

Warszawa, 08.06.2022

Dr hab. inż. Remigiusz Augusiak
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
Aleja Lotników 32/46
02-668 Warszawa
augusiak@cft.edu.pl

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

Sylwetka Kandydata

Dr Markiewicz doktoryzował się w 2014 roku na Uniwersytecie Gdańskim na podstawie rozprawy pt. „*Characterization and detection of multipartite entanglement*” przygotowanej pod kierunkiem prof. dr. hab. Marka Żukowskiego. Po obronie pracował w kilku polskich ośrodkach naukowych: Uniwersytet Warszawski (1 rok), Centrum Fizyki Teoretycznej (1 rok) oraz Uniwersytet Jagielloński (3 lata). W roku 2020 wrócił na macierzystą uczelnię, gdzie do dzisiaj pozostaje zatrudniony jako adiunkt w ramach Międzynarodowego Centrum Teorii Technologii Kwantowych. Od tej strony kariera naukowa dr Markiewicza prezentuje się bardzo ciekawie. Muszę jednak przyznać, że brakuje mi w dorobku Habilitanta stażu podoktorskiego w zagranicznym ośrodku naukowym.

Osiągnięcie habilitacyjne

Jako osiągnięcie habilitacyjne dr Markiewicz przedstawił cykl aż dziewięciu publikacji naukowych pt. „*Przejawy nieklasyczości w układach kwantowomechanicznych i kwantowoptycznych*”. Prace wchodzące w skład osiągnięcia opublikowano w bardzo dobrych czasopismach międzynarodowych z listy JCR: *Physical Review A*, *New Journal of Physics* czy nawet *Physical Review Letters* lub *npj Quantum Information*. W pracach tych dr Markiewicz zajmował się badaniem i detekcją pewnych form nieklasyczości charakteryzujących układy kwantowe takich jak splątanie, nielokalność Bella, czy też kwantowa kontekstualność. Jest to niezwykle aktualny i ciekawy obszar badań, zarówno od strony poznawczej jak i aplikacyjnej. W szczególności splątanie kwantowe czy nielokalność Bella mogą być używane jako zasoby dla całej gamy interesujących zastosowań takich jak metrologia kwantowa czy certyfikacji kwantowej losowości. Z tego też powodu obszar, po którym porusza się Habilitant jest już od wielu lat obiektem intensywnych badań. Spośród prac tworzących cykl habilitacyjny wydzielił on kilka podzbiorów. Pierwszy, składający się z artykułów [H7,H5], dotyczy detekcji splątania kwantowego przy pomocy kryteriów, które można stosować w eksperymencie. Drugi podzbiór, zawierający prace [H9] i [H8], dotyczy pojęcia nielokalności Bella, kolejnej formy korelacji nieklasycznych będącej pochodną splątania kwantowego. W pracach [H4,H2,H1] badane są nieklasyczne własności interferencji ze względu na nierozróżnialność cząstek wraz z jej zastosowaniami do wytwarzania pewnych wielocząstkowych stanów splątanych. Wreszcie, [H6] oraz [H3] dotyczą kontekstualności oraz nielokalności Bella pojedynczego fotonu. Poniżej pokrótce opiszę wyniki uzyskane w każdej z prac, zachowując powyższy podział.

1) W pracy [H7] wyprowadzono bardzo ogólny warunek konieczny i dostateczny splątania dla układów dwuciałowych oparty na odwzorowaniach działających na przestrzeniach macierzowych, które zachowują hermitowskość, ale mogą być w ogólności nieliniowe. Otrzymany warunek porównano z bodaj najważniejszym kryterium splątania opartym na dodatnich odwzorowaniach liniowych; choć jest on słabszy niż kryterium Horodeckich to jego zaletą jest to, że pozwala ono na konstrukcję „przyjaznych

eksperymentowi” warunków splątania, co zilustrowano przykładami. Uważam, że praca [H7] to mocny punkt dorobku dr. Markiewicza. Z jednej strony zawiera ona ciekawe wyniki, a z drugiej Habilitant jest w niej wiodącym autorem. Ze dziwieniem przyjąłem fakt, że nie doczekała się ona wielu cytowań. Uogólnia ona bowiem wyniki pracy [E6], która jest całkiem nieźle cytowana.

W pracy [H5] przebadano natomiast skuteczność w detekcji splątania kwantowego kryterium geometrycznego z pracy [E6], które było punktem wyjścia dla wyżej opisanej pracy [H7], w zastosowaniu do konkretnych układów fizycznych. Rozważono dwa dwu-komponentowe układy fizyczne, w których każdy z komponentów składa się z dowolnej liczby cząstek nierozróżnialnych: dwa kondensaty Bosego-Einsteina splątane przy pomocy dwóch różnych oddziaływań oraz ściśnięty stan próżni będący wynikiem parametrycznej konwersji w dół. W obu przypadkach zastosowane kryterium pozwala wykryć splątanie kwantowe, przynajmniej dla pewnych zakresów parametrów.

2) Praca [H8], w oparciu o znany izomorfizm pomiędzy kutrytową przestrzenią Hilberta i podprzestrzenią symetryczną dwukubitowej przestrzeni Hilberta, wprowadza formalizm pozwalający reprezentować dwu lub wielokutrytowe operatory Bella dla w zasadzie dowolnych nierówności Bella jako operatory działające na iloczynie tensorowym dwóch lub wielu symetrycznych podprzestrzeni przestrzeni dwukubitowych. W szczególności reprezentacja ta pozwala przedstawić operator Bella, który realizuje maksymalne łamanie jednej z najbardziej znanych nierówności Bella wprowadzonej przez Collinsa i współpracowników (zwana powszechnie nierównością CGLMP) jako kombinacja optymalnych operatorów dla kilku nierówności Bella wprowadzonej przez Clausera i współpracowników (zwana dalej nierównością CHSH) i nierówności Mermina. Jest to cenna obserwacja ponieważ pozwala ona poniekąd zrozumieć dość nieoczekiwany fakt, że stan osiągający maksymalną wartość nierówności CGLMP nie jest maksymalnie splątany pomimo tego, że nierówność ta definiuje ścianę odpowiedniego wielościanu Bella. Stan ten musi być bowiem odpowiednią kombinacją liniową stanów osiągających maksymalną wartość dla obu powyższych optymalnych operatorów.

Nawiasem mówiąc wydaje się, że można wykorzystać podejście zaprezentowane w pracy [H8] do skonstruowania nierówności Bella (zmodyfikowanej nierówności Collinsa i współpracowników), która będzie osiągała wartość optymalną dla stanu maksymalnie splątanego dwóch kutrytów. Mianowicie, poprzez odpowiedni dobór parametru w owym operatorze Bella przed częścią odpowiadającą nierównościom CHSH lub nierówności Mermina można go tak zmodyfikować, aby jego maksymalna wartość własna była realizowana właśnie przez stan maksymalnie splątany. Następnie, otrzymanemu w ten sposób operatorowi należałoby, odwracając izomorfizm użyty w pracy [H8], przypisać nierówność Bella.

Praca [H9] podaje bardzo ciekawe alternatywne sformułowanie nieklasyczności typu Bella, które nie jest oparte na zbiorach warunkowych rozkładów prawdopodobieństw (czy też równoważnie wartości oczekiwanych) tak jak ma to miejsce w tradycyjnym ujęciu. Tutaj wartości oczekiwane zastąpione są pewną funkcją złożoności Kołmogorowa ciągów wyników uzyskanych w eksperymencie Bella dla par ustawień obu obserwatorów, która ma charakter metryki. Używając owej wielkości wyprowadzono odpowiednik jednej z najbardziej podstawowych nierówności Bella, tzn. wspomnianej już nierówności CHSH. Jej łamanie oznacza, że ciągi bitów otrzymane w eksperymencie Bella dla czterech par kombinacji ustawień pomiarowych nie mogą być odtworzone przy pomocy dwóch niezależnych maszyn Turinga, dla których danymi wejściowymi są ciągi ustawień pomiarowych oraz zmienne ukryte reprezentujące korelacje klasyczne pomiędzy maszynami. Złożoność Kołmogorowa jest w ogólności wielkością niewyznaczalną, co ogranicza jej stosowalność w eksperymencie. Można jednak wielkość tę przybliżyć używając długości ciągu skompresowanego przy użyciu dostępnych algorytmów kompresji danych. Uzyskano w ten sposób nieco inną wersję nierówności typu CHSH, którą następnie przetestowano w eksperymencie wykonanym w laboratorium w Singapurze na splątanych parach fotonów.

3) W kolejnym podzbiórce, składającym się z prac [H1,H2,H4], badano przejawy nieklasyczności w zjawiskach interferometrycznych. W pracy [H4], opublikowanej zresztą w bardzo dobrym *Physical Review Letters*, sformułowano model optyki liniowej w ramach tzw. uogólnionych teorii probabilistycznych—ogólnego formalizmu pozwalającego na opis (probabilistycznych) teorii fizycznych takich jak mechanika kwantowa, ale nie tylko. Celem było zbadanie, czy pewne efekty charakteryzujące cząstki nierozróżnialne

jak efekt grupowania się fotonów na wyjściu z multiportu jest pokłosiem czysto-matematycznego formalizmu mechaniki kwantowej, czy raczej wynika z pewnych uniwersalnych i niezależnych od tego formalizmu zasad fizycznych. Co ciekawe, pokazano również, że otrzymany uogólniony probabilistyczny model optyki liniowej przewiduje istnienie multiportu, który charakteryzuje się wyższym prawdopodobieństwem grupowania niż pozwala na to mechanika kwantowa. Jest to więc w pewnym sensie analog znanych z nielokalności Bella korelacji, zwanych pudłem PR, które osiągają maksymalną wartość algebraiczną nierówności CHSH, spełniając jednocześnie fizyczną zasadę niesygnalizowania. W pracy [H4] udało się sformułować dodatkowy warunek, który w przypadku trzymodowym pozwala obniżyć prawdopodobieństwo grupowania do wartości kwantowo-mechanicznej $2/3$.

W pracy [H2] sformułowano ogólną metodę wytwarzania wielocząstkowych stanów splątanych w oparciu o schemat interferencyjny wprowadzony już jakiś czas temu przez Yurke'a i Stolera i zilustrowano go na kilku przykładach: dwukubitowy stan Bella oraz trzykubitowe stany GHZ i W . Praca [H1] to kontynuacja [H2], w której pokazano jak w owym schemacie można wytwarzać W o dowolnej liczbie kubitów. W pracy oszacowano również prawdopodobieństwo sukcesu otrzymania stanu w tym schemacie, a także porównano go z innymi, znanymi z literatury i wykorzystującymi optykę liniową schematami pozwalającymi wytwarzać stany W . Jako że jednym z kluczowych elementów schematu jest postselekcja zdarzeń wyjściowych, w kolejnej pracy [O1], nie wchodzącej do cyklu, dr Markiewicz przebadał czy nie rodzi ona problemów z punktu widzenia eksperymentu Bella.

Uważam, że projektowanie schematów tego typu ma duże znaczenie aplikacyjne ponieważ stany typu W , czy ogólnie splątane stany symetryczne mają wiele zastosowań, np. w metrologii kwantowej. Zabrakło mi jednak w pracach Habilitanta porównania z pracami dotyczącymi wytwarzania stanów typu Dicke w innych układach fizycznych jak np. kondensat Bosego-Einsteina [B. Lücke *et al.*, Phys. Rev. Lett. **112**, 155104 (2014)].

4) W pracy [H6] dokonano krytycznej oceny wniosków sformułowanych w szeregu prac innych autorów mówiących, że klasyczny strumień światła może przejawiać nieklasyczość w postaci łamania nierówności CHSH w scenariuszu kontekstualności. Pokazano bowiem w [H6], że w tym przypadku nie są spełnione reguły rozłączności zdarzeń, które determinują maksymalną wartość „klasyczną” nierówności CHSH. Prawidłowo wyznaczony w tym przypadku odpowiednik nierówności CHSH nie może być złamany. W pracy [H3] poddano natomiast krytycznej ocenie pracę Tana, Wallsa i Colleta [E67] wprowadzającą bodaj pierwszy schemat do testowania nieklasyczości Bella dla pojedynczego fotonu i pokazano, że rozumowanie zaprezentowane w tej pracy zawiera lukę. W szczególności można stworzyć model ukrytych zmiennych opisujący korelacje wytworzone w tym schemacie, co oznacza, że nie pozwala na ujawnienie nieklasyczości jednego fotonu. W pracy [H3] skonstruowano następnie „prawidłową” nierówność Bella oraz pokazano jak zmodyfikować schemat TWC tak, aby prowadził on do ujawnienia nieklasyczości fotonu.

Podsumowując, wysoko oceniam powyższy zbiór prac. Przedstawiono w nim szereg interesujących i inspirujących rezultatów, które w mojej ocenie mają duże znaczenie dla rozwoju kwantowej informacji, podstaw teorii kwantów czy też optyki kwantowej. Wyróżniłbym tutaj pracę [H7] ze względu na to, że wprowadza ona nowy ogólny warunek konieczny i dostateczny pozwalający wykrywać splątanie w układach kwantowych oraz pracę [H8] ponieważ rzuca ona nowe światło na fakt, że nierówność CGLMP nie jest łamana optymalnie przez stan maksymalnie splątany. Cenne są również prace [H3] oraz [H6] ponieważ rozstrzygają one złożone koncepcyjnie problemy, ale także ze względu na to, że porządkują one naszą wiedzę o dziedzinie. Bardzo pozytywnym aspektem tego wniosku jest wszechstronność Habilitanta. Choć prace są powiązane tematycznie, to jednak dotyczą różnych form nieklasyczości jakie można w układach kwantowych obserwować bądź wykorzystują inne metody do ich badania, co też dobrze świadczy o warsztacie naukowym dr. Markiewicza. Na uwagę zasługuje również fakt, że w swojej działalności naukowej dr. Markiewicz nie boi się on dokonywać krytycznej analizy prac innych autorów, czego wyrazem są wspomniane już prace [H6,H3]. Na koniec dodam jeszcze, że autoreferat jest starannie przygotowany, co jak wynika z moich ostatnich obserwacji nie jest częstym zjawiskiem. Dzięki temu jest on wystarczający do zrozumienia wyników zawartych w pracach składających się na osiągnięcie habilitacyjne.

Wszystkie prace składające się na osiągnięcie habilitacyjne są wieloautorskie, a liczba współautorów zmienia się od jeden do pięć. Aby czynić zadość wymaganiom ustawowym do wniosku dołączono stosowne oświadczenia Habilitanta i jego współautorów dotyczących wkładów w ich powstanie. Uważam, że na ich podstawie można wyodrębnić indywidualny, merytoryczny udział dr. Markiewicza w powstanie każdego z artykułów. Oceniam, że udział ten był znaczący, a w przypadku niektórych publikacji jak np. [H6,H7,H8] był on nawet dominujący, co jest zresztą potwierdzone tym, że dr Markiewicz w tych pracach jest pierwszym autorem.

Całkowity dorobek naukowo-badawczy

Łączny dorobek publikacyjny dr. Markiewicza w momencie składania wniosku to 32 artykuły, z czego 31 ukazało się w międzynarodowych czasopismach fizycznych takich jak wspomniane już *Physical Review A* czy *Physical Review Letters*, a także w *Quantum* czy *PNAS*. Jedna praca została opublikowana w recenzowanych materiałach pokonferencyjnych. Habilitant jest również współautorem aż ośmiu preprintów umieszczonych w bazie arXiv.org, które również zostaną zapewne opublikowane; warto tutaj dodać, że od momentu złożenia tego wniosku liczba opublikowanych prac Habilitanta wzrosła o trzy. 20 z tych 32 prac powstało po obronie doktoratu, co oznacza, że przed doktoratem Habilitant był współautorem aż 11 prac; w obu przypadkach jest to wynik z pewnością ponadprzeciętny. Warto również zwrócić uwagę na fakt, że poziom badań Habilitanta, mierzony jakością czasopism w których on publikuje, jest od lat wysoki.

Tematyka pozostałych prac w dorobku Habilitanta jest zbliżona do tej podejmowanej w osiągnięciu habilitacyjnym i warto tutaj wspomnieć o pracy [O2], opublikowanej w *Physical Review Letters*, która wprowadza nową, zainspirowaną teorią złożoności komunikacyjnej, definicję nieklasyczności w scenariuszu, w którym na danym układzie kwantowym pomiary są wykonywane w sposób sekwencyjny. Można jednak dostrzec w dorobku Habilitanta próby wyjścia poza tą tematykę. Jest on np. współautorem prac dotyczących metrologii kwantowej [O17,O6,O4], które są zapewne pokłosiem dwóch staży naukowych odbytych w ICFO w Barcelonie (w grupie prof. A. Acína) oraz na Uniwersytecie Warszawskim (w grupie prof. R. Demkowicza-Dobrzańskiego), czy też zmatematyzowanej pracy dotyczącej uśredniania po grupach Liego [O18] lub wreszcie pracy dotyczącej transferu stanów kwantowych w łańcuchach spinowych napisanej wspólnie z prof. M. Wieśniakiem [O21].

Wedle Web of Science prace dr. Markiewicza zyskały ponad 370 cytowań, a jego H-indeks równy jest 10; wg Google Scholar liczby te są dużo wyższe. W obu przypadkach liczba cytowań jest wysoka, powiedziałbym nawet, że przewyższa średnią liczbę cytowań z wniosków habilitacyjnych, które widziałem. Świadczy to dobrze o rozpoznawalności prac naukowych Habilitanta.

Znacznie gorzej wygląda jego dorobek od strony aktywności konferencyjnej. Wygłosił on bowiem tylko cztery referaty na międzynarodowych konferencjach naukowych, w tym dwa zaproszone oraz kilka seminariów w polskich ośrodkach. Uważam, że Habilitant powinien popracować na tym aspekcie swojego dorobku. Będzie to z korzyścią dla niego, ponieważ zwiększy rozpoznawalność jego prowadzonych przez niego naukowych na arenie międzynarodowej.

Dr Markiewicz odbył wiele staży naukowych, przy czym aż trzy już jako doktorant, w tym dwa kilkumiesięczne w zagranicznych ośrodkach (ICFO w Barcelonie oraz CQT w Singapurze). Warto tutaj wspomnieć, że pobyt w ICFO zaowocował najbardziej cytowaną pracą w dorobku Habilitanta dotyczącą metrologii kwantowej; wg portalu Web of Science zebrała ona aż 130 cytowań. Ponadto, dr Markiewicz odbył trzy staże podoktorskie w czołowych ośrodkach w Polsce, w których można zajmować się podstawami teorii kwantów oraz kwantową informacją takich jak Uniwersytet Warszawski (grupa prof. R. Demkowicza-Dobrzańskiego) oraz Uniwersytet Jagielloński (grupa prof. K. Życzkowskiego). O ile fakt, że Habilitant odbył wiele staży naukowych w swojej karierze jest wyróżniającym aspektem jego dorobku, to szkoda, że nie zdecydował się on na zagraniczny staż podoktorski. Nieco zaskakujący jest też fakt, że w czasie łącznie aż pięciu lat staży podoktorskich powstały tylko trzy publikacje we współpracy z grupami, w których te staże się odbyły; całkowita liczba publikacji powstałych w tym okresie jest jednak dużo większa. Tak czy inaczej, uważam, że jeden z wymogów ustawowych, który mówi, że habilitant „wykazuje się istotną aktywnością

naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej” jest w przypadku tego wniosku spełniony.

Dr Markiewicz był kierownikiem jednego grantu badawczego finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki w ramach programu FUGA, dzięki któremu odbył trzyletni staż naukowy na Uniwersytecie Jagiellońskim w Krakowie. Był on również kierownikiem mniejszych projektów finansowanych przez Uniwersytet Gdański, a także wykonawcą w kilku innych grantach.

Habilitant napisał 10 recenzji dla czasopism naukowych, co również poniekąd świadczy o Jego rozpoznawalności w środowisku, choć muszę przyznać, że liczba ta jest dość skromna jak na ten etap kariery naukowej.

Działalność dydaktyczna oraz działalność popularyzatorska są raczej symboliczne i sprowadzają się do prowadzenia ćwiczeń z algebry liniowej w jednym roku akademickim oraz jednego wykładu popularyzatorskiego. Szkoda jednak, że dr Markiewicz nie prowadził żadnego wykładu obieralnego; byłoby to z korzyścią dla studentów, a także rozwoju dziedziny w Polsce.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę całokształt działalności naukowej dr. Markiewicza, uważam, że wszystkie wymogi ustawowe są w przypadku tego wniosku spełnione, i to z nadatkiem. Badania naukowe, które realizuje Habilitant są od lat wysokiej próby i przekładają się w znaczący sposób na rozwój kwantowej informacji, teorii kwantów oraz optyki kwantowej, a przez to także fizyki. Ponadto, z powodzeniem realizował on badania naukowe w więcej niż jednym ośrodku naukowym. W mojej ocenie w pełni zasługuje on na stopień doktora habilitowanego i dlatego niniejszym rekomenduje nadanie tego stopnia dr. Markiewiczowi.