

Prof. dr hab. Tadeusz Domański
Katedra Fizyki Teoretycznej
Instytut Fizyki
Uniwersytet M. Curie-Skłodowskiej
20-031 Lublin

Lublin, 29 lutego 2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Andrea Barresi pt.
„Dynamics of collective modes in superfluid fermi gases”

Przedłożona rozprawa doktorska opisuje dynamiczne właściwości nadciekłych gazów typu fermionowego, które mogą realizować się w warunkach nierównowagowych. W szczególności przeanalizowano propagację wirów kwantowych i dipoli utworzonych z wirów o przeciwnie skierowanych cyrkulacjach, zbadano kolektywne wzbudzenia amplitudy parametru porządku (modu Higgsa) w odpowiedzi na zmianę potencjału oddziaływań oraz określono wzajemną współzależność wirów kwantowych i stanów związanych w ferronach lub innych bardziej złożonych strukturach powstałych w nadcieczy pod wpływem nierównowagi spinowej fermionów. Tego rodzaju problematyka jest aktualnie przedmiotem dużego zainteresowania, zarówno w kontekście ultrazimnych kondensatów atomowych jak też w fizyce materii skondensowanej oraz układów nanoskopowych. Wyniki uzyskane przez Doktoranta mogą mieć istotne znaczenie dla środowiska naukowego.

Praca doktorska została przygotowana na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem dra hab. Gabriela Wlazłowskiego, profesora PW. Na treść rozprawy składa się dziewięć rozdziałów, pięć dodatków oraz spis bibliograficzny. Rozdziały od 1 do 5 dostarczają ogólnej informacji o podjętej tematyce badawczej, zaś opis oryginalnych wyników uzyskanych przez Doktoranta jest przedstawiony w rozdziałach 6, 7 i 8. Wyniki te zostały częściowo opublikowane w dwóch artykułach [Phys. Rev. Lett. **130**, 043001 (2023); Sci. Rep. **13**, 11285 (2023)] z zasadniczym udziałem Doktoranta. Kolejna publikacja (oparta na wynikach diskutowanych w rozdziale 8) jest na etapie przygotowania. W dalszej części recenzji przedstawię przegląd poszczególnych fragmentów rozprawy i wykaz ważniejszych wyników uzyskanych przez Doktoranta.

Rozdział pierwszy nakreśla historyczny kontekst podjętej problematyki badawczej. Doktorant przypomniał podstawowe fakty dotyczące odkrycia nadciekłości atomów ^4He oraz laboratoryjnego wytworzenia atomowych kondensatów Bose-Einsteina (BEC) przy użyciu pułapek magnetooptycznych. Skonfrontował następnie zjawisko BEC z nadprze-

wodnictwem/nadciekłością cząstek typu fermionowego, nawiązując do pionierskich prac teoretycznych opisujących scenariusz ciągłego przejścia (*crossover*) pomiędzy nimi. Opisał ważniejsze etapy doświadczalnej realizacji nadciekłości ultrazimnych atomów typu fermionowego. Doktorant przedstawił też przegląd współczesnych metod schładzania atomów do granicy kwantowej, m.in. techniką chłodzenia dopplerowskiego i chłodzenia poprzez odparowywanie atomów wysokoenergetycznych. Zaznaczył, że do nadciekłości ultrazimnych atomów typu fermionowego niezbędne są oddziaływania, które można uzyskać w kontrolowalny sposób za pomocą rezonansowego rozpraszania Feshbacha. Przedstawił charakterystykę pędowo-przestrzennego rozkładu atomów spułapkowanych harmonicznym potencjałem i umieszczonych w płaskiej studni kwantowej. Wskazał następnie metody generowania zaburzeń turbulentnych i sposobów obrazowania wirów kwantowych za pomocą urządzenia zwierciadła cyfrowego (*digital micromirror device*). Przedmiotem badań Doktoranta była m.in. dynamika par wir-antywir. Skuteczną metodę generowania i sterowania takimi defektami topologicznymi opracowała grupa Giacomo Roati'ego z LENS we Florencji, z którą prowadzono ścisłą współpracę naukową.

Rozdział drugi dyskutuje charakterystyczne właściwości przewidziane w ramach hydrodynamicznego podejścia do zagadnienia nadciekłości. Jedną z kluczowych wielkości cieczy klasycznych jest lepkość, która ma związek z procesami dyssypacji. W nadcieczach przepływ materii odbywa się bezdyssypatywnie (poniżej krytycznej prędkości), ale współczesne teorie mikroskopowe dopuszczają pewną graniczną wartość lepkości (tzw. *shear viscosity*) idealnych cieczy w temperaturach powyżej zera bezwzględnego. Doktorant przedstawił zarys właściwości skondensowanych cząstek, którym można przyporządkować makroskopową funkcję falową. Z przestrzennego gradientu fazy funkcji falowej wynika bezrotacyjny przepływ komponentu nadciekłego [spektakularnym przejawem tego faktu jest zjawisko Josephsona]. Doktorant przeanalizował powstawanie wirów zaindukowanych w nadcieczy pod wpływem wprowadzania układu w ruch obrotowy. Wskazał na kwantowanie strumienia cyrkulacji i przedstawił analizę energii kinetycznej wiru oraz składowej momentu pędu. Rozpatrzył następnie klasyczną hydrodynamikę dipolowego układu dwóch wirów o przeciwnych cyrkulacjach i przedstawił przykładową trajektorię zderzających się dipoli (rysunek 2.4). Do badania kwantowej turbulencji w nadcieczach przydatne jest wskazanie różnych komponentów energii kinetycznej układu, z wyróżnieniem składnika jednorodnego oraz kompresyjnego i rotacyjnego. Tego rodzaju dekompozycję Helmholtza przedstawiono w podrozdziale 2.4. Ostatni fragment rozdziału drugiego porusza tematykę kolektywnych wzbudzeń nadcieczy/nadprzewodników. Problematyka oscylacji amplitudy (modu Higgsa) i fazy (dźwiękowego modu Goldstone'a) zespolonego parametru porządku cieszy się obecnie ogromnym zainteresowaniem ze względu na nowe możliwości generowania wzbudzeń kolektywnych oraz ich precyzyjnej spektroskopii. W kontekście ultrazimnych gazów atomowych zjawiska nierównowagowej nadciekłości można wywołać poprzez zmianę długości rozpraszania, co wpływa na efektywny potencjał oddziaływania i bez-

pośrednio determinuje dynamikę zespolonego parametru porządku. Konsystentny opis nierównowagowej dynamiki nadcieczy opracowali R.A. Barankov i L.S. Levitov [PRL **93**, 130403 (2004); PRL **96**, 230403 (2006)] oraz inni autorzy [PRA **91**, 033628 (2015); Annals of Physics **435**, 168554 (2021) ; PRB **106**, 104513 (2022); PRB **106**, L220506 (2022)]. Podobne zagadnienia są rozpatrywane w litych nadprzewodnikach [PRB **109**, 054520 (2024)], zaś w ostatnich latach szczególnie intensywnie w nadprzewodzących nanostrukturach, gdzie możliwości kontrolowanego zaburzenia i doświadczalnych pomiarów nierównowagowego transportu ładunkowego są niezwykle bogate.

W rozdziale trzecim opisano metodologiczne aspekty teorii nadprzewodnictwa/nadciekłości układów fermionowych. Specyfiką ultrazimnych gazów atomowych jest bardzo mała koncentracja, dlatego wpływ oddziaływań dwuciałowych można uwzględnić poprzez potencjał kontaktowy, czyli kanał s teorii rozprożeń. Skutkiem ubocznym takiego podejścia jest konieczność regularyzacji w podczzerwieni aby usunąć wysokoenergetyczne rozbieżności całek mikroskopowej teorii nadprzewodnictwa. Doktorant przedstawił schemat podejścia BCS dla jednorodnego układu fermionów z efektywnym oddziaływaniem przyciągającym oraz uogólnienie na przypadek niejednorodny (adekwatny do spuląpkowanych atomów) przy pomocy formalizmu Bogoliubova de Gennesa. Szczególną uwagę zwrócił na granicę unitarną, gdzie stosowalność przybliżenia średniego pola staje się problematyczna. Niezbędne jest wówczas użycie bardziej wyrafinowanych metod obliczeniowych (np. symulacji QMC) do wyznaczenia energii układu i określenia temperatury krytycznej T_c . W obszarze unitarności (oraz po stronie BEC diagramu fazowego) pary fermionowe tworzą się powyżej T_c , co przejawia się obecnością przerwy energetycznej (tzw. pseudoprzerwy) wokół poziomu Fermiego. Opis wpływu silnych oddziaływań można uwzględnić w ramach teorii funkcjonału gęstości (DFT). Przedstawiono algorytm takiego podejścia oraz specyficzny wariant podejścia DFT stosowany do zagadnienia nadprzewodnictwa/nadciekłości. Ze względu na zamiar badania dynamiki nadcieczy w warunkach nierównowagowych Doktorant przedstawił zarys formalizmu czasowo-zależnych równań Bogoliubova de Gennesa.

Kolejny rozdział traktuje o wpływie pola magnetycznego na stan nadprzewodzący oraz przedstawia istotę stanów związanych i pokrewnych zjawisk realizowanych na wirach kwantowych. Doktorant opisał destrukcyjny wpływ pola magnetycznego zaindukowany mechanizmem Clogstona Chandrasekara, polegającym na rozrywaniu par Coopera w wyniku zeemanowskiego rozszczepienia energii fermionów o różnych spinach (prowadząc do pojawienia się polaryzacji $n_\uparrow - n_\downarrow \neq 0$). Warto dodać, że w przypadku fermionów na sieci krystalicznej oprócz takiego mechanizmu pole magnetyczne może mieć również wpływ orbitalny modyfikując całkę przeskoku fermionów poprzez czynnik Peierlsa i generując widmo energetyczne o strukturze tzw. motyli Hofstadtera. Doktorant przedstawił krótką charakterystykę egzotycznych wariantów nadprzewodnictwa realizowanych w obecności pola magnetycznego, między innymi: stanu FFLO (par fermionów o niezerowym sumarycznym pędzie), fazy Sarmy (w układzie o nierównych populacjach spinowych $n_\uparrow \neq n_\downarrow$)

i tzw. fazy *breached* przewidzianej przez F. Wilczka (hipotetycznie realizowalnej przy parowaniu fermionów o znacząco różnych masach $m_{\uparrow} \gg m_{\downarrow}$). W obecności lokalnego pola magnetycznego (albo lokalnej magnetyzacji) w nadprzewodnikach/nadcieczach mogą pojawić się ferrony przewidziane przez profesorów P. Magierskiego i G. Wlazłowskiego, które na przestrzeni ostatnich lat były szczegółowo zbadane na Politechnice Warszawskiej. Ferrony są obiektami pokrewnymi do stanów związanych Caroli-de Gennes-Matricon'a występujących w wirach kwantowych. Ich powstawanie ma związek z rozpraszaniem Andreeva. Doktorant wyjaśnił istotę takiego anomalnego kanału rozpraszania realizowanego na pograniczu nadprzewodnika i fazy normalnej. Dwa ostatnie fragmenty rozdziału czwartego opisują charakterystyczne cechy najniższego stanu związanego w wirze kwantowym i przedstawiają dyssypacyjny mechanizm Silaeva, polegający na absorpcji energii przez stany związane w wyniku ruchu wirów kwantowych.

Rozdział piąty dostarcza szczegółów procedury obliczeń numerycznych. Oryginalne wyniki zebrane są w trzech kolejnych rozdziałach, którym poświęcę trochę więcej uwagi.

Rozdział szósty przedstawia wyniki dotyczące dynamiki wirów kwantowych zaindukowanych w obszarze BCS-owskim oraz granicy unitarnej nadcieczy fermionowych. Struktura wirów jest zdeterminowana przestrzennym profilem fazy parametru porządku. Badania dynamiki dla różnych konfiguracji wirów i dipoli typu wir-antywir przeprowadzo na sieci układu kwazidwuwymiarowego. Przykładowy profil fazy dipola wir-antywir jest zilustrowany na rysunku 6.1. Zasadniczym celem badań było określenie związku dyssypacji energii wywołanego przyspieszonym ruchem dipola (przewidzianego teoretycznie przez Silaeva) w konfrontacji z wynikami doświadczalnymi grupy LENS z Florencji. Analizę rozpoczęto od zbadania wpływu temperatury, uwzględniając energię najniższego poziomu Andreeva i gęstości cząstek w wirze. Obliczenia dla obszaru BCS i granicy unitarnej wskazały, że poniżej $0,3T_c$ temperatura praktycznie nie ma istotnego wpływu na powyższe wielkości (rysunek 6.3). Doktorant przeszedł następnie do zbadania ruchu dipola wir-antywir, rozpatrując punktowy rozmiar obu wirów. Na podstawie wyrażeń analitycznych określił czasową zależność trajektorii dipola i wzajemnej odległości wirów. Stwierdzono, że geometria (tzn. profil pułapki) i temperatura mają znaczny wpływ na propagację dipola. Zasadnicze wyniki samozgodnych obliczeń numerycznych dla zderzeń dipoli wir-antywir na sieci o rozmiarach $100 \times 100 \times 16$ opisano w podrozdziale 6.4. Zderzenia wirów dają wkład do ruchu przyspieszonego, prowadząc do wzbudzeń cząstkowych w strukturze poziomów Andreeva i w konsekwencji do wybijania cząstek z rdzenia wirów. Ilość cząstek w wirze interpretowano jako indyktor lokalnej temperatury (uwzględnianej w podejściu Silaeva). Obliczenia wykazały, że ilościowy efekt zależy od odwrotności początkowej odległości. Tak więc efekt wyciekania ze stanów Andreeva zaindukowany procesami dyssypacyjnymi spowodowanymi ruchem przyspieszonym dipoli wir-antywir potwierdził jakościowe przewidywania teorii Silaeva. Jednakże, ilościowy efekt okazał się raczej marginalny. Ponadto, dla początkowej odległości mniejszej od ośmiu stałych sieci

stwierdzono zjawisko anihilacji dipola wir-antywir (rysunek 6.9). Dowód anihilacji jest widoczny również w oparciu o dekompozycję Helmholtza (rysunek 6.10). Zakres temperatur dostępnych aktualnie w doświadczeniu ($T_{exp} \geq \frac{1}{3}T_c$) niestety uniemożliwia ilościową weryfikację wyników uzyskanych przez Doktoranta.

Rozdział siódmy dotyczy oscylacji amplitudy parametru porządku zaindukowanych szybką zmianą parametrów układu (tzw. *quantum quench*). W tym celu zaproponowano następujący protokół wymuszenia nierównowagowej nadciekłości: adiabatyczną zmianę długości rozpraszania do wartości $a = -0,1k_F^{-1}$ oraz gwałtowny powrót do wyjściowej wartości $a = -10k_F^{-1}$ (rysunek 7.1). Kwantowa ewolucja układu wykazała oscylacje amplitudy parametru porządku występujące w pewnym zakresie czasowym po gwałtownej zmianie. Doktorant zbadał stabilność takich modów Higgsa, rozpatrując przypadek dużej i małej amplitudy drgań (rysunek 7.3) oraz analizując wpływ zewnętrznego zaburzenia. Ponadto, częstość drgań porównano z teoretycznymi przywidywaniami referencji [167]. Występowanie kolektywnych oscylacji amplitudy parametru porządku ograniczone było do pewnego obszaru czasowego $t \in \langle t_q, t_d \rangle$, po którym ulegały dość gwałtownemu zanikowi. Zanik modu Higgsa zinterpretowano jako rezultat pojawienia się niejednorodnej fazy parametru porządku. Szkoda, że Doktorant nie zbadał dynamiki fazy parametru porządku towarzyszącej zanikowi oscylacji amplitudy w granicy $t \rightarrow t_d$. W tym miejscu chciałbym również zwrócić uwagę na szczegół techniczny. Wielkości przedstawione na rysunkach 7.1, 7.2 i 7.3 są wykreślone względem czasu t wyrażonego w jednostkach ϵ_F . Moim zdaniem jednostką powinna być odwrotność energii Fermiego (lub dokładniej \hbar/ϵ_F). Analiza stanu naciekłego po zaniku modów Higgsa wykazała tendencję do pojawienia się niejednorodnego parametru porządku (analogicznego do stanu FFLO) lub przestrzennych modulacji polaryzacji (ferronów).

Rozdział ósmy analizuje propagację wirów kwantowych w spolaryzowanym gazie fermionów w granicy unitarnej ($a_s k_F \sim 0$). W tym celu Doktorant rozpatrzył układ kwazidwuwymiarowy, który w warunkach początkowych składał się z obszaru jednorodnego oraz obszaru spolaryzowanego $\mu_\uparrow - \mu_\downarrow \equiv P$ (rysunek 8.1). Wiry kwantowe zaindukowane były w obszarze jednorodnym, natomiast ferrony lub bardziej złożone struktury (np. linie nodalne) pojawiały się w obszarze spolaryzowanym i ich charakter był zdefiniowany stopniem polaryzacji P . Celem badań było określenie wzajemnego wpływu na siebie tych obiektów po wyłączeniu potencjału polaryzującego układ. Doktorant przedstawił wyniki obliczeń numerycznych dla granicy dużej i małej różnicy populacji spinowej. W tym pierwszym przypadku stwierdził szybką reorganizację przestrzenną linii nodalnych (rysunek 8.3), po której nastąpił powolny ruch wirów. Wiry zostały ostatecznie zaabsorbowane przez linie nodalne. Proces takiej anihilacji został bardziej szczegółowo określony w oparciu o analizę energetyczną (dekompozycję Helmholtza) i zwróceniem uwagi na zmianę długości linii nodalnych. Jakościowo odmienna sytuacja ma miejsce dla małej polaryzacji P . W takich warunkach propagacja dipola wir-antywir odbywa się

do momentu zderzenia z ferronem, w wyniku czego ferron traci stabilność i przekazuje fermiony ze stanów Andreeva do dipola, zwiększając jego masę. Obserwowalny wpływ takiego zderzenia przejawia się wyraźnie w trajektorii ruchu dipola (rysunek 8.6). Dla przypadku ekstremalnie niewielkiego stopnia polaryzacji układu (poniżej 0,5 %) zamiast ferronów pojawiają się krople (*droplets*) niesparowanych fermionów, które szybko wyparowują i w marginalny sposób wpływają na propagację dipoli wirów kwantowych.

Rozprawa doktorska została przygotowana starannie w języku angielskim. Układ materiału jest logiczny oraz klarowny. Strona edytorska nie budzi większych zastrzeżeń. Z obowiązku recenta wymienię kilka zauważonych pomyłek lub drobnych nieścisłości: [strona 13] zamiast E_r ob B powinno być E_r or B ; [strona 18] wzór (1.18) jest słuszny tylko w przypadku $[\hat{H}, \hat{U}] = 0$; [strona 23] sformułowanie *BEC condensation could only happen when all particles occupied the same quantum state of the lowest energy* jest nieprecyzyjne, ponieważ kondensat Bose-Einsteina ma miejsce nawet jeśli tylko część cząstek zajmuje najniższy dostępny poziom energetyczny; [strona 47] zwrot spinów w wyrażeniu $\Delta(r) = \langle \psi_{\uparrow}^{\dagger}(r)\psi_{\downarrow}^{\dagger}(r) \rangle$ powinien być przeciwny, gdyż obecna definicja narusza zasadę Pauliego; [strona 51] *in these case* \rightarrow *in this case*; [strona 111] *It value* \rightarrow *Its value*; [strona 119] *curves an changes* \rightarrow *curves and changes*; [strona 119] $T \simeq 0.3C \rightarrow T \simeq 0.3T_C$. Powyższe potknięcia edytorskie nie wpływają jednak na rozumienie treści pracy.

Praca doktorska magistra Andrea Barresi wnosi istotny wkład w zrozumienie dynamicznych właściwości fermionowych nadcieczy zaindukowanych warunkami nierównowagowymi. Doktorant wykazał się dogłębną znajomością zagadnienia nadciekłości/nadprzewodnictwa fermionów w zakresie od słabego do silnego oddziaływania i wykazał umiętność posługiwania się wyrafinowanymi metodami obliczeń numerycznych, dzięki którym określono dynamikę wirów kwantowych, zbadano ich stabilność w dipolach typu wir-antywir i współzależność z ferronami lub innymi obiektami spinowo nierównowagowej nadcieczy. Doktorant wyznaczył też czasowy zakres kolektywnych oscylacji amplitudy parametru porządku pod wpływem zmiany długości rozpraszania i określił mechanizm tłumienia modów Higgsa. Przedłożona rozprawa spełnia zwyczajowe i prawne wymagania określone w Ustawie *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2020 r. poz. 85 z późniejszymi zmianami) do nadania stopnia doktora w dyscyplinie *nauki fizyczne*. Na tej podstawie wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie magistra Andrea Baressi do publicznej obrony oraz dalszych etapów Jego przewodu doktorskiego. Ze względu na wysoki poziom przeprowadzonej analizy teoretycznej, bogactwo zagadnień diskutowanych w kontekście nierównowagowego nadprzewodnictwa układów fermionowych, zaawansowany poziom obliczeń numerycznych oraz opublikowanie części wyników w prestiżowym *Physical Review Letters* wnioskuję dodatkowo o wyróżnienie pracy doktorskiej.

Tadeusz Domański
Kierownik
Katedry Fizyki Teoretycznej