



Dr hab. Tomasz Sowiński, prof. IF PAN
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warszawa
tomasz.sowinski@ifpan.edu.pl

Warszawa, 18 listopada 2021 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Piotra Dariusza Zdybła pt.
„Kwantowe przemiany fazowe w spolaryzowanych mieszaninach
ultrazimnych atomów fermionowych o nierównych masach”**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgra Piotra Zdybła została przygotowana na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego pod kierunkiem dra hab. Pawła Jakubczyka — specjalisty w dziedzinie teorii przemian fazowych i zjawisk krytycznych. Jest to dysertacja napisana w języku polskim, na którą składa się osiem rozdziałów, trzy załączniki oraz obszerny spis literatury zawierający aż 259 pozycji. Dodatkowo, zgodnie z obowiązującymi przepisami, praca poprzedzona jest streszczeniem w języku polskim oraz angielskim. Naukowa część rozprawy opiera się na oryginalnych wynikach naukowych zawartych w trzech artykułach naukowych opublikowanych w latach 2018–2020 w prestiżowych czasopismach o zasięgu międzynarodowym, tj. w *Journal of Physics: Condensed Matter*, *Physical Review A*, oraz *Physical Review Research*. Warto w tym miejscu podkreślić, że we wszystkich tych publikacjach pierwszym autorem jest mgr Zdybel, a jedynym współautorem jest dr hab. Paweł Jakubczyk. W tym przypadku nie ma zatem żadnych wątpliwości, że rozprawa stanowi opis indywidualnych osiągnięć naukowych doktoranta dokonanych pod bezpośrednim nadzorem i przy współudziale swojego promotora.

Rozprawa mgra Zdybła dotyczy jednego z najbardziej aktualnych problemów fizyki silnie skorelowanych układów wielu ciał, tj. zrozumienia nieklasycznych, kolektywnych własności mieszanin fermionowych o różnych masach w sytuacji, gdy układ, na skutek zmian zewnętrznych parametrów kontroli, jest przeprowadzany między fazą nadciekłą, a fazą normalną, czyli przez tzw. przejście BEC-BCS. Choć sam problem tego przejścia jest bardzo stary, bo sięga początków drugiej połowy ubiegłego wieku, to w ostatnich latach nabrał nowego znaczenia za sprawą eksperymentalnych możliwości jakie pojawiły się w domenie fizyki atomowej. Dzięki niespotykanemu postępowi w precyzyjnym kontrolowaniu układów atomowych możliwe stało się bowiem bezpośrednie badanie układów fizycznych opisywanych modelami, które wcześniej uznawane były za teoretyczne ciekawostki, a w najlepszym razie za bardzo uproszczone modele efektywne opisujące zachowanie elektronów w sieci krystalicznej ciał stałych. Wraz z wejściem fizyki atomowej na pole zjawisk wielu ciał otworzyły się całkowicie nowe możliwości i wiele pytań, których wcześniej nie formułowano, zaczęło mieć wręcz fundamentalne znaczenie doświadczalne. Jednym z takich zagadnień jest właśnie badanie mieszanin fermionowych o różnych masach. W tym kontekście rozprawa mgra Zdybła staje się bardzo aktualna i łącząca kilka różnych gałęzi fizyki. Z jednej strony dotyczy ona bowiem szeroko stawianych zagadnień i możliwych do doświadczalnego zweryfikowania przewidywań dotyczących ultrazimnych, niezbalansowanych,

fermionowych mieszanin atomowych. Z drugiej, uruchamia i prezentuje skuteczność całego precyzyjnego aparatu matematycznego teorii przemian fazowych i zjawisk krytycznych rozwijanego wcześniej w innych kontekstach. Z trzeciej, może rzucić nowe światło na problematykę istnienia egzotycznych faz kwantowych leżących w obrębie zainteresowań fizyki ciała stałego takich jak słynna faza FFLO (Fulde-Ferrel-Larkin-Ovchinnikov) czy faza Sarmy. Czytając tę rozprawę miałem ciągle uczucie, że mgr Zdybel doskonale zdaje sobie sprawę z tego wielowątkowego kontekstu i konsekwentnie trzyma się takiej narracji.

Po krótkim wprowadzeniu w tematykę rozprawy w rozdziale pierwszym, autor poświęca dwa kolejne na zanurzenie całej rozprawy w kontekst współczesnych eksperymentów w domenie fizyki ultrazimnych gazów atomowych (Rozdział 2.) oraz w nowoczesnym, mocno sformalizowanym podejściu do teorii przemian fazowych (Rozdział 3.). Choć oba rozdziały mają charakter autorskiego pobieżnego przeglądu idei, wyników oraz technik doświadczalnych i teoretycznych, to są one napisane na tyle zgrabnie i przejrzyście, że dodają rozprawie waloru dydaktycznego, który na pewno należy docenić.

Rozdział 4. to pierwszy fragment rozprawy zawierający oryginalne wyniki badań prowadzonych przez mgra Zdybla. Jest to swoiste przygotowanie odpowiednich narzędzi, które w dalszych częściach pozwolą uzyskiwać kolejne rezultaty. W tym rozdziale Autor formułuje rozważany problem w języku całek funkcjonalnych i stosuje typowy zabieg uwalniający od zmiennych fermionowych (tzw. „bozonizację”) wykonując transformację Hubbarda-Stratanovicha. Następnie, wykorzystując fizyczny fakt, że w fazie nadciekłej pary Coopera makroskopowo obsadzają jeden z orbitali, wyłuskuje najbardziej istotny wkład do działania, tzw. potencjał efektywny, a także pierwszą poprawkę pochodzącą od niewielkich fluktuacji względem sytuacji jednorodnej. Muszę przyznać, że ten dość techniczny rozdział jest napisany w sposób przemyślany, a przez to bardzo czytelny. Choć zawiera on sporo szczegółów niezbędnych do utrzymania toku rozumowania, to równocześnie pomija drobiazgowy wyprowadzenia. Bardzo dobrym zabiegiem jest wyciągnięcie części z nich do załącznika dla zainteresowanego czytelnika. Rozdział kończy się ciekawą i wyczerpującą interpretacją poszczególnych części uzyskanego propagatora.

W rozdziale piątym mgr Zdybel rozpoczyna analizę od wyznaczenia własności układu w ramach teorii pola średniego. Dzięki wcześniej wyprowadzonemu potencjałowi efektywnemu wykreśla zarówno diagramy fazowe jak i koncentracje atomów w poszczególnych składnikach dla różnych parametrów, w tym dla różnych stosunków mas r . Jak wynika z przeprowadzonej analizy, już na tym poziomie widać nietrywialny wpływ tego parametru na własności fermionowej mieszaniny. Wraz ze wzrostem stosunku mas, diagram fazowy w zmiennych temperatura—pole magnetyczne przestaje być symetryczny względem zerowego pola, a punkty trójkrytyczne przesuwają się ku niższym temperaturom. Dalsza część rozdziału poświęcona jest głębszej analizie potencjału efektywnego wg kanonicznego podejścia Landaua do przemian fazowych, tj. poprzez rozwinięcie w parzyste potęgi parametru porządku. Dzięki temu możliwe jest głębsze zbadanie różnych własności układu w pobliżu punktu krytycznego w zależności od stosunku mas fermionów. W moim odczuciu najciekawszą częścią tego rozdziału jest rozumowanie z wykorzystaniem

gradientowego rozwinięcia efektywnego działania. Prowadzi ono bowiem do ilościowego i doświadczalnie weryfikowalnego sformułowania warunku na sprowadzenie układu do punktu wielokrytycznego (tzw. punktu Lifszycy), w którym dwie fazy nadciekłe (jednorodna faza BCS oraz faza FFLO) mogłyby współistnieć z fazą normalną.

Po dogłębnym przeanalizowaniu własności układu przy założeniu jednorodnej konfiguracji parametru porządku, w kolejnym rozdziale mgr Zdybel szczegółowo analizuje fluktuacje unoszone przez wzbudzenia fononowe. Poprzez rozwinięcie gradientowe propagatora fluktuacji szybko otrzymuje odpowiednią relację dyspersyjną z charakterystycznym dla wzbudzeń Bogoliubova liniowym zachowaniem dla małych pędów przechodzącym w kwadratową zależność dla pędów dużych. Następnie, poprzez uwzględnienie dodatkowych nielokalnych członów w rozwinięciu, Autor identyfikuje człony odpowiedzialne za tłumienie typu Landaua i wyznacza współczynnik tłumienia po stronie nadciekłej. Rozdział zamyka przeprowadzenie analogicznej analizy po drugiej stronie punktu krytycznego dla fazy normalnej układu. Wynika z niej jasno, że tłumienie Landaua może zachodzić tylko, gdy energetycznie dopuszczalne jest wprowadzenie do układu cząstki cięższej, a wzbudzenie powstającej pary jest korzystne. Oba warunki oczywiście bardzo silnie zależą od stosunku mas fermionów tworzących poszczególne składniki mieszaniny, co ładnie ilustruje (anglojęzyczny) rysunek 6.7.

W Rozdziale 7. doktorant pochyła się nad problemem stabilności punktu krytycznego po uwzględnieniu fluktuacji parametru porządku. Jak słusznie wskazuje Autor dysertacji, taka analiza jest potrzebna, gdyż w literaturze znane są modele, w których rodzaj przemiany fazowej zmienia się z ciągłego na nieciągły na skutek uwzględnienia fluktuacji. Pytanie jest tym bardziej zasadne, że niedopasowanie powierzchni Fermiego w analizowanym układzie może być bardzo duże ze względu na dość spore stosunki mas fermionów dostępnych doświadczalnie. Aby rozstrzygnąć ten problem mgr Zdybel uruchamia bardzo zaawansowany aparat nieperturbacyjnej teorii grupy renormalizacji i pokazuje, że przy zaniedbaniu tłumienia Landaua fluktuacje parametru porządku mają wpływ stabilizujący na rodzaj przemiany fazowej, tzn. raczej wzmacniają niż osłabiają jej ciągły charakter. Sytuacja zmienia się jednak, gdy w analizie zostaje uwzględnione tłumienie Landaua. Dla odpowiednio niskich temperatur, płynięcie stałych w kierunku punktu stałego jest blokowane. To może świadczyć o indukowaniu nieciągłej przemiany I rodzaju. To kolejny bardzo ciekawy i nieoczywisty wynik zaprezentowany w rozprawie.

W podsumowującym rozdziale pracy mgr Zdybel jeszcze raz przypomina najważniejsze problemy oraz wyniki zaprezentowane w swojej rozprawie i krótko wskazuje możliwe kierunki ich doświadczalnego sprawdzenia.

W tym miejscu chciałbym bardzo mocno podkreślić, że oprócz dużego ładunku naukowego rozprawa jest także bardzo dobrze przygotowana pod względem edytorskim. I nie chodzi jedynie o prawidłowy technicznie skład pracy, ale przede wszystkim o jej bardzo logiczną kompozycję, z czytelnymi wprowadzeniami do każdego z rozdziałów. Autor poświęcił bardzo dużo uwagi, aby czytelnika prowadzić przez kolejne problemy w sposób zrozumiały i dogłębny, a jednocześnie podejmuje próby (czasami nie do końca udane) unikania bardzo technicznych szczegółów. Niemal

każdy otrzymany wynik jest przy tym jasno skomentowany, co bardzo ułatwia budowanie intuicyjnego obrazu podejmowanych zagadnień. To wszystko sprawia, że całą pracę czyta się z naukową przyjemnością. Trzeba jednak przyznać, że — ze względu na bardzo zaawansowany aparat matematyczny — nie jest to lektura łatwa i wymaga od czytelnika bardzo dużego skoncentrowania.

Jak na tak obszerną pracę, drobnych potknięć oraz innych elementów, które mogłyby być lepiej przedstawione jest w rozprawie niezwykle mało. Do tych pierwszych (mało istotnych) zaliczyłbym przede wszystkim konsekwentne pomijanie przecinka przed zaimkiem „który” oraz niezbyt zgrabne posługiwanie się niezręczną kalką językową „selfenergia”. Jeśli chodzi o elementy merytoryczne, które mogłyby być lepiej zaprezentowane to wskazałbym na mało trafne skomponowanie niektórych rysunków. Nie mam tutaj na myśli tak prostych błędów jak brak podpisów osi na rysunkach 6.1 i 6.2, a raczej ich przekaz merytoryczny. Choć rozprawa dotyczy głównie badania roli stosunku mas fermionów należących do odrębnych składników na własności mieszaniny, to przedstawione rysunki nie zawsze adekwatnie ten wpływ ilustrują. Dobrym przykładem są tutaj rysunki 5.1 i 5.2, które mogłyby być połączone w jeden rysunek zawierający więcej przykładów dla różnych r i tym samym wpływ stosunku mas na diagram fazowy byłby lepiej zilustrowany. Podobny zabieg połączenia mógłby być zastosowany dla rysunków z rozdziału 6., które prezentują różne przewidywane własności modów Goldstone’a. Oczywiście te drobne niedociągnięcia nie mają dużego wpływu na ogólną czytelność rozprawy, a z pewnością nie mogą mieć żadnego ani na jej ciężar naukowy, ani na jej końcową ocenę.

Biorąc pod uwagę przedstawione argumenty stwierdzam, że rozprawa doktorska pana mgra Zdybła jest autorskim opisem oryginalnych, opublikowanych wyników naukowych doktoranta. Świadczy ona o umiejętności kandydata do samodzielnego prowadzenia badań naukowych. Nie mam żadnych wątpliwości, że dysertacja spełnia wszystkie formalne wymagania zawarte w obowiązujących przepisach ustawowych dotyczących postępowań w sprawie nadawania stopnia naukowego doktora, a także przepisach szczegółowych określonych przez Senat Uniwersytetu Warszawskiego. Praca, moim zdaniem, spełnia również wszystkie wymogi zwyczajowe, które są stawiane rozprawom doktorskim w zakresie fizyki teoretycznej. Dlatego z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie mgra Piotra Dariusza Zdybła do dalszych etapów przewodu doktorskiego w celu uzyskania pierwszego stopnia naukowego w zakresie fizyki.

