

dr hab. Piotr Żuchowski, prof. UMK
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Instytut Fizyki, Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
ul. Grudziądzka 5/7
87-100 Toruń

Recenzja pracy doktorskiej mgr. Daniela Pęcaka

pod tytułem

Silnie skorelowane układy kilku ultrazimnych fermionów o różnych masach

Pan magister Daniel Pęczak przygotował rozprawę doktorską pod opieką promotora, prof. Tomasza Sowińskiego. Praca dotyczy tematyki bardzo blisko związanej z ostatnimi eksperymentami związanymi z ultrazimnymi gazami atomowymi fermionów. Jest to nurt bardzo ważny w tej dziedzinie. Wykorzystanie zjawiska rezonansu Feshbacha i kontrola długości rozpraszania, czyli parametru opisującego oddziaływania między atomami, pozwoliło na zaprojektowanie znakomitych eksperymentów w których fermiony (zwykle atomy potasu-40 lub litu-6) mogą zostać wykorzystane na przykład do symulowania zachowania elektronów w fazie skondensowanej. Przykładem tu mogą być badania grupy Selima Jochima na uniwersytecie w Heidelbergu, lub przeprowadzane w Innsbrucku eksperymenty nad mieszaniną fermionów ${}^6\text{Li}$ i ${}^{40}\text{K}$. Co więcej, otwierają się nowe możliwości ciekawych badań układów fermionowych z wykorzystaniem niektórych izotopów dysprozu oraz erbu, strontu-87 oraz iterbu w najbliższej przyszłości. Stąd słowa uznania dla Autora za zajęcie się tak ważnym tematem w sytuacji, gdy pilnie potrzebne są nowe przewidywania teoretyczne.

Praca została napisana w języku polskim, liczy około 80 stron, podzielona jest na 6 rozdziałów i bibliografię, która to liczy 107 pozycji. Uzyskane w pracy wyniki zostały już częściowo opublikowane w dobrych czasopismach fizycznych, Physical Review A (IF rzędu 2.8) i New Journal of Physics (IF rzędu 3.5). Magister Pęczak jest pierwszym autorem tych trzech artykułów co można uznać za duży sukces. Ponadto doktorant jest autorem jeszcze jednej pracy, która została już umieszczona na serwerze preprintowym arXiv w marcu tego roku, która, jak rozumiem, czeka na publikację (jaki jest jej obecny status?). Prace te powstawały w małym gronie współautorów. Dodatkowo Pan Pęczak jest współautorem jeszcze dwóch publikacji niezwiązanych z tematyką pracy doktorskiej w Physical Review A i Journal of Modern Optics. Jest to zatem zacy dorobek jak na doktoranta, a praca w New Journal of Physics zyskała już kilkanaście cytowań (wg bazy Scholar Google).

Odniosę się teraz do treści kolejnych rozdziałów. Całość pracy otwiera krótkie wprowadzenie - bardzo krótki wstęp oraz Rozdział 1 w którym Autor przedstawia historię osiągnięć nauki o ultrazimnych gazach. W moim odczuciu te rozdziały znacząco odstają poziomem od pozostałych i są najsłabszą częścią rozprawy. Słabości te wyrażają się dość niedbałym językiem - przykład niezręczności językowej „przygotowywanie układów kwantowych posiadających uwypuklone pożądane cechy” - ogólną kompozycją i zbyt powierzchownym wprowadzeniem czytelnika do tematu. Na przykład we Wstępie, w jednym z paragrafów odnoszę wrażenie że w kilku zdaniach Autor próbował nam streścić doświadczenia prowadzone przez grupę Jochima, z tym, że opis taki i tak następuje w Rozdziale 1, więc lepiej byłoby zrezygnować w ogóle z takiego szczerkowego opisu we Wstępie. Opis podany w Rozdziale 1 jest zadowalający, podane jest kilka szczegółów eksperymentalnych po czym Autor odsyła nas do stosownych referencji. Jednakże we wstępie nie znalazł się taki opis dla układu Li-K, który jest głównym układem badanym w pracy. Biorąc pod

uwagę że mieszaniny fermionów o różnych masach są tematem głównym pracy, a układów taki eksperymentalnie zrealizowano dopiero jeden (Li-K) można było opisać ten eksperyment bardziej szczegółowo. Nie oczekuję że teoretyk chwilowo zmieni się w eksperymentatora, ale jest dobrze wiedzieć, że Autor zna dobrze kontekst swoich obliczeń, zdaje sobie sprawę z ograniczeń eksperymentalnych i wie w którą stronę eksperymenty mogą ewoluować. Rozdział 1 czyta się trudno, materiał powinien zostać podzielony na podrozdziały. W rezultacie treść jest mocno chaotyczna. W paragrafach mieszają się różne, moim zdaniem odległe tematycznie problemy. Na przykład na stronie 7 paragraf drugi od góry opisuje problemy związane z badaniem ultrazimnych gazów, po czym pojawia się nagle twierdzenie Earnshawa, którego problem odnosi się raczej do jonów w pułapce (i to bez znaczenia czy ciepłych czy zimnych), lub polarnych molekuł a nie ultrazimnych gazów neutralnych atomów. Na stronie 11 do jednego paragrafu wrzucono omówienie rezonansów Feshbacha i kontrolę oddziaływania przy pomocy zmiany geometrii układu - podrozdziały pomogłyby lepiej wprowadzić czytającego w temat i odseparowałyby najistotniejsze kwestie. Jeszcze jedna dość osobliwa rzecz: na stronie 8 pojawia się dyskusja zjawiska „mechanizmu resublimacji”. Przyznam że pierwszy raz zetknąłem się z tym terminem w kontekście ultrazimnych gazów. Może Autorowi chodziło o „rekombinację trójcząlową” która istotnie powoduje straty w gazach atomowych? Straty trójcząlowe jakie zachodzą w ultrazimnych gazach nie są rzecz jasna jedynymi jakie skracają czas życia gazów ultrazimnych, zderzenia nieelastyczne atomów są nawet większą przeszkodą (przykład atomów cezu i rubidu-85). Brakuje mi w tym rozdziale kilku ważnych pojęć, które przydałyby się do lepszego omówienia treści, na przykład temperatury (limit) Dopplera, który Autor omawia słowami „Fluktuacje średniego pędu nakładają ograniczenia na minimalną temperaturę którą można osiągnąć za pomocą chłodzenia dopplerowskiego” ale nie podaje explicite od czego ona zależy a przecież wzór na limit Dopplera to dwa znaki. Do dyskusji zdegenerowanego gazu fermionów przydałoby się zdefiniować też temperaturę Fermiego.

Rozdziały 2-6, w których przedstawiona jest główna część badawcza pracy doktorskiej, czyta się już znacznie lepiej. Materiał w nich podzielony jest logicznie i spójnie. Kolejne rozdziały zdają się odpowiadać na pytania zadawane w poprzednich, w związku z czym całość tworzy bardzo zgrabną „historię”. I tak: rozdział drugi omawia podstawowe pojęcia używane w dalszej części rozprawy, definiuje modelowy hamiltonian układu fermionów w języku drugiej kwantyzacji oraz bazę funkcji jednocząstkowych, które stanowią funkcje oscylatora kwantowego oraz cząstki w pudle. Omówiony jest sposób otrzymywania funkcji 1-cząstkowych dla dowolnych potencjałów poprzez diagonalizację układu na „siatce” oraz metoda Arnoldiego. Moim zdaniem przydało by się jeszcze omówienie algorytmu tworzenia elementów macierzowych hamiltonianu wielocząstkowego od strony technicznej.

Rozdział 3 zawiera problem rozdzielenia zmiennych układu dwóch rodzajów fermionów w zewnętrznym potencjale harmonicznym. Badania dwóch różnych fermionów dotyczyły tylko cząstek o takich samych potencjałach pułapkujących, co znacznie uprościło sytuację, choć trzeba zaznaczyć, że ogólniejsza teoria separacji współrzędnych dla różnych częstości pułapki (co w doświadczeniach prowadzonych do tej pory prawie zawsze ma miejsce) również istnieje i mogła zostać przedyskutowana przez Autora. Kolejny rozdział dotyczy przewidywań zmian kształtu gęstości atomów w pułapce harmoniczej pod wpływem oddziaływania między fermionami. Zaobserwowano bardzo interesujący efekt: po zbadaniu fermionów w pułapkach o kształcie harmonicznym i studni potencjału okazało się, że są one jakościowo zupełnie różne: w przypadku potencjału harmonicznego lekkie fermiony są wypychane na zewnątrz, zaś ciężkie wciągane do środka. W przypadku potencjału studni prostokątnej jest dokładnie odwrotnie i to ciężkie fermiony są wypychane na zewnątrz. Efekt ten zaobserwowano dla kilku wartości oddziaływania oraz różnych kombinacji ilości fermionów.

Efekt jakościowo różnego separowania się gęstości fermionów w różnych kształtach potencjału dokładniej zbadano w rozdziale 5. W tym celu zaproponowano potencjał w sposób ciągle zmieniający się między parabolą a studnią prostokątną - będący potencjałem obciążonego oscylatora. Stany jednocząstkowe w tym przypadku zostały uzyskane numerycznie. Poprzez stopniowe (adiabaticzne) zmienianie kształtu pułapki separacja gęstości fermionów ulega zmianie. Do zbadania tego zjawiska posłużono się parametrem porządku będącym scalkowanym drugim momentem magnetyzacji (różnica między gęstościami fermionów o różnych masach) oraz jego pochodnymi po parametrze zmiany potencjału (podatności) oraz wykonano

wykresy tych wielkości dla wielu parametrów oddziaływania. Wykorzystano *ansatz* skalowania podatności do pokazania że niezależnie od parametru oddziaływania skalowana podatność może być dobrana tak, że jest uniwersalna dla każdego oddziaływania. Stąd wniosek, że układ wykazuje przejście fazowe i można wyznaczyć krytyczne parametry tego przejścia dla ustalonej liczby cząstek.

Ostatni rozdział pracy to porównanie tak zwanego *ansatzu interpolacyjnego* do układu kilku fermionów o różnych masach do ścisłej diagonalizacji. Ansatz interpolacyjny został wprowadzony w grupie Zinnera. Autor rozprawy zaznacza że część wyników z Rozdziału 6 została uzyskana we współpracy z grupą Zinnera. Ansatz interpolacyjny przetestowany jest poprzez porównanie wierności funkcji falowej względem funkcji otrzymanej ze ścisłej diagonalizacji. Zaskakująco, ten prosty ansatz działa bardzo dobrze dla prawie wszystkich parametrów oddziaływania, również w sytuacji bardzo różnych mas fermionów. W konkluzjach zawarty jest pomysł na dalsze wykorzystanie tego ansatzu, przy pomocy rozszerzenia układu funkcji bazowych w metodzie wariacyjnej o punkt dla którego wierność jest najgorsza ($z=2$). Jestem bardzo ciekawy jak ten pomysł zadziała.

Pozostałe pytania do Kandydata, jakie pozwolę sobie zadać:

- W jaki sposób można rozszerzyć teorię na przypadek różnych polaryzowalności atomowych (a co za tym idzie częstości pułapki harmoniczych)? Czy Autor rozprawy widzi jakąś drogę ku temu?
- Jak dokładniej wygląda zbieżność energii układu od N_{max} , czy jest to jakaś potęgowa zależność, czy można znaleźć jakiś sposób na ekstrapolowanie wyników z mniejszych baz do nieskończonych rozwinięć, w sytuacji gdyby taka zbieżność okazała się regularna?
- Jakie było N_{max} wykorzystane w obliczeniach w Rozdziale 6? Jak rozumiem było ono uzbieżnione, ale chętnie usłyszałbym komentarz jak bardzo wierność zależy od konkretnych wartości N_{max} .
- Postać potencjału pośredniego między studnią a oscylatorem harmonicznym (obcięta parabola) ma nieciągłą pochodną. Czy może mieć ona wpływ na widmo?

Podsumowanie:

Przedstawiona przez mgr. Daniela Pęcaka rozprawa doktorska dotyczy bardzo dynamicznie rozwijającej się tematyki badań, bezpośrednio związanej z najciekawszymi eksperymentalnymi badaniami w dziedzinie ultrazimnych gazów atomowych. Na treść pracy złożyło się kilka już opublikowanych prac w dobrych czasopismach fizycznych takich jak *Physical Review A* i *New Journal of Physics*. Prace te już zostały zauważone przez środowisko i z pewnością wyniki tych prac będą wykorzystywane w bliskiej przyszłości. Rozprawa doktorska stawia wiele nowych pytań i zachęca do dalszych badań nad tym tematem. Najważniejsze rozdziały w pracy, te które zawierają nowe badania, zostały napisane poprawnie, choć miejscami nieco zwięzłe. Najslabszą stroną rozprawy doktorskiej jest rozdział pierwszy, w którym Autor przedstawia ostatnie osiągnięcia w dziedzinie ultrazimnych gazów atomowych które mają znaczenie w kontekście fizyki kilku- i wielu ciał - rozdział ten jest napisany nieco chaotycznie i nazbyt skrótowo. Niemniej, nie psuje on ogólnie bardzo dobrego wrażenia po lekturze rozdziałów 2-6. Lektura pracy sprawiła mi dużą przyjemność, zaciekała mnie i dużo się dzięki niej nauczyłem. Z pełnym przekonaniem wnoszę więc o dopuszczenie Pana Daniela Pęcaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

dr hab. Piotr Żuchowski, prof. UMK



Toruń, 21 listopada 2017