



Center for Theoretical Physics

Polish Academy of Sciences

Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warsaw

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

E-mail: cft@cft.edu.pl, NIP: 525-000-92-81, REGON: 000844815

Warszawa, 24 sierpnia 2021 r.

dr hab. Krzysztof Pawłowski, prof. CFT
pawlowski@cft.edu.pl
Al. Lotników 32/46
02-668 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Artura Niezgody o temacie "Many-body Correlations as a Resource for Quantum Metrology"

Rozprawa doktorska Pana mgr. Artura Niezgody dotyczy różnych form nieklasycznych korelacji i relacji między nimi. W szczególności badane są stany nielokalne, która w dziedzinie kwantowej informacji oznacza stany, których można użyć do złamania nierówności Bella. W tej sytuacji wyniki obserwacji są sprzeczne z mechaniką klasyczną, nawet rozszerzoną o zmienne ukryte. Wskazuje to na potrzebę użycia ogólniejszej teorii, takiej jak mechanika kwantowa. Drugą wielkością dyskutowaną przez większość rozprawy jest kwantowa informacja Fishera, która odgrywa kluczową rolę w dziedzinie kwantowej metrologii. Wielkość ta pozwala stwierdzić na ile można zredukować wpływy szumu kwantowego na niepewność estymacji, wynikającego z nierówności Heisenberga, a tym samym polepszyć precyzję pomiarów. Autor ilustruje ogólne rozważania na temat tych wielkości przykładami obliczonymi dla konkretnych układów fizycznych, takich jak kondensat Bosego-Einsteina oraz łańcuch spinów.

Napisana po angielsku rozprawa składa się ze 107 stron, podzielonych na 6 rozdziałów, zakończonych niezwykle obszerną literaturą obejmującą aż 245 pozycji. Pierwsze dwa rozdziały wprowadzają czytelnika w najważniejsze pojęcia dotyczące kwantowych korelacji oraz teorii estymacji. Kolejne rozdziały przedstawiają wielkości fizyczne i nierówności używane do klasyfikowania splątania.

Z dużymi oczekiwaniami przeczytałem rozdział dotyczący estymacji fazy w oparciu o obraz interferencyjny powstający podczas rozprężania dwumodowego kondensatu Bosego-Einsteina. Należy zauważyć, że takie pomiary są rutynowo wykonywane od ponad 20 lat. Niestety autor rozważa jedynie jednocząstkową macierz gęstości. Ta wielkość jest w mojej opinii niewystarczająca do użycia doświadczalnych danych na potrzeby dokładnych pomiarów. Zwykle dysponuje się serią zdjęć, z których każde przedstawia chmury punktów obrazujących położenia atomów tworzących kondensaty. Są to raczej pomiary wielocząstkowej funkcji korelacji. Obawiam się, że odzyskanie z takich danych jednocząstkowej macierzy gęstości może być źródłem niepewności w estymacji większych niż te, które są rozpatrywane w rozprawie. Większość tego rozdziału jest jednak poświęcona uogólnieniom nierówności Bella, opartej na średnich wartościach i fluktuacjach kolektywnych spinów. Te wielkości są mierzone przez wiele grup doświadczalnych, również w kontekście splątania i nierówności Bella.

Kolejny rozdział dotyczy informacji Fishera stanów, które mogą pojawić się w trakcie ewolucji kondensatu Bosego-Einsteina zapoczątkowanego w spinowym stanie koherentnym.

R

Autor przedstawia typowe podejście, polegające na analizie punktów stałych w uproszczonym opisie matematycznym układu, opierającym się na przybliżeniu polem średnim. Taka analiza wskazuje w jakim stanie spójnym należy przygotować układ. W rozprawie Autor przedstawił optymalne warunki, w których informacja Fishera osiąga skalowanie Heisenberga. Istotnym wynikiem jest wskazanie dynamiki, która prowadzi do stanów ściśniętych w bardzo krótkim czasie. Autor przedstawił również optymalne generatory obrotu. Podziwiam dużą biegłość autora w przybliżonym rozwiązywaniu równań różniczkowych wyprowadzonych w ramach przybliżenia BBGKY.

W rozdziale piątym autor proponuje funkcję korelacji, która jest uogólnieniem operatora parzystości, a następnie używa jej do wyprowadzania nowej nierówności Bella. Jest to ciekawy wynik teoretyczny. Korelacje wymagają zmierzenia zaledwie jednego elementu macierzy gęstości. Ponadto badana funkcja korelacji jest powiązana matematycznie z kryteriami na k -częstkowe splątanie układu. Po przedyskutowaniu własności tej funkcji, autor rozprawy zastosował ją dla stanów podstawowych szeregu znanych modeli fizycznych – modelu Isinga, modelu Isinga z oddziaływaniami „długozasięgowymi”, modelu Heisenberga oraz modelu Majumdera-Ghosha. Przy okazji autor rozprawy wykazał się znajomością ansatzu Bethego, użytego w pracy do znalezienia stanów własnych tzw. modelu XXZ.

Praca zwięczona jest ciekawym powiązaniem kwantowej informacji Fishera z nielokalnością. W środowisku naukowym panuje powszechne przekonanie, że stany kwantowe, które mogą najbardziej udoskonalić pomiary, są zapewne najbardziej splątane. Nierówność przedstawiona przez mgr. Artura Niezgodę wiąże zaproponowaną przez niego funkcję korelacji użytą w nierównościach Bella, z kwantową informacją Fishera. Ten wynik jest pięknie zilustrowany przykładami dla stanów podstawowych kondensatu Bosego-Einsteina w podwójnej studni potencjału oraz łańcucha spinów.

Podsumowując, rozprawa zawiera interesujące rozważania matematyczno-fizyczne dotyczące nielokalności i jej związków ze splątaniem i informacją Fishera. Część wyników ma szansę na realizację doświadczalną. W mojej ocenie dotyczy to przede wszystkim stanów kwantowych tworzony dynamicznie. Wyniki przedstawione w dwóch ostatnich rozdziałach są istotne teoretycznie. Za wadę pracy uważam niedostateczne przedyskutowanie parametrów doświadczalnych. W szczególności dyskutowana jest parzystość oraz jej uogólnienia. Tego typu wielkości mają małe praktyczne znaczenie z dwóch powodów. Jednym jest wspomniany w rozprawie problem detekcji wszystkich cząstek, co do jednej. Druga trudność polega na tym, że pojedynczy pomiar zwraca tylko bit informacji. Odtworzenie wartości średniej, np. na poziomie małych liczb rzędu 2^{-N} wymaga więc olbrzymiej liczby powtórzeń eksperymentu, co może okazać się niepraktyczne już w przypadku chmury gazu składającej się kilkudziesięciu atomów.

Uważam, że praca została napisana starannie. Dobór i przedstawienie materiału naukowego zostały wykonane w sposób logiczny, a wyjaśnienia były klarowne. Kierowany obowiązkami ciężącymi na recenzencie muszę jednak wskazać pewne błędy edytorskie. Niestety Autor nie ustrzegł się od literówek, również w równaniach. Dla przykładu, w równaniu (3.37) brakuje wyrażenia opisującego obwiednie gęstości. Stan przedstawiony w (3.27b) nie ma zerowych fluktuacji operatora J_z , chociaż rzeczywiście są one względnie małe.

h



Center for Theoretical Physics

Polish Academy of Sciences

Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warsaw

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

E-mail: cft@cft.edu.pl, NIP: 525-000-92-81, REGON: 000844815

Jak napisano wyżej rozumowania zostały przedstawione klarownie, chociaż jest kilka miejsc, w których wyjaśnienia mogłyby być bardziej precyzyjne. Poniżej równania (3.47) autor wspomina problem z granicą termodynamiczną w przypadku $\Lambda = -1$, ale nie jest jasne na czym polega problem, gdyż wyniki przedstawione w równaniach (3.46) oraz (3.47) są ciągłe w tym punkcie. Na stronie 58, antykomutator między optymalnym generatorem obrotu oraz operatorem parzystości nie został wyjaśniony. W równaniu (6.16) i kolejnych warto było umieścić indeks ξ , aby wskazać na niestandardowy kierunek spinów.

Sugeruję też poprawienie referencji [23], w której są literówki.

Autor rozprawy poprawnie posługuje się pojęciami dotyczącymi kwantowej metrologii oraz kwantowego splątania. Potrafi przedstawić te badania w szerszym kontekście. Umiejętnie stosuje pojęcia z dziedziny kwantowej informacji w badaniach nad ultrazimnymi atomami oraz łańcuchami spinów. Rozprawa wskazuje na szeroką wiedzę kandydata, jego umiejętność formułowania problemów badawczych oraz rozwiązywania ich dobrze dobranymi metodami.

Rozprawa przedstawia oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Jest nim wskazanie takiej funkcji korelacji, która jest użyta do badania nielokalności i głębokości splątania oraz powiązanie jej z informacją Fishera. Przy pewnych warunkach, pozwala to traktować nielokalność jako zasób do kwantowej metrologii.

Rozprawa spełnia wymagania ustawowe oraz warunki wskazane przez Senat Uniwersytetu Warszawskiego. **Rozprawę oceniam pozytywnie i wnioskuję o dopuszczenie mgr. Artura Niezgody do dalszych etapów procedury doktorskiej.**

Krzysztof Pawłowski