

dr hab. Tomasz Karpiuk, prof. UwB
Wydział Fizyki
Uniwersytet w Białymstoku
ul. Ciołkowskiego 1L
15-245 Białystok

Recenzja pracy doktorskiej mgr Andrea Barresi
pt. „Dynamics of collective modes in superfluid Fermi gases”
wykonanej pod kierunkiem dr. hab. inż. Gabriela Wlazłowskiego, profesora uczelni
w Grupie Teorii Jądra Atomowego na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej

Rozprawa doktorska mgr. inż. Andrea Barresi składa się z abstraktu, ośmiu głównych rozdziałów, konkluzji, jednego załącznika i bibliografii zawierającej 172 pozycje. Główną treść pracy można podzielić na dwie części. Pierwsza składająca się z pięciu rozdziałów stanowi wprowadzenie do badanych zjawisk, zawiera opis użytego formalizmu i pakietu numerycznego. Druga część to kolejne trzy rozdziały, które zawierają opis oryginalnych badań przeprowadzonych przez doktoranta oraz prezentację i dyskusję wyników. W dalszej części recenzji bardzo krótko scharakteryzuję kolejne rozdziały rozwijając tylko te części co do których mam pytania i uwagi.

Pierwszy z głównych rozdziałów stanowi historyczne wprowadzenie do badań zjawiska nadciekłości, teorii BCS i technik doświadczalnych. Moje uwagi do tego rozdziału są następujące.

- Autor używa tu konsekwentnie oznaczenia Ru na Rubid zamiast standardowo przyjętego oznaczenia Rb. Ru oznacza Ruten.
- Na stronie 14 pojawiają się nawiasy z trzema kropkami w środku [...] co pewnie oznacza brakującą referencję.
- W końcu wydaje się, że druga równość w równaniu 1.18 jest prawdziwa tylko w przybliżeniu i to tylko dla czasów ekspozycji znacznie krótszych od skal czasowych wewnętrznej dynamiki układu.

Drugi rozdział opisuje wybrane wzbudzenia jakie mogą pojawić się w nadciekłym układzie takie jak kwantowe wiry, pary wirów i mody Higgsa.

W trzecim rozdziale przedstawiony jest użyty model teoretyczny. Skupiono się tu na dwóch badanych w pracy reżimach, a mianowicie na reżimie unitarnym i reżimie par BCS. Następnie wprowadzono równania Bogoliubova de Gennes i funkcjonal gęstości, który zawiera w sobie także anomalną gęstość. Taki funkcjonal prowadzi do równań typu Bogoliubov de Gennes. W końcu wprowadzono wersję zależną od czasu. W tym miejscu mam kilka uwag.

- Czy definicja długości spójności 3.22 jest poprawna? Jakie jednostki są tu użyte?
- Grecki symbol κ używany jest tu w trzech znaczeniach. Po pierwsze jako długość spójności. Po drugie jako parametr Bertscha, a po trzecie jako energia stanu podstawowego.
- Wydaje się, że w równaniach 3.10 i 3.11 pojawiają się błędy.

W rozdziale czwartym omówiono gaz, który jest spinowo spolaryzowany. Między innymi wprowadzono struktury zwane ferronami oraz, scharakteryzowano pewne egzotyczne fazy, które być może mogą powstawać w spolaryzowanym układzie takie jak faza Fulde-Ferrell-Larkin-Ovchinnikov, faza Sarmy, czy Breached Pair State. Następnie wprowadzono stany Andreeva, czyli stany, które lokalizują się obszarze normalnym pomiędzy obszarami nadciekłymi. Przykładem tego

jest obszar rdzenia wiru w spolaryzowanym gazie unitarnym. Na koniec tego rozdziału zostaje omówiony mechanizm dyssypacji zaproponowany przez Silaeva.

Ostatni rozdział części wprowadzającej, czyli rozdział piąty opisuje aspekty techniczne przeprowadzanych symulacji. Po pierwsze omawiane są wersje funkcjonu gęstości (wynikających równań), które zostały użyte do symulacji w odpowiednich reżimach. Następnie krótko omówiono metody numeryczne wykorzystane w pakiecie WSLDA i proces postępowania w przypadku poszukiwania stanu początkowego i ewolucji w czasie. W następnym podrozdziale podano szczegóły numeryczne symulacji takie jak użyte funkcje falowe, jednostki kodowe, szczegóły na temat tego jak otworzyć symulacje i w końcu informacje na temat użytych superkomputerów. Mam dwa pytania do tego rozdziału.

- Czy zamiast diagonalizacji do poszukiwania stanu podstawowego rozważano ewolucję w czasie urojonym i jednoczesną ortonormalizację orbitali?
- Drugie pytanie dotyczy ostatniego z superkomputerów używającego akceleratorów AMD Instinct. Do tej pory byłem przekonany, że kod napisany w CUDA można było uruchomić tylko na akceleratorach firmy NVIDIA. Czy to znaczy, że obecnie możliwe jest uruchomienie tego kodu na akceleratorach AMD Instinct? Czy może używacie przenośnego standardu OpenCL?

Druga część pracy, składająca się z trzech rozdziałów, opisuje badania przeprowadzone za pomocą pakietu WSLDA i analizuje otrzymane wyniki. Pierwszy z tych rozdziałów (rozdział szósty) poświęcony jest mikroskopowym właściwościom kwantowych wirów. Wyniki przedstawione w tym rozdziale zostały opublikowane w pracy **Phys. Rev. Lett. 130, 043001**. Po pierwsze pokazano że energia najniższego stanu związanego w rdzeniu wiru zmniejsza się wraz z temperaturą natomiast gęstość gazu rośnie. Zmiany te zachodzą szybciej ze wzrostem temperatury w reżimie par BCS niż w unitarnym. Następnie wyznaczono prostopadły współczynnik tarcia i pokazano, że przy braku pułapki nie zależy on od odległości między wirami w parze. Pokazano również, że potencjał pułapki i temperatura mają znaczący wpływ na propagację wirów. Badając zderzenia par wirów wykazano, że odległość pomiędzy wirami się zmniejsza podobnie jak w doświadczeniu. Co prawda wyniki te znacząco różnią się od pomiarów doświadczalnych. Niemniej jednak jest to pierwszy mikroskopowy opis procesów dyssypacji przy zderzeniach wirów w nadciekłych gazach fermionowych. W zerowej temperaturze za zmniejszenie odległości może odpowiadać mechanizm Silaeva choć mechanizm ten ma mniejsze znaczenie niż przewidywano. W końcu pokazano jak przebiega proces anihilacji dwóch par wirów. Moje pytania do tego rozdziału są następujące.

- Na rysunku 6.8 dla $T=0.1$ w reżimie BCS odległość po zderzeniu jest większa w pewnym zakresie początkowej odległości. Ten efekt wydaje się większy niż błąd metody. Czym ten efekt jest spowodowany?
- Dlaczego nie użyto prawdziwego kształtu pułapki w kierunku z , tak by można było się porównywać z doświadczeniem z pracy 86. Podobnie z wartością $(a_s k_F)^{-1}$.
- Na rysunku 6.10 widać dramatyczny spadek energii związanej z komponentem rotacyjnym. Jednocześnie tylko nieznacznie rośnie energia związana z komponentem kompresji. W co zostaje przekonwertowana ta energia? Czy użyty opis może na to odpowiedzieć?

Drugi z rozdziałów opisujących przeprowadzone badania (rozdział siódmy) opisuje proces zaburzenia układu w czasie poprzez zmianę długości rozpraszania w wyniku czego wzbudzany jest w układzie mod Higgsa. Wyniki przedstawione w tym rozdziale zostały opublikowane w **Sci Rep 13, 11285 (2023)**. Dodatkowo do drgającego jednorodnie w przestrzeni parametru porządku dodawane jest zaburzenie w postaci fali płaskiej lub zlokalizowanego zaburzenia. W przypadku zaburzenia falą płaską dochodzi do rozpadu modu Higgsa w głównej mierze na superpozycję dwóch fal o pędzie plus minus pęd związany z długością spójności. Pojawienie się takiej modulacji w parametrze porządku sugeruje przypomina fazę FFLO. Pojawienie się takich modulacji zostało

również potwierdzone w dwóch i trzech wymiarach. W przypadku zlokalizowanego zaburzenia mod Higgsa ulega zanikowi w obrębie stożka przyczynowego wyznaczonego przez prędkość dźwięku. Mam tu jedną uwagę.

- W załączniku A.4 nie udało mi się znaleźć jak wygląda zlokalizowane zaburzenie.

W trzecim rozdziale omawiającym wyniki (rozdział ósmy) badana jest dynamika pary wirów w spolaryzowanym układzie. Wyniki tego nie zostały jeszcze opublikowane. W przypadku dużej polaryzacji $P > 10\%$ wiry bardzo szybko zderzają się z liniami nodalnymi i ulegają zanikowi. W przypadku małych polaryzacji $P < 5\%$ para wirów może przeżyć zderzenie z ferronem. W wyniku odległość między wirami się zmniejsza i następuje przesunięcie pary wirów. Dla bardzo małych polaryzacji w układzie występują raczej krople, które są niszczone przy zderzeniu z wirem, a niesparowane cząstki są absorbowane w rdzeniach wirów. Na koniec mam dwa pytania.

- Twierdzi się tu, że w przypadku dużej polaryzacji linie nodalne nie ulegają skróceniu. Czy aby na pewno jest to prawda? Badana jest tylko sytuacja z jedną parą wirów. W tej sytuacji gęstość wirów, czyli liczba wirów na jednostkę długości linii nodalnych jest bardzo mała i być może efekt jest niemierzalny z powodu dokładności pomiarowej. Moim zdaniem trzeba by było wziąć taką samą gęstość wirów jak w przypadku małej polaryzacji gdy efekt zjadania ferronów przez wiry jest widoczny. Tylko wtedy można by twierdzić, że w przypadku dużej polaryzacji wiry nie mają wpływu na długość linii nodalnych.
- Przy omawianiu wyników pojawia się kilka różnych wzorów na długość spójności: k_F/Δ , $k_F/(2\Delta)$, $k_F/(\pi\Delta)$. Dlaczego tak jest? Od czego zależy wybór konkretnego wzoru?

Podsumowując, jestem przekonany, że praca mgr. inż. Andrea Barresi zawiera bardzo dobrze przygotowany materiał naukowy i stanowi istotny wkład w badaniu dynamiki nadciekłych gazów fermionowych. Wyniki badań zostały opublikowane w dwóch pracach w renomowanych, wysoko punktowanych czasopismach naukowych. Doktorant jest pierwszym autorem w obu tych pracach. Rozprawa doktorska zawiera również materiał do tej pory nieopublikowany, a który znajdzie się w trzeciej publikacji. Ponadto pierwszych pięć rozdziałów potwierdza, że doktorant posiada szeroką wiedzę w zakresie dyscypliny Nauki Fizyczne. Jestem przekonany, że rozprawa, której tyczy recenzja, z nawiązką spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim zgodnie z art. 186 i 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1668 z późn. zm.) i wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie mgr. inż. Andrea Barresi do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



dr hab. Tomasz Karpiuk, prof. UwB