

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Tanausu Hernandeza Yanesa

Oceniana przeze mnie rozprawa doktorska „Practical Spin-Squeezing with Ultra-Cold Atoms in Optical Lattices” napisana została przez mgra Tanausu Hernandeza Yanesa pod opieką dr hab. Emilii Witkowskiej w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk. Wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych.

W rozprawie autor zajmuje się opisem tworzenia stanów ściśniętych spinowo. Stany takie są niezwykle przydatne do zwiększenia precyzji pomiarów badanych wielkości fizycznych. Np. ściśnięty stan światła wykorzystany w interferometrze służącym do pomiarów fal grawitacyjnych zwiększył około dwukrotnie czułość pomiaru tychże fal. Teoretycznie, ściśnięte stany spinowe dają możliwość wielokrotnego zwiększenia precyzji pomiaru. Z tego powodu opis wytwarzania takich stanów jest ważnym kierunkiem aktualnych badań teoretycznych i doświadczalnych. Rozprawa doktorska mgra Yanesa jest ważnym przyczynkiem do tych badań.

Autor rozprawy bada teoretycznie układy ultrazimnych atomów znajdujących się w tzw. sieciach optycznych – czyli zewnętrznym, periodycznym potencjale pułapkującym atomy. Autor wybiera takie parametry badanych układów, aby potencjalnie skomplikowana dynamika, efektywnie zredukowała się do dynamiki generowanej, przez stosunkowo prosty Hamiltonian, zawierający operatory kolektywnego spinu układu. W takim opisie funkcja falowa układu rozpinana jest, przez co najwyżej dwuwymiarową bazę, co jest potężną redukcją liczby stopni swobody układu. Tak zaawansowana redukcja, możliwa jest dzięki poprawnemu zidentyfikowaniu pasm energetycznych układu i ograniczeniu dynamiki do najniższego z nich. Tak jak pisałem wcześniej, wynikiem zastosowania takiej procedury, jest otrzymanie stosunkowo prostego opisu dynamiki układu. W szczególności można znaleźć zmianę w czasie tzw. parametru ściśnięcia spinowego, opisującego stopień splątania stanu kwantowego układu. Minimalna wartość tego parametru pokazuje, jak bardzo otrzymany stan kwantowy jest użyteczny z punktu widzenia poprawy precyzji pomiaru interferometrycznego. Wyznaczenie czasu po którym parametr ściśnięcia spinowego uzyskuje wartość minimalną, oraz wyznaczenie tej wartości dla różnych układów jest celem niniejszej rozprawy doktorskiej.

Po wyżej przedstawionym skrótowym opisie głównych wyników rozprawy przejdę to bardziej szczegółowego opisu treści rozprawy.

Rozprawa rozpoczyna się od wstępu, w którym autor wprowadza czytelnika w tematykę rozprawy, omawiając pojęcie ściśnięcia spinowego, jego wykorzystanie w metrologii kwantowej oraz generację w układach zimnych atomów.

W rozdziale drugim, autor definiuje operatory kolektywnego spinu w przypadku bozonów. Wprowadza również koherentne stany spinowe, które umożliwiają reprezentację stanu kwantowego układu poprzez dodatnią gęstość prawdopodobieństwa (funkcję Husimi układu) określoną na sferze Blocha. Taka reprezentacja graficzna w poglądowy sposób przedstawia rozkład gęstości prawdopodobieństwa i umożliwia prostą identyfikację obecności i siły ściśnięcia w stanie kwantowym. Dodatkowo definiuje parametr ściśnięcia spinowego, który kwantyfikuje użyteczne splątanie układu. Na końcu rozdziału autor przedstawia kilka modelowych Hamiltonianów z różnymi kombinacjami operatorów spinu kolektywnego. Analizuje ich dynamikę prezentując wykres parametru ściśnięcia w czasie wraz z wykresami funkcji Husimi na sferze Blocha.

W rozdziale trzecim autor koncentruje się na opisie zimnych atomów w sieciach optycznych. Wprowadza model Hubbarda zarówno dla bozonów jak i fermionów. Opisuje sytuację w której model Hubbarda upraszcza się do tzw. modelu Heisenberga. Prezentuje wyprowadzenie stanów własnych tego Hamiltonianu – tzw. magnonów (pojedynczych i podwójnych).

Tak jak pisałem wcześniej, kluczowa dla badań opisanych w rozprawie, jest redukcja opisu układu do stosunkowo prostego Hamiltonianu kolektywnego spinu. Ta redukcja odbywa się poprzez wprowadzenie efektywnego Hamiltonianu, otrzymanego z Hamiltonianu początkowego przy pomocy rachunku zaburzeń. W rozdziale czwartym autor opisuje metodę teoretyczną umożliwiającą otrzymanie wyżej wspomnianego Hamiltonianu efektywnego.

Cześć pracy opisana powyżej, przygotowuje narzędzia oraz opis teoretyczny do zbadania realistycznych układów atomowych opisanych w następnych rozdziałach.

I tak, w rozdziale piątym, autor zajmuje się układem mieszaniny dwóch rodzajów atomów bozonowych, oddziałujących ze sobą za pomocą sił o charakterze dipolowym. Atomy te umieszczone są w potencjale sieci optycznych, tak, że dynamikę układu opisuje model Hubbarda. Autor pokazuje jak w tzw. stanie nadciekłym układu, efektywny Hamiltonian daje się wyrazić poprzez operatory kolektywnego spinu. Na końcu rozdziału autor prezentuje wykres spinowego parametru ściśnięcia w funkcji czasu. Wyraźnie pokazany jest obszar czasowy, w którym ściśnięcie stanu jest na tyle duże, że użycie takiego stanu istotnie poprawiłoby precyzję pomiaru interferometrycznego. Autor zauważa jednak, że zaproponowany układ może być trudny do realizacji eksperymentalnej, ze względu na straty atomów (wywołanych przez dwuciałowe zderzenia nieelastyczne). Zauważa, że straty mogą być silnie zredukowane poprzez zamianę bozonów na fermiony (ze względu na zasadę Pauliego w jednym oczku sieci mogą być maksymalnie dwa atomy z różnymi spinami). Dodatkowym czynnikiem zmniejszającym straty jest reżim wysokiej sieci optycznej. W tym wypadku układ wchodzi w tzw. fazę Motta, gdzie najkorzystniejsza energetycznie sytuacja jest obsadzenie każdego oczka sieci tylko jednym atomem.

Właśnie taki układ jest przedmiotem rozdziału szóstego. W tym wypadku model Hubbarda redukuje się do modelu Heisenberga. Ten wielomodowy model jest trudny do analizy teoretycznej. Autor chce zredukować ten złożony Hamiltonian do Hamiltonianu efektywnego otrzymanego w wyniku działania rachunku zaburzeń. W tym celu znajduje pasmo energetyczne, które jest, opisanym w rozdziale trzecim, pasmem wzbudzeń zwanych magnonami. Aby otrzymać prosty Hamiltonian efektywny, potrzebny jest dodatkowe oddziaływanie, które „sprzęgnie” stan podstawowy z podprzestrzenią wzbudzeń

magnonowych. Okazuje się, że to oddziaływanie można uzyskać za pomocą wiązki światła laserowego o odpowiedniej częstotliwości, oświetlającej atomy w określony sposób. Mając proces sprzęgający, oraz korzystając z drugiego rzędu rachunku zaburzeń, autor wyprowadza efektywny Hamiltonian, który, tak jak potrzebował, zawiera jedynie operatory kolektywnego spinu. Rozdział kończy się wykresem parametru ściśnięcia spinowego w funkcji czasu jawnie prezentującego silne ściśnięcie.

W rozdziale siódmym autor wraca do bozonów, aczkolwiek bada teraz układ w reżimie izolatora Motta (w rozdziale piątym analizowany był reżim nadciekły). Autor pokazuje jak w tym reżimie, w szerokim obszarze parametrów, układ efektywnie daje się opisać pożądanym, prostym Hamiltonianem. Obok tego autor analizuje pewien szczególny przypadek wartości parametrów układu (wybranych wartości oddziaływań kontaktowych dla mieszaniny bozonów). W tym wypadku, aby otrzymać pożądaną, prostą Hamiltonian, układ atomów potrzeba dodatkowo włożyć w niejednorodne pole magnetyczne. Traktując to pole jako zaburzenie i stosując technikę rachunku zaburzeń, autor wyprowadza efektywny Hamiltonian. W obydwu tych przypadkach otrzymane Hamiltoniany składają się tylko z operatorów kolektywnego spinu. W dalszej części rozdziału autor wplata w model obecność „dziur” (czyli braku atomów w oczku sieci) w układzie. Jest to związanie z dostosowaniem modelu do obserwacji eksperymentalnych gdzie dziury są nagminnie obserwowane. Tak jak poprzednio rozdział kończy się wykresami zależności spinowego parametru ściśnięcia od czasu.

Jak wiadomo parametr ściśnięcia spinowego jest związany ze splątaniem. Jednakże są też inne metody wykrywania splątanie w układzie. Jedną z takich metod jest złamanie nierówności Bella. W rozdziale ósmym autor wyprowadza takie nierówności dla badanych poprzednio układów i prezentuje ich łamanie, w pewnym obszarze parametrów i czasów ewolucji układów.

Rozprawę kończy rozdział dziewiąty zawierający krótkie podsumowanie pracy.

Moja ocena rozprawy jest bardzo pozytywna. Rozprawa napisana jest bardzo starannie i precyzyjnie. Czytając rozprawę odnosi się wrażenie, że autor rozumie co robi oraz świadomie dokonuje wyboru układów, w celu otrzymania stanów o jak największym użytecznym splątaniu. Autor stopniowo wprowadza czytelnika w obszar swoich badań. Po kolei definiuje oraz motywuje obserwabla które będzie wyznaczał. Następnie omawia dynamikę stanów kwantowych, zadaną modelowymi Hamiltonianami, prezentując w ładny graficznie sposób ulegające ściśnięciu stany. Dopiero po takim obszernym wprowadzeniu omawia realistyczne układy. Tak jak pisałem wcześniej, otrzymane wyniki teoretyczne stanowią istotny wkład w aktualne badania prowadzone w tym obszarze.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia, wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668).

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z dziedziny fizyki zimnych gazów, a także świadczy o ogólnej wiedzy Kandydata w tym zakresie oraz o jego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wnoszę o dopuszczenie mgra Tanausa Hernandeza Yanesa do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy. Uważam że przedstawione wyniki oraz jakość ich prezentacji na to zasługują.

Pawel Zin