

Recenzja pracy doktorskiej mgr Michała Jachury

p.t. „Inżynieria modowa stanów światła dla wybranych technologii kwantowych”

Przedstawioną pracę doktorską oceniam jako bardzo dobrą.

Praca w głównej mierze dotyczy wykorzystania interferencji dwu-fotonowej typu Honga-Ou-Mandela w interferometrii kwantowej, kwantowej komunikacji oraz kwantowej metrologii. Zawiera zarówno opis nowego podejścia pomiarowego (kamera ze wzmacniaczem obrazu), opisy wykonanych doświadczeń i ich opis teoretyczny. Jest oparta na sześciu artykułach naukowych, w pięciu z których mgr Jachura jest pierwszym autorem. Prace te zostały opublikowane w bardzo dobrych czasopiśmie, każda w innym: Physical Review Letters, Nature Communications, Nature Photonics, Optics Letters, Optics Express i Journal of Modern Optics. To nie wyczerpuje pełnego dorobku Autora. Praca jest napisana w języku polskim. Stwierdzam, że jest to istotnie polski a nie „ponglis”, który jest obecnie standardem nie tylko w rozprawach naukowych. Wpływy języka angielskiego są bardzo małe. Bardzo cenię fakt, że Autor nie używa angielskiej transliteracji do zapisu nazwisk rosyjskich. Angielska transliteracja jest teraz prawie naukową pseudo-normą, a nie można przy jej pomocy zapisać rosyjskich nazwisk tak aby ich odczytanie było zbliżone do oryginału.

Poszczególne tezy pracy są następujące.

- Zademonstrowano, że niskoszumna kamera sCMOS wyposażona w zewnętrzny wzmacniacz obrazu umożliwia świetne obserwacje interferencji dwufotonowej typu Honga-Ou-Mandela. Pozwala ona rejestrować przestrzenny rozkład rejestrowanych fotonów, co jednocześnie pozwala je z reguły policzyć. Sądzę, że tego typu schemat pomiarowy na przed sobą wiele innych fascynujących zastosowań.
- Przedstawiono opis teoretyczny interferometrii dwufotonowej, uwzględniający odstępstwa od sytuacji idealnej. W ramach powyższego zaproponowano i przetestowano doświadczalnie metodę, pozwalającą na pomiar fazy o precyzji lepszej niż standardowa dla pełnego zakresu przesunięć fazowych w interferometrze „dwufotonowym”. Ciekawy jest tu przypadek fotonów częściowo rozróżnialnych pod względem widma (tj. częstotliwości). W takim przypadku pokazano, co wydaje się kontr-intuicyjne, że precyzję pomiaru fazy można poprawić poprzez wprowadzenie częściowej rozróżnialności przestrzennej fotonów. Wtedy zmiany fazy odzwierciedlane są także w zmianach przestrzennego rozkładu koincydencji.
- Teoretycznie i eksperymentalnie ukazano wpływ lokalnej fazy przestrzennych, poprzecznych do kierunku propagacji „funkcji falowych” fotonów na interferencję dwu-fotonową, przy dużej rozdzielczości przestrzennej w obszarze detekcji.
- Wykazano, że powyższe zjawisko pozwala na rekonstrukcję takiej „funkcji falowej” (uwzględniającej amplitudy jak i fazy), przy użyciu referencyjnych fotonów o znanej „funkcji falowej”.
- Wykazano, że interferencja Honga-Ou-Mandela jest doskonałym narzędziem pozwalającym na tzw. kwantową daktyloskopię. Jest to dość dziwna nazwa stosowana do porównywania zgodności dwóch ciągów bitów. Metody kwantowe pozwalają na redukcję tzw. złożoności komunikacyjnej

takiego zadania (czyli umożliwiają uzyskanie wysokiego prawdopodobieństwa uzyskania prawidłowej odpowiedzi przy mniejszym przekazie informacji niż w przypadku protokołów klasycznych). Pokazano, że kwantowo optyczna daktyloskopia może być sprowadzona do pomiaru widzialności dwufotonowej interferencji, dla światła wysyłanego przez obu uczestników protokołu. Wykorzystanie efektu Honga-Ou-Mandela czyni protokół niewrażliwym na niestabilność fazy. Analizowano też protokoły kwantowe innego typu, w tym protokół polegający na interferencji stanów koherentnych. Wykazano, stany $|NN\rangle$, dla $N>2$, prowadzą do pogorszenia jakości kwantowej daktyloskopii (w ramach przeanalizowanego schematu).

- Opracowano i przetestowano metodę pomiaru szybkozmiennej czasowej modulacji fazy przy użyciu interferometrii spektralnej. To ostatnie zagadnienie nieco odbiega od pozostałych, jako że jest to raczej zagadnienie z optyki klasycznej, co prawda z użyciem laserów i innych ultranowoczesnych technologii. Może jednak mieć zastosowanie przy strojeniu układów interferometrii kwantowej dla np. protokołu „daktyloskopii”.

Zbiór powyższych tez stanowi istotny i interesujący wkład do interferometrii kwantowej, o dużym potencjale zastosowań w dalszych badaniach Autora jak i całego środowiska interferometrii kwantowej. Z punktu widzenia wymagań stawianym pracom doktorskim jest ich spełnieniem i to z nadmiarem.

Moje uwagi krytyczne ograniczają się do opisu teoretycznego, który miejscami jest trochę szkicowy, nie dookreślony, co czasami utrudnia lekturę, Rozdział 2 zawiera opis „optyki kwantowej pojedynczych fotonów”. Tu np. operatory anihilacji fotonów $a(x)$ są niezdefiniowane. Symbol „ x ” ma oznaczać chyba położenie na „pasku pikseli z matrycy światłoczułej”. Jak wiadomo fotonowi nie można przypisać położenia. Mimo, że dalsze rachunki z użyciem tego symbolu dają poprawne wyniki, co więcej są zgodne z obserwacjami eksperymentalnymi Autora, mają one charakter manipulacji symbolami o niebyt ustalonym znaczeniu. Nie wiadomo jaka jest relacja tego symbolu z formułą (2.23). Nie wątpię że $a(x)$ można odpowiednio powiązać z (2.23), ale tego nie znajdziemy w pracy. A jest to najważniejszy trick teoretyczny tej dysertacji. Wiele pojęć, które muszą być znane studentowi trzeciego roku, ma precyzyjne wprowadzenia, startujące od fundamentu równań Maxwella, a tu mamy przeskok bez żadnego uzasadnienia. Oczywiście mógłbym to wszystko sobie wyprowadzić, lub gdzieś poszukać, ale uważam, że jeżeli zaczynamy od równań Maxwella, zapisanych explicite, to czytelnik powinien się spodziewać precyzyjnego wywodu prowadzącego do wszystkich najważniejszych technicznych wyrażań. Nota bene, w pustej przestrzeni omega to zawsze c razy długość wektora falowego, a operator pola elektrycznego jest zawsze wektorem, bo mamy zjawisko polaryzacji [to komentarz do formuły (2.22) i także (2.16)]. Nigdzie nie jest sygnalizowane pominięcie polaryzacji w opisie (co jest tym bardziej paradoksalne, gdy się zauważy, że Autor realizuje polaryzacyjną wersję interferencji Hong-Ou-Mandela). Ta niedookreśloność propaguje dalej i na przykład co oznacza „ x ” w punkcie 2.8 jest zupełnie niezdefiniowane. Opis generacji par fotonów w podrozdziale 2.9 jest zbyt szkicowy. Co więcej nie wiemy z jakiego typu konwersją mamy do czynienia. Opis nie pozwala na zrozumienie dlaczego fotony są skorelowane kierunkowo. Być może lepszym rozwiązaniem było by pominięcie tego szkicowego wyprowadzenia i po prostu opisanie jak wygląda stan pary fotonów pochodzących z parametrycznej konwersji. Nota bene, w dalszych rozdziałach Autor przyjmuje taką właśnie metodę dyskursu i nie podaje uzasadnień dla takich pojęć jak informacja Fishera czy informacja Chernoffa i wielu innych.

Nie podoba mi się traktowanie widzialności interferencyjnej jako wielości zespolonej, ale to kwestia gustu. Także pojęcie „modu widmowego” i „modu przestrzennego” jest dla mnie bardzo niebezpieczne. Cóż bowiem kreuje operator kreacji związany z modem widmowym? Raczej powinno się mówić konsekwentnie o widmowym i przestrzennym stopniu swobody modu.

Autor z reguły studzi entuzjazm czytelnika wobec przedstawionych wyników, co jest powtarzającym się, oryginalnym zabiegiem. Także w paru miejscach w pracy mamy zwroty typowe dla wniosku grantowego, a nie pracy naukowej (oceny rangi czasopism, w których opublikowano wyniki).

Powyższe uwagi krytyczne są raczej próbą zwrócenia uwagi doktorantowi na konieczność precyzyjnego wywodu, bez pomijania rzeczy które są dla Autora oczywiste, ale nie muszą być oczywiste dla czytelnika. Nie ważą one mocno w mojej ocenie wartości jego pracy doktorskiej, która jest bardzo wysoka. Wnioskuje o przejście do dalszych etapów procedury przewodu doktorskiego mgr Michała Jachury i rozważnie przez komisję po obronie, czy praca nie powinna być wyróżniona.



Marek Żukowski

Międzynarodowe Centrum Teorii Technologii Kwantowych, Uniwersytet Gdański, 30.09.2018.