



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

Warszawa, 25 października 2021 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Buğry Tüzemena pt.  
„Spin-polarized Impurities in Ultracold Fermi Gas”**

Rozprawa doktorska mgra Buğry Tüzemena została przygotowana na Wydziale Fizyki Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem pana prof. dra hab. Piotra Magierskiego. Napisana jest w języku angielskim, obejmuje 101 stron maszynopisu i jest ilustrowana 42 rysunkami. Praca podzielona jest na siedem rozdziałów oraz bibliografię zawierającą 89 pozycji. Zgodnie z obowiązującymi wymogami prawnymi, rozprawa opatrzona jest również streszczeniem w języku polskim. Naukowa część dysertacji oparta jest na oryginalnych wynikach naukowych, które zostały opublikowane w ostatnich latach w trzech artykułach naukowych. Dwie z nich to publikacje trójautorskie w renomowanym czasopiśmie międzynarodowym *Physical Review A* wydawanym przez Amerykańskie Towarzystwo Fizyczne. Trzecia praca to czteroautorska publikacja pokonferencyjna w *Acta Physica Polonica B*, w której mgr Tüzemen jest pierwszym autorem. Wszystkie publikacje powstały pod kierunkiem liderów grupy, tj. prof. Magierskiego oraz prof. Włazłowskiego. Zarówno sama rozprawa jak i cykl prac, na podstawie którego ona powstała dotyczą zagadnienia *ferronu* — przestrzennie zlokalizowanego wzbudzenia w jednorodnym i nadciekłym gazie Fermiego, które charakteryzuje się silną polaryzacją, a stabilność jest zapewniana istnieniem w jego obszarze nietrywialnego potencjału parowania. Warto w tym miejscu podkreślić, że *ferron* to koncept z powodzeniem wprowadzony do literatury przez grupę prof. Magierskiego właśnie poprzez cykl tych trzech publikacji naukowych. Przedłożona rozprawa jest zatem swoistym pierwszym przeglądem najważniejszych, już opublikowanych wyników, dotyczących *ferronu* — od modelowania możliwych sposobów jego wytwarzania, przez opis jego statycznych i dynamicznych własności, aż po szczegółową analizę jego wewnętrznej struktury. Całość poprzedzona jest ogólnym wprowadzeniem do zagadnienia nadprzewodnictwa oraz prezentacją wykorzystywanych metod numerycznych.

Pierwszy rozdział rozprawy rozpoczyna się od dość zgrabnie napisanego chronologicznego przeglądu odkryć doświadczalnych oraz modeli teoretycznych, które ostatecznie doprowadziły do dzisiejszego zrozumienia zjawiska nadprzewodnictwa w ramach teorii Bardeena, Coopera i Schrieffera (BCS). W tym rozdziale Autor zwraca uwagę czytelnika na rozszerzony problem gazu fermionów, w którym składniki nie są idealnie zbalansowane (np. pod względem liczby cząstek). W takiej sytuacji powierzchnie Fermiego poszczególnych składników nie są identyczne i tym samym powstające pary Coopera mogą mieć niezerowy całkowity pęd. Ten dość naturalny mechanizm, choć przewidziany ponad 50 lat temu w słynnych pracach Fulde i Ferrela oraz Larkina i Ovchinnikova (tzw. teoria FFLO), wciąż nie znalazł swojego bezsprzecznego potwierdzenia

doświadczalnego. Rozprawa doktorska mgra Tüzemena w jakimś sensie wpisuje się w tą właśnie problematykę, gdyż *ferron* to wzbudzenie, które, choć powstające nawet w jednorodnym i zbalansowanym gazie fermionów, wymuszane jest zewnętrznym potencjałem zależnym od spinu czyli lokalnie łamiącym symetrię pomiędzy dwoma składnikami. Z tego punktu widzenia, jednym z elementów, których bardzo mi zabrakło w tym fragmencie rozprawy jest dokładniejszy opis pomysłów i wyników doświadczalnych dotyczących tego zagadnienia. Krótki fragment zawarty w podrozdziale 1.3 nie do końca stanowi taki przegląd, a mógłby bardzo ciekawie wzbogacić tę, stricte teoretyczną, rozprawę doktorską i zwiększyć grono jej potencjalnych czytelników.

W rozdziale drugim Autor przedstawia najpierw podręcznikowy opis teorii BCS w ramach przybliżenia pola średniego dla układu jednorodnego, a następnie stawia kluczowe dla rozprawy doktorskiej pytanie rozszerzające na zjawiska brzegowe zachodzące na przestrzennej granicy fazy nadprzewodzącej. Jak się bowiem okazuje w dalszej części pracy, to właśnie zjawiska brzegowe prowadzące m.in. do powstawania stanów związanych Andreeva są odpowiedzialne za bardzo ciekawą fizykę *ferronów*. Choć ten fragment rozprawy jest napisany bardzo przystępnie i ciekawie, to brakuje mi w nim dwóch, trzech zdań podsumowujących, które mogłyby ukierunkować czytelnika (zwłaszcza mniej zaznajomionego z tematyką) w tym właśnie kierunku.

Rozdział trzeci to ostatni fragment wprowadzający przed dyskusją właściwych wyników rozprawy. Jest on poświęcony opisowi podejścia numerycznego, w ramach którego zostały przeprowadzone dalsze symulacje wielociałowe. Jest ono odpowiednio zaadaptowaną wariacją przybliżenia lokalnej gęstości (LDA) wywodzącego się bezpośrednio z technik opartych na teorii funkcjonału gęstości (DFT). Metoda numeryczna jest powszechnie stosowana w środowisku fizyków szeroko rozumianej materii skondensowanej, zarówno przy problemach statycznych jak i dynamicznych. Nie ulega wątpliwości, że narzędzie numeryczne wykorzystywane przez doktoranta jest dobrane adekwatnie do stawianych problemów, nie jest ekstrapolowane na zagadnienia, dla których jego poprawność mogłaby być kwestionowana, a interpretacja otrzymywanych wyników jest prowadzona zgodnie ze sztuką.

Kolejny rozdział rozprawy rozpoczyna prezentację oryginalnych wyników naukowych otrzymanych przez doktoranta pod kierunkiem jego promotora. Mgr Tüzemen dość szczegółowo opisuje protokół wytwarzania *ferronu* w unitarnym, jednorodnym i spinowo zbalansowanym gazie fermionowym poprzez quasi-adiabaticzne włączenie i wyłączenie zewnętrznej, przestrzennie zlokalizowanej gaussowskiej bariery potencjału działającej w przeciwny sposób na poszczególne składniki (przyciągająco i odpychająco). Tym sposobem, lokalnie w przestrzeni następuje rozerwanie par Coopera i powstanie spolaryzowanego wzbudzenia, nazywanego właśnie *ferronem*. Najważniejszą częścią tego fragmentu rozprawy jest wykazanie (poprzez wykonanie precyzyjnych symulacji numerycznych) nie tylko, że takie wzbudzenie powstaje w momencie włączenia zewnętrznego potencjału, ale przede wszystkim, że pozostaje ono stabilne po jego wyłączeniu. Jak zauważa Autor, końcowa stabilność tego specyficznego wzbudzenia zależy zarówno od fizycznych parametrów protokołu (kształt zewnętrznej bariery i charakterystyczne czasy jej włączania), jak i od numerycznych parametrów symulacji. Chciałbym w tym miejscu wyraźnie docenić, że wpływ tych



wszystkich czynników jest nie tylko dość szczegółowo omówiony, ale również fenomenologicznie zinterpretowany. Jednym z końcowych elementów tego rozdziału jest pobieżna analiza bardzo ciekawego przypadku, w którym dochodzi do zderzenia dwóch *ferronów*. Trochę szkoda, że Autor poświęcił temu zagadnieniu niespełna jedną stronę swojej rozprawy i nie załączył żadnego odwołania do repozytorium z animacją omawianych przypadków. Zapewne takie rozwiązanie mogłoby zaspokoić ciekawość niejednego czytelnika.

Piąty rozdział rozprawy stanowią dalsze, bardziej subtelne, badania struktury wewnętrznej *ferronu* w języku stanów związanych Adreeva powstających na jego przestrzennych granicach, a także wpływu globalnego niezbalansowania pomiędzy składnikami na rozmiar przestrzenny wzbudzenia. Centralnym wynikiem tej części rozprawy jest wg mnie rysunek 5.4, a szczególnie jego część c) pokazująca, że w przypadku dwuwymiarowym rozmiar *ferronu* rośnie liniowo z liczbą fermionów nieposiadających swoich partnerów w przeciwnym składniku. Mgr Tüzemen wyjaśnia fenomenologicznie źródło tego skalowania i argumentuje, że w przypadku trójwymiarowym skalowanie musiałoby być kwadratowe. Szkoda, że ten wynik nie został poparty, choćby częściowo, żadną symulacją numeryczną. Tutaj chciałbym zwrócić uwagę, że ta część rozprawy w pewnym sensie odróżnia się od pozostałych, gdyż opiera się bardziej o argumenty heurystyczne niż numeryczne. To pokazuje, że doktorant jest nie tylko biegły w prowadzeniu symulacji numerycznych, ale dobrze rozumie i potrafi zbudować pewne wyobrażenie zjawisk i procesów, które opisuje. To pozwala mu bardzo sprawnie poprowadzić cały wywód.

W ostatnim rozdziale opisującym uzyskane wyniki naukowe, mgr Tüzemen koncentruje się na własnościach dynamicznych *ferronu* traktowanego jako integralna całość, która ma określone położenie i prędkość. W zależności od liniowej prędkości bariery potencjału, która wytwarza *ferron*, pozostające po jej wyłączeniu wzbudzenie porusza się z określoną (zauważalnie mniejszą) prędkością. Prędkość ta jest ograniczona pewną wartością krytyczną, powyżej której *ferron* przestaje być stabilny. Jak argumentuje Autor, prędkość krytyczna powinna zależeć od różnicy liczby fermionów w poszczególnych składnikach, ergo od wielkości powstającego *ferronu*. To przewidywanie jest w pełni zgodne z otrzymanymi wynikami symulacji numerycznej. Za jeden z ciekawszych fragmentów tego rozdziału należy uznać próbę (zakończoną powodzeniem) wprowadzenia efektywnej masy *ferronu*, tzn. wielkości, którą można interpretować jako jego bezwładność i prowadzącą wprost do odpowiednika pojęcia energii kinetycznej. Jak wykazuje doktorant, rzeczywiście jest tak, że wykorzystując zaproponowaną definicję masy *ferronu* i znając jego prędkość można wyliczyć wprost energię kinetyczną, która niemalże idealnie zgadza się z energią jaka jest dostarczana do całego układu przy rozpędzaniu *ferronu*. Wyraźne odstępstwa są widoczne tylko dla odpowiednio dużych prędkości, tzn. gdy wzbudzenie przestaje być stabilne ze względu na słabnące efekty związane z powstawaniem skorelowanych par. Przeprowadzona w tym fragmencie analiza jest bardzo ciekawa i czyta się ją ze szczególną przyjemnością. Przysłowiową kropkę nad i tego rozumowania postawiłoby wykazanie (lub zaprzeczenie), że tak zdefiniowana energia kinetyczna jest wielkością addytywną, tzn. energia przekazywana do całego układu przy rozpędzeniu dwóch *ferronów* jest sumą tak zdefiniowanych energii kinetycznych.

Pracę podsumowuje rozdział siódmy, w którym Autor jeszcze raz przypomina najważniejsze wyniki swojej dysertacji.

Rozprawa doktorska mgra Tüzemena jest napisana bardzo starannie i widać, że doktorant włożył dużo wysiłku, aby uczynić ją przejrzystą. Niemniej jednak Autorowi nie udało się uniknąć wszystkich błędów edytorskich i pewnych niedomówień, których kilka pozwolę sobie przytoczyć. Przejście od wzoru (2.3) do (2.4) nie jest trywialne i zapewne byłoby lepiej, gdyby Autor poświęcił mu jakieś, choćby pobieżne, wyjaśnienie. Tym bardziej, że pozostawia on bez zdefiniowania wielkość  $D(0)$ . W okolicach wzoru (4.1) nie jest jasne jaki jest cel wprowadzenia wydawałoby się nieistotnych członów  $\epsilon_y$  i  $\epsilon_z$  (na poziomie  $10^{-6}$ ) łamiących symetrię osiową. Czy to jest zabieg niezbędny dla efektywnego prowadzenia symulacji numerycznych, czy też ma on jednak znaczenie fizyczne? Pod rysunkiem 5.1 zamieniony jest natomiast podpis lewy z prawym oraz błędne jest odniesienie do pracy [88] zamiast do [89]. Pojawiają się też pewne nieścisłości w oznaczeniach w okolicy wzoru (2.20). Natomiast już jako element intrygującej ciekawostki odbieram błędne referencje do własnych prac doktoranta umieszczone na samym początku rozprawy w abstrakcie na stronie viii. Podobnych, aczkolwiek drobnych, potknięć edytorskich w pracy jest więcej. Oczywiście przytaczam te wszystkie elementy wyłącznie z obowiązku jaki spoczywa na recenzencie, gdyż nie mają one większego wpływu na ogólną czytelność rozprawy, a żadnego na jej końcową ocenę.

Lektura rozprawy doktorskiej mgra Buğry Tüzemena sprawiła mi dużo naukowej przyjemności. Jest to dość kompleksowa prezentacja własności *ferromu* — specyficznego wzbudzenia elementarnego w unitarnym gazie fermionowym, w którego odkryciu i badaniu uczestniczył doktorant. Praca jest napisana językiem przystępnym, omijającym niepotrzebne, a niestety bardzo często spotykane w literaturze, specjalistyczne żargonowe zwroty i stwierdzenia. To sprawia, że może być ona bardzo dobrym przewodnikiem dla innych naukowców (w tym dla studentów), którzy chcieliby dalej zgłębiać fizykę *ferromów*. Z tego powodu, te drobne niedociągnięcia, które pozwoliłem sobie przytoczyć powyżej oczywiście nie mogą zmienić mojej pozytywnej opinii o samej rozprawie jak i o wynikach naukowych, na podstawie których została ona napisana.

Biorąc pod uwagę wszystkie powyższe elementy stwierdzam, że rozprawa doktorska mgra Buğry Tüzemena stanowi (oparty na bardzo dobrych publikacjach) opis oryginalnego problemu naukowego, w którego rozwiązaniu doktorant brał czynny udział, a jego wkład był istotny zarówno po stronie koncepcyjnej jak i technicznej. W związku z tym nie mam żadnych wątpliwości, że spełnia ona wszystkie formalne wymogi zawarte w obowiązujących regulacjach prawnych. W moim przekonaniu spełnia ona również wszystkie wymogi zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim w zakresie fizyki teoretycznej. Dlatego z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie mgra Buğrę Tüzemena do dalszych etapów przewodu doktorskiego w celu uzyskania pierwszego stopnia naukowego w zakresie fizyki.

