

dr hab. inż. Łukasz Paweła  
Instytut Informatyki  
Teoretycznej i Stosowanej PAN  
ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

Gliwice, 23 stycznia 2024 r.

## Recenzja całokształtu dorobku naukowego, dydaktycznego i organizacyjnego dra Waldemara Kłobusa w związku z postępowaniem habilitacyjnym

### **Podstawowe dane o kandydacie**

- Kandydat uzyskał stopień doktora nauk fizycznych w roku 2014 na Uniwersytecie Adama Mickiewicza w Poznaniu.
- Według dokumentacji kandydat nie ubiegał się wcześniej o nadanie stopnia doktora habilitowanego.
- Przebieg pracy naukowo-zawodowej: 2012-2014 jest asystentem naukowym na Wydziale Fizyki UAM, następnie w latach 2014-2016, po obronie doktoratu asystentem naukowym w projekcie QOLAPS na Wydziale Fizyki UAM. W latach 2018-2021 jest adiunktem odbywającym staż podoktorski na Uniwersytecie Gdańskim, po którego zakończeniu został stałym pracownikiem naukowo dydaktycznym UG.
- Inne staże i doświadczenie: kilkutygodniowe staże w jednostkach takich jak University of Calgary, Węgierska Akademia Nauk, Uniwersytet Jagielloński, Ludwig-Maximilians-Universität München oraz Nanyang Technological University

## Strona formalna wniosku

Obiektem oceny habilitanta jest, według art. 219 ust 1. pkt 2b Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce, osiągnięcie naukowe w postaci cyklu powiązanych artykułów naukowych pod tytułem: „Analiza układów złożonych i wpływu nieklasycznych korelacji na ich własności”.

Według ustawy stopień doktora habilitowanego nadaje się osobie, która:  
Stopień doktora habilitowanego nadaje się osobie, która:

- posiada stopień doktora;
- posiada w dorobku osiągnięcia naukowe albo artystyczne, stanowiące znaczny wkład w rozwój określonej dyscypliny, w tym co najmniej:
  - 1 monografię naukową, wydaną przez wydawnictwo, które w roku opublikowania monografii w ostatecznej formie było ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na. Podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. a, lub
  - 1 cykl powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w czasopiśmie naukowych lub w recenzowanych materiałach z konferencji międzynarodowych, które w roku opublikowania artykuły w ostatecznej formie były ujęte w wykazie sporządzonym zgodnie z przepisami wydanymi na podstawie art. 267 ust. 2 pkt 2 lit. b, lub
  - 1 zrealizowane oryginalne osiągnięcie projektowe, konstrukcyjne, technologiczne lub artystyczne;
- wykazuje się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.
- Osiągnięcie może stanowić część pracy zbiorowej, jeżeli opracowanie wydzielonego zagadnienia jest indywidualnym wkładem osoby ubiegającej się o stopień doktora habilitowanego.

## Ocena dorobku naukowego

- Tytuł osiągnięcia naukowego przedstawionego do oceny: „Analiza układów złożonych i wpływu nieklasycznych korelacji na ich własności”
- Dane naukometyczne. Dane różnią się w różnych bazach. Według Google Scholar: Indeks H: 11, 402 cytowania.

Zarówno indeks Hirscha jak i indeks cytowań nie stanowi kryterium oceny habilitanta. Są one zbyt zależne od wielu niemerytorycznych czynników.

- Wszystkie artykuły przedstawione jako osiągnięcie naukowe opublikowane są w dobrych (w zakresie swojej specjalizacji) czasopismach.
- Habilitant przed doktoratem opublikował 11 artykułów, natomiast po doktoracie 13, łącznie z siedmioma artykułami przedstawionymi jako osiągnięcie naukowe.
- We wszystkich publikacjach habilitant uczestniczył w powstaniu koncepcji badań oraz był zaangażowany w pisanie manuskryptu. W większości publikacji jego wkład w powstanie ostatecznego tekstu był wiodący. Dodatkowo w każdej publikacji składającej się na cykl habilitant dokonał istotnych analiz teoretycznych oraz numerycznych niezbędnych do uzyskania ostatecznego wyniku. Fakty te są potwierdzone odpowiednimi oświadczeniami współautorów.

Tematyka badań habilitanta mieści w modnym nurcie badań związanych z informatyką kwantową. W swoich badaniach habilitant skupił się na badaniach fundamentalnych, związanych z korelacjami pojawiającymi się w złożonych układach kwantowych. Głównym celem badań jest lepsze zrozumienie wielocząstkowych korelacji w tych układach i ich wpływu.

W pracy [H1] pokazano jak sygnalizujące korelacje, które naruszają zasadę monogamii splątania mogą zostać wykorzystane do przesyłania klasycznych informacji pomiędzy przestrzennie odseparowanymi obserwatorami. Jako przykład fizycznego układu, w którym mogą takie warunki nastąpić mogą posłużyć czarne dziury i związane z nimi paradoks niszczenia informacji kwantowej. O ile praktyczne zastosowania tego typu rozważań są mocno ograniczone, badania takie stanowią istotny krok w kierunku badania granic aktualnie ugruntowanych teorii fizycznych.

Praca [H2] poświęcona jest pomiarowym zasadom nieoznaczoności. W szczególności rozważono scenariusz dwóch podukładów, w którym jedna ze stron decyduje się zmierzyć jedną ze swoich obserwacji, podczas gdy druga strona najpierw wykonuje łagodny pomiar jednej obserwacji (uzyskując tylko częściowe informacje o wyniku), a następnie silny pomiar innej obserwacji (gdzie zysk informacyjny jest maksymalny). Następnie, zakładając jedynie niemożność nadświatłowej komunikacji między dwoma stronami (czyli zasadę braku sygnalizacji) oraz naruszenie nierówności Bella, zbadano związek między zyskiem informacji a zakłóceniem wynikającym z samego aktu łagodnego pomiaru. Wyniki wskazują, że dla ogólnych teorii probabilistycznych przestrzegających zasady braku sygnalizacji, zakłócenie wynikające ze statystyk, które można obserwować w laboratoriach (czyli statystyki przewidywane przez mechanikę kwantową), jest trywialne, dopóki zysk informacji

nie osiągnie pewnej wartości progowej. Ten próg można przesunąć w stronę zera, rozważając więcej obserwabli (jak w przypadku nierówności łańcuchowej Bella).

Ponadto, wyniki mają kryptograficzną interpretację. Alicja przygotowuje system dwudzielny i wysyła jeden podsystem do Boba. Jeśli ten ostatni podsystem zostanie przechwycony i zmierzony przez podsłuchującego, wówczas na końcu Alicja i Bob dzielą zakłócone urządzenie. Z tego powodu wyniki mogą mieć potencjalne zastosowania w kryptografii opartej na wysyłaniu stanów, jak w protokole BB84, a nie na wykonywaniu pomiarów na współdzielonych splątanych stanach o nieznanym pochodzeniu.

Praca posiada głównie wyniki teoretyczne jednak interpretacja kryptograficzna daje pole do potencjalnych zastosowań wyników w praktyce. Oczywiście dla takiego wykorzystania spełniony musiałby zostać szereg, ukrytych tutaj, założeń technologicznych. Niemniej, sam pomysł stanowi istotny wkład w rozwój fizyki.

W pracach [H3, H4] habilitant wraz ze współautorami wprowadza nową wielkość, nazwaną międzyzależnością (ang. interdependence), opisującą wielocząstkowe własności układów kwantowych. Wielkość zdefiniowana jest poprzez optymalizację informacji wzajemnej pomiędzy dwoma składowymi podukładami warunkowanymi pozostałymi elementami. Dla stanów opisanych przez macierze gęstości wielkość tą można zapisać jako optymalizacji liniowej kombinacji entropii von Neumanna odpowiednio zredukowanych macierzy gęstości. Jak sam habilitant wyjaśnia, wprowadzone wielkość nie spełnia wszystkich postulatów oczekiwanych od miary korelacji, w szczególności postulatu mówiącego, że miara nie powinna wzrastać w wyniku lokalnych operacji. Co więcej, autorzy podają, dla jakiej wartości wprowadzonej wielkości korelacje mają charakter klasyczny, a dla jakiej kwantowy.

Wprowadzona wielkość oraz jej szczegółowa analiza w pracy [H4] stanowi ciekawe spojrzenie na problem charakteryzacji korelacji w układach wielocząstkowych.

Praca [H5] prezentuje wyniki dotyczące  $k$ -jednorodnych stanów  $N$  cząstkowych. Stany te charakteryzują się własnością, że każda redukcja  $k$  cząstek daje stan maksymalnie mieszany. Autorzy w pracy badają maksymalną czystość jaką tego typu stany mogą osiągnąć oraz podają sposoby na skonstruowanie tego typu stanów bazując na  $N$  cząstkowych macierzach Pauliego. Uzyskane wyniki są ciekawe i innowacyjne, ponieważ pokazują, że te stany, pomimo iż są mieszane posiadają nieklasyczne własności jak na przykład splątanie wielocząstkowe. Dodatkowo stany te pozwalają na złamanie nierówności Bella.

Co więcej, przepis pozwalający konstruować te stany może zostać wyrażony w postaci obwodu kwantowego, zatem możliwe jest badanie tych stanów w istniejących bramkowych komputerach kwantowych. Może habilitant powinien wrócić do tych pomysłów i teraz gdy dostęp do tego typu maszyn jest łatwy do uzyskania, wykonać odpowiednie eksperymenty?

W pracy [H6] badano splątanie pomiędzy dwoma układami kwantowymi opisy-

wanymi przez zmienne ciągle. Skupiono się na badaniu świadków splątania pomiędzy dwoma odseparowanymi przestrzennie cząstkami. W tym celu wykorzystano dodatkowy układ sprzężony z badanymi cząstkami. To sprzężenie jest tworzone w taki sposób, aby późniejsze pomiary na dodatkowym układzie pozwalały wyciągnąć wnioski dotyczące układami. Ten dodatkowy układ posiada niższy wymiar niż badane układy, co pozwala badać transfer informacji o splątaniu z układów o dużym wymiarze do układów o niższym wymiarze. Oczywiście, z tego względu, część informacji jest tracona, więc jest to forma stratnej kompresji informacji o własnościach układów. Podejście takie pozwala zmniejszyć liczbę koniecznych do wykonania pomiarów, co w praktyce pozwala zrównoważyć tę stratę. Szczególnie ciekawym przypadkiem zastosowania tego podejścia jest możliwość badania splątania pomiędzy dwoma układami opisanymi za pomocą zmiennych ciągłych przy wykorzystaniu dwóch kubitów. Idea kompresji informacji o fizycznym stanie układu i ich odczytu z mniejszych układów oraz związana z tym redukcja liczby koniecznych pomiarów wydaje się szczególnie ciekawa z punktu widzenia powstających, oraz istniejących komputerów kwantowych. Jako że są to maszyny obciążone sporym szumem każda redukcja liczba koniecznych operacji może być sporym zyskiem w kontekście jakości wyniku. W tym świetle badania tego typu są innowacyjne i stanowią istotny wkład w rozwój dziedziny.

Praca [H7] kontynuuje trend badania wielocząstkowych układów kwantowych, tym razem skupiając się na chaotycznych układach kwantowych. W prezentowanej pracy wprowadzono model sprzężonych spinów poddanych działaniu kanału tłumienia, stanowiący przykład układu kwantowego, dla którego odnotowano przejście od dynamiki regularnej do chaotycznej zgodnie z uniwersalnym scenariuszem Feigenbauma. W odróżnieniu od standardowego podejścia, gdzie przejście to zachodzi przy zmianie parametru nieliniowości, w badanym przypadku odpowiadająca mu klasyczna dynamika jest chaotyczna, a podwajanie okresu zachodzi w miarę wzrostu parametru układu.

Co interesujące, numeryczna wartość stosunku między kolejnymi wartościami parametru tłumienia dla podwajania okresu jest bliska uniwersalnej stałej Feigenbauma, wywiedzionej dla jednowymiarowych transformacji nieliniowych. Habilitant i współautorzy wysuwają hipotezę, że obserwowane przejście od dynamiki regularnej do chaotycznej nie jest ograniczone do tego konkretnego modelu dynamiki kwantowej, ale poprawnie opisuje zmiany parametryczne szerokiej klasy wielocząstkowych układów kwantowych.

W przedstawionej serii prac skupiono się na specyficznych celach, które można podsumować następująco: badania miały na celu zbadanie efektów łamania ograniczeń na korelacje w układach wielocząstkowych, skupiano się na badaniu niekwantowych ograniczeń korelacji w układach wielocząstkowych oraz ich wpływie na wyniki uzyskane w ramach formalizmu kwantowego. Charakteryzowano korelacje

w układach wielocząstkowych, badając ich przydatność w konkretnych protokołach kwantowych. Zaprezentowano metodę przenoszenia splątania kwantowego na układach o zmienionej wymiarowości. Badano cechy korelacji wielocząstkowych i ich użyteczność do charakteryzowania splątania kwantowego w układach wielocząstkowych. Zaprezentowano metodę konstruowania i badania właściwości maksymalnie splątanych stanów wielocząstkowych oraz ich uogólnień. Badano wpływ interakcji w układach wielocząstkowych na ich dynamikę i określano warunki prowadzące do zachowań chaotycznych.

W tym sensie badania te mają charakter innowacyjny i wnoszą niezaprzeczalny wkład w rozwój fizyki.

Negatywną stroną publikacji prezentowanych w cyklu jest liczba współautorów. Powoduje to, że momentami trudno wyłuskać dokładny wkład habilitanta w konkretne wyniki. Z drugiej strony, pokazuje to szeroką, międzynarodową współpracę habilitanta oraz skuteczność współpracy w ramach rozległego zespołu co jest istotną cechą osoby, która niedługo będzie miała swoich własnych doktorantów. Uwaga ta nie rzutuje na całościową ocenę wniosku habilitanta, który ciągle oceniam bardzo wysoko.

## Inne osiągnięcia

- W okresie po otrzymaniu doktoratu habilitant wykazał się dużą aktywnością zarówno naukowa, jak i dydaktyczna oraz organizacyjna.
- Habilitant wielokrotnie (ponad 20 razy) prezentował swoje wyniki na międzynarodowych konferencjach naukowych.
- Uczestniczył w projektach naukowych finansowanych przez ERC, NCN oraz MNiSW.
- W ramach działania na rzecz społeczności akademickiej wielokrotnie recenzował prace w czasopismach naukowych oraz konferencjach.
- Habilitant był promotorem pomocniczym w jednym przewodzie doktorskim.
- Otrzymał Nagrodę Rektora UG, Nagrodę Rektora UAM oraz stypendium Miasta Poznania dla młodych badaczy.
- Oprócz tematyki badań stanowiącej cykl publikacji habilitant uczestniczył w badaniach nad zagadnieniami: detekcji splątania wielocząstkowego za pomocą losowych pomiarów, majoryzacyjnych zasad nieoznaczoności, kontekstualności w ujęciu teorii zasobów oraz analizy efektów oddziaływań magnetycznych w modelu Hubbarda

## Ocena końcowa i wnioski

Uważam, że całokształt aktywności naukowej, organizacyjnej i dydaktycznej dra Waldemara Kłobusa jest **pozytywny** i uważam, że **spełnia** on w pełni wymagania stawiane przez stosowną ustawę. Na podstawie przedstawionej analizy **popieram wniosek o nadanie stopnia doktora habilitowanego** doktorowi Waldemarowi Kłobusowi.