

Recenzja dorobku naukowego dr. Tomasza Paterka w postępowaniu habilitacyjnym

Pan dr Tomasz Pater uzyskał stopień doktora nauk fizycznych na Uniwersytecie Gdańskim w roku 2007 przedstawiając rozprawę doktorską pt. „Kwantowa komunikacja”. Po uzyskaniu stopnia doktora przebywał na stażach podoktorskich w Instytucie Optyki Kwantowej i Kwantowej Informacji w Wiedniu (lata 2007-2008) oraz Centrum Kwantowych Technologii w Singapurze (lata 2008-2012 oraz 2012-2015). Obecnie jest zatrudniony na stanowisku *assistant professor* na Uniwersytecie Technicznym Nanyang w Singapurze.

Na rozprawę habilitacyjną dra Tomasza Paterka składa się cykl 11 prac oryginalnych opublikowanych w prestiżowych czasopismach naukowych w latach 2008-2015 (jedna praca ukazała się w *Rev. Mod. Phys.*, 7 w *Phys. Rev. Lett.*, oraz po jednej pracy w *Phys. Rev. A* i *New. J. Phys.*). Prace wchodzące w skład są wieloautorskie. Dołączona dokumentacja zawiera oświadczenia wszystkich współautorów określające ich rolę w procesie tworzenia artykułów.

Przedstawione prace dotyczą szeroko pojętych zagadnień związanych z korelacjami w układach kwantowych i wpisują się w nurt badań dotyczących podstaw fizyki kwantowej i kwantowej teorii informacji. Korelacje w układach fizycznych (zarówno klasycznych jak i kwantowych) są często kluczem do zrozumienia fizyki zagadnienia. Naszą wiedzę o układzie zdobywamy analizując różne typy korelacji. Wraz z rozwojem kwantowej teorii informacji problem opisu korelacji nabiera kluczowego znaczenia. Korelacje są kluczowym zasobem komunikacji, która *de facto* polega na skorelowaniu nadawcy i odbiorcy przez wymianę układów fizycznych. Fizyka kwantowa wprowadza nowe subtelne typy korelacji, które nie są dostępne w układach klasycznych – kwantowe splątanie, kwantowy dysonans. Praca habilitacyjna dra Paterka poświęcona jest analizie nieklasycznych korelacji, opisie możliwych miar korelacji oraz praktycznym zastosowaniom nieklasycznych korelacji w pewnych algorytmach kwantowych.

W pracy [A] (5 autorów – wkład dra Paterka wynosi 20%) zaproponowana jest ciekawa metoda wykrywania kwantowego splątania oparta o analizę tensora korelacji dla układu N kubitów. Okazuje się, że wprowadzając naturalny iloczyn skalarny w przestrzeni wektorowej tensorów korelacji można wykazać, że jeśli norma tensora korelacji przekracza pewną wartość graniczną, to odpowiadający mu stan kwantowy jest splątany. Kryterium to jest niezwykle proste jeśli porównamy je np. z kryteriami opartymi o świadków splątania czy też odwzorowania dodatnie. Tym niemniej, w wielu istotnych z punktu zastosowań przykładach, działa w optymalny sposób, np. w rodzinie stanów Wernera dwóch kubitów wykrywa wszystkie stany splątane. Zaletą wprowadzonego kryterium splątania jest wykorzystanie bezpośrednio mierzalnych funkcji korelacji bez konieczności przeprowadzania pełnej tomografii stanu kwantowego, co zwykle jest kosztowną procedurą. Z tego powodu autorzy nazywają je *eksperymentalnie przyjazną metodą wykrywania splątania*. Okazuje się, że dyskutowane kryterium można istotnie wzmocnić, jeśli w przestrzeni tensorów korelacji wprowadzimy uogólniony iloczyn skalarny oparty na metryce Riemanna zdefiniowanej przez

pewną dodatnio określoną macierz. Tak uogólnione kryterium staje się konieczne i wystarczające, tzn. jeśli tensor korelacji odpowiada stanowi splątaniem, to istnieje metryka taka, że norma tensora wyliczona względem tej metryki przekracza pewną wartość graniczną zależną tym razem od wyboru metryki. Co ciekawe zbiór kryteriów parametryzowanych przez dostępne metryki jest istotnie bogatszy niż zbiór świadków splątania – świadek splątania odpowiada metryce, która reprezentowana jest projektorem.

Kryterium splątania z pracy [A] znalazło ciekawe zastosowanie w pracy [E] (5 autorów – wkład dra Paterka 12%), w której zaproponowano schemat detekcji kwantowego splątania w nieznanym stanie przy użyciu niewielkiej liczby pomiarów. Schemat ten oparty jest o znany rozkład Schmidta, który w tym przypadku stosowany jest nie do wektora stanu w przestrzeni Hilberta układu, ale do tensora korelacji, który jest elementem przestrzeni Hilberta tensorów korelacji. Schemat ten został użyty do wykrycia splątania w stanach 2- i 3-kubitowych (eksperymenty przeprowadzono w grupie prof. Weinfurtera w Monachium).

Istotnym elementem kryterium z pracy [A] jest fakt, że w iloczynie skalarnym z dodatnio określoną metryką występują jedynie sumy kolejnych kwadratów funkcji korelacji. Cecha ta odróżnia zasadniczo to kryterium od kryterium opartego na świadkach splątania, gdzie ślad operatora gęstości z operatorem świadka zawiera na ogół wyrazy z różnymi znakami. Jest to dodatkowa zaleta proponowanej metody, dzięki której w praktyce może się okazać, że do wykrycia splątania wystarczy jedynie niewielka liczba pomiarów funkcji korelacji. Problem ten dyskutowany jest w pracy [H] (4 autorów – wkład dra Paterka 35%), w której autorzy pokazują różnice w działaniu obu kryteriów na wielu przykładach znanych stanów (stany diagonalne w bazie Bella, stany izotropowe, stany Wernera, stany Horodeckiego i ich uogólnienia). Dyskutowane kryterium znalazło również zastosowanie w pracy [C] (5 autorów – wkład dra Paterka 40%) do analizy relacji między kwantowym splątaniem a łamaniem nierówności Bella. Przeprowadzono detaliczną analizę stanów Bella, stanów GHZ i ich uogólnień, oraz stanów W poddanych różnym rodzajom szumu. Stosując dyskutowane kryterium wykazano istnienie stanów splątanych, które dopuszczają lokalny opis realistyczny, tzn. spełniają nierówności Bella.

Praca [K] (7 autorów – wkład dra Paterka 25%) zawiera interesującą dyskusję korelacji w układach N -cząstkowych. Okazuje się, że istnieją N -cząstkowe stany, które nie zawierają N -cząstkowych korelacji (w sensie tensora korelacji), ale posiadają N -cząstkowe splątanie, które może być wykryte metodami z pracy [A]. Dodatkowo, wykazano eksperymentalnie łamanie nierówności Bella w pewnych stanach o nieparzystej liczbie kubitów.

Praca [D] (5 autorów – wkład dra Paterka 39%) ponownie wykorzystując wprowadzone wcześniej metody detekcji kwantowego splątania, pokazuje, że istnieją ograniczenia na łamanie nierówności Bella w układach wielu cząstek: łamanie 2-cząstkowych nierówności Bella w układzie cząstek A - B wprowadza ograniczenia na łamanie takich nierówności w układach A - C czy też B - C . Obserwacja ta wskazuje na istnienie komplementarności 2-cząstkowych korelacji w układzie wielocząstkowym i, w analogii do podobnego efektu znanego w teorii kwantowego splątania, została nazwana *monogamią Bella*. Jest to kolejny efekt pokazujący subtelne efekty korelacyjne w kwantowych układach wielocząstkowych.

Kolejne prace [B] (5 autorów – wkład dra Paterka 20%) oraz znakomita praca przeglądowa [G] (5 autorów – wkład dra Paterka 20%) (opublikowana w *Rev. Mod. Phys.*) proponują uniwersalne podejście do nieklasycznych korelacji w oparciu o miarę odległości zdefiniowaną przez entropię względną. Miara taka była już w latach 90. zastosowana jako jedna z

możliwych miar splątania (Plenio i Vedral). Tutaj stosowana jest do korelacji bardziej subtelnych niż samo splątanie. Podejście to w naturalny sposób prowadzi do wyodrębnienia różnych rodzajów korelacji: splątanie, dyskord, dysonans czy też w końcu korelacje klasyczne mierzące odległość stanu klasycznego do najbliższego stanu produktowego. W autoreferacie w języku polskim autor tłumaczy *relative entropy* jako entropię wzajemną (str. 10 i 11). Entropia wzajemna jest zwykle tłumaczeniem *mutual entropy*, którą uważa się za miarę całkowitych korelacji. Natomiast *relative entropy* tłumaczymy w polskiej literaturze jako entropię względną. To pewne zamieszanie pojęciowe wynika zapewne z faktu, że dr Paterk od wielu lat przebywa za granicą i używa na co dzień terminów angielskich. Praca przeglądowa jest podsumowaniem kilkuletniej eksplozji zainteresowania kwantowym dyskordem i stanowi obecnie znakomite źródło informacji dla badaczy zajmujących się problemem kwantowych korelacji. Prace [B] i [G] zostały docenione przez badaczy korelacji kwantowych i były do tej pory wielokrotnie cytowane: [B] 360 razy i [G] 420 razy, co daje w przypadku [B] około 60 cytowań na rok, natomiast w przypadku [G] ponad 70 cytowań na rok.

Za bardzo interesujący uważam wynik z pracy [F] (6 autorów – wkład dra Paterka 16,6%) , w której pokazana jest rola dyskordu w dystrybucji splątania oraz ogólniej protokołach komunikacji. Pokazano, że tzw. *zakomunikowane splątanie* między układami A i B przez wymianę układu C rozumiane jako $E(A|BC) - E(B|AC)$, gdzie $E(A|B)$ oznacza entropię względną, jest ograniczone przez dyskord $D(AB|C)$. Oznacza to, że poprzez wymianę C, który nie posiada splątania z AB, splątanie BC z A może być większe niż początkowe splątanie AC z B. Efekt ten nazwano *dystrybucją splątania przez stany separowalne*. Dodatkowo w pracy [I] (8 autorów – wkład dra Paterka 20%) został zaimplementowany optymalny protokół dystrybucji z wykorzystaniem kubitów zakodowanych w polaryzacji fotonów. Ciekawe jest również zastosowanie kwantowego dyskordu zaprezentowane w pracy [J] (2 autorów – wkład dra Paterka 75%) opublikowanej w *New. J. Phys.* Autorzy pokazują, że stany separowalne, które jak wiadomo nie prowadzą do łamania nierówności Bella, mogą być użyte w pewnych protokołach kwantowo-informacyjnych i prowadzą do wzrostu efektywności w porównaniu z odpowiednim protokołem klasycznym. Jak pokazano w [J] istotnym zasobem, który prowadzi do wspomnianego efektu jest kwantowy dyskord.

Wyniki uzyskane w cyklu prac [A-K] uważam za bardzo wartościowe. Znalazły one duży oddźwięk w środowisku naukowym o czym świadczy np. duża liczba cytowań.

Pozostały dorobek naukowy dra Paterka jest również imponujący i dowodzi bardzo wysokiej aktywności naukowej. Składa się na niego 9 artykułów opublikowanych przed uzyskaniem stopnia doktora, oraz 27 z okresu późniejszego (wg. *Web of Science* dwie prace zostały opublikowane już po złożeniu wniosku). Jego zainteresowania koncentrują się wokół problemów dotyczących podstaw fizyki kwantowej i dotyczą nierówności Bella, założeń twierdzenia Bella, nierówności Leggeta oraz ich zastosowań związanych np. ze złożonością komunikacyjną. Autor badał również modele dopuszczające opis w języku lokalnych zmiennych ukrytych.

Należy podkreślić, że prace dra Paterka były publikowane w najbardziej prestiżowych czasopismach naukowych, np.

- *Information causality as a physical principle* (*Nature* 2009) – 172 cytowań
- *Quantum discord as a resource for remote state preparation* (*Nature Physics* 2012) – 151 cytowań

- *An experimental test for non-local realism* (Nature 2007) – 145 cytowań

Łącznie prace dra Paterka były cytowane około 1700 (w tym 1630 razy bez autocytowań) – dane z Web of Science na koniec stycznia 2016. Indeks H wynosi 17, a tzw. sumaryczny impact factor wynosi 300 (wg autoreferatu). Podaję ten wskaźnik z obowiązku recenzenta chociaż nie jest dla mnie jasne, co on dokładnie mierzy. W przypadku dwóch prac dr Paterk jest jedynym autorem (prace [13] i [18] z załączonej listy). Pozostałe prace są na ogół wieloautorskie. Moim zdaniem nie umniejsza to wagi osiągniętych rezultatów. W większości prac deklarowany wkład dra Paterka jest powyżej średniej (= 100% / liczba autorów). Należy podkreślić, że współautorzy prac to światowa czołówka fizyków pracujących obecnie w dziedzinie podstaw fizyki kwantowej i kwantowej teorii informacji. Obecna sytuacja na rynku pozycji podoktorskich wymusza dużą aktywność publikacyjną najlepiej w dobrej konfiguracji współautorów.

Dr Paterk kierował dwoma projektami naukowymi Ministerstwa Edukacji w Singapurze, oraz jednym projektem na Uniwersytecie Technicznym Nanyang. Był również wielokrotnie wykonawcą projektów Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego oraz Narodowego Centrum Nauki. Wielokrotnie prezentował wyniki swoich badań na konferencjach międzynarodowych (w tym dwa razy jako zaproszony mówca). Był również zaangażowany w komitetach organizacyjnych kilku konferencji międzynarodowych.

W ramach działalności dydaktycznej prowadził wykład kursowy z mechaniki kwantowej, laboratorium fizyczne, oraz ćwiczenia do wykładu z optyki kwantowej i analizy matematycznej. Dodatkowo prowadził zajęcia komputerowe z programowania w C++. Sprawował opiekę naukową nad wieloma pracami licencjackimi i był opiekunem naukowym dwóch doktorantów w Singapurze.

Podsumowanie: uważam, że dorobek naukowy dra Paterka jest wybitny, a przedstawiony cykl 11 prac, składający się na pracę habilitacyjną, z nawiązką spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane kandydatom do stopnia dra habilitowanego. Dlatego wniosek o nadanie panu dr. Tomaszowi Paterkowi stopnia doktora habilitowanego uważam za całkowicie uzasadniony i wnoszę o jego przyjęcie przez Radę Wydziału Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Gdańskiego.

Toruń, 29 stycznia 2016

prof. dr hab. Dariusz Chruściński

