



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](mailto:pustelny@uj.edu.pl)

Kraków, 28 lutego 2022

## Recenzja wniosku o nadanie stopnia doktora habilitowanego

### Panu Piotrowi Kolenderskiemu

Przedłożony mi do recenzji wniosek Pana Dr. Piotra Kolenderskiego zatytułowany jest *Model generowania, kontroli i detekcji pojedynczych fotonów w badaniach podstawowych i stosowanych*. Jego tematyka dotyczy teoretycznych i doświadczalnych badań prowadzonych przez Habilitanta na przestrzeni ostatnich lat, ze szczególnym uwzględnieniem ostatnich 5 lat. Okres ten obejmuje 7 prac naukowych opublikowanych w latach 2017-2021 oraz jedną pracę z 2014 roku, które stanowią podstawę prezentowanego osiągnięcia. Wspólnym mianownikiem wszystkich tych prac są pojedyncze fotony lub ich pary. Częstki te wykorzystywane były przez Habilitantów w badaniach w ramach zagadnień związanych z telekomunikacją, obrazowaniem oraz koherencyjną tomografią optyczną.

Kluczem do opisanych w ramach osiągnięcia badań doświadczalnych jest możliwość generacji pojedynczych fotonów. Spośród szeregu dostępnych technik, Dr Kolenderski wykorzystywał w swoich pracach zjawisko parametrycznej spontanicznej konwersji w dół, zwane także fluorescencją parametryczną (ang. *spontaneous parametric down conversion – SPDC*). W zjawisku tym pojedynczy foton, przechodzący przez ośrodek nieliniowy, zamienia się w dwa fotony o niższych energiach, przy czym spełnione muszą być zasady zachowania energii i pędu. Kwantowy charakter emitowanego w ten sposób promieniowania objawia się nie tylko poprzez określoną liczbę emitowanych fotonów (stan Focka), ale również przez możliwość generacji splątania między nimi. To właśnie temu zagadnieniu Habilitant poświęcił część swoich badań naukowych. Wykazał on m.in., że zapewnienie odpowiednich warunków eksperymentalnych, w tym spełnienie tzw. dopasowania fazowego w kryształach nieliniowych, pozwala na emisję pary splątanych fotonów. Splątanie to dotyczyć może zarówno spektralnych, jak również polaryzacyjnych stopni swobody. Możliwość wytwarzania splątanych fotonów otwiera pole do szeregu ciekawych badań, o których mowa we wniosku.

Pan Kolenderski, będąc przede wszystkim fizykiem eksperymentatorem, opisał w ramach osiągnięcia szereg prowadzonych przez siebie badań doświadczalnych. Aby były one jednak możliwe konieczne było opracowanie technik efektywnej generacji fotonów. Na potrzeby realizacji tego celu Habilitant wykorzystywał oddziaływanie ciągłego, jak również impulsowego światła laserowego z różnego typu kryształami nieliniowymi (BBO, KTP). Badania te pozwoliły na optymalizację parametrów emitowanych fotonów pod kątem różnych opisanych we wniosku zastosowań.

Pierwszym elementem osiągnięcia, który znalazł odzwierciedlenie w przedstawionej literaturze (artykuły naukowe stanowiące osiągnięcie) są prace nad poprawą parametrów transmisji kwantowej w światłowodach. Szczególnym obiektem zainteresowań Dr. Kolenderskiego było zwiększenie zasięgu transmisji informacji kwantowej. Częściowo cel ten można osiągnąć poprzez poprawę parametrów technicznych wykorzystywanych elementów, np. poprzez zmniejszenie tzw. ciemnych zliczeń detektorów wykorzystywanych w pomiarach. Można go jednak również osiągnąć poprzez wykorzystanie pary fotonów generowanych w zjawisku SPDC. W takim przypadku jeden z fotonów może zostać wykorzystany do „obwieszczenia” nadejścia drugiego fotonu, co pozwala na zawężenie pakietu falowego drugiego fotonu (krótszy czas włączenia detektora). Jak pokazały teoretyczne i doświadczalne badania Habilitanta pozwala to na istotne (kilkudziesięcioprocentowe) zwiększenie zasięgu transmisji fotonu w sieciach światłowodowych.

W prowadzonych przez Dr. Kolenderskiego badaniach, informacja kwantowa kodowana była zarówno w modzie polaryzacyjnym, jak również w modzie czasowym fotonu. Szczególnie ciekawym jest ten drugi przypadek, w którym foton przygotowywany jest w dwóch czasowo rozseparowanych paczkach falowych. Propagując się w ośrodku dyspersyjnym paczki te ulegają dyspersji, która może prowadzić do ich przekrycia i interferencji. Wykrycie fotonu w danej chwili czasu jest więc pomiarem niosącym ze sobą informacje o stanie kwantowym układu, co może być wykorzystane do kodowania informacji. Zaletą tego rozwiązania nad protokołami wykorzystującymi np. splątanie polaryzacyjne jest jego większa odporność na zaburzenia. W światłowodach bowiem, może dojść do niekontrolowanego sprzęgania ze sobą dwóch modów polaryzacyjnych, co prowadzi do utraty informacji kwantowej. W tym sensie wykorzystanie kodowania przestrzennego może prowadzić do poprawienia parametrów transmisyjnych kwantowych sieci telekomunikacyjnych, ale również do wytwarzania bardziej złożonych fonicznych stanów kwantowych (qutrit, quadrit itd.).

Druga część osiągnięcia Habilitanta poświęcona jest oddziaływaniu pojedynczych fotonów z materią. Tego typu badania doświadczalne możliwe były dzięki stworzonej przez Dr. Kolenderskiego, absolutnie unikalnej w skali kraju, bazie aparaturowej. Zbudowany w jego grupie mikroskop fluorescencyjny, pozwalający na zliczanie pojedynczych fotonów z bardzo dobrą rozdzielczością czasową, otworzył pole dla nowych, interesujących badań.

Jednym z obiektów zainteresowań Habilitanta były centra barwne azot-wakancja w diamentach. Te ciało stałe układy, które z uwagi na swoją strukturę energetyczną i właściwości stanowią swego rodzaju quasytomy, są obiektem intensywnych badań współczesnej fizyki atomowej i optycznej. Ponieważ jednak centrum azot-wakancja jest elementem sieci krystalicznej diamentu, podlega ono wielu procesom nieznanym w układach atomowych.

W ramach swoich badań Habilitant przeanalizował procesy relaksacyjne w układach azot-wakancja. Do tego celu wykorzystał wspomniany wyżej mikroskop fluorescencyjny wykrywający pojedyncze fotony. Wykorzystanie jednego z fotonów tworzonej w procesie SPDC pary jako fotonu obwieszczonego pozwoliło na uzyskanie rozdzielczości czasowej niedostępnej dla typowych technik laserowych. W ten sposób możliwe stało się nie tylko przeanalizowanie procesu zaniku fluorescencji (relaksacja promienista), ale również przejść bezpromienistych (z uwagi na swoją wysoką dynamikę przejścia takie nie mogą być badane technikami klasycznej spektroskopii laserowej). Prace Habilitanta pozwoliły na zaobserwowanie wolnego zaniku czasowego fluorescencji (skala pojedynczych nanosekund), jak również bardzo szybkiego procesu relaksacji bezpromienistej (czasy rzędu 100 ps). Co ciekawe, z uwagi na różne warunki doświadczalne w stosunku do badań realizowanych w innych grupach, wyniki Dr. Kolenderskiego są ilościowo różne od wcześniejszych wyników. Może to być kolejnym przyczynkiem do lepszego zrozumienia dynamiki układów azot-wakancja w diamentach.

Innym obszarem aktywności Habilitanta w tej dziedzinie jest zwiększenie rozdzielczości pomiarów mikroskopowych. Realizacja mikroskopii superzdolności rozdzielczej miałyby się odbyć poprzez zawężenie przestrzennego pakietu falowego fotonu. Przeprowadzone do tej pory prace Dr. Kolenderskiego dowiodły, że mod przestrzenny fotonu jest zdecydowanie mniejszy od rozmiarów wynikających z apertury numerycznej obiektywu wykorzystywanego w mikroskopie. Otwiera to możliwość wykorzystania tego typu pomiarów z rozdzielczością przestrzenną większą od tej uzyskiwanej w mikroskopach fluorescencyjnych, co zostało

zademonstrowane numerycznie przez Habilitanta. Bazując na informacjach zawartych we wniosku można przypuszczać, że prace nad doświadczalną implementacją tego typu pomiarów trwają obecnie w grupie Dr. Kolenderskiego.

Ostatnim elementem osiągnięcia prezentowanego przez Habilitanta jest kwantowa koherencyjna tomografia optyczna (ang. *quantum optical coherence tomography – qOCT*). Konwencjonalna koherencyjna tomografia optyczna jest techniką stosowaną do przestrzennego obrazowania obiektów przezroczystych. Technika ta wykorzystuje zjawisko interferencji światła spójnego odbijającego się od kolejnych warstw w próbce i rejestrowaniu natężenia obrazu interferencyjnego. Skanowanie długości drogi optycznej ramienia referencyjnego pozwala na określenie struktury przestrzennej próbki, co wykorzystywane jest m.in. w medycynie (okulistyka).

U podstaw qOCT leży jedno z podstawowych zjawisk optyki kwantowej tj. efekt Hong-Ou-Mandela. Zjawisko to polega na nałożeniu na siebie na płycie światłodzieliącej dwóch nierozróżnialnych fotonów. Nierozróżnialność fotonów sprawia, że dochodzi między nimi do interferencji kwantowej, której skutkiem jest skierowanie obu fotonów jednocześnie w ten sam port wyjściowych płytki (wspólny kierunek). Użycie tego zjawiska w qOCT polega na wykorzystaniu interferencji dwóch nierozróżnialnych fotonów, przy czym jeden z fotonów wcześniej odbija się od badanej próbki. W ten sposób brak koincydencji pomiędzy zliczeniami w dwóch detektorach niesie istotną informację o próbce.

Rozwiązanie, które zostało zaproponowane przez Habilitanta w ramach qOCT polegało na wykorzystaniu detektorów pojedynczych fotonów oraz bardzo słabych impulsów światła laserowego. Wykorzystanie tak słabego światła pozwoliło na uzyskanie rozdzielczość na poziomie pojedynczych fotonów, co uutorowało drogę do pomiarów grupowania się tych cząstek w efekcie Hong-Ou-Mandela. To właśnie w takim układzie doświadczalnym udało się Dr. Kolenderskiemu dokonać pomiaru próbek biologicznych (skórka cebuli).

Rozszerzeniem tych badań było zastąpieniu detektorów pojedynczych fotonów spektrometrami pozwalającymi na pomiar widma rejestrowanych fotonów. Umożliwiło to określenie łącznej amplitudy spektralnej pary fotonów, a przez to ograniczenie pewnych problemów doświadczalnych związanych z dyspersją chromatyczną układu. To właśnie ten pomiar był pierwszym przykładem wykorzystania splątania kwantowego w qOCT. Uzyskane wyniki

dowodły możliwości poprawienia parametrów tej techniki poprzez wykorzystanie cząstek wykazujących własności stricte kwantowe.

Podsumowując, należy stwierdzić, że przedstawiony materiał jest wartościowy, obejmuje ciekawą tematykę badań i z pewnością stanowi solidną podstawę wniosku Dr. Kolenderskiego o nadania stopnia doktora habilitowanego. Przy analizie materiału rodzi się jednak czasem pytanie o klucz doboru konkretnych publikacji. Prezentowany materiał jest zdecydowanie szerszy niż ten zawarty w publikacjach [H1-H8], dlatego naturalnym wyborem wydawałoby się włączenie również innych prac, skądinąd cytowanych w osiągnięciu, jako członu wniosku. Prawdopodobnie jednak wybranie takiego a nie innego zestawu prac ma swoje powody.

Choć bez wątplenia przedstawiony materiał stanowi bardzo wartościowy dorobek naukowy, jego wadą jest sama forma przedstawienia osiągnięcia. W opisie bardzo często pojawia się żargon, treści opisywane są w sposób niejasny lub lapidarny. Nie pozwala to niestety dogłębnie zrozumieć prezentowanej tematyki, a przez to w pełni docenić jakości osiągnięcia. Ba, pozostawia nawet wrażenie, że sam dokument mógłby być przygotowany lepiej. W pracy pojawiają się także niekonsekwencje i błędy edytorskie. Przykładowo nigdzie nie można znaleźć anonsowanego w części 5. osiągnięcia fragmentu dotyczącego kwantowej komunikacji satelitarnej, pojawią się błędy edytorskie czy pomyłki samego Habilitanta dotyczące miejsc jego wystąpienia (vide casus prezentacji w Legnicy w 2015 roku, który odbył się na Polskiej Konferencji Optycznej, a nie na Zjeździe Fizyków Polskich). Pozostawia do niestety wrażenie, że wniosek jej niedopracowany pod tym względem, co obniża jego ocenę „za styl”.

Powracając jednak do treści merytorycznej samego osiągnięcia warto przeanalizować osiągnięcia Dr. Kolenderskiego w liczbach. Habilitant jest autorem 24 artykułów naukowych po doktoracie oraz 8 prac przed doktoratem. Prace te były cytowane przez innych autorów 312 razy, co jest wynikiem dobrym jak na ten etap kariery naukowej. Z drugiej jednak strony sędzę, że potencjał badań Dr. Kolenderskiego jest jeszcze większy i sam zadaję sobie pytanie dlaczego wyniki naukometryczne nie są lepsze.

Pozycja Dr. Kolenderskiego jako specjalisty w doświadczalnej optyce kwantowej jest już znacząca. Świadczą o tym m.in. zaproszenia do wygłoszenia referatów na konferencjach naukowych oraz seminariów na uczelniach.

Na osobą uwagę zasługuje skuteczność Dr. Kolenderskiego w pozyskiwaniu środków na badania. Zgodnie z załączoną dokumentacją zdobył On kilkanaście milionów złotych w formie

grantów finansowanych przez różne instytucje. Gros z tych pieniędzy zostało przeznaczonych na stworzenie światowej klasy laboratorium optyki kwantowej w Toruniu. Istotną część uzyskanych funduszy to również pieniądze zdobyte „na ludzi”. Pan Kolenderski sprawował opiekę nad ośmiorgiem studentów (prace licencjackie i magisterskie). Dowodem jego dojrzałości naukowej jest również opieka nad sześciorgiem doktorantów oraz koordynowanie pracy czterech doktorów. Zespół ten realizuje zarówno badania o charakterze podstawowym, jak również aplikacyjnym. Dowodem tego ostatniego są m.in. badania i projekty realizowane we współpracy z przemysłem.

Jeśli chodzi o działalność dydaktyczną Dr. Kolenderskiego to obejmuje ona wykłady i ćwiczenia ze studentami. Szkoda, że w opisie osiągnięcia nie pojawia się informacja czy prowadzone przez niego zajęcia z kursów podstawowych to wykład czy ćwiczenia. Pozwoliłoby to na jeszcze lepszy ogląd jego osiągnięć dydaktycznych.

Podsumowując, Dr Piotr Kolenderski posiada znaczący dorobek naukowy obejmujący prawdziwie interesujące badania z zakresu optyki kwantowej. Badania te mają zarówno aspekt podstawowy, jak również aplikacyjny, a sam Dr. Kolenderski zaangażowany jest tak w prace doświadczalne, jak i teoretyczne. Podczas swojej kariery naukowej wykazał się On dużą dojrzałością jako naukowiec będąc m.in. pomysłodawcą i organizatorem Laboratorium Pojedynczych Fotonów na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. Zdobywając granty na prowadzenie badań zbudował/zakupił unikalną w skali kraju aparaturę oraz zgromadził wokół siebie grupę ludzi, która prowadzi interesujące badania naukowe. **Z tego też powodu jestem przekonany, że przedstawiony dorobek spełnia warunki zawarte w art. 219 ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce i wnioskuję o dalsze procedowanie jego wniosku.**

dr hab. Szymon Pustelny, prof. UJ