

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

dr hab. Marek Józefowicz, prof. UG
Przewodniczący Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne
Uniwersytet Gdański

Recenzja pracy doktorskiej

pt. "Non-Separability Indicators for Quantum Optical Fields Involving Intensity Correlation Measurements" napisanej przez Panią Magister Biankę Woloncewicz.

Praca doktorska pani magister Bianki Woloncewicz, napisana w języku nowożytnej Nauki, czyli po angielsku, opiera się na czterech artykułach opublikowanych w renomowanych czasopismach naukowych z listy filadelfijskiej. Doktorantka jest współautorką tych prac, a z załączonych oświadczeń współautorów wynika istotny wkład pani Woloncewicz w realizację badań i uzyskanie wyników tam raportowanych.

Struktura pracy jest zgodna ze schematem tzw. „spinki”, gdzie przedstawione publikacje poprzedzone są obszernym komentarzem wprowadzającym. Głównym celem tego komentarza jest przygotowanie czytelnika, zwłaszcza osoby rozpoczynającej swoją przygodę z doktoratem w danej dziedzinie, do lektury i pełnego zrozumienia omawianych artykułów. Do tego czy to udało się pani Biancie odnieść się w dalszej części mojej recenzji.

Zacznę jednak od komentarza na temat struktury pracy doktorskiej, którą uważam za poprawną i logicznie spójną. Po podziękowaniach oraz dwóch wersjach abstraktu, w języku polskim i angielskim, pojawia się... rozdział pierwszy. Na początku miałem wrażenie, że spis treści znajdę na końcu pracy, jednak tak się nie stało. Szczerze przyznam, że jego brak mnie zaskoczył, aż do tego stopnia, że postanowiłem wyrazić tę uwagę. Chociaż na początku lektury nie sprawiło to większych trudności, nie mogę ukryć, że spis treści byłby przydatny nie tylko dla recenzenta, lecz także dla osób, które pragną zgłębić tematykę zajmującą panią Biankę Woloncewicz.

W pracy doktorskiej pani Bianki Woloncewicz można wyodrębnić dwa tematy – oba sięgające zarówno fundamentów teorii kwantowej jak i mające duży potencjał aplikacyjny. Są to nierówności, test Bella oraz zagadnienie prawidłowego opisu czy może raczej rozumienia czym jest pojedynczy foton. Jednym z głównych elementów pracy jest stan ściśnięty. Stan taki można generować z



wykorzystaniem zjawiska parametrycznego dzielenia częstotliwości w kryształach nieliniowych oświetlonych wiązką laserową. Typowo rozważa się dwa skrajne scenariusze. W pierwszym intensywność pompy jest na tyle duża, aby dwie generowane wiązki miały duże natężenie. To odpowiada sytuacji w której wiele fotonów z impulsu pompującego generuje pary. Tak można przygotowywać jasne stany ściśnięte o których mowa w doktoracie. Na takim zjawisku opiera się zasada działania optycznych oscylatorów parametrycznych (ang. optical parametric oscillator), które są użytecznym narzędziem laboratoryjnym. W drugim przypadku dobiera się moc średnią lasera pompującego tak, aby prawdopodobieństwo generowania par wielokrotnych było bardzo małe w porównaniu z prawdopodobieństwem wygenerowania jednej pary. Tutaj mówi się o zjawisku parametrycznego dzielenia częstotliwości (ang. parametric down conversion), które jest jednym z bardzo istotnych jeśli nie najistotniejszym z elementów praktyki laboratoryjnej w zakresie badania fundamentów i limitów precyzji opisu zjawisk przez mechanikę kwantową.

Doktorantka zaprezentowała pewien rodzaj uogólnienia metod badania nieklasycyzacji na sytuację w której stan pola elektromagnetycznego nie da się przybliżyć poprzez pojedynczą parę fotonów. Do tego celu pani Woloncewicz wykorzystuje obserwabla odpowiadające pomiarom liczby fotonów. W szczególności są to operatory Stoksa oraz „intensity rates”. Te obserwabla są zdefiniowane już na początku pracy w rozdziale numer dwa oraz pracach PhD1 i PhD2. Takie operatory dość bezpośrednio można uogólnić w celu opisu układów wielopoziomowych nazywanych quditami w teorii informacji kwantowej.

To na co szczególnie zwróciłem uwagę to analiza sytuacji, które są bliskie tym z którymi można się spotkać w praktyce. Mam tu na myśli odporność opisanych testów nierówności Bella na utratę fotonów opisane w rozdziale 5.3. W rozdziale 5.5 autorka dowodzi odporności metody na pewien rodzaj szumu, który to składa się z niekoherentnej superpozycji czterech stanów ściśniętych.

W tym miejscu mam następujące pytania:

1. Dlaczego akurat taki model szumu jest rozważany? Jakiej sytuacji fizycznej odpowiada?
2. Każde źródło szumu powoduje dodatkowe zliczenia. Natomiast każdy detektor z jednej strony ma pewną wydajność kwantową której konsekwencją jest utrata fotonów oraz pewien szum własny, czyli dodatkowe zliczenia nawet przy braku fotonów. Jak w ramach języka przedstawionego w pracy można modelować tego typu charakterystyki detektorów i jaki miałyby wpływ na przedstawione w pracy metody testów Bella?
3. Ta kwestia wiąże się nieco z poprzednią. Jest kilka rodzajów detektorów, które mają rozdzielczość liczby fotonów. Najbardziej dostępne są takie składające się z macierzy detektorów pojedynczych fotonów (ang. bucket detectors). Inne to tak zwane detektory lawinowe (ang. avalanche linear photodiode). Takie urządzenia charakteryzują się pewnymi rodzajami szumu, np. śrutowym, termicznym. Czy metody opisane w pracach są również odporne na tego typu niedoskonałości?
4. W pracy przewija się wzmianka o zastosowaniach praktycznych. Ostatnio dużo mówi się o generowaniu klucza kryptograficznego na duże odległości z wykorzystaniem źródeł par splątanych. Tutaj pracuje się w reżimie umiarkowanego pompowania kryształu nieliniowego tak, aby kontrybucja par wielokrotnych była pomijalna. Łącze optyczne, przestrzenne czy światłowodowe, oraz sposób detekcją skutkują bardzo małym prawdopodobieństwem detekcji fotonu. W związku z tym metody generowania klucza kryptograficznego, które z założenia miały być niezależne od urządzeń tracą tą własność. Pytanie dotyczy scenariusza

- opisanego w doktoracie. Czy znane są limity wydajności detekcji, które gwarantują powodzenie testu Bella w kontekście jasnych stanów ściśniętych opisanych w pracy?
5. Co oznacza, że ze przy wykorzystaniu obserwabli zdefiniowanych w dwóch pierwszych pracach można uzyskać lepsze łamanie nierówności Bella? Takie sformułowanie padło w abstrakcie.
 6. Jakie znaczenie fizyczne ma operator $\hat{\Pi}$ zdefiniowany pod równaniem o numerze 2?

Druga część zagadnień dotyczy nieklasyczności pojedynczego fotonu. Rozdział 7 to komentarz, a w zasadzie streszczenie drugiej pary artykułów, na których doktorantka opiera swój doktorat. Tutaj głównym zagadnieniem są testy korelacji jedno-fotonowych. Doktorantka rozważa i dyskutuje nad dwoma scenariuszami: pierwszym autorstwa Hardy'ego oraz drugim, nieco bardziej zaawansowanym, zaproponowanym przez Tana, Wallsa i Colletta (TWC). Oryginalne prace wywołały pewną dyskusję, w którą Autorka niniejszej rozprawy się włącza. Mam pewne, choć podkreślam, że bardzo małe, wątpliwości co do stopnia wzajemnego powiązania pierwszej i drugiej pary artykułów, na których pani Bianka Woloncewicz oparła swój doktorat.

Tutaj mam jedno pytanie i jedną prośbę:

1. Proszę o bardziej obszerny komentarz dotyczący wzajemnego powiązania jakie występuje między artykułami PhD1-PhD4.
2. Co to znaczy „single photon exciting a balanced beamsplitter”? Stwierdzenie to występuje zaraz na początku rozdziału o numerze 7.

Istotą pisania doktoratu w formie tzw. „spinki” jest przygotowanie wstępu w taki sposób, aby odpowiednio przygotować czytelnika do dalszej lektury prezentowanych publikacji. W mojej ocenie, ten cel został osiągnięty w przypadku pierwszej pary publikacji, dotyczącej testów Bella. Natomiast druga para prac, które zajmują się jeszcze bardziej fundamentalnymi i specjalistycznymi zagadnieniami, PhD2 i PhD3, została nieco zaniedbana. Część ta jest umiarkowanie przystępna dla czytelnika, który nie jest specjalistą w dziedzinie zmiennych ukrytych czy też nie jest wcześniej zaznajomiony z używanymi tam metodami matematycznymi. Rozdział o numerze siedem, zatytułowany „Nonclassicality of single photon”, mógłby być nieco bardziej rozbudowany, aby ułatwić zrozumienie opisanych tam koncepcji. Muszę przyznać, że zrozumienie jego zawartości zajęło mi pewien czas, pomimo że mam przygotowanie w dziedzinie optyki kwantowej i fizyki pojedynczych fotonów. Niemniej jednak, to nie ma negatywnego wpływu na moją ocenę.

Podsumowując, należy stwierdzić, że jako całość praca doktorska jest starannie zorganizowana i dobrze napisana. Doktorantka nie uniknęła pewnych literówek i usterek gramatycznych, jednakże nie są one na tyle poważne, aby znacząco wpłynęły na ogólny dobry odbiór doktoratu. Przykłady to m.in. abstrakt w języku polskim, gdzie występuje „niekołałnością pojedynczego fotony”, oraz wcześniejsze powtórzenie „na na”. Praca przedstawia istotny wkład w dziedzinę informacji kwantowej poprzez opracowanie nowych metod opartych na nierównościach Bella. Badania sięgają także fundamentów mechaniki kwantowej. Dlatego też stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia wszystkie formalne i zwyczajowe wymogi dotyczące tego typu prac naukowych. Z tej przyczyny, wnioskuję o dopuszczenie Pani mgr Bianki Woloncewicz do kolejnych etapów procesu przewodu doktorskiego.

Piotr Koleenderski