

Grudzień 4, 2023r.

## **Recenzja dorobku naukowego dr Katarzyny Siudzińskiej w związku z postępowaniem o nadanie stopnia doktora habilitowanego**

### **Sylwetka Kandydata**

Dr Katarzyna Barbara Siudzińska doktoryzowała się w 2019 roku na Wydziale Fizyki, Astronomii i Informatyki stosowanej Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu na podstawie rozprawy pt. "Evolution of open quantum systems governed by unitarily covariant quantum channels" przygotowanej pod kierunkiem prof. dr. hab. Dariusza Chruścińskiego. Od tego czasu jest zatrudniona na tym samym wydziale na stanowisku asystenta (2019-2021) oraz od 2021 roku jako adiunkt.

### **Osiągnięcie habilitacyjne**

Na osiągnięcie naukowe dr Siudzińskiej pt. " Analiza i zastosowania kanałów Pauligo i ich uogólnień" składa się 13 artykułów naukowych opublikowanych w latach 2019-2023 w czasopiśmie międzynarodowym. Część artykułów opublikowana jest w bardzo dobrym czasopiśmie fizycznym takim jak Physical Review A (5 artykułów), pozostała część opublikowana została w dobrych czasopiśmie takich jak Journal of Physics (6 artykułów), Entropy (1 artykuł) oraz Journal of Physics Communications (1 artykuł). Na uwagę zasługuje fakt, że większość prac jest jednoautorska (10 artykułów), w pozostałych pracach (3 artykuły) wkład Habilitanta jest znaczący. W niniejszym wniosku przedstawiono cykl prac, które koncentrują się na analizie i charakteryzacji kwantowych kanałów Pauliego oraz ich uogólnień. Dla skutecznej komunikacji kwantowej kluczowe jest posiadanie głębokiego zrozumienia sposobu niezawodnego

przekazywania, manipulowania i zabezpieczania informacji kwantowych podczas ich przesyłania przez kanały kwantowe poddane szumom. W rzeczywistości jednak nie istnieją doskonałe, czyli bezszumowe, kanały komunikacyjne, co oznacza, że część informacji ulega utracie w trakcie transmisji. Wszystkie rzeczywiste układy fizyczne oddziałują z otoczeniem, co prowadzi do powstania korelacji i wymusza traktowanie układów kwantowych nie jako izolowanych, ale otwartych. W rezultacie ewolucja podukładów, z których składa się komputer kwantowy, jest nieutnitalna a co za tym idzie nieodwracalna. Zjawisko dekoherencji, jest nieuchronne, gdyż układy kwantowe mogą oddziaływać nawet z próżnią, gdzie nie ma żadnych zewnętrznych cząstek ani pól. W miarę postępu naukowego i technologicznego bramki logiczne oraz inne urządzenia elektroniczne zbliżają się do skali atomowej. W związku z tym rośnie znaczenie opracowywania satysfakcjonujących metod przesyłania danych.

Opisze teraz główne wyniki Kandydatki opublikowane w załączonym cyklu publikacji (artykuły H1-H13 w autoreferacie). Pani dr Siudzińska dzieli swoje osiągnięcie na cztery podkategorie:

1. Geometria na przestrzeni kanałów kwantowych (artykuły H1-H4): Dokonano tutaj geometrycznej charakteryzacji odwzorowań dodatnich i kompletnie dodatnich zachowujących ślad. Ilościowe wyniki dotyczące względnych objętości pozwalają na określenie właściwości losowych kanałów kwantowych.
2. Klasyczne mieszaniny odwzorowań dynamicznych (artykuły H5-H8): Analizowane są tutaj wypukłe kombinacje odwzorowań dynamicznych, wykraczające poza mieszaniny półgrup markowskich, odwzorowań odwracalnych, aż po odwzorowania komutatywne.
3. Poprawa właściwości komunikacyjnych kanałów za pomocą szumów (artykuły H9-H12): autorka Wykorzystuje dekoherencję i klasyczne szумы do poprawy pojemności klasycznej i innych miar wydajności kanałów kwantowych. W przypadku klasycznej pojemności nieunitalność okazuje się lepszym zasobem niż splątanie.
4. Dalsze uogólnienia kanałów Pauliego (artykuł H13): Wprowadzone są kanały bardziej ogólne niż uogólnione kanały Pauliego, co pozwala na uzyskanie klasy kanałów symetrycznych w dowolnym wymiarze skończonym przez zastąpienie baz wzajemnie nieobciążonych operatorami pomiaru.

Pozwolę sobie pokrótce opisać główne wyniki prac:

[H1] Geometry of Pauli maps and Pauli channels (2019):

W tej pracy skupiono się na geometrycznych właściwościach odwzorowań Pauliego, które zachowują ślad. Znajomość funkcji własnych tych odwzorowań umożliwia określenie elementów odległości i objętości związanych z metryką Hilberta-Schmidta dla stanów Choi-Jamiołkowskiego. Badane są tutaj względne objętości kanałów łamiących splątanie oraz kanałów generowanych przez generatory lokalne w czasie. Ponadto, dla kanałów Pauliego pokazano jaki jest procent kanałów dodatnio i kompletnie dodatnio podzielnych, co związane jest z pojęciem markowskości oraz otwartych układów kwantowych z pamięcią.

[H2] Geometry of generalized Pauli channels (2020):

Jest to Kontynuacja pracy [H1]. Skupiono się tutaj na analizie geometrycznych własności uogólnionych kanałów Pauliego. Wykorzystano bazy wzajemnie nieobciążone (MUB) do konstrukcji

kanałów. Przeanalizowano obszary całkowania i objętości podklas kanałów. Wyznaczono dolne ograniczenie na objętość dodatnich uogólnionych odwzorowań Pauliego.

[H3] Geometry of symmetric and noninvertible Pauli channels (2020):

Kontynuacja [H1], przeanalizowano geometrię dodatnich i kompletnie dodatnich odwzorowań Pauliego z dwoma różnymi parametrami. Wyznaczono względne objętości kanałów łąjących splątanie, kanałów produkowanych przez generatory lokalne oraz kanałów podzielnych.

[H4] Geometry of phase-covariant qubit channels (2023):

Publikacja skupia się na analizie geometrycznych właściwości przestrzeni nieunitalnych kanałów kwantowych, koncentrując się na przykładzie kubitowych odwzorowań kowariantnych z uwzględnieniem fazy. Artykuł skupia się na identyfikacji kształtów obszarów i analitycznych objętości odwzorowań kowariantnych z uwzględnieniem fazy, ze szczególnym uwzględnieniem tych łąjących splątanie kwantowe oraz generowanych przez lokalne w czasie generatory. Pomimo trzech parametrów charakteryzujących analizowane kanały, analogicznie do kanałów Pauliego, uzyskane wyniki wykazują istotne różnice. Przykłady obejmują kształty i symetrie obszarów oraz procentową ilość kanałów wśród odwzorowań dodatnich. Otrzymane rezultaty przyczyniają się do lepszego zrozumienia struktur i właściwości kanałów kwantowych.

[H5] Quantum evolution with a large number of negative decoherence rates (2020):

Zbadano wpływ efektów niemarkowowskich na kwantową ewolucję. Wykazano, że silnie niemarkowską ewolucję z ujemnymi współczynnikami dekoherencji można uzyskać poprzez klasyczną mieszaninę półgrup markowowskich. Przeanalizowano warunki na dodatnią i kompletnie dodatnią podzielność w zależności od parametrów mieszania.

[H6] Markovian semigroup from mixing noninvertible dynamical maps (2021):

Analizowano mieszaniny nieodwracalnych odwzorowań dynamicznych za pomocą uogólnionych kanałów Pauliego. Pokazano, że nieodwracalne odwzorowania dynamiczne mogą prowadzić do półgrupy markowskiej.

[H7] Non-Markovianity criteria for mixtures of noninvertible Pauli dynamical maps (2022)

Przeprowadzono analizę niemarkowowskości ewolucji zadanej przez kanały Pauliego. Zbadano związki między podzielnością kanałów a podzielnością ich mieszanin. Sformułowano warunki na mieszaniny spełniające określone kryteria podzielności.

[H8] Phase-covariant mixtures of noninvertible Pauli channels (2022):

Praca ta pioniersko zajmuje się tematem klasycznych mieszanin kanałów nieunitalnych, czyli tych, które nie zachowują operatora identycznościowego. Szczególnym przypadkiem są kanały kowariantne ze względu na fazę, stanowiące uogólnienie odwzorowań opisujących tłumienie amplitudy, procesu odwrotnego do tłumienia amplitudy oraz rozfazowania. Analiza odwzorowań nieunitalnych ujawnia efekty, które nie występują w przypadku mieszanin (unitalnych) kanałów Pauliego. Przykładowo, odpowiedni dobór parametrów podczas mieszania kanałów nieunitalnych może prowadzić do uzyskania kanału unitalnego. Analogicznie, mieszanie odwzorowań komutatywnych, czyli przemiennych w dowolnej chwili czasu, może skutkować odw-

zorowaniami niekomutatywnymi. Kombinacje wypukłych półgrup, które dla kanałów Pauliego prowadzą nawet do ewolucji wiecznie niemarkowowskich, nie generują kanałów kowariantnych ze względu na fazę w zbiorze opisującym dynamikę markowowską. Warto zauważyć, że półgrupę dynamiczną można uzyskać jedynie poprzez zmieszanie dwóch półgrup, podczas gdy kanały Pauliego generują półgrupę dopiero w wyniku mieszania trzech odwzorowań, z co najmniej dwoma z nich będącymi nieodwracalnymi.

[H9] Classical capacity of generalized Pauli channels (2020):

Wyprowadzono ograniczenia na klasyczną pojemność i pojemność Holevo dla uogólnionych kanałów Pauliego. Wykazano relację między pojemnością kanału a jego wiernością. Przeanalizowano związek między szybkością zmian pojemności a podzielnością odwzorowań dynamicznych.

[H10] Engineering classical capacity of generalized Pauli channels with admissible memory kernels (2021):

Publikacja rozwija tematykę omówioną w pracy [P13], dowodząc, że odpowiedni dobór parametrów szumu może poprawić jakość przesyłu danych przez kanał kwantowy. Skupia się na ewolucji klasycznej pojemności uogólnionych kanałów Pauliego opisanych równaniami master z jądrami pamięci. Przeprowadza analizę porównawczą pojemności półgrup markowowskich i odwzorowań dynamicznych, uwzględniając nielocalne szumy na poziomie jąder pamięci. Wykazuje, że możliwy jest wzrost klasycznej pojemności kanału w porównaniu nie tylko z półgrupą, ale także z bardziej ogólnymi kanałami opisującymi ewolucję markowowską. Co istotne, analogiczne uwzględnienie szumów na poziomie lokalnych w czasie generatorów dynamicznych nie wywołuje podobnych efektów, jednak zwiększona zdolność kanałów kwantowych do przesyłu klasycznej informacji potwierdza korzystny wpływ efektów szumu.

[H11] Adjusting phase-covariant qubit channel performance with non-unitality (2023):

W artykule przeprowadzono analizę komunikacyjnych właściwości kanałów kowariantnych ze względu na fazę w zależności od ich stopnia nieunitalności. Wyznaczono analityczne formuły na minimalną i maksymalną wierność kanałów na stanach czystych, jak również na maksymalną czystość na wyjściu. Przy nowo zdefiniowanej miarze nieunitalności pokazano, jak uzyskać kanał o pożądanym stopniu nieunitalności za pomocą klasycznych mieszanin kanałów unitalnych i maksymalnie nieunitalnych. Przedstawiono rozkład prawdopodobieństwa jako rodzaj szumu, który okazał się korzystny dla rozważanych własności ewolucji kwantowych. Wyniki wskazały, że odwzorowania unitalne cechują się najgorszą wydajnością dla większości miar, z wyjątkiem minimalnej wierności kanału. Ponadto, wydajność kanału monotonicznie maleje wraz ze stopniem nieunitalności, co obserwowane jest również dla zgodności i splątania formowania. Istotnym spostrzeżeniem jest poprawa wydajności kanałów w każdej chwili czasu, co odróżnia te wyniki od wcześniejszych prac, gdzie korzystne efekty szumu były tymczasowe.

[H12] Improving classical capacity of qubit dynamical maps through stationary state manipulation (2023):

W pracy analizowane są tradycyjne pojemności kanałów kowariantnych z uwzględnieniem fazy, ze szczególnym uwzględnieniem pojemności Holevo i pojemności wspomaganej splątaniem. Głównym wnioskiem jest, że te pojemności mogą wzrosnąć poprzez manipulację stacjonarnym stanem kanału, który jest ściśle związany z jego stopniem nieunitalności. Innymi słowy, im

bardziej nieunitalny kanał, tym większa jego pojemność. Parametryzacja kanału jest realizowana za pomocą klasycznych mieszanin występujących w równaniach master jąder pamięci, a tutaj przedstawiono metodę ich konstrukcji. Interesującym aspektem jest to, że równoważną inżynierię można przeprowadzić, korzystając z mieszanin odpowiadających lokalnym jądrom w czasie generatorów, a nawet samych odwzorowań dynamicznych. Wykazano, że wzrost nieunitalności kanału odpowiada wzrostowi pojemności Holevo i pojemności wspomaganej splątaniem w każdym momencie czasu. Dla silnie nieunitalnych odwzorowań pojemność Holevo, a więc i klasyczna pojemność kanału, czasowo przewyższa pojemność wspomaganą splątaniem kanału unitalnego. To sugeruje, że nieunitalność jest istotnym zasobem kwantowym dla transferu informacji, mogącym przewyższyć użyteczność innego zasobu, jakim jest kwantowa splątanie.

[H13] Generalization of Pauli channels through mutually unbiased measurements (2020):

W artykule zostało wprowadzone nowe uogólnienie kanałów Pauliego przy użyciu pomiarów wzajemnie nieobciążonych (MUM). To uogólnienie obejmuje kanały Pauliego jako szczególny przypadek, gdy MUM-y zastąpi się bazami wzajemnie nieobciążonymi (MUB-ami). Istotnie, w przeciwieństwie do MUB-ów, maksymalna liczba MUM-ów istnieje w dowolnym wymiarze przestrzeni Hilberta, co implikuje istnienie uogólnienia kanałów Pauliego w dowolnym wymiarze. Te kanały nadal są odwzorowaniami bistochastycznymi (zachowującymi ślad i operator jednostkowy), ale ich wektory własne nie są już unitarne. W artykule dokładnie przeanalizowano właściwości tego uogólnienia, takie jak kompletna dodatniość, łamanie splątania kwantowego czy multiplikatywność maksymalnej czystości stanu wyjściowego. Przedstawiono również przykłady odwzorowań skonstruowanych z macierzy Gell-Manna oraz z obserwabli Heisenberga-Weyla.

### **Całkowity dorobek naukowo-badawczy**

Całkowity dorobek naukowy Kandydatki od strony publikacyjnej to 26 artykułów naukowych (18 prac powstało po doktoracie). Warto zwrócić uwagę na fakt, że większość prac jest opublikowanych w bardzo dobrych czasopismach naukowych. Tematyka prac badawczych niewchodzących w skład osiągnięcia, a napisanych po doktoracie (artykuły P1-P5 w autoreferacie) to głównie: zainteresowania związane z analizą kanałów Pauliego i ich uogólnienia. Z drugiej strony zainteresowania badawcze Kandydatki koncentrują się na odwzorowaniach liniowych, zwłaszcza na detekcji splątania.

W jednym z artykułów dr Siudzińska wprowadza uogólnienie symetrycznych operatorów pomiaru, zwanych (N,M)-POVM, które obejmują symetryczne, informacyjnie kompletne POVM-y oraz projektory na bazy wzajemnie nieobciążone. Przedstawia konstrukcję tych pomiarów, analizuje ich własności i sugeruje możliwe zastosowania w dziedzinie kwantowej informacji.

Kolejne prace autorki skupiają się na wykrywaniu splątania i konstrukcji świadków splątania. Wprowadza Ona nowe klasy odwzorowań dodatnich, wykorzystując pomiary wzajemnie nieobciążone i symetryczne. Przedstawia również świadków nierozkładalnych, które są użyteczne w detekcji splątania stanów PPT.

W innej dziedzinie badań autorka analizuje geometrię jednomodowych kanałów gaussowskich. Przedstawia metody analizy geometrii, obliczania objętości kanałów, i omawia wyniki dotyczące kanałów łamiących splątanie oraz kanałów łamiących niekompatybilność.

Podsumowując, Pani Siudzińska prezentuje różnorodne aspekty swojej pracy badawczej, obejmujące analizę różnych rodzajów pomiarów kwantowych, konstrukcję odwzorowań dodatnich, detekcję splątania oraz analizę geometrii kanałów gaussowskich.

Opis dorobku naukowego Wnioskującego należy uzupełnić o prace powstałe w czasach poprzedzających uzyskanie przez Panią Siudzińską stopnia doktora (artykuły P6-P13 w autoreferacie).

Łączna liczba cytowań prac wchodzących w skład osiągnięcia wynosi 49. Nie jest to duża liczba i można to po części wytłumaczyć faktem, że prace zostały opublikowane niedawno. Łączna liczba cytowań wynosi 83 (bez autocytowań) oraz indeks Hirscha 7 wskazuje, że prace Habilitantki są rozpoznawalne w świecie nauki.

Od strony upowszechniania swoich osiągnięć naukowych wniosek dr Siudzińskiej prezentuje się dobrze. W części II.7 wykazu osiągnięć naukowych stanowiących znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny znajdują się 2 referaty po uzyskaniu stopnia doktora oraz 4 referaty przez uzyskaniem stopnia doktora.

Pani dr Siudzińska była kierownikiem w dwóch projektach w latach 2018-2019 (NCN Etiuda 6) oraz 2019-2020 (NCN Preludium 16). Obecnie jest kierownikiem w grantie NCN Sonata 17, co dowodzi że jest w stanie skutecznie ubiegać się o finansowanie swoich badań naukowych. Ponadto była Ona wykonawczynią w trzech innych grantach NCN.

## **Konkluzja**

Biorąc pod uwagę pozytywne i negatywne elementy tego wniosku, w mojej ocenie uważam, że dorobek naukowy dr Katarzyny Siudzińskiej jest wartościowy, a przedstawiony cykl 13 prac, składający się na rozprawę habilitacyjną, stanowi znaczny wkład w rozwój dyscypliny naukowej zgodnie z wymogami ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Z całym przekonaniem wnioskuję o nadanie tego stopnia dr Katarzynie Siudzińskiej.

Z poważaniem,  
Adam Rutkowski

*Adam Rutkowski*