

dr hab. Bogdan Damski
Instytut Fizyki Uniwersytetu Jagiellońskiego
ul. Łojasiewicza 11
30-348 Kraków
bogdan.damski@uj.edu.pl

Kraków, 20-5-2018

**Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Dariusza Kajtocha zatytułowanej
„Quantum Interferometry with Spinor Condensates”**

Omawiana rozprawa doktorska została napisana w języku angielskim pod opieką dr hab. Emilii Witkowskiej w Instytucie Fizyki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie. Przedstawia ona kompleksowo szereg zagadnień związanych z wykorzystaniem spinorowych kondensatów Bosego-Einsteina w kwantowej metrologii. Możliwość zastosowania układów kwantowych do precyzyjnych pomiarów jest obecnie szeroko badana w wiodących ośrodkach naukowych na świecie. Nie mniejszym zainteresowaniem cieszy się fizyka zimnych atomów takich jak kondensaty Bosego-Einsteina. Zatem rozprawa doktorska magistra Dariusza Kajtocha dobrze wpisuje się w tematykę współczesnych badań.

Jest ona oparta na oryginalnych wynikach opisanych w dwóch pracach opublikowanych w Physical Review A i jednym manuskrypcie, który zapewne niedługo zostanie opublikowany. Warto podkreślić, że doktorant jest również współautorem dwóch innych publikacji w Physical Review A i dwóch manuskryptów, co łącznie daje wyróżniający dorobek naukowy na tym etapie kariery akademickiej i jasno pokazuje, że jest on bardzo dobrze przygotowany do kontynuacji badań na stażach podoktorskich. Poniżej pokrótce omówię treść rozprawy doktorskiej i pozwolę sobie zadać autorowi rozprawy kilka pytań.

Rozprawa rozpoczyna się od wstępu, który z jednej strony wprowadza podstawowe pojęcia z zakresu kwantowej metrologii a z drugiej strony pokazuje jak można je zastosować do kondensatu Bosego-Einsteina o spinie jeden. Komplikacja z jaką zmierzył się tutaj doktorant wynika stąd, że każdy atom w badanym układzie nie jest układem dwupoziomowym, jak to ma miejsce w wielu innych badaniach z zakresu kwantowej metrologii, ale jest on układem trójpoziomowym. Dyskusja jest uzupełniona dwoma przykładami, które ilustrują dbałość doktoranta w przygotowanie rozprawy doktorskiej.

W kolejnym rozdziale przedstawiona jest obszerna dyskusja stanów podstawowych badanego kondensatu spinorowego i metody liczenia kwantowej informacji Fishera, która pozwala na klasyfikację zarówno stanów podstawowych jak i stanów termicznych ze względu na ich przydatność w metrologii. Kwantowa informacja Fishera jest wyznaczana zarówno średnipolowo, jak i w pełni kwantowo, co jest możliwe dzięki zastosowaniu przybliżenia jednomodowego. To ostatnie podejście pozwala na wyjście poza przybliżenie średnipolowe w stosunkowo prosty sposób, co czyni je atrakcyjnym w kontekście innych problemów, które można w tym układzie badać. Na przykład, spodziewam się, że można je zastosować do opisu dynamiki spinorowych kondensatów w pobliżu kwantowych punktów krytycznych przy przejściach bez spontanicznego łamania symetrii. W większości omawianych przypadków kwantowa informacja Fishera skaluje się kwadratowo z rozmiarem układu. Oznacza to, że osiąga ona granicę Heisenberga, w której efekty kwantowe umożliwiają ultra precyzyjną metrologię. Wiele uwagi poświęca również doktorant kwantowej informacji Fishera w stanach termicznych, gdzie granica Heisenberga jest również osiągana. Jednym z ciekawych wyników tutaj jest to, że kwantowa informacja Fishera w fazie polarnej osiąga granicę Heisenberga dopiero w niezerowej temperaturze, co doktorant przekonująco uzasadnia. Ponadto

dyskutowany jest wpływ fluktuacji namagnesowania na kwantową informację Fishera, co ma istotne znaczenie dla oceny eksperymentalnej przydatności wyników przedstawionych w rozprawie.

Następny rozdział jest poświęcony generacji stanów ściśniętych w oddziałujących dipolowo kondensatach spinorowych. Takie stany są przydatne w kwantowej metrologii, co jak sądzę stanowi motywację do ich dyskusji w omawianej rozprawie doktorskiej. Wiele uwagi doktorant poświęca wyprowadzeniu Hamiltonianu tego układu pokazując, że w odpowiednich granicach redukuje się on do znanych w literaturze modeli jednoosiowo skrętnych (ang. one-axis twisting) i dwuosiowo przeciwskrętnych (ang. two-axis countertwisting). Ten Hamiltonian jest następnie używany podczas ewolucji czasowej, która przeprowadza stan koherentny w stan ściśnięty. Poziom ściśnięcia jest analitycznie i numerycznie analizowany w zależności od parametrów układu i wyboru parametrów początkowego stanu koherentnego do ewolucji czasowej. Eleganckim podsumowaniem tych rozważań są Tabele 4.1 i 4.2, pokazujące analityczne wyniki na maksymalny poziom ściśnięcia i czas ewolucji jaki do niego prowadzi.

Poniżej przedstawię kilka bardziej „technicznych” komentarzy, które chciałbym przedyskutować podczas obrony pracy doktorskiej:

1. Jedną z wielkości używanych do opisu kwantowych przejść fazowych jest tzw. podobieństwo stanów podstawowych (ang. ground-state fidelity), które jest zdefiniowane jako moduł iloczynu skalarnego stanów podstawowych wyznaczonych dla dwóch różnych pól zewnętrznych działających na układ. Wiele wysiłku zostało ostatnio włożone w badania tej wielkości i jej uogólnienia na stany termiczne. W szczególności wiadomo, że tzw. podatność podobieństwa stanów podstawowych i termicznych (ang. fidelity susceptibility) jest bezpośrednio powiązana z kwantową informacją Fishera. Zastanawia mnie zatem, czy można ten związek wykorzystać do analizy wyników uzyskanych przez doktoranta?
2. Rysunki 3.5 i 3.6 pokazują kwantową informację Fishera wyznaczoną dla szeregu parametrów spinorowego kondensatu zarówno rachunkiem średniopółowym jak i kwantowym. Obydwa podejścia na tych rysunkach wydają się być tożsame, co jest na pierwszy rzut oka zaskakujące i sugeruje pytanie o to, kiedy te dwa podejścia dają różne wyniki? Czy można oszacować dla jakich parametrów układu (np. rozmiaru układu) przybliżenie średniopółowe kwantowej informacji Fishera załamuje się?
3. Na rysunku 3.6 dodatkowo wzbudza moje zainteresowanie zachowanie kwantowej informacji Fishera dookoła kwantowych punktów krytycznych. Czy można to zachowanie powiązać z uniwersalnymi wykładnikami krytycznymi układu?
4. Czytając rozprawę doktorską odnoszę wrażenie, że kwantowa informacja Fishera w stanach podstawowych różnych faz spinorowego kondensatu skaluje się z rozmiarem układu liniowo lub kwadratowo. Zastanawia mnie zatem, czy możliwe są inne skalowania z rozmiarem układu w pobliżu kwantowych punktów krytycznych? Przypuszczam, że musi być jakiś obszar przejściowy dookoła fazy polarnej i fazy ferromagnetycznej, gdzie skalowanie z rozmiarem układu nie jest ani liniowe ani kwadratowe. Jeśli tak jest, to czy można oszacować jego rozmiar na diagramie fazowym?

5. W rozdziale 3 funkcja falowa Thomasa-Fermiego jest używana w jednomodowym opisie układu, podczas gdy w rozdziale 4 jest ona zastąpiona przez Gaussowską funkcję falową. Skąd wynika ta zmiana? Jak wyznaczone są współczynniki $\gamma_{x,y,z}$ we wzorze (4.11)?
6. W rozdziale 4.4 dyskutowany jest wynik pokazujący ewolucję czasową parametru ściśnięcia, wzór (4.40). Nie jest dla mnie zrozumiałe, na czym polega rozwinięcie w małym parametrze ϵ , które prowadzi do tego wzoru. Skąd biorą się warunki (4.39a) i (4.39b)?
7. Z treści rozprawy wnioskuję, że jedną z motywacji do rozważenia kondensatu Bosego-Einsteina o spinie jeden jest to, że jest to zbiór układów trójpoziomowych. Po przeczytaniu rozprawy doktorskiej nie mam jasności, czy układy trójpoziomowe mają jakąś przewagę w zastosowaniach metrologicznych nad standardowymi układami dwupoziomowymi. Czy wraz ze wzrostem ilości poziomów, np. poprzez rozważenie kondensatu o spinie większym niż jeden, możemy się spodziewać wzrostu dokładności pomiaru zewnętrznego pola?

Tytułem uwag końcowych chcę podkreślić, że we wszystkich rozdziałach rozprawy doktorskiej autor starannie dyskutuje kontekst doświadczalny omawianych problemów i podaje sporo referencji do prac teoretycznych i doświadczalnych tematycznie powiązanych z dyskutowanymi zagadnieniami. Moją uwagę zwraca również stosunkowo duża ilość wyników analitycznych dyskutowanych w rozprawie, co pozytywnie świadczy o biegłości rachunkowej doktoranta i sugeruje głębokie zrozumienie przez niego dyskutowanych problemów. Ponadto warto wspomnieć, że notacja stosowana w rozprawie jest konsekwentna a szata graficzna adekwatna do omawianych problemów. Zatem, pomijając drobne błędy językowe, uważam, że rozprawa jest dobrze napisana i stanowi ciekawą lekturę na temat zastosowań metrologicznych kondensatów Bosego-Einsteina.

Stwierdzam, że rozprawa Pana magistra Dariusz Kajtocha spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim z dziedziny fizyki. Wnoszę o dopuszczenie Pana magistra Dariusza Kajtocha do dalszych etapów obrony pracy doktorskiej. Ponadto zgłaszam wniosek o wyróżnienie tej rozprawy.

Uzasadnienie wyróżnienia:

Uważam, że na wyróżnienie zasługuje kompleksowa dyskusja zastosowań metrologicznych spinorowych kondensatów Bosego-Einsteina w omawianej rozprawie doktorskiej. Uzyskane wyniki, zarówno analityczne jak i numeryczne, elegancko ilustrują potencjał metrologiczny tego układu i pozwalają na planowanie eksperymentów. Te wyniki z jednej strony dają fundamentalny wgląd w zachowanie omawianego układu, a z drugiej strony stymulują postęp w praktycznych zastosowaniach układów kwantowych, czyli tzw. inżynierii kwantowej. Mój wniosek o jej wyróżnienie dodatkowo motywuje staranny sposób napisania tej rozprawy, publikacja prezentowanych w niej wyników w uznanych czasopismach i istotny wkład doktoranta w ich powstanie potwierdzony przez promotora rozprawy.

Bogdan Damski

