

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

Poznań, 26 maja 2015

**Recenzja pracy doktorskiej
Pana mgr. Tomasza Wasaka pt.
„Collisional properties and many body effects in ultracold systems.
Quantum interferometry”**

Przedstawiona dysertacja doktorska mgr. Tomasza Wasaka pt. „Collisional properties and many body effects in ultracold systems. Quantum interferometry” została przygotowana pod kierunkiem prof. dr. hab. Marka Trippenbacha i dr. Jana Chwedeńczuka na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego.

Szeroko rozumianym celem tej dysertacji było opracowanie interferometrycznych testów nieklasyczności ultrazimnych atomów. Rozprawa dotyczy kwantowej optyki fal materii (ang. quantum matter-wave optics), a konkretnie analizy własności zderzeń i korelacji ultrazimnych atomów w kontekście ultraczułej interferometrii kwantowej. Moim zdaniem jest to ważna i ciekawa tematyka z zakresu intensywnie rozwijanej inżynierii kwantowej.

W rozprawie doktorskiej Kandydat przedstawił wyniki swoich pięciu artykułów, a także nowe wyniki, które nie zostały dotychczas spisane w formie artykułów. Rozprawa liczy 169 stron i składa się z 8 rozdziałów oraz z kilku dodatków ze szczegółowymi wyprowadzeniami niektórych wyników.

Warto podkreślić, że inspiracją dla Kandydata do prowadzenia tych badań były fundamentalne eksperymenty przeprowadzone w latach 2010-2013, które zostały opisane w rozdziale 1 w kontekście zderzeń i korelacji zimnych atomów. Te doświadczenia, jak również wyniki teoretyczne Kandydata, mogą przyczynić się do opracowania nowej generacji interferometrów atomowych o czułości wykraczającej poza granicę klasyczną. Kandydat przeanalizował w dysertacji doświadczenia m.in. grupy Carstena Klempta w Hannoverze¹ i grupy Jörga Schmiedmayera w Wiedniu² nad generacją i interferencją bliźniaczych fal materii o czułości interferometrycznej wykraczającej poza szum śrutowy. Kandydat opisał też ciekawe eksperymenty grupy Alaina Aspecta i Christopha Westbrooka w Paryżu nad generacją splątania kwantowego³ i generacją statystyki subpoissonowskiej liczby masywnych bozonów⁴ w wyniku zderzeń kondensatów (tj. mieszania czterech fal materii).

¹B. Lücke i in., Science **334**, 773 (2011).

²R. Bücker i in., Nature Phys. **7**, 608 (2011).

³K. V. Kheruntsyan i in., Phys. Rev. Lett. **108**, 260401 (2012).

⁴J.-C. Jaskuła i in., Phys. Rev. Lett. **105**, 190402 (2010).

Rozdział 2 jest wprowadzeniem do analizy rozróżnialności stanów kwantowych. W szczególności Kandydat omówił szereg standardowych miar rozróżnialności stanów, m.in. kwantową i klasyczną informację Fishera, odległości Kolmogorowa i Hellingera, czy też dywergencję Kullbacka-Leiblera. Miary te Kandydat zastosował w kolejnych rozdziałach w zagadnieniach inżynierii kwantowej (np. w metrologii kwantowej) i informatyki kwantowej (np. w opisie korelacji kwantowych takich jak splątanie kwantowe, ściskanie spinowe, czy też ściskanie fluktuacji liczby bozonów). W tym rozdziale zdefiniowano też optymalne pomiary (wg określonej miary odległości), które gwarantują największą możliwą rozróżnialność stanów kwantowych.

Oszacowanie nieznaney fazy θ , z możliwie najmniejszą nieokreślonością $\Delta\theta$, jest jednym z głównych celów metrologii kwantowej. W rozdziale 3 wykorzystano powyższy formalizm matematyczny (w szczególności klasyczne i kwantowe informacje Fishera) celem określenia optymalnych pomiarów w estymacji fazy θ w kilku dwumodowych układach interferometrycznych. Mianowicie Kandydat przeanalizował przykłady jednego, dwóch i więcej kubitów w stanach o wysokiej symetrii, np. w stanach Wernera, czy zaszumionych stanach typu NOON. Warto podkreślić, że znalezienie optymalnego pomiaru w estymacji fazy w ogólnym przypadku jest problemem złożonym i trudnym. Rozdział 3 został opracowany na podstawie jeszcze nie opublikowanego przez Kandydata artykułu [7]⁵.

W rozdziale 4 pokazano, że łamanie nierówności Cauchy'ego-Schwarza może być efektywnym kryterium nieklasyczności i w szczególności kryterium splątania cząstek w kondensatach Bosego-Einsteina. Wyniki te Kandydat opublikował w artykule [5]⁶ w *Physical Review A*. Warto dodać, że nierówności Cauchy'ego-Schwarza są powszechnie stosowane w tradycyjnej optyce i teorii informacji jako kryteria nieklasyczności (np. w definicji antygrupowania fotonów i subpoissonowskiej statystyki liczby fotonów), jak również kryteria splątania kwantowego (mówi się wówczas o świadkach splątania pól optycznych). Jednak żadna ze znanych mi prac, przed lekturą publikacji Kandydata, nie dotyczyła zastosowania tych nierówności w opisie nieklasyczności i splątania bozonów masywnych.

W rozdziale 5 przeanalizowano zderzenia kondensatów Bosego-Einsteina pod kątem możliwości generacji splątanych par atomowych i redukcji szumów (tj. ściśnięcia) liczby cząstek w dwu- i wielomodowych układach. Wyniki te Kandydat opublikował w pracy [9]⁷ w *Physical Review A*. Ciekawym wynikiem tego rozdziału, potwierdzonym symulacjami numerycznymi, jest moim zdaniem pokazanie m.in., że rozmycie pędów chmur atomowych jest główną przeszkodą ograniczającą, lub wręcz uniemożliwiającą, uzyskanie dużej redukcji szumów wraz ze wzrostem gęstości rozproszonych par atomowych. A właśnie w tym obszarze dużych gęstości par splątanych oczekuje się zwykle, że interferometria kwantowa powinna być istotnie czulsza od interferometrii klasycznej.

W rozdziale 6, będącym ciekawym rozwinięciem wyników poprzedniego rozdziału, zastosowano teorię Bogoliubowa do opisu rozpraszania atomów z kondensatu Bosego-Einsteina w dwa obszary rozdzielone przestrzennie. Wyniki te Kandydat opublikował w artykule [6]⁸ w *New Journal of Physics*. Kandydat zademonstrował przydatność badanych układów w ultraczu-

⁵T. Wasak, J. Chwedeńczuk, L. Pezzé, A. Smerzi, arXiv:1310.2844 (2013).

⁶T. Wasak, P. Szańkowski, P. Ziń, M. Trippenbach, J. Chwedeńczuk, *Phys. Rev. A* **90**, 033616 (2014).

⁷P. Deuar, T. Wasak, P. Ziń, J. Chwedeńczuk, M. Trippenbach, *Phys. Rev. A* **88**, 013617 (2013).

⁸T. Wasak, P. Szańkowski, R. Bücker, J. Chwedeńczuk, M. Trippenbach, *New J. Phys.* **16**, 013041 (2014).

lej interferometrii kwantowej, w przeciwieństwie do pesymistycznych wniosków, które można wyciągnąć na podstawie analizy wyników w rozdziale 5. Warto też podkreślić, że teorię Bogoliubowa Kandydat skutecznie zastosował do pełniejszej analizy wyników wspomnianego eksperymentu grupy Jörga Schmiedmayera w Wiedniu z bliźniaczymi wiązkami atomowymi (ang. twin-atom beams), w których każdy atom z jednej wiązki jest skorelowany z atomem z innej wiązki.

W rozdziale 7 opisano interferometrię kwantową z wykorzystaniem niezależnie wytworzonych kondensatów Bosego-Einsteina o fluktuującej liczbie cząstek. Wyniki te Kandydat opublikował w artykule [1]⁹ w *Physical Review A*. Bardzo podobają się mi wyniki tego rozdziału, które można podsumować następująco: Nieklasyczne korelacje między bozonami są wyłącznie wynikiem ich nierozróżnialności. Zatem redukcja szumów w interferometrii kwantowej poniżej szumu śrutowego i tym samym możliwość wykonania ultraczułych pomiarów mogą być wyłącznie konsekwencjami nierozróżnialności bozonów. Te wyniki prowadzą też do wniosków praktycznych w kontekście np. kwantowych korelacji chmur atomów poprzez ich zderzenia. Kandydat pokazał konieczność precyzyjnej kontroli kształtu rozkładów atomów w każdej z tych chmur celem większej redukcji szumów kwantowych.

Myślę, że analiza problemów poruszanych w tej rozprawie może być źródłem inspiracji do poszukiwania nie tylko kryteriów (tzw. świadków), ale też warunków koniecznych i dostatecznych generacji splątania kwantowego i nieklasyczności masywnych bozonów w analogii do opisu splątania i nieklasyczności fotonów. Na przykład, łamanie nierówności Cauchy'ego-Schwarza, omawiane w dysertacji i powszechnie stosowane w tradycyjnej optyce kwantowej, jest bardzo szczególnym przypadkiem nieskończonej hierarchii kryteriów nieklasyczności i splątania, które można wyprowadzić jako wyznaczniki macierzy momentów uporządkowanych normalnie lub poddanych częściowej transpozycji. Warto też moim zdaniem zastanowić się nad precyzyjną definicją nieklasyczności bozonów masywnych w analogii do nieklasyczności fotonów zdefiniowanej poprzez ujemność funkcji P Glaubera-Sudarshana w przestrzeni fazowej. Jak wiadomo, liniowe elementy optyczne (takie jak płytki światłodzielące czy interferometry Macha-Zehndera) nie mogą zmienić światła klasycznego w nieklasyczne (w szczególności w światło splątane). Wyniki tej dysertacji mogą sugerować, że tak nie jest dla bozonów masywnych wg definicji nieklasyczności stosowanej w dysertacji. Wyjaśnienie tego paradoksu wymaga głębszej analizy porównawczej w oparciu o precyzyjną definicję nieklasyczności fal materii.

Kandydat jest współautorem aż 12 prac, w tym 7 artykułów opublikowanych w *Physical Review A* i po jednej pracy w czasopismach: *New Journal of Physics*, *Chaos* oraz *Europhysics Letters*. Ponadto dwa artykuły, które są dostępne w archiwum preprintów *arXiv.org*, nie zostały jeszcze opublikowane. Warto podkreślić, że mgr Wasak jest pierwszym autorem aż w 10 artykułach i drugim autorem w dwóch pozostałych.

Nie ulega wątpliwości, że prace Kandydata były co najmniej kilkanaście razy recenzowane i opublikowane w renomowanych czasopismach, co dobitnie świadczy o wartości i światowym poziomie tych wyników. W niniejszej recenzji mogę tę wysoką ocenę jedynie po raz kolejny jednoznacznie potwierdzić.

Moja ogólna ocena rozprawy doktorskiej Kandydata jest bardzo wysoka. Cele rozprawy

⁹T. Wasak, P. Szańkowski, J. Chwedeńczuk, *Phys. Rev. A* **91**, 043619 (2015).

zostały precyzyjnie sformułowane i konsekwentnie zrealizowane. Rozprawa jest starannie i rzetelnie napisana. Struktura pracy jest przemyślana i logiczna. Jestem też pod dużym wrażeniem wyników naukowych uzyskanych przez Doktoranta w tak krótkim czasie. Rozprawa podoba się mi zarówno pod względem formalnym i merytorycznym. Biorąc też pod uwagę jej walory edukacyjne uważam, że warto ją opublikować, a przynajmniej umieścić w ogólnodostępnym archiwum preprintów arXiv.org.

Recenzowana przeze mnie rozprawa i wymienione 12 artykułów jednoznacznie świadczą o tym, że Pan mgr Wasak jest dojrzałym i twórczym naukowcem umiejącym skutecznie posługiwać się zaawansowanymi metodami optyki kwantowej, optyki atomowej i informatyki kwantowej.

Reasumując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska pt. „Collisional properties and many body effects in ultracold systems. Quantum interferometry” spełnia z nadmiarem wszelkie wymogi stawiane Ustawą o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 roku. Tym samym stwierdzam, że rozprawa ta stanowi oryginalne rozwiązanie przez jej Autora problemu naukowego, a także wskazuje na Jego ogólną wiedzę teoretyczną w zakresie fizyki kwantowej oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Dlatego też z pełnym przekonaniem i przyjemnością wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. Tomasza Wasaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Chciałbym też zaproponować wyróżnienie tej rozprawy doktorskiej.

Poznań, dnia 26 maja 2015 r.

A. Muranowski
A. Muranowski