

dr hab. Emilia Witkowska
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Oddział Fizyki Teoretycznej
Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warszawa
ewitk@ifpan.edu.pl

**Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Karola Gietki zatytułowanej
„Quantum Metrology with Atoms and Light”**

Rozprawa doktorska mgra Karola Gietki rozważa wykorzystanie nieklasycznych stanów wytworzonych w układach ultra-zimnych gazów atomowych w kwantowej metrologii. Autor skupia swoją uwagę na interferometrii atomowej wykorzystującej kondensaty dwuskładnikowe umieszczone w jednorodnym potencjale i we wnęce optycznej, w której tworzą hybrydowy układ sprzężony ze światłem. Zarówno możliwość zastosowania efektów kwantowych, jak również zimnych gazów atomowych, do precyzyjnych pomiarów jest obecnie dość szeroko badana teoretycznie i doświadczalnie. Tematyka rozprawy wpisuje się zatem w nurt współczesnych badań.

Rozprawa doktorska mgra Karola Gietki zawiera krótki wstęp do dziedziny metrologii kwantowej, motywację do podjęcia badań oraz dwie części zawierające wprowadzenie do interferometrii atomowej i oryginalne wyniki Autora.

W części pierwszej Autor wprowadza czytelnika do teorii interferometrii kwantowej w dziedzinie optycznej celem zdefiniowania interferometru Macha-Zehndera oraz wykazania użyteczności nieklasycznych stanów światła do zwiększenia precyzji pomiaru. Następnie, omawia własności dwuskładnikowych kondensatów Bosego-Einsteina w kontekście układu do utworzenia odpowiednika optycznego interferometru Macha-Zehndera w dziedzinie atomowej. Na końcu Autor przedstawia podstawy teorii pomiaru aby wyprowadzić pojęcie kwantowej informacji Fishera jako kryterium świadczące o potencjalnej użyteczności danego stanu do interferometrii atomowej. Dyskusję poszczególnych definicji Autor uzupełnia nie tylko matematycznym formalizmem pozwalającym na wyprowadzenie poszczególnych wzorów, ale przede wszystkim dość obszerną analizą i interpretacją fizyczną poszczególnych pojęć, co ilustruje jego dbałość w przygotowanie rozprawy doktorskiej. Część pierwsza rozprawy napisana jest w sposób bardzo jasny, a dobór omawianych pojęć jest dość obszerny. Niewątpliwie, ta część rozprawy będzie służyła obecnym i przyszłym pokoleniom studentów do nauki podstaw teorii metrologii kwantowej w kontekście zimnych gazów atomowych.

Oryginalne wyniki badań naukowych Autora omówione zostały w drugiej części rozprawy w trzech niezależnych rozdziałach, a dotyczą one (i) struktury stanów splątanych wygenerowanych dynamicznie w dwuskładnikowych kondensatach Bosego-Einsteina, (ii) maksymalnej możliwej czułości interferometrii Macha-Zehndera wykorzystującej dwupoziomowe atomy we wnęce optycznej, oraz (iii) zastosowanie czułości kwantowej informacji Fishera do wykrycia cech charakterystycznych dla klasycznego chaosu w kwantowym modelu Dickiego.

(i) Autor rozpoczyna od charakterystyki użyteczności do interferometrii Macha-Zehndera stanów splątanych wytworzonych dynamicznie z początkowego stanu koherentnego zgodnie z jednoosiowo skrętnym hamiltonianem. Miara użyteczności jest kwantowa informacja Fishera i stosując

podejście ścisłe, jak i metody przybliżone, Autor pokazuje intuicyjnie pochodzenie skalowania Heisenberga. Następnie, dowodzi, że do osiągnięcia skalowania Heisenberga wystarczająca jest estymacja z różnicy populacji, a uwzględnienie szumów związanych z detekcją uniemożliwia w praktyce wykorzystanie stanów splątanych do wzmocnienia precyzji powyżej poziomu szumu śrutowego.

(ii) W rozdziale piątym umieszczonym w drugiej części rozprawy, Autor pokazuje, że stany wytworzone przez kwantowy pomiar nieniszczący dla atomów we wnęce optycznej są wysoce przydatne do interferometrii Macha-Zehndera ze względu na wykazane skalowanie Heisenberga odpowiedniej kwantowej informacji Fishera. Pomiar liczby fotonów na wyjściu interferometru jest wystarczający do osiągnięcia precyzji zadanej przez kwantową informację Fishera w pewnych przypadkach. Autor pokazuje jak uwzględnienie szumów związanych z niedoskonałą detekcją fotonów, jak również stratą fotonów, obniża wartość precyzji.

(iii) Ostatni rozdział rozprawy zawierający opis uzyskanych przez Autora wyników wychodzi poza tematykę interferometrii atomowej i pokazuje zastosowanie metod kwantowej metrologii w celu wykrycia cech typowych dla chaosu w modelu Dickiego. Kwantowa informacja Fishera związana jest z odległością pomiędzy sąsiadującymi stanami kwantowymi i dlatego Autor używa jej wartości w celu wykrycia znaczącej zmiany odległości pomiędzy „trajektoriami” co, poprzez analogię z fizyką klasyczną, jest sygnaturą zachowania chaotycznego. Ta analogia jest dość luźna, jako że wzrost kwantowej informacji Fishera związany jest również ze wzrostem splątania pomiędzy atomami. Autor jest dość świadomy tej ułomności, i szczegółowo analizuje zmianę kwantowej informacji Fishera dla różnych parametrów. Pokazuje, że istnieje taki obszar parametrów, w którym układ ma pewne cechy chaotyczne a mianowicie, czas wzrostu kwantowej informacji Fishera zgodny jest ze skalowaniem czasu Ehrenfesta a funkcja Wignera posiada typowe drobne, wąskie struktury. Na tej podstawie Autor rozgranicza zachowanie chaotyczne od regularnego, zauważając jednocześnie, że przejście od skalowania typowego dla szumu śrutowego do skalowania Heisenberga jest gwałtowne w obszarze chaotycznym i dość płynne w obszarze regularnym.

Oryginalne wyniki badań naukowych przedstawione przez Autora pozwalają na zrozumienie własności rozważanych układów z punktu widzenia interferometrii atomowej, pokazując również użyteczność metod metrologii kwantowej do szerszych zastosowań np. badań zjawisk chaosu w kwantowych układach. Część druga rozprawy napisana jest bardzo jasno, choć dość zwięźle. Przedstawione zostały jedynie finalne wyniki, co w porównaniu ze szczegółowym opisem części pierwszej, może pozostawiać pewien niedosyt. Poniżej przedstawię kilka uwag dotyczących wyników badań Autora, które chciałabym przedyskutować podczas obrony pracy doktorskiej.

1. Szumy związane z niedoskonałą detekcją atomów są jedną z przyczyn ograniczającą wykorzystanie stanów splątanych do kwantowej metrologii. Ostatnio pojawiło się szereg prac wykorzystujących ideę nieliniowego echa w celu wyeliminowania negatywnego wpływu szumu (np. PRL 116, 053601 (2016)). Czy tego typu protokół bazujący na nieliniowej dynamice można zastosować w przypadku układów rozważanych w rozdziałach 4 i 5 ? Czy możliwa jest doświadczalna implementacja wspomnianego wyżej protokołu ?

2. W rozdziałach 4 i 5 Autor skupia się na interferometrze Macha-Zehndera, który efektywnie jest związany z obrotem stanu wokół osi y uogólnionej sfery Blocha. Czy wyznacza on maksymalną wartość informacji Fishera uwzględniając efektywne obroty stanu wokół innych osi sfery Blocha ? Jeśli nie, to jaka konfiguracja byłaby lepsza i jakiego wzrostu informacji Fishera można się wówczas spodziewać ?

3. W rozdziale 3.2 części pierwszej Autor pokazuje, że estymacja z wartości średnich nasycza nierówność Craméra-Rao o ile statystyka zadana jest rozkładem Gaussa. Czy badane przez Autora rozkłady w rozdziale 4 i 5 podlegają pod ten przypadek ?

4. Dwu-modowy model rozważany przez Autora może zostać wyprowadzony również w przybliżeniu pojedynczego modu opisującego przestrzenną funkcję falową atomów. Jaka jest rola przestrzennych stopni swobody, które zostały pominięte w opisie rozważanych układów ? Jak ich uwzględnienie wpłynie na wnioski wyciągnięte przez Autora ?

5. W rozdziale 6.1 Autor stwierdza, że czysty chaos w kwantowej rzeczywistości jest niemożliwy ze względu na to, że równanie Schrödingera jest liniowe w funkcji falowej. Jak to stwierdzenie ma się do nieliniowego równania Schrödingera, które zwykle opisuje dynamikę oddziałujących ultrazimnych gazów atomowych ?

6. Jaka jest rola przejścia fazowego modelu Dickiego w istnieniu przejścia do dynamiki chaotycznej obserwowanej na rysunku 6.6 dla $g\omega$ większego od 0.4 ? Na ile położenie punktu przejścia i końcowe wnioski wyciągnięte przez Autora zależą od energii stanu początkowego, co dzieje się gdy ta energia jest dużo większa od energii stanu podstawowego ?

Mimo powyższych uwag i pytań, jakie nasunęły się podczas lektury rozprawy, moja ocena pracy jest niezwykle pozytywna. Widać w niej szerokie spektrum zainteresowań Autora, jak również stosowanych narzędzi, od przybliżonych i ścisłych metod analitycznych poprzez metody numeryczne, zastosowane do trzech różnych układów fizycznych. Bibliografia jest bogata i pokazuje szerokie horyzonty Autora oraz dobrą orientację w literaturze. Widać też wysiłek Autora włożony w głębokie zrozumienie własności metrologicznych rozważanych układów. **Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że praca spełnia zwyczajowe i ustawowe wymagania stawiane pracom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie magistra Karola Gietkę do dalszych etapów przewodu doktorskiego.**

Emilia Wiśniewska