

Dr hab. inż. Remigiusz Augusiak
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
Aleja Lotników 32/46
02-668 Warszawa

**Recenzja osiągnięcia naukowego oraz dorobku naukowego
dr. Piotra Kolenderskiego
w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego**

Sylwetka Kandydata

Dr Piotr Kolenderski doktoryzował się w 2010 roku na podstawie rozprawy zatytułowanej „*Inżyniera par fotonów generowanych ośrodkach nieliniowych*” przygotowanej pod kierunkiem prof. dr hab. Konrada Banaszka na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. Po obronie pracy doktorskiej w latach 2010-2013 pozostawał pracownikiem tegoż uniwersytetu jako asystent naukowy, a jednocześnie odbył staż podoktorski w Institute for Quantum Computing na Uniwersytecie w Waterloo w Kanadzie. W 2013 powrócił na Uniwersytet Mikołaja Kopernika gdzie pozostaje zatrudniony do dzisiaj. Założył na tam Laboratorium Zastosowań Pojedynczych Fotonów, które funkcjonuje w obrębie Krajowego Laboratorium Fizyki Atomowej Molekularnej i Optycznej (FAMO). Jednocześnie od lat prowadzi on grupę badawczą w ramach tego laboratorium zajmującą się właśnie zastosowaniami źródeł pojedynczych fotonów, która obecnie składa się z aż sześciu doktorantów oraz czterech pracowników ze stopniem naukowym doktora.

Osiągnięcie habilitacyjne

Jako osiągnięcie habilitacyjne dr Kolenderski przedstawił cykl ośmiu artykułów naukowych zatytułowany „*Metody generowania, kontroli i detekcji pojedynczych fotonów oraz ich zastosowania w badaniach podstawowych i stosowanych*”. Wszystkie publikacje ukazały w recenzowanych czasopismach o randze międzynarodowej takich jak *Scientific Reports* (3), *Physical Review A* (2), *Optics Letters* (1), *Optics Express* (1), czy też bardzo dobre czasopismo *Optica* (1). Cykl ten to owoc wieloletnich badań Habilitanta nad źródłami pojedynczych fotonów, ich charakteryzacją, a także eksploatacją w takich zastosowaniach jak komunikacja kwantowa czy optyczna tomografia koherencyjna. Poniżej nakreślę wyniki przedstawione w osiągnięciu, zachowując podział narzucony przez Habilitanta.

1) Pierwsza, najobszerniejsza część cyklu habilitacyjnego poświęcona jest komunikacji kwantowej, a w zasadzie kwantowej dystrybucji klucza kryptograficznego, przy czym do wytwarzania klucza kryptograficznego używany jest bodaj najbardziej podstawowy protokół zaproponowany przez Bennetta i Brassarda w 1984 roku, tzw. protokół BB84. Komunikacja kwantowa jest jednym z najbardziej interesujących a zarazem obiecujących obszarów kwantowej teorii informacji. Zastąpienie klasycznych bitów kubitami pozwala bowiem na uzyskanie przewagi w wielu zadaniach komunikacyjnych; w szczególności bezpieczeństwo klucza kryptograficznego jest zagwarantowane przez prawa fizyki, a nie opiera się na złożoności obliczeniowej jak to ma miejsce w tradycyjnej kryptografii. Jednym z podstawowym problemów, przed którym stoi kwantowa dystrybucja klucza kryptograficznego to zwiększenie maksymalnego zasięgu pomiędzy osobami, które chcą wytworzyć bezpieczny klucz kryptograficzny. Głównymi czynnikami, które ograniczają ten zasięg to straty związane ze światłowodem oraz wydajność detektorów i ciemne zliczenia. W pracach [H2,H4,H6,H7] Habilitant wraz ze współpracownikami proponują różne rozwiązania, które ten zasięg pozwalają zwiększyć.

W teoretycznej pracy [H7], opublikowanej w bardzo dobrym czasopiśmie *Optica*, która otwiera ten cykl, wskazano na możliwość wykorzystania korelacji spektralnych splątanych par fotonów, wytworzonych w procesie parametrycznej konwersji w dół, do redukcji szumów po stronie detektorów, a w rezultacie do zwiększenia zasięgu protokołu. W analizie brano pod uwagę światłowody jednomodowe powszechnie

używane w telekomunikacji oraz rzeczywiste parametry detektorów i źródeł fotonów. Jednym z głównym rezultatów pracy jest obserwacja, że w przypadku gdy obserwatorzy nie znają momentu wytworzenia par splątanych, użycie par fotonów o dodatnich korelacjach spektralnych pozwala zwiększyć zasięg protokołu w stosunku do korelacji ujemnych; co więcej, im wyższe korelacje spektralne, tym ten zasięg większy. Możliwość wytworzenia fotonów o dodatnich korelacjach spektralnych została wskazana przez Habilitanta we wcześniejszych pracach jak np. [2].

W kolejnej pracy [H6] przebadano możliwość ustanowienia bezpiecznego klucza w protokole BB84 w wersji asymetrycznej, tzn. w takiej, w której odległości dzielące obu obserwatorów od źródła fotonów różnią się od siebie. W szczególności, można przyjąć, że źródło znajduje się bliżej jednego z laboratoriów, powiedzmy laboratorium Alicji. Rozważając ponownie sytuację, w której obserwatorzy nie znają czasu wytworzenia pary fotonów, dokonano dość nieintuicyjnej obserwacji, że dla dostatecznie dużej odległości po stronie Boba, długość światłowodu po stronie Alicji musi znajdować się w dobrze określonym, skończonym przedziale, aby obserwatorzy mogli wygenerować bezpieczny klucz. Ponadto, efekt ten występuje, jeżeli korelacje spektralne obu fotonów są dodatnie. Co więcej, zwiększając długość światłowodu po stronie Alicji można zwiększyć bezpieczną długość po stronie Boba. Jednocześnie, zwiększenie korelacji spektralnych obu fotonów przekłada się na zwiększenie 'bezpiecznej' odległości po stronie Boba dla ustalonej długości światłowodu Alicji.

W pracy [H4], też teoretycznej, zbadano wpływ parametrów źródła fotonów takich jak długość trwania impulsu laserowego pompującego kryształ nieliniowy, czy też tych charakteryzujących sam kryształ, na bezpieczną zasięg protokołu, przy czym, podobnie jak w pracy [H8] brano pod uwagę możliwość, że długości światłowodów po obu stronach są dowolne. Pokazano, że przez odpowiedni dobór tych parametrów można zwiększyć ową 'bezpieczną' długość światłowodów nawet aż o 30% w stosunku do znanych wyników. W pracy przedyskutowano również, czy wyznaczone optymalne wartości parametrów są osiągalne w przypadku używanych obecnie laserów oraz kryształów nieliniowych.

Praca [H2] dotyczy innego schematu kodowania informacji kwantowej niż ten oparty na polaryzacji fotonów, użyty w poprzednich trzech pracach. W tym przypadku stany bazowe kubitowej czy nawet kuditowej przestrzeni Hilberta kodowane są w dwóch (wielu), odseparowanych czasowo paczkach falowych, natomiast dowolny stan kubitowy to superpozycja obu paczek. Propagacja w światłowodzie obu paczek prowadzi do ich interferencji. W pracy [H2], która jest w zasadzie kontynuacją wcześniejszego artykułu [12] napisanego w tym samym zespole, przebadano możliwość rekonstrukcji macierzy gęstości opisującej stan kwantowy obu paczek na końcu światłowodu przez światłowód poprzez czasowe zliczanie fotonów, uwzględniając również szum czasowy po stronie detektora. Jak pokazano w [12] propagację w światłowodzie wraz owym zliczaniem można formalnie reprezentować jako pewien uogólniony, nieprojektywny pomiar kwantowy w domenie czasowej wykonany na stanie wytworzonym przez źródło. Celem było wyznaczenie minimalnej wierności rekonstruowanego stanu w funkcji długości światłowodu w zależności od poziomu szumu detektora. Najważniejszą obserwacją sformułowaną w pracy jest fakt, że dla pewnej klasy stanów kubitowych czy kuditowych zadanych przez wzajemne fazy pomiędzy elementami bazy standardowej, zwiększenie długości światłowodu przekłada się na poprawę dokładności z jaką rekonstruowane są owe macierze gęstości. W szczególności, nawet w przypadku rzeczywistych poziomów szumu detektora, dla odpowiednio długich światłowodów można odtworzyć owe macierze gęstości w przypadku obu wymiarów z bardzo dużą dokładnością (wykresy nr 2 i 5 w pracy).

2) W pracy [H8], będącej owocem współpracy wielu ośrodków naukowych, zaprezentowano wyniki eksperymentu, w którym wykorzystano źródła pojedynczych fotonów potwierdzającym falową naturę światła, w którym pojedyncze fotony przepuszczane były przez kryształ dwójłomny powodując powstanie obrazu interferencyjnego. Istotnym aspektem jest tutaj wykorzystanie par fotonów o splątaniu w przestrzennych i polaryzacyjnych stopniach swobody. Przez odpowiedni dobór stanu jednego z fotonów—fotonu obwieszczającego (heralding photon)—w analizatorze polaryzacji można modyfikować kształt obrazu interferencyjnego wytwarzanego przez drugi z fotonów. Co ważne, w innej pracy Habilitanta, [16], pokazano, że powyższy efekt zdalnego sterowania własnościami jednego z fotonów przez pomiar w odpowiedniej bazie fotonu obwieszczającego można wykorzystywać do poprawy rozdzielczości w mikroskopii fluorescencyjnej.

3) Pozostałe trzy prace wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego dotyczą zastosowania źródeł fotonów w koherencyjnej tomografii optycznej (OCT), która jest metodą interferometryczną pozwalającą badać strukturę obiektów rozpraszających światło o szerokich zastosowaniach np. w diagnostyce medycznej. Z tego względu ta linia badań prezentuje się bardzo interesująco i ma duży potencjał aplikacyjny, podobnie zresztą jak badania dotyczące komunikacji kwantowej.

Pierwsza z prac tej części osiągnięcia, [H5], dotyczy kwantowej wersji OCT, która wykorzystuje splątane pary fotonów i oparta jest na efekcie Hong-Ou-Mandela. Użycie splątania pozwala między innymi obrazować wewnętrzną strukturę próbek z większą dokładnością w stosunku do standardowej tomografii optycznej. Koherencyjna tomografia optyczna nie jest jednak wolna od wad, przy czym jednym z głównych problemów są artefakty pojawiające się w mierzonym sygnale, które tworzą się na skutek interferencji pakietów falowych odbitych od powierzchni badanego obiektu. W pracy [H5] dokonano gruntownej analizy kwantowej tomografii w domenie częstotliwości, w której każde z wyjść dzielnika wiązki monitorowane jest przez spektrometr z rozdzielczością czasową. W oparciu o transformatę Fouriera otrzymywanej w ten sposób łącznej amplitudy spektralnej par fotonów, opracowano algorytmy pozwalające, przynajmniej w przypadku prostych próbek, pozbyć się owych artefaktów z obrazu bądź znacząco zmniejszyć ich rozmiar.

Innym problemem, z którym boryka się koherencyjna tomografia optyczna, w szczególności w zastosowaniach medycznych, to fakt, że moc światła używanego w diagnostyce nie może być zbyt duża, co przekłada się na jakość obrazowania. Praca [H3] pokazuje, że używając schematu pomiarowego zaczerpniętego z optyki kwantowej, wykorzystywanego do badania korelacji spektralnych fotonów, można znacząco obniżyć moc światła wykorzystanego do obrazowania w stosunku do standardów bezpieczeństwa obowiązujących w diagnostyce medycznej. Jednocześnie jakość obrazowania jest porównywalna z tą otrzymywaną w standardowej koherencyjnej tomografii optycznej, co zostało zilustrowane w eksperymencie wykonanym na dwóch próbkach: plasterek cebuli oraz stos trzech warstw różnych szkieł.

Celem pracy [H1] jest natomiast wykazanie zarówno od strony teoretycznej jak i eksperymentalnej, że zalety wynikające z użycia splątanych par fotonów, w szczególności polepszenie rozdzielczości osiowej można również uzyskać w klasycznej koherencyjnej tomografii optycznej stosując pewne algorytmy jak np. ten zaproponowany niedawno w pracy Jensena i współpracowników. Odbywa się to jednak kosztem zwiększenia liczby artefaktów w mierzonym sygnale.

Uważam, że przedstawione prace są bardzo wartościowe dla rozwoju takich dziedzin jak komunikacja kwantowa czy optyka kwantowa, przy czym największe wrażenie zrobiły na mnie teoretyczne prace [H6,H7] podająca sposoby zwiększenia odległości pomiędzy obserwatorami zwiększenia kryptografii kwantowej, a także praca [H5] wskazująca na możliwość wykorzystania 'elementów pozadiagonalnych' łącznej amplitudy spektralnej do wyrugowania artefaktów z obrazu. Ciekawa jest również praca [H2], w której podano 'sprytny' sposób reprezentacji strat na światłowodzie wraz z procesem zliczania fotonów w postaci pewnego ciągłego w czasie pomiaru wykonywanego na stanie początkowym układu. Warto również podkreślić fakt, że Habilitant w swojej działalności naukowej łączy teorię z eksperymentem, co jest bardzo pozytywnym aspektem tego wniosku.

Z drugiej strony, muszę przyznać że sam autoreferat nie jest napisany 'optymalnie'. Prace [H8,H1] zostały opisane bardzo skrótowo, przy czym pracy [H1] Habilitant poświęcił w zasadzie tylko jedno zdanie. Jednocześnie prace [14] i [16], których co prawda Habilitant jest współautorem, ale nie wchodzą one do cyklu habilitacyjnego, zostały opisane w bardziej szczegółowy sposób. Rozumiem, że Autor chciał nakreślić kontekst badań, ale uważam, że powinien był zachować odpowiednie proporcje. Zabrakło mi również w autoreferacie odniesień do prac innych autorów, przez co badania Habilitanta nie zostały ułożone w tym co się obecnie dzieje w dziedzinie. Autoreferat powinien jednak stanowić spójną całość.

Wszystkie prace wchodzące w skład cyklu habilitacyjnego są wieloautorskie, choć poza pracą [H8] liczba współautorów jest mała i ograniczona z góry przez dwa. Aby sprostać wymogom formalnym do wniosku dołączone są również deklaracje dr. Kolenderskiego i jego współautorów określające wkład w powstanie prac. Muszę przyznać, że oświadczenia Habilitanta są nieco zbyt powierzchowne i sprowadzają się do ogólnych stwierdzeń dotyczących nadzorowania prac badawczych czy pozyskiwania środków finansowych. Z drugiej strony, taka jest też rola kierownika grupy badawczej, aby cedeować wykonanie konkretnych zadań

na młodszych współpracowników, pozostawiając sobie kierowanie pracami. Jestem przekonany, że wkład dr. Kolenderskiego w powstanie cyklu, w szczególności od strony koncepcyjnej jest duży.

Całkowity dorobek naukowo-badawczy

Całkowity dorobek naukowo-badawczy dr. Kolenderskiego wygląda bardzo dobrze. Myślę, że przewyższa on typowe 'dorobki habilitacyjne' z fizyki. Składają się na niego 34 prace opublikowane w czasopismach z listy JCR, przy czym aż 26 powstało po otrzymaniu stopnia naukowego doktora. Prace ukazały się w całym spektrum czasopism naukowych. Nie ma sensu żebym je tu wszystkie wymieniał, wspomnę tylko, że spośród artykułów niewchodzących do osiągnięcia spora część ukazała się w bardzo dobrych *Physical Review A*, *Optics Express* czy *Optics Letters*. Dr Kolenderski jest również współautorem szeregu prac/abstraktów opublikowanych w materiałach pokonferencyjnych, choć nie wspominał on o tym we wniosku. Spośród prac niewchodzących do osiągnięcia, a opublikowanych po doktoracie warto wymienić nieco bardziej zmatematyzowaną pracę opisującą schemat tomografii wielopoziomowych stanów kwantowych kodowanych w modach czasowych fotonów [12], z której mocno czerpie praca [H2]. Myślę, że ten artykuł mógł zostać dołączony do osiągnięcia bowiem wraz z [H2] tworzą one spójną całość. Inne prace, o których warto wspomnieć to prace [14,16] wykonane we współpracy z wieloma zagranicznymi ośrodkami, które dotyczą oddziaływania pojedynczych fotonów z materią.

Do momentu pisania recenzji prace dr. Kolenderskiego zyskały łącznie 334 cytowania, a jego H-index wynosi 11. Liczby te świadczą o dużej rozpoznawalności prac Habilitanta.

Pozostałe elementy dorobku naukowego dr. Kolenderskiego również prezentują się bardzo dobrze. Habilitant jest regularnie zapraszany do wygłoszenia referatu na międzynarodowych konferencjach. Pełni on rolę recenzenta dla wielu czasopism naukowych, uwzględniając te najbardziej prestiżowe jak *Nature* czy *Physical Review Letters*. Dr Kolenderski jest bardzo skuteczny w pozyskiwaniu środków na swoje badania. Pełnił lub pełni on rolę kierownika w całym szeregu grantów takich jak duży projekt First TEAM Fundacji na rzecz Nauki Polskiej, przy pomocy których finansuje swoją grupę badawczą. Sprawował on również opiekę naukową nad trzema projektami PRELUDIUM fundowanymi przez Narodowe Centrum Nauki a także jest członkiem dużych projektów konsorcyjnych. Wreszcie, dr Kolenderski jest już wielu lat kierownikiem grupy badawczej na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu, która aktualnie składa się z 10 osób (nie wliczając samego kierownika), w tym z aż sześciu doktorantów. Fakt, że kształci on tak liczną młodych naukowców jest bardzo pozytywnym aspektem jego działalności naukowej. Świadczy on również o dużej samodzielności i niezależności naukowej Habilitanta.

W mojej ocenie przedstawione powyżej fakty świadczą o tym, że działalność naukowa dr. Kolenderskiego ma znaczący wpływ na rozwój fizyki i dlatego uważam, że niniejszy wniosek spełnia wymóg ustawy, który mówi, że kandydat do stopnia naukowego doktora habilitowanego posiada „w dorobku osiągnięcia naukowego albo artystycznego, stanowiącego znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny”.

Odnosnie drugiego warunku ustawowego, który mówi, że kandydat „wykazuje się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej”, należy zauważyć, że dr Kolenderski odbył trzyletni staż podoktorski w Institute for Quantum Computing na Uniwersytecie w Waterloo w Kanadzie, gdzie zajmował się doświadczalną optyką kwantową oraz jej zastosowaniami np. w komunikacji kwantowej. Z tego okresu pochodzi np. praca wskazująca na możliwość wytworzenia splątanej pary fotonów o dodatniej korelacji spektralnej [2], z której czerpią badania zaprezentowane w cyklu habilitacyjnym, czy też praca donosząca o eksperymentalnej realizacji gry Aharon-Vaidman. Uważam więc, że ten wymóg jest również spełniony.

Konkluzja

Podsumowując, uważam, że dr Piotr Kolenderski w pełni zasługuje na stopień naukowy doktora habilitowanego w dyscyplinie nauki fizyczne i dlatego rekomenduję nadanie mu tego stopnia.

Remigiusz Augustyniak