



UNIwersytet
Warszawski

Wydział Fizyki UW

Dr hab. Krzysztof Jachymski

Warszawa, 15.11.2024

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Tanausu Hernandez Yanes

Praca mgr. Hernandez Yanes, przygotowana pod opieką dr. hab. Emilii Witkowskiej z Instytutu Fizyki PAN, dotyczy inżynierii ściśniętych stanów kwantowych w układach ultrazimnych atomów umieszczonych w sieci optycznej. Celem autora było zaproponowanie realistycznych scenariuszy uzyskania ściśnięcia oraz analiza możliwości ich praktycznej realizacji biorąc pod uwagę niedoskonałości układu takie jak obecność nieobsadzonych oczek sieci. Wyniki opisane w pracy są oparte na pięciu wieloautorskich publikacjach, w tym jednej w *Physical Review Letters* gdzie doktorant jest pierwszym autorem.

Autor rozpoczyna od oświadczenia opisującego swój wkład w prezentowane publikacje, z którego wynika, że był on kluczowy we wszystkich pracach, co bardzo ułatwia ocenę jego osiągnięcia. Sama praca ma hybrydową strukturę. Po czterech wstępnych rozdziałach opisujących podstawowe pojęcia i metody używane w pracy, następujące cztery zawierają przedruki oryginalnych publikacji poprzedzone czymś w rodzaju komentarza i rozszerzenia niektórych sekcji. Taka struktura w praktyce nie jest wygodna dla czytelnika, wymaga przeczytania wpierw manuskryptu a następnie skakania pomiędzy tekstem dopisanym a pierwotnym. Zdecydowanie wolałbym jeden spójny tekst. Rozprawa jest jednak ogólnie starannie zredagowana i ozdobiona ciekawą analogową animacją wizualizującą ściskanie stanu koherentnego. Nie będę tu wymieniał zauważonych literówek, błędów w równaniach czy niezręcznych sformułowań, mimo iż kilka zauważyłem to nie wpływają one na odbiór treści. Omówię teraz krótko zawartość poszczególnych rozdziałów.

Rozdział pierwszy dość ogólnikowo zarysowuje kontekst badań, pozostawiając nieco niejasne wrażenie. Drugi skupia się na definicjach stanów koherentnych i ściśniętych dla układu spinów, a także podstawowych hamiltonianów generujących ściskanie. Jest w mojej opinii bardzo dobrze napisany i bardzo pomocny w czytaniu dalszej części. Szczególnie wartościowe dla mnie było przedstawienie konkurencyjnych definicji parametru ściśnięcia. Nie jest to raczej szeroko znane zagadnienie i dobrze, że zostało starannie omówione. W trzecim rozdziale autor krótko omawia standardowy opis atomów w sieci optycznej oraz model Heisenberga który opisuje przypadek silnych oddziaływań. Sporo miejsca poświęcone jest wzbudzeniom modelu Heisenberga, tj. falom spinowym, dopiero w dalszej części pracy staje się jasne dlaczego. Czwarty rozdział jest bardzo krótki i przedstawia standardową transformację Schieffera-Wolffa, mógłby lepiej się sprawdzić jako załącznik. Ogólnie część wstępna wydaje się wystarczająca.

Piąty rozdział rozpoczyna właściwą część pracy i przedstawia model generacji splątania w układzie bozonów w jednowymiarowej sieci optycznej oddziałujących dipolowo. Głównym wynikiem jest ustalenie, że w przybliżeniu dwumodowym, kiedy obsadzony jest tylko stan o zerowym quasipędzie, efektywny Hamiltonian przypomina znany z literatury model ściskania (one axis twisting lub two-axis countertwisting, zależnie od parametrów). W dodatkowym materiale autor wyprowadza w nieco zagmatwany sposób oddziaływanie dipolowe w języku operatorów spinowych i dyskutuje rolę warunków brzegowych, które okazują się mieć niemałe znaczenie dla niewielkich rozmiarów układu (przykłady wygenerowano dla $N=8$). Różnica wydaje się być spowodowana długozasięgowym charakterem oddziaływania. Czy autor mógłby skomentować ten wynik, w szczególności spodziewane zachowanie dla większej liczby oczek sieci? Nasuwa się też pytanie o rolę geometrii układu w szybkości generowania splątania, gdyż można by myśleć o wykorzystaniu anizotropii oddziaływania dipolowego i jakiejś optymalizacji ustawienia cząstek.

Szósty rozdział zawiera według mnie najciekawsze wyniki. Dotyczy on generacji ściśnięcia w układzie silnie oddziałujących fermionów opisywanych modelem Heisenberga z dodatkowym członem wprowadzającym sprzężenie spin-orbita (indukowanym np. za pomocą pary laserów), który w języku modelu Heisenberga generuje fale spinowe. Mam w tym punkcie pytanie związane z poprzednim rozdziałem. Oddziaływanie dipolowe w naturalny sposób generuje sprzężenie spin-orbita (pominięte przez autora m.in. z powodu wyboru liniowej geometrii układu). Czy mogłoby ono zostać użyte zamiast zewnętrznego pola laserowego? Chciałbym również dowiedzieć się, dlaczego we wzorze 6.4 następuje skokowa zmiana Hamiltonianu dla fazy równej π (materiał dodatkowy do artykułu chyba nie znalazł się w dysertacji) i czy ma to fizyczne znaczenie, gdyż w eksperymencie prawdopodobnie faza referencyjna będzie obciążona skończoną dokładnością. Najbardziej zaskakujący jest jednak dla mnie fakt, że warunki brzegowe całkowicie zmieniają ewolucję układu. Jak tłumaczy autor, jest to spowodowane dodatkowym członem efektywnego Hamiltonianu proporcjonalnym do parametru „eta” który można analitycznie obliczyć dla niektórych wartości faz utrzymując $-1/2$. Autor podaje intuicyjne wyjaśnienie tego faktu wracając do obrazu fal spinowych i pokazując, że dla otwartego układu nie ma ograniczenia na wektor falowy wzbudzenia, więc sprzężanie następuje do ciągłego widma fal zamiast dyskretnego. Czy ten efekt nie powinien jednak zanikać dla dużych rozmiarów układu, kiedy odległości pomiędzy poziomami wzbudzonymi maleją?

W siódmym rozdziale autor rozważa modele które mogą być prostsze w realizacji doświadczalnej choć działające tylko dla małej liczby atomów, korzystające jedynie z anizotropii oddziaływań lub zmiennego pola magnetycznego skierowanego prostopadle do osi kwantyzacji. Głównym przedmiotem analizy jest wpływ niedoskonałości układu takich jak statyczne dziury rozbijające łańcuch na części, zewnętrzna pułapka czy skończona temperatura na możliwe do osiągnięcia ściśnięcie. Ósmy rozdział pracy poświęcony jest konstrukcji świadka splątania który potwierdziłby generowanie kwantowych korelacji w łańcuchu atomów. Ponownie rozważane są przypadki z szumem w postaci istnienia dziur lub podwójnych obsadzeń w układzie. Autor stosuje co prawda znane narzędzia oparte na korelacjach typu Bella, jednak wykazuje się skrupulatnością analizując bardzo wiele przypadków szumu i pokazując, że można wykryć splątanie za pomocą prostych pomiarów korelacji pomiędzy

dwiema cząstkami. To niewątpliwie przydatny materiał i mam nadzieję, że zostanie dostrzeżony w środowisku.

Autor pracy wykonał ogólnie dużą ilość obliczeń numerycznych, nie tylko dla efektywnych uproszczonych modeli ale również obliczając ewolucję czasową pierwotnych układów atomów w sieci, gdzie dynamika jest potencjalnie dość skomplikowana. Dzięki temu można w pełni ufać prostym opisom używającym kolektywnego spinu. Zademonstrował dobre rozeznanie w problemach metrologii kwantowej, jak również fizyki ultrazimnych atomów.

Podsumowując, praca mgr. Tanausu Hernandez Yanes zawiera wartościowe nowe wyniki naukowe dotyczące korelacji kwantowych w układach zimnych atomów, które mogą znaleźć zastosowanie w przyszłych eksperymentach. Zawarte w niej wyniki zostały opublikowane w recenzowanych czasopismach o wysokim prestiżu, a doktorant miał w nie wiodący wkład. Rozprawa spełnia zatem ustawowe warunki stawiane pracom doktorskim. Wnioskuje więc o dopuszczenie mgr. Tanausu Hernandez Yanes do publicznej obrony pracy doktorskiej.