

Ocena dorobku naukowego dr. Wiesława Laskowskiego w związku z postępowaniem o nadanie stopnia naukowego doktora habilitowanego

Działalność badawcza dr. Wiesława Laskowskiego mieści się w kręgu podstaw mechaniki kwantowej z elementami optyki kwantowej oraz kwantowej teorii informacji. Habilitant swojej od początku kariery naukowej jest związany z zespołem prof. Marka Żukowskiego. Jako przewidziane ustawą osiągnięcie badawcze dr Laskowski przedstawił cykl dziesięciu prac opatrzony tytułem „Wykrywanie, analiza i charakteryzacja nieklasycznych własności stanów kwantowych. Teoria dla eksperymentu”. Pośród prac objętych osiągnięciem badawczym trzy opublikowano na łamach prestiżowego pisma Physical Review Letters, a pozostałe w renomowanym piśmie Physical Review A. We wszystkich publikacjach, poza jedną, szacowany wkład habilitanta majoryzuje wkłady pozostałych autorów. Publikacje mają charakter wieloautorski, przy czym w pięciu publikacjach dr Laskowski jest pierwszym autorem.

O ile istnieje ścisły związek tematyki cyklu z tematem doktoratu pt. „ Nieklasyczne korelacje układów złożonych z wielu kubitów” obronionego w 2007 pod kierunkiem prof. Marka Żukowskiego na Uniwersytecie Gdańskim, o tyle nowością obecnego cyklu, poza – rzecz jasna – oryginalnym charakterem samych rezultatów, jest zdecydowanie konsekwentne ukierunkowanie badań na potencjalne zastosowania eksperymentalne.

Zasadniczym celem badań było wykrywanie, analiza i charakteryzacja nieklasycznych korelacji stanów kwantowych ze szczególnym uwzględnieniem możliwej optymalizacji tj. minimalizacji liczby oraz zwiększenia prostoty wykonywanych pomiarów. W pracach [A], [B] (odnośniki przytaczam tu za - noszącym, przynajmy, pewne piętno pośpieszności - tekstem autoreferatu habilitanta) podano systematyczną metodę konstrukcji nieliniowych świadków splątania. Chociaż pojęcie nieliniowego świadka splątania było znane, (m.in. już w 2003 roku w języku kwadratowego świadka splątania wyrażono pewne entropowe kryterium splątania) to w pracy [A] zaproponowano elegancką, opartą o intuicję geometryczną konstrukcję biliniowego świadka, którą definiuje pewien superoperator G , który może pełnić rolę metryki w przestrzeni Hilberta Schmidta. Metoda ta automatycznie odtwarza operatory liniowych świadków splątania jeżeli superoperator G jest rzędu jeden. W pracy [B] pokazano jak istotnie zmniejszyć liczbę wykonywanych pomiarów poprzez usunięcie szeregu pomiarów, co w istotny sposób ułatwia testowanie doświadczalne, ale zachowuje się kryterium np. pozwala wykrywać splątanie związane. Należy podkreślić, że struktura kryterium jest uniwersalna tzn. obejmuje warunki konieczne i dostateczne. Jedynie pewne zastrzeżenia może budzić termin „metryka”, bo założenie dodatniości operatora G nie pociąga automatycznie gwarancji nieznikania formy kwadratowej na dowolnym stanie.

Wyprowadzoną metodę autorzy stosują z powodzeniem w wybranych przykładach, wykorzystując własności tensora korelacji w przypadku dwu- i wielocząstkowym.

Prace [C],[D] kontynuują zastosowanie omówionej powyżej techniki na gruncie badań problemu k-separowalności. Temat ten przez długi czas wydawał się w literaturze budzić zbyt mało uwagi ze względu na skomplikowany charakter problemu. K-separowalność oznacza na gruncie stanów mieszanych, że dany stan jest kombinacją wypukłą iloczynów k stanów, przy czym, podkreślimy, rodzaje podziałów pomiędzy różnymi elementami kombinacji wypukłej nie muszą się zgadzać. W przypadku stanów czystych stawia się tu pytanie, czy stan czysty jest produktem k stanów czystych bez szczegółowej specyfikacji jakie grupy podukładów elementarnych (np. kubitów) owe stany opisują. Ważny jest tu fakt, że brak k-produktowości stanu czystego oznacza, że układ posiada co najmniej $N/(k-1)$ (w sensie najmniejszej majoryzującej liczby całkowitej) wzajemnie splątanych podukładów elementarnych (gdzie N to liczba podukładów elementarnych). Praca [C] początkuje badania rozstrzygając tylko dla stanów czystych, kiedy stan czysty wymaga korelacji N-cząstkowych, a więc nie jest 2-separowalny, przy czym test angażuje wielocząstkowe tensory korelacji. W pracy [D] wyprowadzono i zastosowano szereg warunków splątania k-kubitowego, które jest przyjazne eksperymentowi w tym sensie, że – co dość znaczące - angażuje wyłącznie dwucząstkowe tensory korelacji.

Praca [E] zawiera systematyczne badanie siły kwadratowego kryterium splątania opracowanego w publikacji [A] do stanów mieszanych, które powstają poprzez działanie globalnego białego lub kolorowego szumu oraz działania lokalnych identycznych kanałów kwantowych: deloparyzującego, defazującego oraz zmniejszającego amplitudę (*amplitude-damping*). Badany jest tutaj próg szumu, dla którego zachodzi niszczenie splątania, jak również próg, dla którego znika łamanie rodziny korelacyjnych nierówności Bella dla wielu kubitów. Jeden z zasadniczych rezultatów pracy stanowi znalezienie nowych rodzin stanów splątanych, które spełniają owe klasy nierówności Bella w granicy nieskończonej liczby cząstek. Bardzo interesujące jest to, że po stosownym przeskalowaniu odpowiednie wartości progowe pozostają co najwyżej w zależności kwadratowej. Nasuwa się pytanie czy takie skalowanie ma jakiś związek z fundamentalnymi ograniczeniami na rolę mechaniki kwantowej w zadaniach z zakresu kwantowego obliczania.

O ile w powyższych analizach brano pod uwagę pewną szeroką, jednak nie wyczerpującą klasę nierówności Bella, o tyle praca [F] zawiera numeryczną analizę krytycznej widzialności z punktu widzenia istnienia modelu ukrytych zmiennych przy wybranych liczbach pomiarów lokalnych von Neumanna w oparciu o programowanie liniowe. W pełni wybrzmiewa w tej pracy cel zawarty w podtytule osiągnięcia („Teoria dla eksperymentu”), bowiem widzialność jest absolutnie podstawowym parametrem każdego interferometrycznego doświadczenia wykonywanego na stanach splątanych. W pracy przedstawiono imponujący zestaw uzyskanych krytycznych widzialności dla 57 różnych stanów czystych lub mieszanych zakłóconych białym szumem. Porównano wyniki symulacji numerycznych z wynikami rezultatów eksperymentalnych pokazując, że widzialność uzyskana w doświadczeniu była wystarczająca, aby zagwarantować nielokalność. Interesujące jest uzyskanie krytycznej

widzialności równej 1 dla pewnych stanów reprezentujących splątanie związane, co odpowiada istnieniu modelu ukrytych zmiennych dla tych stanów. Dotyczy to stanów Durra i Ciraca oraz biseparowalnych stanów Bennetta i współpracowników skonstruowanych w oparciu o nierozszerzalne bazy iloczynowe. Wagę tego ostatniego wyniku dodatkowo zwiększa rezultat Vertesiego i Brunnera [Phys. Rev. Lett. (2012)], którzy pokazali, że są stany biseparowalne, nie dopuszczające istnienia modelu lokalnych ukrytych zmiennych. Praca zawiera m.in. analityczny model ukrytych zmiennych dla dwóch ustawień dla 4-kubitowych stanów Dura i Ciraca. Z analizy numerycznej wynika też m.in. że dla dwóch ustawień naturalne uogólnienie nierówności CHSH [R. Augusiak *et al.*, Phys. Rev. A (2006)] odtwarza próg widzialności dla dowolnych modeli ukrytych zmiennych. Wyniki omawianej pracy stanowią bardzo ciekawą i wartościową bazę danych dla badaczy poszukujących silnych nierówności Bella. Zachodzi pytanie, czy użyty w publikacji program nie mógłby być rozszerzony w taki sposób, aby reprodukcować pewne hiperpowierzchnie odpowiadające nowym nierównościom Bella.

Praca [G] również podąża tropem numerycznym, koncentrując się jednak na dwucząstkowych kubitowych stanach czystych. W badaniach wyróżniono także szczególną klasę nierówności Bella tzw. CGLMP (od pierwszych liter nazwisk autorów pracy, w której została wprowadzona) choć niezależnie przeprowadzono badania krytycznej widzialności pozwalających na istnienie lokalnego realistycznego modelu ukrytych zmiennych. W dalszym ciągu celem autorów jest znalezienie krytycznych widzialności, przy czym tutaj zamiast dyskretnej rodziny stanów, mamy ciągła dwuparametryczną rodzinę obejmującą wszystkie możliwe rzędy Schmidta. Interesujące jest, że najmniej wrażliwe na szum (tj. dopuszczającą najniższą krytyczną widzialność) okazały się być stany rzędu Schmidta 2. Zaobserwowano też, że różnica w widzialności między schematem z eksperymentalnie przystępną klasą pomiarów (Rys. 1 w pracy [G]), a schematem z ogólnymi pomiarami nie wynosi więcej niż 1%. Interesujące jest, że użyte narzędzia nie doprowadziły do wykrycia braku lokalnego realizmu w żadnej z 4 klas dwucząstkowych stanów o splątaniu związanym, w tym – co szczególnie istotne – także w klasie stanów reprezentujących klucz kryptograficzny, co może przemawiać za prawdziwością słynnego przypuszczenia Ashera Peresa, które mówi, że dwucząstkowe stany spełniające PPT nie łamią żadnej nierówności Bella.

Obecność w omawianym cyklu pracy [I] ma szczególne uzasadnienie, ponieważ wprowadza ona narzędzie ważne dla dwóch kolejnych artykułów [J,K] o znaczeniu nie do przecenienia dla eksperymentalnej detekcji splątania. Zasadniczą obserwacją stanowiącą punkt wyjścia pracy [I] jest stwierdzenie, że suma kwadratów wartości średnich wzajemnie antykomutujących dychotomicznych obserwabli nie może przekraczać jedności. Ta obserwacja pozwala na systematyczną reprodukcję znanych nierówności ilustrujących monogamię kwantowych korelacji oraz wyprowadzenie kilku innych w ramach jednego spójnego obrazu, przy czym zjawisko ograniczenia przez jedynkę korelacji reprezentowanych przez wzajemnie antykomutujące obserwable nazywają tu autorzy słusznie komplementarnością korelacji. Nie ma wątpliwości, że oprócz nowatorskiego narzędzia w

obszarze badań nad monogamią korelacji w artykule tym pojawia się nowa obserwacja teoretyczna, która - o czym poniżej - doprowadzi do ważnych zastosowań doświadczalnych.

Prace [J,K] zawierają zarówno propozycje jak i doświadczalne zastosowania metod detekcji splątania niezależnych od stanu kwantowego. Praca [J] proponuje dwie metody – pierwszą, dla dwukubitowych stanów czystych opartą jedynie o pomiary lokalne, z ewentualnym filtrowaniem, co pozwala zawsze zrekonstruować bazę Schmidta, a co za tym idzie, wykryć splątanie z udziałem tylko dwóch pomiarów korelacyjnych. Drugim, bardzo finezyjnym podejściem jest warunek przekroczenia wartości 1 przez sumę kwadratów elementów tensora korelacji wzmocniony o schemat nazywany przez autorów drzewem decyzji, która oparta jest o dowiedziony w pracy [I] i omawiany powyżej fakt mówiący, że suma wartości średnich wzajemnie antykomutujących operatorów nie może przekroczyć jedynki. Praca [K] rozszerza tę metodę do przypadku wielu kubitów. Imponująco prezentuje się tu porównanie schematu z losowymi pomiarami oraz schematu z uwzględnieniem drzewa decyzji, które to porównanie wyraźnie sugeruje eksponencyjny zysk w detekcji splątania w porównaniu z pierwotną metodą. Bez wątplenia schemat z drzewem decyzji należy uznać za jedno z zasadniczych osiągnięć przeprowadzonego cyklu badań.

Metoda filtrowania - jakkolwiek możliwa do zastosowania jedynie dla dwucząstkowych stanów czystych - pokazuje, że czasem w obszarze, który wydawał się już w pełni zamknięty dociekliwość badawcza może znaleźć interesujące fenomeny.

Prezentowany cykl prac stanowiący osiągnięcie badawcze habilitanta zawiera szereg bardzo wartościowych rezultatów. Elegancki schemat detekcji splątania w oparciu o intuicję geometryczną w przestrzeni Hilberta-Schmidta na trwałe wpisał się w teorię detekcji kwantowego splątania i może być w pewnym sensie uważany za rezultat klasyczny tej dziedziny. Wyniki dotyczące widzialności krytycznej stanowią znakomitą bazę dla dalszych badań, a także informują o istnieniu lokalnego modelu ukrytych zmiennych dla szeregu stanów mieszanych. Jakiegokolwiek poszukiwania spójnego obrazu łamania lokalnego realizmu przez stany kwantowe będzie musiało uwzględnić prezentowane w tym zakresie wyniki, a dla doświadczalników przeprowadzających kalibrację źródeł splątania obszerna tabela może stanowić pierwszy punkt odniesienia w kontekście pytania, czy w laboratorium już pojawiły się silne tj. wykluczające lokalny realizm korelacje. Zbiór metod oparty o komplementarność korelacji definiowanych przez antykomutujące operatory, niezwykle ważny z eksperymentalnego punktu widzenia, jest przykładem, w jaki sposób przenikliwa obserwacja może prowadzić do bardzo znaczącej redukcji eksperymentalnego wysiłku. Zwraca uwagę obecność autora w pracach doświadczalnych z udziałem światowej klasy eksperymentatora prof. Haralda Weinfurtera, co pośrednio dodatkowo świadczy o wadze uzyskanych wyników.

Oprócz 10 publikacji wchodzących w skład osiągnięcia badawczego habilitant jest współautorem innych 16 publikacji, w tym czterech w *Physical Review Letters* i sześciu w *Physical Review A*, pośród których są prace napisane poza ośrodkiem gdańskim. Tematyka tych publikacji dotyczy przede wszystkim nierówności Bella, ale znajdują się tam też prace z interferometrii kwantowej, gier kwantowych i znaczenia informacji Fishera dla detekcji splątania. Pośród nich za szczególnie wartościowe można uznać prace o istnieniu stanów N-

kubitowych, których braku lokalnego realizmu nie można wykryć przy pomocy N-cząstkowych korelacji [8], praca o charakterystycznych operatorach Bella [10] i artykuł pokazujący związek informacji Fishera z detekcją splątania [16]. Prace autora były cytowane nie mniej niż 246 razy (bez autocytowań), ich indeks H wynosi 11, a czynnik nazywany powszechnie sumarycznym impact factorem przekracza 103, co odpowiada więcej niż dobremu współczynnikom bibliometryczne na tym etapie kariery naukowej.

W zakresie udziału w projektach badawczych dossier habilitanta jest bardzo bogate. Habilitant brał lub bierze udział w znacznej liczbie projektów międzynarodowych, w tym w trzech europejskich, dwóch polsko-austriackich i dwóch polsko-niemieckich, a także w kilku krajowych, pośród których jest prestiżowy projekt TEAM Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej. Należy tu w szczególności podkreślić, że habilitant kieruje obecnie krajowym projektem SONATA bis przyznanym mu przez Narodowego Centrum Nauki na lata 2013-2017.

O wadze osiągnięć habilitanta świadczy pośrednio fakt, że wspomniana już Fundacja na Rzecz Nauki Polskiej wyróżniła wcześniej habilitanta prestiżowymi stypendiami: stypendium START dla młodych naukowców oraz zagranicznym stypendium KOLUMB wraz ze wspomagającym grantem powrotnym. W tym kontekście nie sposób nie wspomnieć, że dr Wiesław Laskowski spędził ponad półtora roku na naukowych stażach i wizytach naukowych, włączając w to - bodaj najlepszy na świecie - ośrodek z kwantowej interferometrii w Wiedniu, czy czołowy europejski ośrodek z optyki kwantowej - Instytut Maxa Plancka w Garching.

Kandydat do stopnia doktora habilitowanego prowadził w skromnym zakresie zajęcia dydaktyczne - w przeliczeniu na godziny wykładowe w wymiarze około dwóch lat, co wiązało się z częstym zatrudnieniem na stanowiskach czysto badawczych. Warto jednak podkreślić, że z drugiej strony dr Laskowski odnotowuje na swoim koncie znaczący dorobek popularyzatorski: serię wykładów popularyzatorskich i warsztatów w ramach współpracy z Centrum Nauki Eksperyment w Gdyni, udział w charakterze dydaktycznym w projekcie na gruncie województwa pomorskiego, przygotowanie skryptu do przedmiotu „Wstęp do programowania”.

Ponadto dr Laskowski ma osiągnięcia organizacyjne. Trzykrotnie współorganizował jako członek komitetu organizacyjnego międzynarodową konferencję badawczą, przewodził też komitetowi organizacyjnemu naukowego sympozjum, ponadto administruje stroną Instytutu Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki oraz zasiada w senackiej komisji socjalno-mieszkaniowej. Na koniec warto wspomnieć, że habilitant dokonał redakcji technicznej trzech książek, w tym - co warto podkreślić z perspektywy dziedzictwa kultury polskiej - redagowanego przez Emilię Jakimowicz i Adama Miranowicza tomu materiałów biograficznych poświęconych Stefanowi Banachowi (Kraków, 2009).

W podsumowaniu stwierdzam, że w mojej opinii osiągnięcia habilitanta spełniają warunki przewidziane ustawą o stopniach i tytule naukowym w odniesieniu do habilitacji - przy czym niektóre owych warunków spełnione są z dużym nadmiarem - i tym samym popieram wniosek o nadanie dr. Wiesławowi Laskowskiemu stopnia naukowego doktora habilitowanego.

Janusz Jankowski