiej zostały osiągnięte, a wyniki badań zostały opublikowane w pracach [1-8].

6b. Okres po uzyskaniu stopnia naukowego doktora

W roku 2004 rozpocząłem pracę w Instytucie Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych PAN na stanowisku adiunkta w grupie prof. Tadeusza Kopcia. Pierwszym zagadnieniem, którym się zainteresowałem był wpływ geometrii sieci krystalicznej na własności wybranych związków z grupy nadprzewodników wysokotemperaturowych. Koncentrując się na opisie nadprzewodnictwa wysokotemperaturowego w języku kolektywnych zmiennych fazowych, wykorzystany został półmikroskopowy opis oparty na modelu XY. Model pozwalał na uwzględnienie skomplikowanej geometrii sieci krystalicznej i na początku użyty został do opisu zachowania szeregów homologicznych nadprzewodników rtęciowych celem wyjaśnienia nietypowej zależności temperatury krytycznej tych związków od liczby warstw (n) miedziowo-tlenowych (Cu-O) w komórce elementarnej (maksimum temperatury krytycznej dla $n=3$). Warstwową strukturę związków została wprowadzona do trójwymiarowego modelu XY poprzez regulowane wewnątrz-, międzypłaszczyznowe oraz między blokowe sztywności fazowe, co pozwoliło na odzwierciedlenie skomplikowanej struktury szeregów homologicznych w kierunku osi c . Użycie przybliżenia sferycznego pozwoliło na rozwiązanie modelu przy zastosowaniu metody macierzy przejścia i wyznaczenie temperatury krytycznej dla wybranej liczby warstw n . Wyniki okazały się jednak nie odzwierciedlać obserwowanej eksperymentalnie zależności temperatury krytycznej. Z tego powodu do modelu wprowadzona została możliwość reorganizacji ładunku elektrycznego pomiędzy różnymi warstwami bloku (komórki elementarnej) określona współczynnikiem rozwarstwienia ładunku będącym funkcją liczby płaszczyzn Cu-O (n) w bloku. Wprowadzając uzasadnione fizycznie założenia dotyczące zależności mikroskopowych sztywności fazowych od domieszkowania podejście pozwoliło na wyznaczenie wartości współczynnika rozwarstwienia w funkcji rozmiaru bloku, które okazało się być w dobrej zgodności z wynikami jądrowego rezonansu magnetycznego wyznaczającymi rozkład ładunku elektrycznego pomiędzy warstwami Cu-O szeregów homologicznych [9-10]. Podobne podejście zostało zastosowane także do zbadania diagramu fazowego wysokotemperaturowego nadprzewodnika YBCO i wyjaśnienia pochodzenia charakterystycznego stałotemperaturowego obszaru „plateau” na tymże diagramie. Regulowane parametry reprezentujące mikroskopowe sztywności fazowe pozwoliły na opisanie charakterystycznych dla YBCO skal energii i uwzględnienie anizotropii wewnątrz płaszczyzn bazowych symulujące obserwowane porządkowanie tlenu w łańcuchach. Okazało się jednak, iż sama zmiana geometrii (porządkowanie tlenu) nie może być odpowiedzialna za obecność plateau. Opierając się jednak na danych eksperymentalnych ujawniających fakt, iż domieszkowanie tlenem w YBCO może wprowadzać istotne zmiany gęstości ładunku pomiędzy warstwami Cu-O oraz pozostałymi obszarami komórki elementarnej pokazane zostało, iż pierwsze z nich muszą być mocno niedomieszkowane, podczas gdy drugie – silnie przedomieszkowane w niemal całym obszarze diagramu fazowego, w którym YBCO jest nadprzewodzące. W efekcie wzrost koncentracji tlenu prowadzi do powstania dwóch przeciwstawnych czynników, które mogą prowadzić do pojawienia się obszaru plateau [11-13].

Opisane prace zostały rozpoczęte w INTiBS we Wrocławiu i kontynuowane były podczas 12-miesięcznego pobytu na Uniwersytecie Illinois w Urbana-Champaign, w grupie prof. Anthony’ego J. Leggetta w ramach stypendium zagranicznego Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej.

Po powrocie do Polski kontynuowałem pracę w INTiBS kierując swe zainteresowania ku własnościom silnie skorelowanych układów fermionów i bozonów w ramach podejścia będącego podstawą

niniejszej procedury habilitacyjnej [14-22, 24-26]. Rozpocząłem jednocześnie współpracę z dr. Tomaszem Polakiem z Wydziału Fizyki Uniwersytetu Adama Mickiewicza w Poznaniu, co zaowocowało wspólną publikacją [21]. Rozpocząłem także współpracę z grupą prof. V.-H. Trana (fizyka doświadczalna) dotyczącą własności nowych nadprzewodników żelazowych. Zaowocowało to moim wkładem w czasie badań związku $\text{Eu}(\text{Fe}_{0.81}\text{Co}_{0.19})_2\text{As}_2$, który został zsyntetyzowany i badany w grupie. Wykazywał bardzo interesujące własności, m. in. nadprzewodnictwo indukowane polem magnetycznym, co zostało wcześniej zaobserwowane tylko w kilku związkach. W ramach współpracy zaproponowałem teoretyczny schemat opisujący mechanizm indukcji nadprzewodnictwa: w układach silnie anizotropowych, orbitalny efekt niszczenia par może być zmniejszony, gdy pole magnetyczne jest przyłożone równoległe do warstw przewodzących w związku z ograniczeniem ruchomości elektronów w kierunku prostopadłym do pola. Jednak w takiej sytuacji nawet słabe pole magnetyczne lub składowa magnetyzacji równoległa do kierunku c może być wystarczająca do wywołania niszczącego pary efektu orbitalnego. W badanym przypadku taką właśnie małą składową było naturalne odchylenie momentów magnetycznych europu obecne w zerowym polu magnetycznym. Jednak nawet małe zewnętrzne pole magnetyczne wystarczało do zdsuszenia składowej ferromagnetycznej i wyindukowania nadprzewodnictwa [23].

W najbliższej przyszłości planuję kontynuować prace nad układami silnie skorelowanych bozonów, w szczególności zbadać własności spektralne układów trójwymiarowych także znajdujących się pod wpływem syntetycznego pola magnetycznego. Obszar ten jest szczególnie interesujący, ponieważ umożliwia obserwacje zjawisk transportowych charakterystycznych dla materiałów takich jak grafen w układach atomów w sieciach optycznych. Szczególne przydatne będzie więc uzyskanie zależności pędowej widma wzbudzeń w zewnętrznym polu. Jednak długofalowym celem jest powrót do badań układów skorelowanych fermionów i wyznaczenie pędowej zależności widm wzbudzeń modelu Hubbarda w obecności zarówno uporządkowania antyferromagnetycznego, jak i nadprzewodzącego. Przeprowadzenie tych obliczeń może być ułatwione dzięki doświadczeniu zdobytemu w czasie badania układów bozonowych. Ponadto przydatne mogą być także doświadczenia zdobyte w czasie tworzenia pracy doktorskiej, gdyż uwzględnienie uporządkowania nadprzewodzącego oraz antyferromagnetycznego w modelu Hubbarda doprowadzi do efektywnego modelu zawierającego zmienne pseudo-fermionowe oraz pola cechowania opisywane wspólną grupą symetrii $\text{SO}(5)$.

Tomaz Zabel