

prof. dr hab. Adam Miranowicz
Wydział Fizyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
ul. Umultowska 85, 61-614 Poznań

oraz

Theoretical Quantum Physics Laboratory,
RIKEN Cluster for Pioneering Research,
Wako-shi, Saitama, Japonia

Wako-shi i Tokio, 22.02.2019

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana mgr. Karola Gietki

pt. „*Quantum Metrology with Atoms and Light*”

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska pt. „Quantum Metrology with Atoms and Light” została napisana przez Pana mgr. Karola Gietkę pod opieką promotora dr. hab. Jana Chwedeńczuka i promotora pomocniczego dr. Tomasza Wasaka w Katedrze Optyki Kwantowej i Fizyki Atomowej w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego.

Metrologia kwantowa jest intensywnie rozwijaną tematyką badawczą w dziedzinie technologii kwantowych drugiej generacji. Badania te są prowadzone w ramach np. flagowego projektu Unii Europejskiej. Główną ideą metrologii kwantowej jest wykorzystanie splątania kwantowego celem poprawienia precyzji pomiarów poza granicę klasyczną. Z kolei te ultraczułe techniki pomiarowe mogą być wykorzystane w badaniach wielu fundamentalnych aspektów teorii kwantowej. I właśnie takie zastosowanie metrologii kwantowej było ideą przewodnią niniejszej dysertacji. Z kolei głównym narzędziem matematycznym tych badań jest kwantowa informacja Fishera, która określa ostateczną granicę kwantowej precyzji oszacowania parametrów, czyli może być traktowana jako miara czułości interferometrów kwantowych.

Rozprawa jest napisana w języku angielskim, liczy 126 stron i składa się z 6 głównych rozdziałów podzielonych na dwie części. Część pierwsza, na którą składają się trzy rozdziały, jest interesującym i obszernym wprowadzeniem do metrologii kwantowej, teorii estymacji, optyki kwantowej oraz teorii ultrazimnych gazów kwantowych w sieciach optycznych. Część druga, również złożona z trzech rozdziałów, przedstawia najważniejsze wyniki Autora.

W dysertacji zacytowanych jest prawie 300 prac w tym 4 artykuły Doktoranta. Warto podkreślić, że w tych czterech artykułach, których wyniki zostały omówione w rozprawie, Kandydat był pierwszym autorem. Ponadto doktorant jest współautorem 5 innych artykułów, wśród nich pracy, opublikowanej w Nature Communications w roku 2014, która ma już około 100 cytowań wg Google Scholar.

Omówię teraz bardziej szczegółowo niektóre z najciekawszych wyników tej dysertacji.

Rozdział 4 pt. „Quantum-enhanced interferometry and the structure of twisted states” przedstawia szczegółowe wyprowadzenie i analizę wyników opublikowanych w artykule, który ukazał się pod tym samym tytułem w *Physical Review A* w 2015 roku. Kandydat zbadał wpływ dwóch istotnych typów błędów pomiarowych na ograniczenie stopnia poprawienia czułości interferometrii kwantowej w realnych układach doświadczalnych z wykorzystaniem stanów ściśniętych spinowo za pomocą metodą typu *one-axis twisting* (co można przetłumaczyć jako skręcanie jednoosiowe). Ta metoda generacji stanów ściśniętych została zaproponowana w roku 1993 przez Masahiro Kitagawę and Masahito Uedę. Błędy pomiarowe wynikają m.in. ze skończonej precyzji pomiaru stanów atomowych i z braku pełnej wiedzy o właściwym wyborze pewnego parametru α , który odpowiada takim czasom ewolucji, gdy stan atomowy jest ściśnięty spinowo. Warto podkreślić, że są to bardzo krótkie przedziały czasowe podczas jednego okresu ewolucji. Obliczenia Kandydata jednak pokazały, że ten ostatni rodzaj błędów, w porównaniu do nieprecyzyjnego pomiaru stanów atomowych, nie ma tak dużego wpływu na wartości kwantowej informacji Fishera. Moim zdaniem najciekawszym wynikiem tego rozdziału jest wyjaśnienie mechanizmu poprawienia czułości interferometrii kwantowej typu *one-axis twisting* w oparciu o analizę numeryczną kwantowej informacji Fishera. Okazało się, że kwantowe poprawienie czułości tej metody interferometrycznej jest możliwe dzięki szybkim zmianom fazy stanu ściśniętego. Po lekturze tego rozdziału nasuwa się mi pytanie, czy taki sam mechanizm jest w przypadku poprawiania czułości interferometrii kwantowej z wykorzystaniem stanów ściśniętych metodą skręcania dwuosiowego (ang. *two-axis twisting*).

W rozdziale 5 pt. „Quantum-enhanced interferometry with cavity qed-generated non-classical light”, Kandydat precyzyjnie opisuje wyniki swojego artykułu, który ukazał się pod tym samym tytułem w *European Physical Journal D* w 2017 roku. Warto podkreślić, że współautorem tej pracy jest prof. Helmut Ritsch, światowej klasy optyk atomowy z Uniwersytetu w Innsbrucku, którego prace były cytowane ok. 9 tys. razy. W tym rozdziale Kandydat opisał nowatorską metodę interferometrii kwantowej z wykorzystaniem interferometru Macha-Zehndera, do którego wprowadza się światło nieklasyczne uzyskane w wyniku oddziaływania atomu trójpoziomowego z polem wnęki rezonansowej, a następnie pomiaru warunkowego tego atomu w stanie splątanym ze światłem. Kandydat przeprowadził obliczenia numeryczne kwantowej informacji Fishera, które wykazały zdecydowanie wyższą rozdzielczość tego interferometru kwantowego w porównaniu do układów klasycznych.

Kwantowa informacja Fishera, będąca przydatnym narzędziem matematycznym metrologii kwantowej, może też znaleźć zastosowanie w badaniach chaosu kwantowego, co pokazał Kandydat w rozdziale 6 pt. „Multipartite-entanglement dynamics in regular-to-ergodic transition: A quantum-Fisher-information approach”. Główne wyniki tego rozdziału zostały przedstawione w artykule, który dosłownie wczoraj został opublikowany w *Physical Review B*. Inspiracją do tych badań była obserwacja, że klasyczne układy chaotyczne są bardzo czułe na warunki początkowe, co wydaje się może mieć związek z metrologią. Autor pokazał, że można określić charakterystyczne skale czasowe kwantowych układów chaotycznych i nawet badać przejścia między porządkiem a chaosem poprzez analizę dynamiki czasowej zoptymalizowanej kwantowej informacji Fishera. Wyniki te zostały potwierdzone analizą numeryczną współczynników Lapunowa. Autor pokazał, że kwantowa dynamika ergodyczna pozwala na efektywniejszą generację stanów splątanych, które są użyteczne metrologicznie. Uważam, że jest to ciekawe podejście do analizy dynamiki splątania w układach wielu ciał z perspektywy

metrologicznej i teorii chaosu.

Warto dodać, że wyniki czwartego artykułu Kandydata, opublikowanego pt. „Simple atom interferometer in a double-well potential” w *Physical Review A* w 2014 r., zostały włączone do pierwszej części dysertacji, jako fragment wprowadzenia do zagadnień interferometrii kwantowej.

Uważam, że dysertacja jest opracowana bardzo starannie, ale niejako z obowiązku recenzenta wymienię kilka drobnych nieścisłości. Na przykład, Autor w streszczeniu dysertacji wspomniał, że „Ta duża rodzina stanów typu *twisted* zawiera nawet najbardziej splątany stan znany jako kot Schrödingera.” Precyzyjniej należałoby napisać „dwumodowy kot Schrödingera” lub jeszcze lepiej „dwumodowy stan typu kota Schrödingera”. Inaczej ten termin jest mylący, gdyż stany typu kota Schrödingera mogą być splątane i niesplątane. W optyce kwantowej te stany definiuje się często jako jednomodowe (zatem niesplątane) superpozycje stanów koherentnych, np. taka definicja jest podana we „Wstępie do optyki kwantowej” autorstwa Christophera Gerry’ego i Petera Knighta. Kandydat napisał ponadto, że „The generalisation of the Jaynes-Cummings model to N atoms two-level atoms (equivalent to spin $N/2$) interacting with a single mode field is known as the Dicke model or the Tavis-Cummings model (...)”. Takie sformułowanie jest trochę niezręczne, gdyż Dicke wprowadził swój model już w roku 1954, a Jaynes i Cummings zaproponowali swój model dopiero w roku 1963. A co istotniejsze, warto by rozróżnić wielo-atomowe uogólnienia w przybliżeniu wirującej fali (ang. *rotating wave approximation*) i bez tego przybliżenia. Na przykład model Dickego jest uogólnieniem kwantowego modelu Rabiego z roku 1937, a nie modelu Jaynesa i Cummingsa. Dlatego, zamiast zacytowanego zdania, Kandydat mógłby precyzyjniej napisać np. że „The generalisation of the Jaynes-Cummings model to N atoms is known as the Tavis-Cummings model under the rotating-wave approximation. While the most popular generalisations of the Rabi model to N atoms are known as the Dicke and Hopfield models without applying the rotating-wave approximation.” Szkoda też, że Autor nie wspomniał o tym, że Hamiltonian, dany w rozprawie wzorem (5.5), charakteryzuje kwantowy model Rabiego. Jeśli chodzi o inne drobne nieścisłości zauważone przeze mnie w rozprawie, to wspomnę, że unormowanie stanów typu kota Schrödingera w równaniach (1.54), (1.55) i (1.56) powinno mieć czynnik $|\alpha|^2$, a nie α^2 . Stan Yurkego-Stolera w podpisie rysunku 1.10 na stronie 23 powinien mieć czynnik $1/\sqrt{2}$, a nie $1/2$. Dostrzegłem też pewne błędy w bibliografii.

Oczywiście w tak obszernym opracowaniu nie sposób ustrzec się drobnych błędów lub nieścisłości, więc one w żaden sposób nie deprecjonują wysokiej wartości merytorycznej tej rozprawy.

Chciałbym też wspomnieć, że Kandydat wygłosił seminarium wydziałowe w języku angielskim pt. „Quantum metrology beyond entanglement and measurement” na Wydziale Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu w listopadzie 2018 na zaproszenie piszącego te słowa. W tym seminarium Kandydat przedstawił najważniejsze wyniki tej dysertacji. To wystąpienie zostało bardzo dobrze przyjęte przez słuchaczy UAM, a prelegent rzeczowo i satysfakcjonująco odpowiedział na wszystkie pytania i wątpliwości słuchaczy.

Jestem trochę zaskoczony, że w dysertacji nie zostały omówione wyniki interesującej pracy Kandydata pt. „A supersolid-based gravimeter in a ring cavity”, której współautorami są Farokh Mivehvar i Helmut Ritsch. Artykuł ten został wysłany do *Physical Review Letters* i jego pierwsze recenzje są bardzo pozytywne, więc ta praca ma duże szanse się tam ukazać. Moim zdaniem są to najciekaw-

sze wyniki Kandydata i właśnie ta propozycja kwantowej metrologii z wykorzystaniem grawimetrów skonstruowanych w oparciu o materię ultraskondensowaną wzbudziła największe zainteresowanie słuchaczy seminarium Kandydata w Poznaniu. Praca ta została umieszczona w elektronicznej bazie preprintów arXiv.org (No. 1812.04001) 10 grudnia 2018, tj. tylko trzy dni po złożeniu niniejszej dysertacji w dziekanacie WF UW i tydzień po wysłaniu do tego archiwum innej pracy (tj. arXiv:1812.01013), której wyniki zostały szczegółowo omówione w rozdziale 6 dysertacji. Oczywiście, dysertacja ma duże walory merytoryczne nawet bez wspomnianej pracy o grawimetrach.

W podsumowaniu, uważam, że cele rozprawy doktorskiej zostały wyraźnie określone i konsekwentnie zrealizowane. Rozwiązany został interesujący i aktualny problem badawczy, a osiągnięte wyniki reprezentują światowy poziom naukowy.

Recenzowana rozprawa i wymienione publikacje jednoznacznie świadczą o tym, że Pan mgr Gietka jest dojrzałym naukowcem umiejącym posługiwać się zaawansowanymi metodami optyki atomowej i optyki kwantowej, teorii układów otwartych, informatyki kwantowej, fizyki statystycznej, teorii estymacji, czy też teorii chaosu. W szczególności, Kandydat przedstawił wyniki swoich obliczeń kwantowej informacji Fishera, wykładników Lapunowa i rozkładów kwaziprawdopodobieństwa (funkcji Wignera i Husimiego) w przestrzeni fazowej.

Przedstawiona praca doktorska jest dojrzałym i wielostronnym spojrzeniem na zagadnienia metrologii kwantowej w nieliniowych układach atomowych. Moim zdaniem jest to wartościowa i stojąca na wysokim poziomie naukowym praca badawcza wnosząca nowe interesujące wyniki.

Reasumując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska pt. „Quantum Metrology with Atoms and Light” spełnia, w mojej opinii, wszelkie wymogi stawiane Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 roku ze zmianami z dnia 21 kwietnia 2017 roku. Tym samym stwierdzam, że rozprawa ta stanowi oryginalne rozwiązanie przez jej Autora problemu naukowego z dziedziny metrologii kwantowej, a także świadczy o ogólnej wiedzy Kandydata w zakresie optyki atomowej, optyki kwantowej i informatyki kwantowej oraz świadczy o Jego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Dlatego też z przyjemnością wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. Karola Gietki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Adam Miranowicz