



Prof. dr hab. Roman Ciuryło
Instytut Fizyki
Uniwersytet Mikołaja Kopernika

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Michała Jachury pt. : „Inżynieria modowa stanów światła dla
wybranych technologii kwantowych”.**

Mgr Michał Jachura w swej pracy doktorskiej połączył badania teoretyczne i doświadczalne wybranych technologii optyki kwantowej. Od dłuższego czasu optyka kwantowa jest jedną z najprężniej rozwijających się gałęzi współczesnej fizyki. Ma ona bezpośrednie przełożenie na badania podstaw fizyki takich jak: splątanie kwantowe w reżimie relatywistycznym, dekoherencja złożonych układów kwantowych, badania oddziaływań fundamentalnych wychodzące poza Model Standardowy. Osiągnięcia inżynierii kwantowej wywierają też wpływ na bardziej praktyczne zastosowania w: metrologii czy przesyłaniu i kodowaniu informacji. Autor snuje rozprawę wokół trzech powiązanych ze sobą zagadnień: obrazowaniu interferencji dwufotonowej, kwantowej daktyloskopii i pomiarów czasowego przebiegu modulacji fazy optycznej.

Przedłożona rozprawa podzielona jest na pięć rozdziałów opatrzonych bogatą bibliografią zawierającą 135 trafnie dobranych pozycji. Czytanie rozprawy ułatwiają cztery dodatki. Wyniki tu zebrane zostały, też przedstawione w 6 artykułach wieloautorskich. Należy pokreślić, że prace te były opublikowane w renomowanych czasopismach: Optics Letters, Nature Communications, Nature Photonics, Optics Express, Physical Review Letters i Journal of Modern Optics. O kluczowej roli jaką mgr Michał Jachura odegrał przy ich powstaniu świadczy fakt, iż jest pierwszym współautorem pięciu z nich. Taki cykl publikacji mógłby stanowić rozprawę habilitacyjną, oczywiście pomijając kwestie pozostałego dorobku. Obrazuje to bardzo wysoką jakość naukową przedłożonej pracy doktorskiej.

Pierwszy rozdział zatytułowany „Wprowadzenie” jest raczej, krótkim przewodnikiem przedstawiającym: układ pracy, artykuły, których wyniki zostały w niej wykorzystane oraz pozostałe artykuły autorstwa mgr. Michała Jachury. Zakończony jest bardzo zwięzłym przedstawieniem kontekstu historycznego dla rozważanej tematyki, poczynając od newtonowskiego korpuskularnego postrzegania światła po: kryptografię kwantową, pojęcie qbitu, zakaz klonowania, zjawisko splątania, paradoks Einsteina-Podolskiego-Rosena i kwantową teleportację.

Rozdział drugi w syntetyczny sposób wprowadza pojęcie optyki kwantowej pojedynczych fotonów niezbędne dla zrozumienia wyników Autora przedstawionych w kolejnych rozdziałach. Mgr Michał Jachura zaczyna od kwantowania pola elektrycznego i wprowadzenia: operatorów kreacji/anihilacji pola, stanów Focka, lokalizacji fotonów, stanów koherentnych, a kończy na generacji pojedynczych fotonów, interferencji jedno i dwufotonowej, efekcie Hong-Ou-Mandla i opisie widzialności interferencji. Zarówno rys historyczny kończący rozdział pierwszy jak i cały rozdział drugi



są świetnie napisane. Stanowią bardzo dobry materiał dydaktyczny, który na kilkunastu stronach klarownie wprowadza podstawowe pojęcia optyki kwantowej. Dzięki zwartej formie i trafnie dobranej literaturze tekst ten może być wykorzystany do szybkiego wprowadzenia licencjatów, magistrantów i doktorantów w tematykę i pomóc w orientacji w zasadniczych osiągnięciach optyki kwantowej wykorzystującej pojedyncze fotony.

Kolejne trzy rozdziały przedstawiają zasadnicze wyniki pracy. Każdy z nich zawiera niezbędne wprowadzenie, prezentację uzyskanych wyników oraz krytyczne podsumowanie.

Trzeci rozdział poświęcony jest obrazowaniu interferencji dwufotonowej. Interesującym osiągnięciem przedstawionym w tym rozdziale było wykorzystanie zademonstrowanej uprzednio przez R. Chrapkiewicza, W. Wasilewskiego i K. Banaszka [Opt. Lett. 39, 5090 (2014)] obserwacji zdarzeń wielofotonowych przy użyciu kamery do pokazania efektu Hong-Ou-Mandla. Zdjęcia rozbłysków obu fotonów obserwowanych na kamerze i przedstawionych na rysunku 3.4 są bardzo namacalnym i wręcz książkowym przykładem ich interferencji w przypadku gdy są rozróżnialne lub nie. To osiągnięcie zostało docenione przez recenzentów i zaowocowało publikacją M. Jachury i R. Chrapkiewicza [Opt. Lett. 40, 1540 (2015)]. Najistotniejszym osiągnięciem mgr. Michała Jachury przedstawionym w tym rozdziale było obniżenie niepewności doświadczalnego wyznaczenia fazy obrazu interferencyjnego poniżej granicy szumu śrutowego co zostało opublikowane wraz współpracownikami: R. Chrapkiewiczem, R. Demkowiczem-Dobrzańskim, W. Wasilewskim i K. Banaszkiem w bardzo prestiżowym periodyku [Nat. Commun. 7, 11411 (2016)]. Punktem wyjścia do tej demonstracji była teoretyczna analiza niepewności i informacji w interferencji z wykorzystaniem stanów $N00N$. W praktyce wykorzystano stany 2002. Kluczowym elementem opisanego schematu była interferencja par fotonów w rozsuniętych przestrzennie modach. Autor pokazał jak znaleźć optymalne rozsuniecie modów względem ich szerokości w zależności od widzialności interferencji. Istotne jest tu to, że poprawa niepewności jest możliwy również dla różnicy faz $\pi/2$ w ramionach interferometru. Osiągnięcie powyższe było możliwe dzięki odpowiedniej kontroli fazy przestrzennej pojedynczego fotonu. Wcześniej okazało się, iż histogramy różnicy położen obserwowanych koincydencji jest bardzo czuły na przestrzenny rozkład fazy. Dr Radosław Chrapkiewicz w swej pracy doktorskiej zaproponował i zaimplementował metodę rekonstrukcji przestrzennej fazy z mierzonych histogramów koincydencji. To podejście zostało opublikowane przez R. Chrapkiewicza i M. Jachurę wraz z K. Banaszkiem i W. Wasilewskim [Nat. Photon. 10, 576 (2016)]. Interesujące było by pytanie jakie warunki eksperymentalne należało by spełnić by odróżnić bazylikę w Gdańsku od bazyliki katedralnej w Toruniu zakodowanych w fazie pojedynczego fotonu.

Rozdział czwarty poświęcony jest kwantowej daktyloskopii. Mgr Michał Jachura zaczyna od teoretycznej analizy porównania ciągu bitów generowanych optycznie i interferowanych w celu określenia ich identyczności bądź nie. Wykorzystuje odległość Hamminga oraz informację Chernoffa aby to osiągnąć. Ciekawym wynikiem było teoretyczne pokazanie, że w schemacie dwufotonowej interferencji użycie źródeł jednofotonowych pozwala zredukować liczbę powtórzeń pomiarów weryfikacyjnych zwłaszcza dla niskich minimalnych względnych odległości Hamminga i małej liczby ciemnych zliczeń. Wyniki te opublikował wraz z M. Lipką, M. Jarzyną i K. Banaszkiem [Opt. Express 25,

27475 (2017)]. Kolejnym istotnym rezultatem opisanym w tym rozdziale było pokazanie, że w daktyloskopii z wykorzystaniem stanów Foka $|NN\rangle$, maksymalną informacją Chernoffa przypadającą na jeden foton otrzymuje się dla stanów $|11\rangle$, czyli interferencji dwufotonowej. Pokazało to, że rozważanie wyższych stanów Foka na tym etapie nie jest zasadne. W końcu mgr Michał Jachura przeanalizował schemat daktyloskopii z wykorzystaniem stanów koherentnych zarówno w przypadku gdy faza promieniowania była ustalono w kolejnych realizacjach oraz gdy mogła się zmieniać w przypadkowy sposób pomiędzy kolejnymi realizacjami. Ważnym wynikiem było pokazanie, że nawet jeśli nie ma możliwości stabilizacji fazy między uczestnikami protokołu ciągle daktyloskopia może być przeprowadzona analizując pełną statystykę zliczeń fotonów. Ponadto Autor wykazał, że w przypadku losowej fazy, w przeciwieństwie do sytuacji, w której spójność faz jest zapewniona, informacja Chernoffa przypadająca na jedno foton ma maksimum dla określonej średniej liczby fotonów. Wyniki te wraz z demonstracją eksperymentalną stały się podstawą, kolejnej już publikacji w jednym z najbardziej prestiżowych czasopism fizycznych [M. Jachura, M. Lipka, M. Jarzyna, W. Wasilewski, K. Banaszek, Phys. Rev. Lett. 120, 110502 (2018)].

Rozdział piąty jest ostatnim i poświęconym pomiarom czasowego przebiegu zmiany fazy promieniowania. W pracy Autor wykorzystał schemat, w którym szeroki spektralnie impuls zostaje rozciągnięty czasowo co pozwala na mapowanie czasu na częstotliwość. Tak rozciągnięty spektralnie i czasowo puls jest następnie interferowany z pulsem poddanym pewnej modulacji. Pomiar takiego widma pozwala odtworzyć fazę modulowanego promieniowania. Demonstracja eksperymentalna tego schematu a co za tym idzie realizacja optycznego oscyloskopu została przez mgr. Michała Jachurę również przedstawiona wraz z J. Szczepanek, M. Karpińskim i W. Wasilewskim w pracy [J. Mod. Opt. 65, 262 (2017)].

Autor wykazał się ogromną starannością w przygotowaniu złożonej rozprawy. Dopatrzyć mogłem się jedynie niewielkich uchybień. Str. 54, linia 3 od dołu strony, słowo „pokazanie” powinno być zastąpione przez „pokazane”. Str. 63, rys. 4.1 b), linie pionowe w kostkach światło dzielący powinny być zastąpione poziomymi. Str. 66, wzór (4.11), wyrażenie „ $\dots=(1-2d[E(x)E(y)])/m=\dots$ ” powinno być zastąpione przez „ $\dots=(m-2d[E(x)E(y)])/m=\dots$ ”. Str. 73, wzór (4.32), użyte tu oznaczenie „ $P_2(\dots)$ ” wydaje się niezbyt konsystentne z wprowadzonymi powyżej oznaczeniami. W rozdziale 5 zabrakło porównania najważniejszych parametrów prezentowanego optycznego oscyloskopu z innymi znanymi realizacjami oscyloskopów. Mimo, iż rozdziały 3-5 są opatrzone poszczególnymi podsumowaniami, zresztą bardzo dobrze napisanymi, brakuje podsumowania całości rozprawy.

Drobne uwagi wspomniane powyżej w żaden sposób nie umniejszają jakości naukowej przedłożonej rozprawy, którą uważam za wyróżniającą. Mgr Michał Jachura bardzo dobrze wykorzystał możliwość pracy w ośrodku o wspaniałych tradycjach w grupie profesora Konrada Banaszka mającej światową renomę i wiodące osiągnięcia w optyce kwantowej. Stawia to edukację jaką odebrał na bardzo wysokim światowym poziomie. Podczas przygotowania rozprawy doktorskiej wykazał się wielkim talentem zarówno eksperymentalny jak i teoretycznym. Świetnie poradził sobie z rozwiązaniem postawionych przed nim wyrafinowanych problemów badawczych. Na podkreślenie zasługuje dojrzałość naukowa doktoranta, która przejawia się w krytycznym podejściu

do otrzymywanych przez siebie wyników i czerpaniu z wiedzy i doświadczenia współpracowników. Miałem przyjemność słuchać wygłoszonych ze swadą referatów mgr. Michała Jachury, które utwierdziły mnie w przekonaniu o jego wielkiej kompetencji i erudycji fizycznej.

Oddźwięk na arenie międzynarodowej prezentowanych w doktoracie wyników obrazuje fakt, iż dwie najstarsze prace pierwszoautorskie mgr. Michała Jachury [Optics Letters 2015, Nature Communications 2016] ujęte w rozprawie były już przynajmniej 23 razy cytowane przez innych badaczy. Wszystkich obcych cytowań ma 70 zgodnie z Web of Science. Są to wyniki imponujące jak na tak młodego badacza.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. Michała Jachury z nadmiarem spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim zarówno te ustawowe jak i zwyczajowe, dlatego stawiam wniosek o dopuszczenie Doktoranta do publicznej obrony jego rozprawy. Ponadto w przypadku pozytywnego przebiegu obrony wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. Michała Jachury.

