

Dr hab. Piotr Kolenderski, prof. UMK
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
e-mail: kolenderski@umk.pl
tel. +48 510 459 791

prof. dr hab. Wojciech Satuła
Przewodniczący Rady Naukowej
Dyscypliny Nauki Fizyczne
Uniwersytet Warszawski

Recenzja pracy doktorskiej

pt. „Spatial characterization of single photons and entangled photon pairs”
napisanej przez pania Sanjuktę Kundu.

Praca składa się z pięciu rozdziałów, zaczynając od przystępnego wstępu, który ma na celu ułatwienie zrozumienia trzech kolejnych. Te trzy rozdziały skupiają się na opisie zadań badawczych, które zostały wcześniej streszczone w abstrakcie. Całość pracy oparta jest na wynikach badań opublikowanych w dwóch pracach, jednej czasopiśmie Quantum oraz drugiej w formie preprintu a także wyników jeszcze nieopublikowanych, nad którymi obecnie trwa praca.

Kolejne rozdziały doktoratu stanowią dobrze zarysowane odrębne całości w związku z czym postanowiłem niejako napisać recenzje każdego z nich. Praca jest napisana bardzo starannie.

Wprowadzenie do pracy doktorskiej stanowi solidny fundament dla zrozumienia przedstawionych zagadnień. Zarysowano istotne aspekty optyki nieliniowej w sposób klarowny i przystępny. To uproszczone podejście do tematu nie tylko ułatwia zrozumienie obszaru, który stanowi kluczowy element badawczy pracy, ale także świadczy o dojrzałości naukowej autorki i jej głębokim zrozumieniu zagadnień poruszanych w doktoracie..

Mam kilka uwag, które przedstawiam w postaci listy:

1. W równaniach 1.1 do 1.3 zacząłbym od wielkości wektorowych, co ułatwiłoby zrozumienie tej części dla osób na wczesnym etapie kariery naukowej, takich jak studenci czy młodzi doktoranci. Dla specjalisty jest to jednak bardzo ładny szkic.
2. Rysunek 1.2 – Tutaj brakuje informacji na temat sposobu pomiaru. Domyślałem się, że powstał na podstawie danych pomiarowych prezentowanych w rozdziale 3.



3. Interferometr ZWM można by lepiej wyjaśnić w 1.34 i 1.34, bo można wprowadzić mapowanie, a następnie będzie jasne, skąd pochodzi faza ϕ .
4. Co oznacza termin "quantum-inspired imaging"?
5. Czy "Timepix" to ogólny termin czy raczej "żargon"? Czym ta technologia różni się do detektorów SPAD ze zintegrowanym TDC?
6. Jaka jest definicja $|r\rangle$ w 1.32? Ta część opisu jest trochę myląca ponieważ w 1.33 $|r\rangle$ odnosi się do ścieżki, więc prawdopodobnie lepszy byłby k -wektor.

Rozdział 2 oparty jest na pracy Quantum 5 (sierpień 2021), s. 516., której współautorką jest pani Sanjka Kundu. Zgodnie z oświadczeniem, była ona współodpowiedzialna za zbudowanie układu doświadczalnego, przeprowadzenie pomiarów oraz ich analizę. Poniżej w kolejnych paragrafach przedstawiam moje uwagi.

W typowych sytuacjach, gdy istotne jest uzyskanie dokładnie jednego fotonu, należy zadbać o to, aby prawdopodobieństwo generacji par wielokrotnych było pomijalne. W przypadku dostępności detektora o rozdzielczości przestrzennej, przeprowadzenie eksperymentu w przypadku obwieszczania opartym na detektorze typu "bucket" powinno być możliwe. Nawiązuję tutaj do sekcji 2.2.1. Czy rozważane były tego typu schematy postępowania?

W pomiarze wykorzystywane są obwieszczane pojedyncze fotony. Na stronie 20, w ostatnim akapicie, pojawia się informacja o zawężeniu widma fotonu obwieszczanego do 3 nm w celu osiągnięcia wysokiej czystości spektralnej. Przypuszczam, że łączne widmo pary fotonów generowanych w źródle jest skorelowane, co sprawia, że foton obwieszczany byłby w innym przypadku w stanie zmieszanym w spektralnym stopniu swobody.

Na początku sekcji 2.2.2 pada stwierdzenie, że apertura spełnia rolę filtra przestrzennego usuwającego częstotliwości przestrzenne wyższych rzędów. W rezultacie otrzymuje się mod przestrzenny, który jest w swojej centralnej części podobny do gaussa. Zastanawiam się, jak dobre jest to przybliżenie w praktyce i na ile można pominąć „prążki Airy’ego”.

W tej samej sekcji, w kolejnym paragrafie, znajduje się zwięzła informacja na temat optymalizacji położenia apertury w przypadku modu z fazą spiralną. Żałuję, że we wprowadzeniu nie ma krótkiego wstępu teoretycznego na ten temat. Pomogłoby to w lepszym zrozumieniu tej kwestii. Podrozdział poniżej też nie ułatwia zrozumienia. Z punktu widzenia eksperymentatora rozumiem, że trzeba zoptymalizować intensywność, ponieważ w przeciwnym razie eksperyment trwałby wieki. Jednak istota zmian wprowadzanych w układzie jest dla mnie niejasna. Być może to jest oczywiste.

W sekcji 2.2.3 znajduje się opis działania kamery wykorzystywanej w eksperymencie. Nasuwa się pytanie o powód niestabilnego jej działania w sytuacji dwóch zbliżonych w czasie wyzwań? Z drugiej strony, czy nie wystarczyłoby, aby impuls wyzwalający trwał 3 μ s?



Takiej informacji nie znalazłem również w rozdziale opisującym w drobiazgowy sposób działanie tego urządzenia.

Przyznaje, subiektywnie, że wyniki eksperymentu są imponujące. Udało się odtworzyć fazę modu przestrzennego z bardzo dobrą dokładnością, mierzoną niskimi odchyleniami standardowymi. Zastanawiam się czy dostępna była informacja czasowo-przestrzenna dla kolejnych detekcji obwieszczanych fotonów? Na podstawie statystyki takich detekcji został wygenerowany histogram z którego odzyskana została faza. Zastanawia mnie, czy doktorantka rozważała podejście bayesowskie do tego zagadnienia? Czy wiadomo, ile fotonów trzeba zmierzyć, aby odtworzyć fazę z zadaniem błędem (ustalonym np. odchyleniem standardowym w "centrum" modu)?

Na samym końcu części podsumowującej pada zdanie, że „metoda nie wymaga detekcji koincydencji”. Rozumiem, że stwierdzenie to odnosi się do koincydencji mierzonych na detektorze macierzowym, ponieważ w rzeczywistości kluczowe jest tutaj obwieszczanie za pomocą detekcji drugiego fotonu.

Uwagi drobne:

1. Na koncu sekcji 2.2.2 „*mm*” powinno być proste.
2. Grupa wykresów 2.6 posiada pewną usterkę. Na pierwszy rzut oka widoczne jest jedynie czarne tło. Jednak w wersji elektronicznej możliwe jest zaznaczenie tego obrazka, co powoduje pojawienie się na nim krótkich opisów oraz oznaczeń alfanumerycznych dla poszczególnych wykresów. Sugeruję dołączenie erraty.

Rozdział 3 oparty jest na pracy zatytułowanej „High-dimensional quantum correlation measurements with an adaptively gated hybrid single-photon camera”, która jest dostępna w formie preprintu. Znajduje się w niej bardzo szczegółowy opis detektora pojedynczych fotonów, obejmujący zarówno rozdzielczość przestrzenną, jak i czasową. Doceniam precyzyjny opis funkcji tego urządzenia. Podczas lektury nasunęły mi się dwa pytania:

1. Jak precyzja wyznaczania położenia zależy od liczby fotonów zarejestrowanych na kamerze CCD?
2. Pomiar intensywności w HIC jest przeprowadzany z użyciem oscyloskopu, gdzie zasadniczo określa się czas trwania „błysku”. Czy pasmo oscyloskopu, w tym przypadku 1 GHz, wpływa na rozdzielczość czasową?

W rozdziale 4 pani Sanjukta Kundu przedstawia metody obrazowania oparte na wykorzystaniu fotonu, który „nie został zmierzony”. Ta koncepcja jest dosyć dobrze znana i opisana w literaturze a tutaj została zastosowana w celu charakteryzacji modów przestrzennych generowanych w procesie SPDC. W szczególności skupia się na analizie korelacji modów orbitalnego momentu pędu.





W tym rozdziale można znaleźć dosyć szczegółową analizę układu pomiarowego, wraz z informacjami, które mogą być przydatne w praktyce do uruchomienia podobnego układu. Niestety, nieczęsto w pracach doktorskich spotyka się opis warsztatu doświadczalnego, dlatego doceniam to, że doktorantka to zrobiła.

Mam jedynie uwagę dotyczącą prezentacji. Sekcje 4.1.1-4.1.3 stanowią de facto rozszerzenie, jeśli nie powtórzenie, tego, co doktorantka przedstawiała we wstępie w sekcjach 1.4.3.2 i 1.4.3.3.

Podsumowując, stwierdzam że praca stanowi istotny wkład w dziedzinę eksperymentalnej optyki kwantowej oraz prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną i doświadczalną kandydatki. Dlatego też stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia wszystkie formalne i zwyczajowe wymagania dotyczące tego typu prac naukowych. W związku z tym wnioskuję o dopuszczenie Pani Sanjukty Kundu do kolejnych etapów procesu przewodu doktorskiego.

