

Prof. dr hab. Tadeusz K. Kopeć,

Wrocław, 12.07.2021

**Instytut Niskich Temperatur i Badań Strukturalnych**

**im. Włodzimierza Trzebiatowskiego**

**Polskiej Akademii Nauk**

**Ul. Okólna 2, 50-422 Wrocław**



*Ocena osiągnięć Pani dr Agnieszki Cichy w związku z postępowaniem o nadanie jej stopnia doktora habilitowanego*

Dotychczasowa kariera naukowa Pani dr Agnieszki Cichy związana jest z Uniwersytetem im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, gdzie w 2006 roku ukończyła studia magisterskie broniąc pracę pt.: *„Przejście BCS-BEC w nadprzewodnikach wysokotemperaturowych i ultrazimnych gazach kwantowych”*, pod kierunkiem promotora: prof. dr. hab. Romana Micnasa., a w 2012 obroniła pracę doktorską pt.: *“The influence of magnetic field on the superconducting properties and the BCS-BEC crossover in the systems with local fermion pairing”*, również pod kierunkiem prof. dr. hab. Romana Micnasa. W latach 2014-2016 przebywała na stażach podoktorskich w Instytucie Fizyki Teoretycznej na Uniwersytecie Goethego we Frankfurcie nad Menem. W latach 2017-2021 pracowała naukowo na stażu podoktorskim wspieranym przez Narodowe Centrum Nauki w ramach grantu. Od roku 2020 zatrudniona jest na stanowisku adiunkta na Wydziale Fizyki, Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, w Zakładzie Teorii Materii Skondensowanej.

Osiągnięciem naukowym, które jest podstawą wniosku o nadanie Pani Agnieszce Cichy stopnia doktora habilitowanego, jest cykl sześciu publikacji w międzynarodowych czasopiśmie (*Physical Review A i B*, oraz *Annals of Physics*) opatrzone wspólnym tytułem: „*Magnetyczne oraz nadprzewodzące fazy w modelach na sieci realizowane w ultrazimnych mieszaninach atomowych na sieciach optycznych*”. Wszystkie publikacje są pracami wielo-autorskimi (od 2 do 4 autorów), do których dołączone zostały deklaracje poszczególnych twórców odnośnie ich indywidualnego wkładu. Publikacje ukazały się w latach 2014-2018.

### **1. Ocena osiągnięcia naukowego**

We wprowadzeniu do swojego autoreferatu Habilitantka podkreśla, że w ostatnich latach byliśmy świadkami ogromnego postępu w zrozumieniu i wytwarzaniu układów ultra-zimnych gazów kwantowych, które dostarczają unikalnych możliwości symulacji kwantowych oddziałujących układów wielu ciał. Możliwość kontroli wszystkich istotnych aspektów takich symulacji umożliwia wgląd w fizyczne mechanizmy, które nie mogły być zrozumiane w konwencjonalnych, „naturalnych” układach fizyki fazy skondensowanej. Jak zauważa, postępy w technikach eksperymentalnych zmieniły także status układu opisywanego hamiltonianem Hubbarda, który przestał on być jedynie modelem zjawisk w fizyce fazy skondensowanej. Postęp w ultra-zimnych gazach umożliwił uzyskanie pełnej eksperymentalnej realizacji dla modelu Hubbarda w różnych sytuacjach fizycznych i użycie go jako bazy dla symulacji kwantowych. Habilitantka podkreśla, że otworzyło to nowe możliwości badawcze, w których opis teoretyczny może być bezpośrednio porównany z eksperymentem. W ten sposób, jak zauważa, pojawiły się nowe perspektywy rozwiązania ważnych problemów fizyki materii skondensowanej. W aspekcie metodologii Habilitantka wskazuje na potrzebę nieperturbacyjnego teoretycznego podejścia do problemu

silnie skorelowanych układów w ramach techniki – tzw. dynamicznego pola średniego (z ang. *Dynamical Mean Field Theory* (DMFT)), która to technika jest jedną z głównych metod użytą w jej badaniach. To podejście pozwala zachować wszystkie dynamiczne fluktuacje kwantowe samo-zgodnego efektywnego problemu na węźle, na który, jak w standardowych teoriach pola średniego, problem pełnej sieci jest odwzorowany.

Artykuł pierwszy cyklu prac przedłożonych do oceny osiągnięcia naukowego podejmuje próbę systematycznego badania wpływ pola Zeemana na charakterystyki nadprzewodzące trójwymiarowego układu w ramach spinowo-spolaryzowanego modelu Hubbarda z przyciąganiem na węźle z  $U < 0$ , zarówno w granicy słabego jak i silnego sprzężenia. Autorzy pracy użyli przybliżenia pola średniego typu BCS-Stoner (z oraz bez członu Hartree zależnego od spinu) aby uzyskać diagramy fazowe stanu podstawowego dla różnych geometrii sieci (sieć Bethego, sieć prosta kubiczna, przestrzennie centrowana oraz centrowana) Przeanalizowano szczegółowo przejście BCS-BEC oraz stabilność różnych faz nadciekłych. Zasugerowano możliwość pojawienie się fazy Fuldego-Ferrella i Larkina-Ovchinnikova (FFLO) w układzie trójwymiarowym na sieci.

W drugiej pracy autorzy badali współzawodnictwo efektu Zeemana oraz mechanizmu rozrywania par poprzez efekt orbitalny. Efekty Zeemana określają górną granicę występowania nadprzewodnictwa, ale w typowych układach ciała stałego efekty orbitalne również grają bardzo ważną rolę. Współzawodnictwo pomiędzy efektem Zeemana a orbitalnym jest niezwykle istotne dla nadprzewodników, ponieważ ten drugi efekt zwykle niszczy nadprzewodnictwo wcześniej niż ten pierwszy. Głównym celem tej pracy była analiza stanu podstawowego układu opisywanego fermionowym modelem Hubbarda w obecności zarówno pola Zeemana jak i pola orbitalnego (gdzie drugi efekt został

uwzględniony w gęstości stanów używanych do rozwiązywania samo-zgodnych równań pola średniego). Pokazano, że fakt uwzględnienia efektów orbitalnych elektronów poruszających się po sieci kwadratowej wzbogaca diagram fazowy i wskazuje na obecność nowych zjawisk fizycznych. Na diagramach fazowych znaleziono pięć faz: stan BCS, częściowo/całkowicie spolaryzowany stan normalny oraz częściowo/całkowicie spolaryzowany obszar separacji faz. Zaobserwowano oscylacje w regionie separacji fazowej ze zmianami koncentracji nośników, które silnie zależą od strumienia pola.

Z kolei w pracy trzeciej autorzy zainspirowani eksperymentami w ultra-zimnych gazach z użyciem atomów metali ziem rzadkich oraz ziem alkalicznych (ang. *alkaline-earth-like*, AEL) pozwolił w ostatnich latach na badanie nowych stanów materii. W tym artykule badano własności temperaturowe ultra-zimnych czteroskładnikowych mieszanin atomów AEL na sieciach optycznych, które mogą być efektywnie opisywane dwupasmowym modelem Hubbarda z regułami Hunda. Głównym celem tego przedsięwzięcia było zbadanie wpływu oddziaływania wymiany na fazy magnetyczne w skończonych temperaturach, dla szerokiego zakresu koncentracji nośników. Zastosowano metodę DMFT oraz jej uogólnienie dla przestrzeni rzeczywistej aby otrzymać temperaturowe diagramy fazowe, włączając przejścia fazowe pomiędzy magnetycznie uporządkowanymi stanami. Wyznaczono diagramy fazowe w zmiennych: temperatura  $T$  vs. potencjał chemiczny  $\mu$  (który jest wejściową zmienną w analizie numerycznej) lub vs. koncentracja nośników  $n$  (gęstość atomów na węzeł sieci, która jest bardziej istotna dla eksperymentu).

Jednym z ważnych aspektów eksperymentalnych są układy sieciowe fermionów, badane w czwartej z prac, gdzie poddano analizie ultra-zimny gaz fermionowy umieszczony na quasi-jednowymiarowej sieci optycznej. W szczególności,

autorzy pracy skupili się na własnościach nadprzewodzących tego układu w ramach spinowo-spolaryzowanego, przyciągającego modelu Hubbarda. Zastosowano przybliżenie pola średniego do wyznaczenia diagramów fazowych w stanie podstawowym. Znaleziono stabilną fazę nadprzewodzącą FFLO oraz parowanie typu  $\eta$  (co stanowi ekstremalny przypadek fazy FFLO), zarówno dla ustalonego potencjału chemicznego jak i ustalonej koncentracji nośników. Badano również przejście BCS-BEC w tym układzie oraz magnetyczne przejście typu Lifshitz (ang. *magnetic Lifshitz transition*, MLT).

W pracy piątej Habilitantka wraz z współautorami badają diagram fazowy modelu Hubbarda z oddziaływaniem przyciągającym na węzle, na sieci typu plastra miodu. Zasugerowano między innymi, że przejście fazowe pomiędzy fazą metaliczną a zdegenerowanymi stanami takimi jak fale gęstości ładunku/faza nadprzewodząca w paśmie półpełnym jest związane z przejściem BCS-BEC z dala od pasma półpełnego. W tej pracy badano także niekonwencjonalne fazy nadciekłe w mieszaninach z nierównowagą populacji nośników umieszczonych na sieci o geometrii plastra miodu. Zastosowano metodę pola średniego by otrzymać diagramy stanu podstawowego, w tym niekonwencjonalną fazę FFLO. Jak zauważają autorzy, taki układ można zrealizować w eksperymentach z ultra-zimnymi gazami, umieszczając atomy w dwóch różnych stanach nadsubtelnych na sieci w kształcie plastra miodu. Jak konkludują autorzy, powyższe rezultaty mogą być pomocne w eksperymentalnej realizacji fazy FFLO na sztucznie wykreowanej heksagonalnej sieci optycznej,

Imponujący rozwój technik eksperymentalnych w ultra-zimnych zdegenerowanych gazach kwantowych atomów metali ziem rzadkich oraz ziem alkalicznych (np.  $^{173}\text{Yb}$ ) w ostatnich latach umożliwił badanie silnie skorelowanych układów wieloorbitalnych. Zmotywowani niedawnym

postępem eksperymentalnym, w ostatnim artykule cyklu autorzy zbadali stabilność porządku ferromagnetycznego w wielo-orbitalnym modelu Hubbarda, stosując metodę DMFT, która pozwala na pełne ujęcie symetrii rotacyjnej  $SU(2)$  oddziaływań między cząstkami o spinie  $1/2$ . Przeanalizowano powiązania powyższego modelu z modelem podwójnej wymiany i zaobserwowano również duże znaczenie procesów odwrócenia spinu ( ang. *spin-flip processes*).

Podsumowując tę część osiągnięcia naukowego należy jednoznacznie stwierdzić, że stanowiące je badania dotyczą bardzo aktualnego problemu. Dlatego też prace Pani dr Agnieszki Cichy bardzo dobrze wpisują się w eksperymentalno-teoretyczny nurt poszukiwań układów sieciowych bozonów i fermionów, w których efekty związane z przejściami fazowymi stanowią dominujący składnik rozważanej fizyki. Autorka przedstawiła zbiór prac eksplorujących różnego rodzaju zjawiska fizyczne w ultra-zimnych gazach na sieci, takie jak: orbitalny magnetyzm (w szczególności reżimy parametrów najbardziej sprzyjające obserwacji faz uporządkowanych magnetycznie) oraz nadciekłość (w tym kontekście, przejście BCS-BEC oraz stabilność różnych niekonwencjonalnych stanów nadprzewodzących). Realizacja tych badań bez wątplenia prowadzi do lepszego zrozumienia magnetyzmu kwantowego, przejścia BCS-BEC oraz niekonwencjonalnej nadciekłości w układach będących przedmiotem bezpośredniego zainteresowania eksperymentalnego.

## **2. Ocena pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych oraz aktywności naukowej, dydaktycznej i popularyzatorskiej**

Pan dr Agnieszka Cichy w autoreferacie podaje, że całkowita liczba jej publikacji wynosi 28, z czego 6 zostało opublikowanych przed uzyskaniem doktoratu. Web of Science aktualnie podaje całkowitą liczbę 27. Baza ta podaje również jej  $h$ -

index wynoszący 6, oraz liczbę cytowań prac, których była współautorem: 121. Na dorobek habilitantki, składają się prace w renomowanych czasopismach o wysokim wskaźniku *impact* (np. 5 prac w *Phys Rev*, 2 prace w *Sci. Rep.* oraz jedna w *Nucl. Phys.*). Większość prac habilitantki to publikacje, które powstały we współpracy z badaczami z wielu ośrodków, gdzie Pani Agnieszka Cichy odbywała szereg staży naukowych. Współpracę międzynarodową można więc ocenić jako bardzo owocną. Habilitantka wygłosiła szereg referatów na konferencjach, z czego 4 z nich to wykłady na zaproszenie. Kierowała i brała udział także w szeregu grantach (w tym grantach obliczeniowych) fundowanych przez instytucje krajowe (NCN) i zagraniczne.

Habilitantka zaangażowana była w szereg przedsięwzięć popularyzujących naukę takich jak artykuły popularnonaukowe, prezentacje na konferencjach fizyczno-filozoficznych, czy też wykładach dla uczniów szkół średnich. Była także koordynatorem cotygodniowych seminariów na Johann Wolfgang Goethe-Universitaet (Frankfurt/Main) oraz na Uniwersytecie im. Adama Mickiewicza (Poznań). Pani Agnieszka Cichy posiada również bogate doświadczenie dydaktyczne: była promotorem pracy magisterskiej, prowadziła szereg ćwiczeń z fizyki teoretycznej, mechaniki statystycznej, mechaniki kwantowej a także z matematyki. Prowadziła również wykład pt. „*Wybrane zagadnienia z fizyki*” dla studentów biologii (Uniwersytet im. Adama Mickiewicza (Poznań)).

## **Podsumowanie**

Wszystkie przedstawione do oceny prace pokazują bardzo dobre opanowanie przez habilitantki technik zaawansowanej teorii pól kwantowych, obliczeniowych i swobodne posługiwanie się nimi zarówno od strony technicznej, jak i fizycznej interpretacji wyników. Prace z obszaru odnoszącego się do modeli silnie oddziałujących bozonów i fermionów wnoszą istotny wkład do

fizyki gazów sieciowych, zawierają porządne obliczenia i napisane są w zwięzły i elegancki sposób w szczególności w odniesieniu do graficznej strony prezentowanych wyników.

Podsumowując, uważam, że dorobek Pani dr. Agnieszki Cichy jest wystarczający dla uzyskania stopnia doktora habilitowanego, zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego dotyczącego kryteriów oceny osiągnięć osoby ubiegającej się o nadanie stopnia doktora habilitowanego. Jej osiągnięcia naukowo-badawcze, współpraca międzynarodowa, osiągnięcia dydaktyczne i popularyzatorskie, spełniają ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane przy ubieganiu się o stopień doktora habilitowanego. Dlatego też rekomenduję Komisji Habilitacyjnej wydanie pozytywnej opinii w sprawie nadania Pani dr Agnieszce Cichy stopnia doktora habilitowanego w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne.



Tadeusz K. Kopec