

Kraków, 10 września 2021

dr hab. Marek Rams
Uniwersytet Jagielloński
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
ul. prof. Stanisława Łojasiewicza 11
30-348 Kraków
marek.rams@uj.edu.pl



UNIwersytet
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Instytut Fizyki

Teoretycznej

Zakład Kwantowej

Teorii Wielu Ciał

ul. St. Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

Recenzja pracy doktorskiej pana magistra Artura Niezgody pt.

“Many-body Correlations as a Resource for Quantum Metrology”

Przedłożona rozprawa doktorska pana Artura Niezgody jest pracą teoretyczną, która łączy ze sobą fundamentalne pytania o nielokalny charakter korelacji w kwantowych układach wielu ciał z pytaniami z zakresu kwantowej metrologii, gdzie korelacje takie mogą stanowić podstawę do uzyskania niesamowitej czułości kwantowych sensorów.

Rozprawa bazuje na czterech artykułach, w tym trzech opublikowanych w *Physical Review A*, oraz jednym który niedawno ukazał się w prestiżowym *Physical Review Letters*. We wszystkich tych pracach pan Artur Niezgoda figuruje jako pierwszy autor, co tradycyjnie utożsamia się w kluczową rolę jaką odegrał w trakcie ich powstawania. Jest to szczególnie ewidentne w ostatniej z tych prac, która została napisana we współpracy z zaledwie jednym współautorem - promotorem doktoratu. Ponadto pan Artur Niezgoda jest też współautorem trzech innych artykułów naukowych, które pomimo że są zbliżone tematycznie, wykraczających jednak poza ściśle określoną tematykę rozprawy doktorskiej. Prace te zostały opublikowane w cenionych czasopismach: dwa w *Physical Review A*, a jeden w *New Journal of Physics*. Uważam, że jest to bardzo dobry dorobek na tym etapie kariery naukowej.

Rozprawa doktorska liczy około 100 stron i została napisana w języku angielskim. Dyskusja jest spójna i koherentna. Poza podsumowaniem oraz krótkim wstępem który pełni rolę przewodnika po rozprawie, składa się ona z sześciu rozdziałów. Pierwsze dwa stanowią wprowadzenie teoretyczne, przybliżając czytelnikowi odpowiednio splątanie kwantowe, jedną z jego najbardziej intrygujących własności jaką jest jego fundamentalnie nielokalny charakter i nierówności Bella które pozwalają taki charakter zaobserwować, oraz podstawowe narzędzia teorii metrologii kwantowej określające fundamentalne ograniczenia na precyzje pomiaru narzucane przez mechanikę kwantową i znaczenie splątania kwantowego dla możliwości ich osiągnięcia. Stanowią one dobre wprowadzenie do właściwych wyników które zostały przedstawione w następnych czterech rozdziałach opisujących rezultaty kolejnych publikacji będących podstawą rozprawy.

W trzecim rozdziale autor rozważa kondensat Bosego-Einsteina umieszczony w podwójnej studni potencjału. Argumentuje, że układ taki w idealnych warunkach i odpowiednim reżimie parametrów może przejawiać nielocalne korelacje oraz

dyskutuje sposób ich eksperymentalnej obserwacji poprzez analizę prążków interferencyjnych pojawiających się gdy kondensat zostanie wypuszczony ze studni. Co szczególnie istotne, dyskusja nie ogranicza się tylko do rozważenia idealnego (teoretycznego) przypadku, ale uwzględnia następnie wpływ różnych nieuniknionych niedoskonałości eksperymentalnych na możliwość faktycznego przeprowadzenia takich obserwacji.



UNIWERSYTET
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Instytut Fizyki

Teoretycznej

Zakład Kwantowej

Teorii Wielu Ciał

ul. St. Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków

Tematem kolejnego, blisko związanego rozdziału jest spinorowy kondensat Bosego-Einsteina i jego zastosowania w interferometrii atomowej jako sensora pozwalającego na ultraprecyzyjne pomiary. W ramach przybliżenia jednomodowego autor opisuje przestrzeń stanów koherentnych i ich dynamikę. Następnie charakteryzuję splątanie w takim układzie, wykorzystując podatność stanu na interferometryczne zaburzenie kwantyfikowaną przez tak zwaną kwantową informację Fishera. Wykazuje ona skalowanie w liczbie cząstek zgodne z tak zwanym skalowaniem Heisenberga które daje najlepszą precyzję dopuszczalną w takim schemacie w ramach mechaniki kwantowej. Co istotne, wskazuję proste generatory zaburzenia które pozwalają praktycznie wysycić teoretyczne optimum oraz wskazuje pomiary układu które są w stanie taki sygnał wychwycić. Co bardzo istotne, kolejny raz dyskusja kończy się analizą warunków eksperymentalnych które powinny być spełnione by taki pomiar wykonać, w tym przypadku dotyczących konieczności detekcji z rozdzielczością do pojedynczego atomu.

Rozdziały piąty i szósty skupiają się na splątaniu w układach łańcuchów spinowych, co jest tematem najbliższym moim osobistym zainteresowaniom. Rozdziały te pokazują, jak amplituda pojedynczych pozadiagonalnych elementów macierzy gęstości systemu może świadczyć o nielokalnym (w sensie nierówności Bella) charakterze splątania, a także certyfikować zasięg takich korelacji. Co więcej mogą one także świadczyć o potencjale metrologicznym stanu takiego układu, dając dolne ograniczenie na kwantową informację Fishera (odwrotnie proporcjonalną do możliwej do osiągnięcia precyzji) gdy zaburzenie które chcielibyśmy precyzyjnie zmierzyć jest sprzężone do powszechnie rozważanej klasy lokalnych generatorów. Wyniki te są bardzo ciekawe zarówno na poziomie fundamentalnym, w kontekście możliwości obserwacji nielokalnego charakteru mechaniki kwantowej, jak i w bardziej praktycznych rozważaniach dotyczących potencjału metrologicznego stanu kwantowego pewnej rodziny qubitów (myśląc tutaj o potencjalnym wykorzystaniu tych narzędzi w szerszym kontekście różnorodnych symulatorów kwantowych). Rozdziały te są zobrazowane przykładami dla stanów podstawowych kilku prototypowych i powszechnie rozważanych modeli spinowych. W tym przypadku, szczególnie dla kwantowego modelu Ising w polu poprzecznym który jest modelem dającym się rozwiązać analitycznie, żałuję odrobinę że przykład ograniczył się do rozważenia łańcucha składającego się z zaledwie sześciu spinów. Ciekawe i jak najbardziej naturalne wydaje mi się w tym kontekście pytanie jak rozważane wielkości skalują się z wielkością układu, a w szczególności co można powiedzieć o nielokalności lub nieseparowalności różnych punktów diagramu fazowego gdy układ będzie dążył do granicy termodynamicznej. W rozdziale szóstym zastanawia mnie także na ile spontaniczne łamanie symetrii zaburzy w praktyce pozornie łatwą możliwość uzyskania skalowania Heisenberga sugerowaną przez oba rozważane w tym rozdziale przykłady.

Pomimo tych drobnych uwag, nie mam wątpliwości że rozprawa nie stanowi

tylko prostego zebrania wyników publikacji, ale składa się on w spójną całość pokazującą drogę naukową doktoranta na przedziale ostatnich lat. W tym kontekście na szczególną uwagę moim zdaniem zasługują wyniki wiążące nielokalności korelacji z kwantową metrologią, zaś sam opis pokazuje bardzo dobre zrozumienie przez doktoranta złożoności tematu.

Podsumowując, uważam że przedłożona rozprawa doktorska pana Artura Niezgody spełnia wszystkie zwyczajowe i ustawowe wymogi oczekiwane od tego typu pracy. Tym samym wnioskuję o dopuszczenie go do dalszych etapów postępowania w procesie o nadanie stopnia naukowego doktora.

Z poważaniem,



dr hab. Marek Rams



UNIwersytet
JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Instytut Fizyki

Teoretycznej

Zakład Kwantowej

Teorii Wielu Ciał

ul. St. Łojasiewicza 11

PL 30-348 Kraków