

Warszawa, 05.06.2019

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

**Recenzja osiągnięcia naukowego oraz dorobku naukowego,
dydaktycznego i organizacyjnego dr. Adama Rutkowskiego
w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego**

Sylwetka Kandydata

Dr Rutkowski doktoryzował się w 2011 na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej Uniwersytetu w Toruniu na podstawie rozprawy doktorskiej pt. „*Analiza stanów cyklicznych kwantowych układów złożonych*” przygotowanej pod kierunkiem prof. D. Chruścińskiego. Potem przez rok zatrudniony był na tym samym wydziale jako asystent, a następnie przeniósł się do Krajowego Centrum Informatyki Kwantowej gdzie w latach 2012-2015 odbył staż podoktorski w ramach grantu FUGA finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki. Po zakończeniu stażu przez cztery miesiące był adiunktem na Politechnice Gdańskiej, a od początku 2016 roku jest zatrudniony jako adiunkt w Instytucie Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Gdańskiego.

Osiągnięcie habilitacyjne

Na osiągnięcie naukowe dr. Rutkowskiego pt. „*Wykrywanie i analiza wybranych nielokalnych korelacji w kwantowych układach złożonych: sterowanie EPR i splątanie*” składa się 7 artykułów naukowych opublikowanych w latach 2014-2018 w czasopismach międzynarodowych, z czego sześć w czasopismach fizycznych takich jak prestiżowe *Physical Review Letters* (2 artykuły), bardzo dobre *Physical Review A* (1 artykuł), dobre *Journal of Physics A* (1) oraz raczej niszowe *Open Systems and Information Dynamics* (1). Jedna praca została opublikowana w czasopiśmie matematycznym *Linear Algebra and its Applications*. Wszystkie prace są wieloautorskie, a liczba współautorów mieści się w przedziale od jednego do pięciu. Jak wynika z dokumentacji przesłanej przez Habilitanta, Jego wkład we wszystkie prace jest duży, w przypadku trzech prac znacząco przewyższający wkłady innych autorów, a w jednym przypadku równy wkładowi drugiego autora pracy.

Przedstawiony cykl prac to owoc wieloletnich badań Autora nad detekcją i charakteryzacją splątania kwantowego oraz kwantowego sterowania (ang. *quantum steering*), które cechują wielociałowe układy kwantowe. Oba pojęcia dotyczą sytuacji, w której dwoje obserwatorów współdzieli pewien dwupodukładowy stan kwantowy, przy czym stan ten nazywamy splątany jeżeli nie da się go przedstawić w postaci kombinacji wypukłej iloczynów tensorowych stanów opisujących każdy z podukładów. Pojęcie kwantowego sterowania, zwanego także sterowaniem Einsteina-Podolsky’ego-Rosena, dotyczy z kolei sytuacji, w której jeden z obserwatorów wykonuje pomiary na swoim podukładzie, wytwarzając w ten sposób pewien zbiór stanów kwantowych na podukładzie drugiego obserwatora. Mówimy, że stan dwucząstkowy jest sterowalny kwantowo jeżeli ów zbiór nie może być opisany w ramach tzw. modelu lokalnych stanów ukrytych, który jest odpowiednikiem pojęcia ukrytych zmiennych znanego z twierdzenia Bella. Należy tutaj wspomnieć, że pojęcie kwantowego sterowania jest pochodną splątania kwantowego w tym sensie, że wszystkie stany sterowalne muszą być jednocześnie splątane, choć przeciwna implikacja nie jest w ogólności prawdziwa.

RA

Badania nad splątaniem i sterowaniem kwantowym są ważne ponieważ pojęcia te leżą u podstaw mechaniki kwantowej. Z drugiej strony, są one zasobami dla pewnych protokołów, które w ramach mechaniki kwantowej osiągają większą wydajność niż przy użyciu klasycznych zasobów albo nawet nie mają swojego odpowiednika w mechanice klasycznej, takich jak np. teleportacja kwantowa, kryptografia kwantowa bądź wytwarzanie i wzmacnianie prawdziwej losowości. Toteż zarówno splątanie kwantowe jak i sterowanie kwantowe wraz z metodami ich detekcji są wciąż intensywnie badane w literaturze, choć w ostatnich latach większy nacisk kładzie się na sterowanie, czy nielokalność Bella ze względu na ich użyteczność w kwantowym przetwarzaniu informacji w wersji niezależnej od urządzeń (ang. *device-independent*). Badania naukowe dr. Rutkowskiego będące podstawą tego wniosku wpisują się w ten nurt, a więc są aktualne, a co więcej mają istotny wpływ na jego rozwój.

Opiszę teraz główne wyniki Kandydata opublikowane w załączonym cyklu publikacji, zmieniając nieco kolejność w stosunku do autoreferatu.

Prace [H5] oraz [H7] są poświęcone badaniu świadków splątania, które stanowią jedno z najważniejszych narzędzi pozwalających wykrywać splątanie kwantowe. W pracy [H7], w której wkład Kandydata jest dominujący, zaproponowano metodę „zanurzania” dwucząstkowych świadków splątania w przestrzenie Hilberta o wyższym wymiarze przez branie ich iloczynów tensorowych z operatorami dodatnimi. Jak udowodniono w pracy, metoda ta zachowuje najważniejsze z punktu widzenia detekcji splątania kwantowego cechy danego świadka takie jak nierozkładalność czy optymalność. Należy tutaj podkreślić, że znajdowanie nierozkładalnych świadków splątania, które są optymalne to w ogólności bardzo trudny problem, któremu poświęcono wiele uwagi w literaturze, a praca [H7] proponuje alternatywne rozwiązanie: znany z literatury świadek splątania może być zanurzony w odpowiedni sposób w przestrzenie Hilberta o wyższych wymiarach lokalnych.

Celem [H5] było zaproponowanie metody konstrukcji świadków splątania przy użyciu odwzorowań liniowych, które nie są w ogólności dodatnie, ale spełniają dodatkowy warunek: odwzorowanie sprzężone do danego odwzorowania jest surjekcją ze zbioru projektorów rzędu większego niż jeden na zbiór projektorów rzędu jeden. Inspiracją dla tej metody była zapewne obserwacja, co zresztą potwierdza się w części czwartej pracy zawierającej przykłady, że istnieją niedodatnie odwzorowania liniowe, które są odwracalne i odwzorowania do nich odwrotne są już dodatnie (np. przedyskutowany w pracy przypadek odwzorowania redukcji). Fakt ten został dostrzeżony w komentarzu [D. Chruściński, G. Sarbicki, J. Phys. A **49**, 218003 (2016)] do pracy [H5], w którym pokazano, że odwzorowania liniowe spełniające powyższy „warunek surjekcji” są odwracalne oraz odwzorowania do nich odwrotne są dodatnie, co sprawia, że metoda podana w [H5] sprowadza się de facto do izomorfizmu Choi-Jamiołkowskiego. To znacząco obniża nowatorskość tej pracy ponieważ oznacza, że dowolnego świadka splątania otrzymanego przy użyciu odwzorowania niedodatniego można skonstruować używając odpowiedniego odwzorowania dodatniego. Uważam, że w tej sytuacji lepiej byłoby zamiast pracy [H5] dołączyć do osiągnięcia pracę [P7], która również dotyczy detekcji splątania, i w której Kandydat ma dominujący wkład. Jeżeli jednak Autor uznał, że praca [H5] powinna być częścią osiągnięcia dto powinien był się w autoreferacie odnieść do komentarza [D. Chruściński, G. Sarbicki, J. Phys. A **49**, 218003 (2016)].

Prace [H3,H6] poświęcone są konstrukcji i badaniu odwzorowań dodatnich pomiędzy przestrzeniami macierzowymi, które są używane do detekcji splątania kwantowego i są bezpośrednio związane ze świadkami splątania poprzez wspomniany już izomorfizm Jamiołkowskiego. W pracy [H6], w której Kandydat miał dominujący wkład, podano dość proste uogólnienie pewnego bistochastycznego odwzorowania liniowego zdefiniowanego wcześniej w pracy [M. Miller, R. Olkiewicz, Open Systems & Information Dynamics **22**, 1550011 (2015)] na przypadek operatorów działających na przestrzeniach Hilberta o dowolnym, skończonym wymiarze. Następnie pokazano, że: i) odwzorowanie to jest dodatnie i nierozkładalne, a więc może być wykorzystywane w detekcji splątania kwantowego w stanach dwucząstkowych o dodatniej transpozycji częściowej (podano przykład takiego stanu); ii) odwzorowanie to jest optymalne, co w skrócie oznacza, że świadek splątania odpowiadający temu

odwzorowaniu w izomorfizmie Choi-Jamiołkowskiego wykrywa, nieco upraszczając, największy zbiór stanów splątanych.

Następnie w dwuautorskiej, obszernej pracy [H3], zainspirowanej konstrukcją z pracy [M. Miller, R. Olkiewicz, *Open Systems & Information Dynamics* **22**, 1550011 (2015)], podano bardzo ogólny przepis pozwalający z dwóch danych odwzorowań dodatnich stworzyć kolejne odwzorowanie dodatnie zdefiniowane na operatorach działających na odpowiednio większej przestrzeni Hilberta; Autorzy nazywają tę procedurę sklejaniem (ang. *merging*). W pewnych szczególnych przypadkach pokazano także, że otrzymane odwzorowania są eksponowane, co ma kluczowe znaczenie dla zrozumienia geometrii stożków wypukłych odwzorowań dodatnich, bądź optymalne, co z kolei jest ważne z punktu widzenia detekcji splątania. To bardzo rzetelna praca, prezentująca bardzo dużą liczbę nowych i nietrywialnych rezultatów, które z pewnością zostaną dostrzeżone w środowisku. Uważam, że praca [H3] to jeden z mocniejszych punktów tego wniosku.

W ciekawej pracy [H1] sformułowano bardzo ogólne kryterium splątania oparte na odwzorowaniach działających na przestrzeniach macierzowych, które zachowują hermitowskość, ale mogą być w ogólności nieliniowe; uogólnia ono geometryczne kryteria splątania wprowadzone i przebadane w serii prac [53-58] (numeracja zgodna z autoreferatem). Następnie powiązано je z prawdopodobnie najważniejszym kryterium splątania opartym na dodatnich odwzorowaniach liniowych: dla dowolnego stanu kwantowego, którego splątanie jest wykrywane przez kryterium z [H7] dla pewnego odwzorowania zachowującego Hermitowskość, można skonstruować odwzorowanie dodatnie, które także wykrywa splątanie tego stanu. Wprowadzone kryterium zostało zilustrowane na dużej liczbie przykładów; w szczególności pokazano, że można je przekuć w przyjazne eksperymentowi warunki splątania. Praca [H7] to również mocny punkt tego autoreferatu ponieważ pokazuje nietrywialny związek pomiędzy dwiema różnymi metodami detekcji splątania kwantowego.

Pozostałe dwie prace [H2] i [H4] poświęcone są badaniu kwantowego sterowania. Celem pracy [H4] było skonstruowanie nierówności sterowania w ogólnym scenariuszu z N d -wynikowymi pomiarami o następującej własności: stosunek maksymalnej wartości kwantowej odpowiedniego funkcjonału sterowania do jego wartości klasycznej, oznaczony przez V , zmierza do nieskończoności wraz ze wzrostem liczby wyników d lub liczby pomiarów N . Nierówności Bella o analogicznej własności „nieograniczonego łamania” były już znane. Autorzy, inspirowani się związkami pomiędzy sterowaniem kwantowym i zasadami nieoznaczoności opisanymi w literaturze, podają dwie konstrukcje nierówności sterowania tego typu. Pierwsza wykorzystuje bazy wzajemnie niezależne (ang. *mutually unbiased bases*), a druga algebry Clifforda i prowadzi do nierówności w najprostszym scenariuszu, w którym $d=2$. Warto tutaj zauważyć, że analogiczne nierówności Bella o „nieograniczonym łamaniu”, w których jeden z obserwatorów wykonuje pomiary dychotomiczne nie były wtedy jeszcze znane, choć krótko po publikacji [H4] zostały podane przez Palazuelos i Yina, o czym artykuł [H4] wspomina.

W pracy [H2], opierając się na wynikach pracy [H4], wyprowadzone zostało dolne ograniczenie na V dla pewnej szerszej klasy nierówności sterowania, dla których maksymalna wartość kwantowa osiągnięta jest przez stan maksymalnie splątany dwóch kubitów i obserwabla, których wektory własne tworzą bazy wzajemnie niezależne. Następnie, używając tego ograniczenia, zbadano czy uwzględniając wybrane parametry eksperymentalne takie jak efektywność detektorów czy wierność badanego stanu oraz biorąc pod uwagę fakt, że w rzeczywistości wykonywane pomiary nie będą spełniały warunku wzajemnej niezależności, można uzyskać nieograniczone łamanie tych nierówności. Wyznaczono także zakresy parametrów, dla których można takie łamanie zaobserwować i zaproponowano układ fizyczny, na którym można eksperymentalnie przetestować powyższe wyniki teoretyczne.

Wyniki uzyskane w pracach [H2] i [H4] są ważne dla zrozumienia pojęcia sterowania w układach kwantowych, możliwości aplikacyjnych jakie ze sobą niesie oraz możliwości jego eksperymentalnej detekcji. Zostały one szybko zauważone przez środowisko, o czym poniekąd świadczą cytowania (19 dla [H4] i 6 dla [H2]). Zabrakło mi jednak w autoreferacie wyjaśnienia dlaczego tak ważne jest poszukiwanie nierówności sterowania/Bella, które mogą być łamane w nieograniczony sposób.

RA

Autoreferat czyta się w miarę dobrze, a zaprezentowane wyniki można zrozumieć bez konieczności zaglądania do poszczególnych prac. Tekst autoreferatu nie jest jednak wolny od pewnych potknięć językowych takich jak wyrażenia „*jest dobrze wiadomym*” lub „*bazy ... korespondują*”. Ponadto, zawiera on wiele kalek językowych z języka angielskiego takich jak np. zdanie „*Zauważmy, że ten warunek jest czysto algebraiczny i nie jest nam potrzebna żadna interpretacja geometryczna*” (strona 29), które wydaje się być tłumaczeniem zdania „*Note that the condition (8) is purely algebraic and in principle need not have any geometric interpretation*”, które oznacza, że owy warunek jest czysto algebraiczny toteż może nie mieć interpretacji geometrycznej. Wreszcie, numeracja prac wchodzących do osiągnięcia naukowego na stronie 3 autoreferatu różni się od tej używanej potem w jego treści.

Całkowity dorobek naukowo-badawczy

Całkowity dorobek naukowy Kandydata od strony publikacyjnej to 18 wieloautorskich artykułów naukowych (14 prac powstało po doktoracie), z czego 16 zostało opublikowanych w dobrych (*Journal of Physics A* (1), *Physics Letters A* (2), *EPJD* (1), *OSID* (3)) lub bardzo dobrych czasopismach naukowych (*Physical Review Letters* (2), *Physical Review A* (5), *New Journal of Physics* (1), *Linear Algebra and Its Applications* (1)) o zasięgu międzynarodowym. Jedna praca ukazała się w czasopiśmie spoza listy JCR oraz jedna znajduje się w bazie preprintów *arXiv.org*. Warto tutaj zwrócić uwagę na fakt, że po doktoracie jakość czasopism, w których publikuje Habilitant znacznie się poprawiła z czasopism takich jak *Open Systems & Information Dynamics* i *Europhysics Journal D* na *Physical Review A*, *New Journal of Physics*, a nawet *Physical Review Letters*. To bardzo dobra tendencja, która sprawia, że badania naukowe dr. Rutkowskiego trafiają do szerszego grona badaczy. Z oświadczeń Autora i Jego współautorów wynika, że miał On duży bądź bardzo duży wkład w powstanie wszystkich prac, z czego można wnioskować, że potrafi samodzielnie stawiać i rozwiązywać problemy naukowe. Jedyna rzecz, której zabrakło mi w dorobku dr. Rutkowskiego to praca jednoautorska, która w sposób jednoznaczny potwierdziłaby Jego samodzielność. Uważam jednak, że przedstawiony dorobek jest wystarczający do otrzymania stopnia naukowego doktora habilitowanego.

Tematyka badawcza prac niewchodzących do osiągnięcia, a napisanych po doktoracie to głównie charakteryzacja splątania kwantowego i metody jego detekcji i tutaj warto wspomnieć o pracy [P7], opublikowanej niedawno w *Physical Review A*, w której, uogólniając wyniki pracy [N. Yu, *Phys. Rev. A* **94**, 060101(R) (2016)], pokazano, że dla pewnej klasy wielokudytowych mieszanych stanów kwantowych częściowa transpozycja jest warunkiem koniecznym i dostatecznym separowalności. Warto jednak zaznaczyć, że Kandydat ma w swoim dorobku także prace, które wychodzą poza powyższy schemat jak np. praca [P10], która zawiera ciekawe wyniki dotyczące charakteryzacji tzw. stanów prywatnych (ang. *private states*), z których można wygenerować bezpieczny klucz kryptograficzny oraz praca [P11], w której pokazano, że tzw. wolne obserwable kwantowe pozwalają uzyskać maksymalną wartość kwantową nierówności Bella wprowadzonej przez Clausera, Horne'a, Shimony'ego i Holta (znana nierówność CHSH). Prace te świadczą o tym, że Kandydat z powodzeniem poszerza zakres tematyczny swoich badań.

Łączna liczba cytowań (pomijając autocytowania) jaką uzyskały prace dr. Rutkowskiego to 46, z czego większość, bo ponad 30, to cytowania prac wchodzących w skład osiągnięcia; indeks Hirscha to 4. To nie są niestety duże liczby, ale jednak pokazują, że Jego prace są zauważane w środowisku. Można to po części wytłumaczyć faktem, że aż 7 prac Kandydata zostało opublikowanych stosunkowo niedawno bo w latach 2017-2018, a po części tym, że wiele prac w Jego dorobku dotyczy zagadnień z pogranicza teorii splątania i fizyki matematycznej, a wtedy zawsze trudniej o cytowania. Za swoją działalność naukową dr Rutkowski otrzymał dwie nagrody: zespołową nagrodę Rektora Uniwersytetu Mikołaja Kopernika II stopnia w 2011 roku oraz stypendium marszałka województwa Kujawsko-Pomorskiego w 2009 roku (obie w czasie doktoratu).

W latach 2012-2015, dr Rutkowski był kierownikiem jednego grantu finansowanego przez Narodowe

Centrum Nauki w ramach programu FUGA, co dowodzi, że jest On w stanie skutecznie ubiegać się o finansowanie swoich badań naukowych. Ponadto, był wykonawcą w dwóch innych grantach realizowanych w Gdańsku: grant ERC Advanced „QOLAPS” kierowany przez prof. R. Horodeckiego oraz grant NCN w ramach programu Harmonia 6, którego kierownikiem był prof. W. Laskowski. Część III.D „Wykazu” wymienia jeszcze dwa mniejsze granty finansujące wyjazdy konferencyjne.

Od strony rozpowszechniania swoich osiągnięć naukowych, wniosek dr. Rutkowskiego wygląda dobrze. W części II.J „Wykazu” znajduje się 10 referatów wygłoszonych na międzynarodowych konferencjach, sympozjach itp., choć w przypadku pozycji 3 i 4 nie są wymienione nazwy konferencji, więc trudno określić czy była to prezentacja konferencyjna czy seminarium. Ponadto, w części III.B „Wykazu” znajduje się jeszcze informacja o aktywnym udziale w 10 innych konferencjach, choć zabrakło informacji na czym ten udział polegał; zapewne chodzi o prezentacje plakatów. Na podkreślenie zasługuje fakt, że aktywność dr. Rutkowskiego w tej materii znacząco wzrosła po doktoracie (wszystkie referaty jak i plakaty zostały zaprezentowane po doktoracie).

Dorobek dydaktyczno-popularyzatorski oraz współpraca międzynarodowa

Po otrzymaniu stopnia naukowego doktora, Kandydat wyjechał na trzyletni staż podoktorski do Krajowego Centrum Informatyki Kwantowej w Sopocie, a następnie kontynuował ten pobyt jako wykonawca w dwóch innych grantach. Należy tutaj podkreślić fakt, że KCIK należy do czołówki centrów na świecie, w których można zajmować się kwantową teorią informacji, co też przełożyło się w bardzo pozytywny sposób na rozwój naukowy dr. Rutkowskiego: publikacje w „lepszach” czasopismach naukowych, większą aktywność od strony rozpowszechniania wyników naukowych, zwiększenie współpracy. Poza tym, odbył On dwa miesięczne staże naukowe w Chinach i Singapurze oraz dwie wizyty (Cambridge i Poznań).

Dr Rutkowski ma doświadczenie w prowadzeniu zajęć dydaktycznych; w latach 2007-2011 jako doktorant na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika prowadził ćwiczenia i laboratoria z przedmiotów fizycznych, a od 2017, już jako pracownik Uniwersytetu Gdańskiego, prowadzi wykłady i ćwiczenia z przedmiotów matematycznych. Zabrakło mi jednak w dorobku Kandydata wykładów z przedmiotów fizycznych, w szczególności z tematyki, której dotyczy ta aplikacja.

Dr Rutkowski zdobył również pewne doświadczenie w kształceniu kadry naukowej: w latach 2016-2018 sprawował opiekę naukową w charakterze promotora pomocniczego nad dr. A. Kołodziejskim (rozprawa pt. „*Analiza i charakteryzacja wielopoziomowych układów kwantowych*”), co pozwala sądzić, że będzie On w stanie samodzielnie prowadzić prace doktorskie.

Kandydat był recenzentem 17 artykułów naukowych dla kilku czasopism międzynarodowych: *Physical Review Letters* (3 prace), *Physical Review A* (9), *New Journal of Physics* (1), *Journal of Physics A* (1), *International Journal of Quantum Information* (2), co w pewnym stopniu świadczy o rozpoznawalności dr. Rutkowskiego na arenie międzynarodowej.

Dr Rutkowski ma też pewien dorobek w popularyzacji nauki i upowszechnianiu wiedzy: w 2013 roku wygłosił referat popularnonaukowy na temat światła oraz był wykonawcą w programie „Zdolni z Pomorza – Uniwersytet Gdański” współfinansowanym przez Unię Europejską, którego celem jest wspieranie edukacji uzdolnionej młodzieży. Ponadto, był członkiem dwóch towarzystw naukowych: Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego (2017-2018) oraz Amerykańskiego Towarzystwa Optycznego (2009-2011).

Konkluzja

Biorąc pod uwagę wszystkie pozytywne i negatywne strony tego wniosku, w mojej ocenie spełnia on ustawowe i zwyczajowe kryteria stawiane kandydatom do stopnia naukowego doktora habilitowanego i wnioskuję o nadanie tego stopnia dr. Adamowi Rutkowskiemu.

Remigiusz Augustyniak