



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

Kraków, 4 stycznia 2024

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani Sanjukty Kundu zatytułowanej „Spatial characterization of single photons and entangled photon pairs”

Tematem rozprawy doktorskiej Pani Sanjukty Kundu zatytułowanej „Spatial characterization of single photons and entangled photon pairs” są eksperymentalne badania właściwości fotonów emitowanych w procesie fluorescencji parametrycznej (ang. *Spontaneous Parametric Down Conversion – SPDC*). W procesie tym powstają pary fotonów o skorelowanych parametrach (korelacja przestrzennych oraz polaryzacyjnych stopni swobody). Ponieważ zjawisko splątania kwantowego jest jednym z podstawowych zjawisk rozróżniających świat klasyczny od świata kwantowego (zjawisko to nie ma odpowiednika w makroskali), praca, badająca same podstawy mechaniki kwantowej, podejmuje zagadnienie ważne i ciekawe.

Struktura pracy doktorskiej Pani Kundu jest przejrzysta. Po rozdziale I, w którym wprowadzone zostają podstawowe pojęcia teoretyczne oraz omówione są pokrótce techniki wykorzystywane w pracy, następują trzy rozdziały stanowiące opis prowadzonych w ramach pracy badań. Z punktu widzenia czytelnika rozdziały te stanowią kolejne etapy realizacji pracy doktorskiej przez Mgr Kundu, poczynwszy od badań najprostszych polegających na charakterystyce właściwości pojedynczych fotonów, przez badanie korelacji w przestrzennych stopniach swobody fotonów emitowanych w procesie SPDC, a skończywszy na badaniu interferencji dwóch fotonów oraz obrazowaniu kwantowym przy pomocy niewykrywanego fotonu (ang. *quantum imaging with undetected photons – QIUP*). O ile sama treść merytoryczna rozdziałów nie budzi moich większych zastrzeżeń (konkretne uwagi dyskutuję w dalszej części recenzji), o tyle za pewną wadę pracy uznaję szereg powtórzeń pojawiających się kilkakrotnie. Dotyczą one m.in. dyskusji zjawiska Zou-Wang-Mandela (rozdział I i IV) czy zasady działania kamer ze wzmacniaczem obrazu (rozdział I i III). Wydaje mi się, że swobodnie Autorka mogła odesłać czytelnika do części znajdujących się wcześniej, a nie powtarzać zaprezentowane już wcześniej informacje. Zwłaszcza, że praca jest stosunkowo krótka.

Przechodząc do bardziej szczegółowej recenzji pracy należy zauważyć, że rozdział I stanowi krótkie kompendium wiedzy dotyczącej zarówno teoretycznych, jak i doświadczalnych i technologicznych podstaw prowadzonych przez Doktorantkę eksperymentów i wykorzystywanej przez nią aparatury. W rozdziale tym znajdziemy m.in. informację o zjawisku SPDC, interferometrii pojedynczych fotonów, w tym jej nieliniowego wariantu, czy technologiach wykorzystywanych do obrazowania pojedynczych fotonów. Jedyne pytanie, które nasunęło mi się podczas czytania tej części dotyczy dyskusji prowadzonej w części 1.4.3.2. Tuż nad równaniem (1.35) można przeczytać zdanie „If a phase shift of ϕ is introduced to path d , the state is modified to

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|a, d\rangle + e^{i\phi}|c, d\rangle) = \frac{1}{\sqrt{2}}(|a\rangle + e^{i\phi}|c\rangle)|d\rangle.$$



UNIwersytet JAGIELLOŃSKI
W KRAKOWIE

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

To czego nie rozumiem to fakt dlaczego opóźnienie fazowe pojawia się tylko w drugim wyrażeniu. **Czy nie jest tak, że foton w ramieniu d podlega opóźnieniu fazowemu to dodatkowa faza nie powinien się pojawić w obu wyrażeniach?** Bardzo bym prosił Doktorantkę o wyjaśnienie tej sprawy.

Rozdział II to już pierwsze badania, które przeprowadzone zostały przez Doktorantkę. Punktem wyjścia do badań prowadzonych w ramach tego i kolejnych rozdziałów jest układ eksperymentalny do generowania splątanych par fotonów. Fotony te wytwarzane są w zjawisku SPDC w kryształach pp-KTP (periodycznie modulowany potasowy tytanian fosforanu) lub BBO (boran baru) pobudzanych światłem o długości fali 405 nm. W doświadczeniach opisanych w ramach rozdziału II, jeden z fotonów światła wykorzystywany był do obwieszczenia, które wyzwalało pomiar parametrów drugiego fotonu z pary. Równocześnie drugi z fotonów wpuszczany był do interferometru Macha-Zehndera, gdzie podlegał interferencji. W celu uzyskania informacji o modzie przestrzennym fotonu, w jednym z ramion umieszczana była pinhola, której zadaniem było „oczyszczenie” fazy fotonu, tak by posiadał on płaski front falowy i w ten sposób stanowił dobrą referencję do pomiarów interferometrycznych. Przedstawione na końcu rozdziału wyniki dość elegancko pokazują zarówno rekonstrukcję fazy przestrzennej fotonu w przypadku gdy została na niego naniesiona jedno- i dwuwymiarowa kwadratowa maska fazowa, jak również wtedy gdy foton posiadał orbitalny moment pędu.

W kolejnym rozdziale opisany jest układ kamery hybrydowej ze wzmacniaczem obrazu. Oferuje on zarówno dobrą rozdzielczość przestrzenną, jak i czasową pomiarów, podczas gdy tradycyjnie stosowane rozwiązania (kamery CCD lub CMOS oraz macierze diod lawinowych) spełniają tylko jedną z tych cech. Podstawą tego rozwiązania jest wykorzystanie wzmacniacza obrazu oraz korelowanie odczytu przy pomocy kamery CCD z odczytem tego samego (wzmocnionego) sygnału przy pomocy fotopowielacza. Szybkie przetwarzanie sygnału z fotopowielacza przy pomocy układu FPGA pozwala znacząco zmniejszyć liczbę rejestracji pustych klatek, co, przy chęci wykrywania korelacji pojedynczych par fotonów, stanowi jedno z podstawowych ograniczeń szybkości prowadzenia pomiarów. Korzystając ze skonstruowanego układu kamery Doktorantka zademonstrowała istnienie antykorelacji składowych prostopadłych pędu fotonów powstałych w procesie SPDC. Antykorelacje te dowodzą, że rejestrowane fotony są rzeczywiście fotonami splątanymi w przestrzennych stopniach swobody. Analizując przedstawione wyniki nasunęły mi się dwa pytania. Pierwsze dotyczy słabych zależności pojawiających się na przekątnych w wynikach przedstawionych na Rys. 3.9(a) i (b). Doktorantka wydaje się nie zauważać tych zależności (przynajmniej ich nie dyskutuje), ale nie umknęły one uwadze skrupulatnego recenzenta. Dlatego też bardzo proszę o **przedyskutowanie faktu istnienia takich korelacji w pędach**. Drugie pytanie dotyczy usuwania szumu z rejestrowanych sygnałów. Zgodnie z informacją zawartą w pracy, szum pomiarowy usunięty został przez odjęcie korelacji przypadkowych, które określone zostały w oparciu o sygnały z kolejnych klatek. Co do tego czy takie odjęcie tła jest statystycznie poprawne mam pewne wątpliwości. Dlatego bardzo bym prosił Doktorantkę o **dokładniejsze wyjaśnienie statystycznych podstaw odejmowania szumów, a w przypadku gdybym czegoś nie zrozumiał, o wyprowadzenie mnie z błędu**.

Przy lekturze tego rozdziału nasunęło mi się jeszcze jedno, dużo bardziej podstawowe pytanie. W 2019 roku recenzowałem pracę Pana Dr. Michała Dąbrowskiego, której promotorem był Pan Dr hab. Wojciech Wasilewski, prof. UW. Choć sama praca poświęcona była pamięci kwantowej, to narzędziem wykorzystywanym do pomiarów była kamera hybrydowa ze wzmacniaczem obrazu (z tego co pamiętam sama kamera opracowana została przez kogoś innego). Dlatego bardzo bym prosił Doktorantkę o **klarowne**



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

przedstawienie czym skonstruowany i wykorzystywany przez nią układ różnił się od tego, który został przygotowany w grupie Prof. Wasilewskiego.

W moim odczuciu ostatni Rozdział pracy niesie ze sobą największy ładunek naukowy. Rozdział ten opisuje wykorzystanie metody QIUP do obrazowania. Do tego celu wykorzystywane są fotony powstałe w eksperymencie Zou-Wang-Mandela lub w innym eksperymencie gdzie powstają tzw. fotony sfrustrowane (mam duży dystans do tej nazwy). W oparciu o skonstruowany układ Doktorantka zademonstrowała możliwość obrazowania przy pomocy niewykrywanego fotonu. W zaprezentowanych wynikach bardzo wyraźnie widać, że zaburzenie toru wiązki jednego ze splątanych fotonów ma istotny wpływ na obraz interferencyjny powstały przy użyciu drugiego fotonu z pary splątanej. Lektura tego rozdziału nasunęła mi parę pytań, które chciałbym zadać Doktorantce: **jaki był czas pomiaru/eksponycji który pozwolił na uzyskanie wyników przedstawionych na Rys. 4.7?** oraz **dłaczego ekran został umieszczony w płaszczyźnie ogniskowej** podczas gdy wydawało by mi się, że wcale tak nie musi być, a nawet wyniki zdają się temu przeczyć? **Mam też zastrzeżenia co do rachunku macierzowego ABCD zaprezentowanego** w tym rozdziale. W moim odczuciu po pierwsze kolejność mnożenia macierzy jest odwrotna (mnożenie macierzowe nie jest przemienne). Oczywiście można założyć, że fotony poruszają się najpierw w ujemną stronę osi, ale wtedy postać trzeciej macierzy od końca chyba również nie jest poprawna. Po drugie nie bardzo rozumiem postać ostatniej macierzy, a w szczególności znak minus członów na diagonalu. Moim zdaniem znak minus powinien znajdować się tylko przy członie macierzy odpowiadającym przemieszczeniu. Oczywiście rozważania te, nawet jeśli błędne, a o skomentowanie tego poproszę Doktorantkę, nie mają zasadniczego wpływu na merytoryczną część tego rozdziału czy jego konkluzję.

Na koniec chciałbym zwrócić uwagę na stronę edytorską pracy, gdyż pod tym względem praca nie jest wolna od wad. Ponieważ uważam, że można je stosunkowo łatwo naprawić przytoczę listę tych, które rzuciły mi się w oczy:

- **Niespójność pisowni „down conversion” – na przestrzeni pracy zwrot ten pisany jest razem, osobno i z myślnikiem,**
- **Odnośniki do równań – czasem numer równania podawany jest w nawiasie, a czasem bez,**
- **Niekonsekwentny zapis jednostek – czasem kursywą, czasem fontem normalnym, czasem są one przyklejone do wartości, a czasem pisane są ze spacją (powinno być ze spacją pisane fontem normalnym),**
- **Brak rysunku 2.3 w pracy – w miejscu rysunku pojawiły się jakieś kreski,**
- **Brak podpisu dróg fotonów na rysunku 1.5 – można się ich ostatecznie domyślić, ale po co niepotrzebnie eksploatować recenzenta.**
- **Na stronie 60 powinno być phase zamiast phse**

Z uwag pozostających już kwestią gustu chciałem nadmienić, że **czerwony kolor tekstu Spisu treści jest zaskakujący** (choć sam lubię czerwony to podobno jest to kolor generujący agresję). Chciałem się również pożalić, że sama praca przyszła do mnie w dwóch częściach – osobno okładka, a osobno kartki. Być może Doktorantka zdecyduje się nanieść zarówno moje poprawki, jak i poprawki innych recenzentów. Wtedy, o ile to możliwe, prosiłbym o nową, oprawioną wersję pracy, które dumnie umieszczę na mojej półce, gdzie znajdują się zarówno moje prace doktorskie, jak i prace przeze mnie recenzowane.



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny

Zakład Fotoniki

Instytut Fizyki

Uniwersytet Jagielloński

Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków

Tel: +48 12 663 4691

E-mail: pustelny@uj.edu.pl

Podsumowując. Moim zdaniem przedstawiony materiał jest ciekawy, wewnętrznie spójny i wnosi do rozwoju dziedziny. W tym kontekście uważam, że spełnia on wszystkie ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane przed pracami doktorskimi i wnoszę do dopuszczenia Pani Sanjukty Kundu do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

prof. dr hab. Szymon Pustelny