

Zielona Góra, 12 lipca 2023r.

Recenzja rozprawy doktorskiej
Non-Separability Indicators for Quantum Optical Fields Involving Intensity
Correlation Measurements
autorstwa mgr Bianki Wołoncewicz

Rozprawa doktorska Pani mgr Bianki Wołoncewicz została przygotowana pod kierunkiem promotora prof. dr. hab. Marka Żukowskiego i dotyczy zagadnień związanych ze splątaniem kwantowym w układach optycznych. W szczególności, Doktorantka skoncentrowała się na nieklasycznych korelacjach kwantowych stanów pola elektromagnetycznego gdy mamy do czynienia z nieustaloną ilością cząstek w układzie, analizowanych za pomocą homodynowych pomiarów intensywności z uwzględnieniem polaryzacji.

Przedstawiona, dysertacja składa się z czterech oryginalnych prac, których współautorką jest Doktorantka. Są to prace wieloautorskie, a listy autorów są przedstawione w porządku alfabetycznym. Ze złożonego przez Kandydatkę oświadczenia wynika, że wniosła ona znaczący, jeśli nie dominujący, wkład w przygotowanie wszystkich tych prac. Zostały one opublikowane w czasopismach o bardzo wysokiej randze, takich jak New Journal of Physics, Scientific Reports oraz Physical Review Research (jako Rapid Communication). Należy tu podkreślić, że pomimo krótkiego czasu życia tych prac, doczekały się one 11-u cytowań (wg bazy WoS na dzień 12 lipca br.). Świadczy to o jakości przedstawionych tam wyników oraz o zainteresowaniu nimi w środowisku naukowym zajmującym się problematyką splątania kwantowego. W tym miejscu chciałbym podkreślić, że wspomniana baza Web of Science wskazuje, że Kandydatka jest również współautorką innych czterech prac opublikowanych w wiodących czasopismach fizycznych. Całkowita liczba cytowań wszystkich prac Doktorantki wynosi 45, z czego 34 bez autocytowań. Świadczy to o wysokiej jakości badań prowadzonych przez Panią mgr Biankę Wołoncewicz.

Oprócz wspomnianych wyżej czterech artykułów stanowiących zasadniczą część dysertacji, Doktorantka złożyła również ponad trzydziestostronicowy przewodnik po tych pracach. Zawiera on informacje niezbędne do studiowania i zrozumienia wspomnianych artykułów. Oprócz streszczenia tematyki złożonych prac, przedstawia ona tam takie tematy jak rola korelacji kwantowych

w badaniach fizycznych, przykładowe obserwable używane do opisu kwantowych pól optycznych, definicję ściśniętej próżni. Następnie Kandydatka przedstawia skrótowo wyniki zaprezentowane w dysertacji. Na końcu, Pani mgr Bianka Wołoncewicz krótko omawia uzyskane przez nią rezultaty w kontekście innych jej badań i planów badawczych. Należy tu dodać, że do wstępu zostały dodane wykazy prac Kandydatki oraz liczący 69 pozycji spis literatury przedmiotu zawierający odwołania do znaczących prac związanych z tematyką będącą przedmiotem zainteresowań Doktorantki. Analizując wspomniany spis można stwierdzić, że tematyka złożonej dysertacji znakomicie lokuje się w głównym nurcie badań światowych w dziedzinach optyki i informatyki kwantowej.

Wracając do omówienia poszczególnych prac składających się na przedstawioną rozprawę, pierwsza z nich, *General mapping of multiqudit entanglement conditions to nonseparability indicators for quantum-optical fields*, stanowi podstawę całego cyklu artykułów. Opisania jest tam ogólna metoda tworzenia pewnej grupy wskaźników splątania kwantowego, który byłby możliwy do praktycznej realizacji w układach kwantowo-optycznych. Wskaźniki te są oparte na korelacjach związanych z intensywnością pól optycznych. Zaproponowana metoda pomiaru opiera się na odwzorowaniach pomiędzy wskaźnikami splątania i nierównościami Bella dla quditów oraz odpowiednimi wskaźnikami nieklasyczności pól optycznych. W praktyce, w zaproponowanej metodzie łączone są prawdopodobieństwa koincydencji pomiędzy detekcją cząstki w konkretnym końcowym kanale a relacjach pomiędzy lokalnie rejestrowanymi intensywnościami pola. Wykorzystano tu zastąpienie wartości średnich obserwabli Pauliego (lub korelacji pomiędzy nimi), średnimi (lub odpowiednio, korelacjami) dla standardowych unormowanych obserwabli Stokesa. Zaproponowane w pracy wskaźniki nieklasyczności są omawiane dla przypadku czteromodowej jasnej ściśnionej (wg nazewnictwa zaproponowanego przez poznańską szkołę optyki kwantowej) próżni oraz jej uogólnienia dla sytuacji gdy mamy do czynienia ze stanami o większej ilości modów optycznych. Co należy tu podkreślić, zaproponowana metoda wydaje się być możliwa do realizacji w układach eksperymentalnych.

Kolejna praca zatytuowana *Simplified quantum optical Stokes observables and Bell's theorem* również została poświęcona narzędziom służącym do wykrywania korelacji kwantowych w polach optycznych. Autorzy zaproponowali tam wielkości będące obserwabkami, które mogłyby zostać użyte w eksperymentach typu Bella. Są to tzw. uproszczone operatory Stokesa. Koncepcja zaproponowanej metody pomiaru opiera się na pomiarach i porównaniu intensywności wiązek o ortogonalnych polaryzacjach. W zależności od wyniku porównania, pomiarowi są przypisywane wielkości ± 1 lub 0 . W pracy są dyskutowane nierówności CSHS (również dla przypadków uwzględniających straty oraz szum), nierówności Bella oraz typu Mermin'a. Co podkreślono tam, zaproponowana metoda pomiaru korelacji działa lepiej niż inne oparte o znormalizowane operatory Stokesa. Wniosek ten został oparty na analizie sytuacji gdy mamy do czynienia z jasną ściśnioną próżnią oraz makroskopowego stanu GHZ. Stwierdzono tam też, że aczkolwiek omawiana

procedura może mieć zastosowanie w eksperymentach typu Bella, nie będzie użyteczna jako świadek splątania.

Pozostałe dwie prace wchodzące w skład dysertacji zostały poświęcone stwierdzeniom dotyczących nielokalności w odniesieniu do pojedynczego fotonu, które byłyby wykrywalne za pomocą pomiarów homodynowych. Analizowano tam dwa eksperymenty myślowe – eksperyment Tana, Wallsa i Colletta (TWC) oraz tzw. paradoks Hardy’ego. Do weryfikacji stwierdzeń zawartych w tych dwóch eksperymentach myślowych, zastosowano formalizm mapowania omawiany w pierwszej z prac dysertacji. Doktorantka podkreśla, że ze względu na fakt, iż te eksperymenty mogą zostać przeprowadzone w realnym laboratorium, rozważania z nimi związane mają znaczenie nie tylko dla rozwoju teorii, ale też zastosowań praktycznych. Jeśli idzie o te ostatnie, to należy wspomnieć na przykład o protokołach kryptografii kwantowej. Co ciekawe, w omawianej pracy pokazano, że aczkolwiek eksperyment Hardy’ego jest poprawny, to w przypadku doświadczenia TWC postawiona tam teza jest błędna. W ostatnim, czwartym artykule omówione zostały dwa eksperymenty. W jednym z nich mamy do czynienia ze wzbudzeniem poprzez pojedynczy foton pary modów przestrzennych, a w drugim, omawiane są dwa mody przestrzenne w stanie słabo ściśniętej próżni. Wykazano tam, że teza eksperymentu TWC jest błędna. Stosując zaproponowany w artykule model lokalnych zmiennych ukrytych, pokazano, że nie jest możliwe wykorzystanie modelu TWC w bezpiecznej kryptografii kwantowej. Co należy podkreślić, również i w tej pracy proponowane są modele teoretyczne, które mogą stać się podstawą realnych eksperymentów i praktycznych zastosowań kwantowo-informatycznych. Są to zmodyfikowane wersje omawianych wcześniej w pracy doświadczeniach TWC oraz Hardy’ego. Dla takich modeli pokazano, że łamanie nierówności Bella występuje dla określonych ustawień elementów oraz parametrów układu eksperymentalnego.

Po zapoznaniu się ze złożoną dysertacją oraz przewodnikiem do artykułów ją stanowiących, mogę z pełnym przekonaniem stwierdzić, że uzyskane oraz przedstawione przez Doktorantkę wyniki są oryginalne oraz bardzo ciekawe. Są one interesujące z różnych względów, gdyż mogą zainteresować nie tylko czytelników zajmujących się zagadnieniami fizycznymi z zakresu optyki kwantowej, ale też specjalistów z dziedziny informacji kwantowej oraz zajmujących się fundamentalnymi pytaniami mechaniki kwantowej. Właśnie to, oraz fakt nawiązywania teoretycznych rozważań zaprezentowanych w rozprawie do sytuacji eksperymentalnych, wskazuje na dużą wartość uzyskanych przez Kandydatkę rezultatów. Uzyskując, a co najważniejsze, dojrzałe interpretując zaprezentowane w swojej dysertacji wyniki, Pani mgr Bianka Wołoncewicz pokazała, że potrafi zastosować do rozwiązywania postawionych przed nią problemów odpowiedni aparat obliczeniowy. Wykazuje się ona znaczącą intuicją fizyczną i potrafi w swej pracy badawczej skutecznie wykorzystać różne koncepcje i modele fizyczne, co czyni z dużą biegłością i wyczuciem stosowanych metod.

Do obowiązków recenzenta należy też wspomnieć o niedociągnięciach znalezionych w dysertacji. Dotyczą one przede wszystkim usterek edytorskich znalezionych w przewodniku dołączonym do artykułów. Przede wszystkim miałbym zastrzeżenia do streszczenia napisanego w języku polskim. Widać tu, że doktorantka w swych publikacjach posługuje się biegle językiem angielskim wykazując jednak pewien brak doświadczenia w opisie omawianych przez nią zagadnień w języku polskim. W efekcie, wspomniane streszczenie jest mniej zrozumiałe oraz precyzyjne niż jego angielski odpowiednik. Uważam, że przygotowanie całego przewodnika w języku polskim znacząco podniosłoby walory dydaktyczne rozprawy oraz pozwoliłoby Kandydatce na uzyskanie większej biegłości w posługiwaniu się terminami polskimi. Jak już wcześniej wspomniałem, w przewodniku zdarzają się drobne błędy edytorskie i literówki. Przykładowo, na stronie 2, w trzecim akapicie Doktorantka pisze cyt. „Gdy oba detektory zarejestrują taką samą częstotliwość przypisywane jest 0”, podczas gdy w anglojęzycznym abstrakcie, jest mowa o takich samych intensywnościach. Oczywiście, wszystko to są drobne usterki, które w niczym nie umniejszają mojej wysokiej oceny dysertacji. Ze swojej strony chciałbym podczas obrony usłyszeć od Kandydatki opis jej dalszych planów badawczych związanych z przedstawioną w rozprawie tematyką, bardziej obszerny niż umieszczony w końcowej części przewodnika.

Podsumowując, mogę z przyjemnością stwierdzić, że recenzowana rozprawa autorstwa Pani mgr Blanki Wołoncewicz spełnia z nawiązką wszystkie ustawowe oraz zwyczajowe wymagania stawiane takim dysertacjom. Omawiane w rozprawie wyniki są oryginalne, interesujące oraz wartościowe z punktu widzenia przyszłych badań w zakresie optyki kwantowej, w szczególności związanych z projektowaniem i budową urządzeń wykorzystujących kwantową teorię informacji. Zostały one opublikowane w czasopiśmie o wysokiej randze i uznaniu oraz doczekały się już cytowań w literaturze światowej. W mojej opinii, pomimo teoretycznego charakteru prac, mogą one być inspiracją również dla eksperymentatorów. Sposób prezentacji i dyskusji uzyskanych przez Doktorantkę rezultatów jest jasny i czytelny, czyniąc ocenianą rozprawę pomocnym źródłem informacji pomocnych przy studiowaniu zagadnień pokrewnych z tymi, omawianymi w dysertacji. Biorąc to wszystko pod uwagę, wnioskuję o wyróżnienie złożonej przez Panią mgr Biankę Wołoncewicz rozprawy.

Na koniec, z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Wiesław Leoński