

Warszawa 18.11.2021

dr hab. inż. Gabriel Włazłowski
Politechnika Warszawska
Wydział Fizyki
gabriel.wlazlowski@pw.edu.pl

Dotyczy: Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Piotra Dariusza Zdybła

Rozprawa doktorska mgr. Piotra Dariusza Zdybła o tytule „Kwantowe przemiany fazowe w spolaryzowanych mieszaninach ultrazimnych atomów fermionowych o nierównych masach” przedstawia wyniki rozważań teoretycznych, dotyczących ogólnie pojętych własności przemian fazowych w kwantowych układach fermionowych o temperaturze bliskiej zera bezwzględnego. Rozprawa oparta jest o wyniki, które autor opublikował w trzech pracach: J. Phys. Condens. Matter 30, 305604 (2018); Phys. Rev. A. 100, 053622 (2019); Phys. Rev. Research 2, 033486 (2020). Są to uznane czasopisma (recenzowane) w środowisku fizycznym. Wymienione prace są dwuautorские a mgr P. Zdybel występuje za każdym razem jako pierwszy autor. Świadczy to o jego wiodącym wkładzie do prac.

Cele rozprawy są dobrze określone: zbadanie za pomocą metod fizyki teoretycznej wpływu nierównoważenia masowego i spinowego na właściwości przemian fazowych, zachodzących w ultrazimnych gazach fermionowych. Dotychczasowe badania w tej tematyce skupiały się głównie na znacznie prostszych sytuacjach. Zazwyczaj dotyczyły układów symetrycznych (równość potencjałów chemicznych $\mu_1 = \mu_2$ i równość mas $m_1 = m_2$), lub z nierównowagą spinową ($\mu_1 \neq \mu_2$). Zgadzam się z autorem, że własności fizyczne układów gdzie mamy zarówno nierównowagę spinową i masową to w dużej mierze niezbadany obszar, zarówno od strony teoretycznej, jak i eksperymentalnej. Obecne techniki eksperymentalne pozwalają na tworzenie takich mikstur (przykładami są $^6\text{Li}-^{40}\text{K}$, $^{40}\text{K}-^{161}\text{Dy}$) i spodziewany jest znaczny wzrost zainteresowania tymi układami. Z tego powodu uważam, że tematyka doktoratu dotyczy ciekawego i aktualnego zagadnienia badawczego, w ramach którego można otrzymać wiele jakościowo nowych wyników badawczych.

Rozprawa składa się z dwóch części: (I) *Kontekst doświadczalny i teoretyczny* oraz (II) *Wyniki badań*. Pierwsza część to wprowadzenie do tematyki badawczej (Rozdział 2: *Ultrazimne fermiony*) oraz wprowadzenie do teorii przemian fazowych (Rozdział 3: *Kwantowe przemiany fazowe*). Informacje przekazane są klarownie i zwięźle. Nie mam zastrzeżeń do tej części. Jedyne pewien niedosyt pozostawia brak obszerniejszego omówienia ostatnich postępów w obszarze eksperymentalnego wytwarzania mieszanin fermionowych. Autor wspomina krótko we *Wprowadzeniu*, że współczesne techniki doświadczalne pozwalają na tworzenie takich układów. W mojej opinii, rozwinięcie tego tematu, np. w części 2.4 *Mieszaniny gazów fermionowych*, poprzez podanie informacji typu: do jakich temperatur można obecnie chłodzić eksperymentalnie takie układy, jakie są możliwości sterowania oddziaływaniem, jakie obserwowalne są dostępne eksperymentalnie, znacząco wzbogaciłoby część wprowadzającą. Pozwoliłoby to lepiej ocenić

Koszykowa 75
00-662 Warsaw
phone +48 (22) 234 72 67
fax: +48 (22) 628 21 71
dziekan@if.pw.edu.pl
fizyka.pw.edu.pl

czytelnikowi, czy obszary diagramu fazowego dyskutowane w rozprawie mają obecnie szanse na eksperymentalną weryfikację. Warto dodać, że w pracach [185,186] mikstury ^{40}K - ^{161}Dy są wskazane jako obiecujący kandydaci dla poszukiwań fazy Fuldego–Ferrella–Larkina–Ovchinnikova (FFLO), co wydaje się jedną z głównych motywacji dla eksperymentatorów. W rozprawie natomiast autor często wskazuje, że faza FFLO jest niestabilna (dla $T>0$). Argument ten jest wielokrotnie wykorzystywany jako przesłanka za pominięciem rozważań dotyczących fazy FFLO w przedstawionej rozprawie (przykładem jest podrozdział 5.1 *Średniopolowy diagram fazowy*). Uważam, że odniesienie się do tej kwestii w części wprowadzającej byłoby wartościowe, tj. czy zdaniem autora prace eksperymentalne skupione na poszukiwaniu fazy LOFF w ultrazimnych mieszaninach Fermiego skazane są zatem na niepowodzenie?

Główne tezy i wnioski rozprawy przedstawione są w części II *Wyniki badań*. Część ta przedstawia przede wszystkim wyniki obliczeń analitycznych. Przedstawione są też wyniki obliczeń numerycznych dla szczególnych przypadków. Mgr Piotr Zdybel zbadał strukturę analityczną efektywnego potencjału, z uwzględnieniem fluktuacji kwantowych. Następnie wyznaczył diagram fazowy w ramach przybliżenia pola średniego, przy założeniu, że układ jest jednorodny (brak fazy FFLO). Uważam, że autor powinien być bardziej precyzyjny przy omawianiu wyników przedstawionych na wykresach 5.1 i 5.2. Domyślam się, że wykresy te zostały otrzymane jako wynik numerycznego rozwiązania równania (5.2). Ponadto, autor powinien podać jakie kryterium zastosował, aby określić czy przemiana jest I czy też II rodzaju. Domyślam się, że rozróżnienie jest dokonane na podstawie analizy profilu gęstości, jak pokazano to na Rys. 5.4. Moje zastrzeżenie związane jest z faktem, że w obliczeniach numerycznych określenie czy funkcja zmienia się w sposób ciągły, czy też skokowy może zależeć od szczegółów implementacji, zazwyczaj od parametrów charakteryzujących dyskretyzację problemu. Dlatego jawne podanie kryterium jest wskazane. W dalszej części, autor rozważa rozwinięcie Landaua dla potencjału efektywnego. W tym kontekście warto zauważyć, że rozwinięcie Landaua jest zazwyczaj dyskutowane dla temperatur bliskich temperaturze krytycznej, gdzie $\Delta \rightarrow 0$, co gwarantuje, że szereg jest szybko zbieżny. Krótki komentarz, podający zasadność wykonania takiego rozwinięcia dla $T \rightarrow 0$ jest wskazany. Autor wykonał skrupulatną analizę różnych obszarów diagramu fazowego (Rys. 5.7) i wykazał, że występowanie kwantowego punktu krytycznego jest w ogólności wykluczone dla układów dwuwymiarowych. Natomiast może on występować dla układów trójwymiarowych. Został wykorzystany fakt, że stałą oddziaływania g można zawsze tak wybrać, aby zapewnić, że współczynnik rozwinięcia $a_2=0$. Z drugiej strony wiemy, że przybliżenie pola średniego działa dobrze dla układów słabo oddziałujących (wartości g odpowiadające $|a_F k_F| < 1$), dla silnych oddziaływań (np. granica unitarna) przestaje być poprawnym opisem (motywacja dla opisanej w podrozdziale 2.3.2 teorii NSR). Rozumiem, że od strony matematycznej w ramach formalizmu pola średniego możemy zapewnić, że współczynnik $a_2=0$, ale czy możemy ufać wynikowi, jeśli odpowiada on reżimowi silnych oddziaływań? W tym kontekście przydatną informacją byłoby podanie wartości liczbowych dla realistycznych (eksperymentalnie dostępnych) przypadków. W ostatniej części rozdziału 5, zostaje wykazane, że można otrzymać kwantowy punkt Lifszycza zlokalizowany pomiędzy fazą normalną, fazą typu FFLO oraz jednorodną nadcieczą, *który może zostać dostrojony do zerowej temperatury poprzez modyfikację długości rozpraszania*. Zatem, to samo zastrzeżenie co powyżej dotyczy również i tego wyniku. W tym przypadku podana jest oczekiwana wartość długości rozpraszania, dla której można się spodziewać wystąpienia punktu Lifszycza. Dla mikstur ^6Li - ^{40}K i ^6Li - ^{53}Cr otrzymujemy $|a_F k_F| > 1$, a zatem odpowiada obszarowi gdzie opis średniopolowy może przestać być dobry (przynajmniej na poziomie ilościowym).

W rozdziale 6 dyskutowany jest wpływ niezrównoważenia masowego na dynamikę modów Goldstone'a. Jako główny wynik wykazane jest, że mody Goldstone'a tłumione są w niezrównoważonych mieszaninach, nawet w granicy $T \rightarrow 0$. Moim zdaniem, jest to bardzo

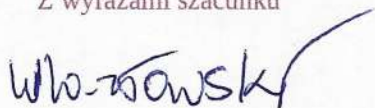
interesujący wynik, szczególnie w kontekście eksperymentalnym. Szkoda, że autor w tym rozdziale nie podjął krótkiej dyskusji dotyczącej obserwabli, które mogłyby zostać użyte do eksperymentalnej detekcji tego zjawiska. Ostatnie dyskutowane zagadnienie badawcze to wpływ fluktuacji parametru porządku na właściwości kwantowej przemiany fazowej. Autor pokazuje, że fluktuacje parametru porządku, wprowadzone przez człony tłumienia, powodują, że nie jest osiągany asymptotyczny reżim skalowania. Może to być sygnaturą pojawiania się przemiany I rodzaju. Jak autor podkreśla, wyniki zostały pozyskane w ramach bardzo prostej parametryzacji efektywnego działania, dlatego na tym etapie mają one charakter spekulatywny. Jest to jeden z dalszych kierunków badań, który może być kontynuowany w przyszłości (poza celem przedstawionego doktoratu). Rozprawę kończy bardzo dobre podsumowanie. Oczywiście poruszone zagadnienie badawcze jest bardzo obszernym tematem i w związku z tym ciężko oczekiwać, że autor udzieli odpowiedzi na wszystkie pytania, chociażby dotyczące pełnej struktury diagramu fazowego (włączając w to możliwe fazy niejednorodne, itd.). Niemniej, w ramach przyjętych założeń modelowych uważam, że mgr. Piotrowi Zdyblowi udało się zrealizować większość postawionych sobie celów badawczych. Na zakończenie, autor podaje potencjalne kierunki dalszych badań w przedstawionej tematyce. Wymienia tutaj: uwzględnienie fazy LOFF, zbadanie wpływu niezrównoważenia na mody Higgsa, uwzględnienie aspektów topologicznych.

Styl i redakcja pracy nie budzą zastrzeżeń. Praca zawiera 3 dodatki oraz zakończona jest obszerną bibliografią (259 pozycji). Z obowiązku recenzenta wskazuję jedynie na drobne niedociągnięcia edytorskie: strona 64, poniżej wzoru (4.27) symbol Φ_q^* jest dwukrotnie zdefiniowany; we wprowadzeniu do rozdziału 5 autor opisuje zawartości podrozdziałów 3.1-3.4 (powinno być 5.1-5.4); Rys. 7.5 i 7.7: do oznaczenia osi x użyte jest κ_c , podczas gdy w tekście występuje κ_0 .

Podsumowując, rozprawa doktorska mgr. Piotra Dariusza Zdybła przedstawia nowe i interesujące wyniki obliczeń analitycznych w dziedzinie ultrazimnych gazów fermionowych. Większość z przedstawionych wyników przeszła niezależną ocenę recenzencką i została opublikowana w dobrych czasopismach naukowych. Przedstawiona w tej recenzji krytyka, nie wpływa na ogólnie **bardzo dobrą ocenę rozprawy**. W szczególności, moja krytyka zwraca głównie uwagę na elementy, których dokładniejsze omówienie mogłoby pomóc w lepszej prezentacji otrzymanych wyników. Krytyka nie dotyczy merytorycznych aspektów pracy. Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że przedstawiona **rozprawa doktorska spełnia formalne i zwyczajowe warunki** stawiane tego typu pracom.

Stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Z wyrazami szacunku



---- Gabriel Wlazłowski ----