



Dr hab. Artur Barasiński, prof. UWr

Wrocław, 11.05.2026

Recenzja rozprawy doktorskiej pt. „Fizyczne ograniczenia na powstawanie i obserwacje korelacji o charakterze ściśle kwantowym” autorstwa Pana mgr. Paweł Samuel Cieślińskiego.

Przedłożona rozprawa doktorska mgr Pawła Samuela Cieślińskiego pt. „Fizyczne ograniczenia na powstawanie i obserwacje korelacji o charakterze ściśle kwantowym” została przygotowana pod kierunkiem prof. dr. hab. Wiesława Laskowskiego. Rozprawa poświęcona jest teoretycznej analizie fundamentalnych ograniczeń związanych z powstawaniem, detekcją i interpretacją korelacji kwantowych, takich jak splątanie czy nielokalność.

Dysertacja ma formę monotematycznego cyklu sześciu artykułów naukowych opublikowanych w renomowanych międzynarodowych czasopismach, takich jak *npj Quantum Information*, *Physical Review Letters*, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *Physical Review A* oraz dwa artykuły w *New Journal of Physics*. W pięciu spośród tych prac Kandydat figuruje jako pierwszy autor. Na podstawie przedstawionych oświadczeń współautorów nie ulega wątpliwości, że wkład Kandydata w powstanie wszystkich publikacji był znaczący i merytorycznie istotny.

Rozprawa składa się z ośmiu rozdziałów obejmujących wprowadzenie, sześć rozdziałów prezentujących wyniki naukowe oraz podsumowanie. Rozdziały 2–7 zawierają przejrzyste i dobrze napisane omówienie problematyki badawczej oraz prezentację głównych rezultatów uzyskanych w pracach współautorstwa Kandydata. Poniżej opisuję szczegółowo główne wyniki Kandydata przedstawione w poszczególnych rozdziałach.

W rozdziale 2, opartym na artykule [*npj Quantum Information* 10 (1), 14 (2024)], Kandydat analizuje problem wykrywania splątania kwantowego w sytuacji ograniczonej liczby danych eksperymentalnych. Punktem wyjścia jest obserwacja, że w realistycznych eksperymentach liczba wykonanych pomiarów jest zawsze skończona, co może prowadzić do błędnych wniosków dotyczących obecności korelacji kwantowych. Autorzy koncentrują się na świadkach splątania, czyli obserwablach pozwalających odróżnić stany splątane od separowalnych. W pracy opracowano analityczny model opisujący wpływ fluktuacji statystycznych na funkcje korelacji wykorzystywane w procedurach detekcji splątania. Szczególnie interesujące jest porównanie podejścia częstotliwościowego oraz bayesowskiego, które prowadzi do bardziej wiarygodnej oceny niepewności eksperymentalnych. Autorzy pokazują, że nieuwzględnienie ograniczeń statystycznych może prowadzić do fałszywego wykrycia splątania lub zawyżenia jakości badanego układu kwantowego. Praca porusza istotny problem metodologiczny związany z interpretacją współczesnych eksperymentów kwantowych.

Rozdział 3, oparty na artykule [New Journal of Physics, 27 074504 (2025)], poświęcony jest problemowi obserwacji nielokalności kwantowej przy ograniczonej wydajności detektorów oraz losowym wyborze ustawień pomiarowych. Autorzy analizują testy Bella w sytuacji, gdy część cząstek nie zostaje zarejestrowana z powodu niedoskonałości aparatury pomiarowej. W pracy wyprowadzono analityczne dolne ograniczenia na prawdopodobieństwo naruszenia nierówności Bella dla maksymalnie splątanych stanów dwukubitowych, a następnie rozszerzono analizę numerycznie na układy wielokubitowe i większą liczbę ustawień pomiarowych. Szczególnie interesujące jest wykazanie, że zwiększenie liczby możliwych kierunków pomiaru może częściowo kompensować ograniczoną wydajność detekcji. Autorzy wyznaczają również progowe wartości wydajności detekcji konieczne do obserwacji nielokalności dla stanów GHZ i W. Otrzymane wyniki pokazują, że typowość naruszeń lokalnego realizmu może utrzymywać się nawet w warunkach istotnych niedoskonałości eksperymentalnych.

Rozdział 4, oparty na artykule [Physical Review Letters 135, 010201 (2025)], dotyczy teorii kwantowych układów odniesienia (*Quantum Reference Frames*). Autorzy analizują, w jaki sposób transformacje pomiędzy różnymi kwantowymi układami odniesienia wpływają na takie zasoby kwantowe jak splątanie i koherencja. Centralnym rezultatem pracy jest wykazanie istnienia niezmiennika związanego z sumą splątania oraz lokalnej koherencji podukładu. Pokazano, że choć same wartości splątania i koherencji mogą zależeć od wyboru układu odniesienia, to odpowiednio zdefiniowana suma tych wielkości pozostaje stała. Wynik ten można interpretować jako swoistą zasadę zachowania zasobów kwantowych, zgodnie z którą utrata jednego rodzaju zasobu może być kompensowana wzrostem drugiego. Autorzy omawiają również konsekwencje tych rezultatów dla naruszeń nierówności Bella oraz relacyjnego charakteru opisu stanów kwantowych.

W rozdziale 5, opartym na artykule [Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 121 (44) e240445121 (2024)], Kandydat analizuje problem monogamii nielokalności kwantowej. Powszechnie przyjmuje się, że silne nielocalne korelacje pomiędzy dwiema cząstkami ograniczają możliwość występowania podobnych korelacji z innymi układami. Autorzy pokazują jednak, że zasada ta nie ma charakteru uniwersalnego. W pracy opracowano systematyczną metodę konstruowania stanów kwantowych oraz nierówności Bella pozwalających na jednoczesne naruszanie ograniczeń monogamii przez wiele podukładów. Szczególną rolę odgrywają tu wielocząstkowe stany Dickego oraz odpowiednio skonstruowane nierówności Bella. Uzyskane wyniki zostały dodatkowo potwierdzone eksperymentalnie przy użyciu sześciufotonowych stanów Dickego, dla których zaobserwowano jednoczesne występowanie nielocalnych korelacji w różnych grupach obserwatorów. Praca prowadzi do istotnej rewizji intuicji dotyczących struktury korelacji nielocalnych w układach wielocząstkowych.

Rozdział 6, oparty na artykule [New Journal of Physics 25 093040 (2023)], poświęcony jest fundamentalnym ograniczeniom czasowym dotyczącym generacji wielocząstkowego splątania przy użyciu naturalnych oddziaływań dwuciałowych. Autorzy analizują proces tworzenia stanów GHZ, W, Dickego oraz absolutnie maksymalnie splątanych stanów (AME), zakładając ewolucję układu pod wpływem realistycznych Hamiltonianów dwuciałowych. W pracy wyznaczono minimalne czasy potrzebne do wygenerowania poszczególnych klas stanów przy zadanych ograniczeniach energetycznych. Otrzymane wyniki można interpretować jako szczególną postać granic szybkości ewolucji kwantowej (*quantum speed limits*) dla układów wielu ciał. Autorzy pokazują również, że odpowiednio dobrane oddziaływania dwuciałowe mogą prowadzić do szybszej generacji splątania niż podejścia oparte na sekwencyjnej implementacji lokalnych bramek kwantowych.

Rozdział 7, oparty na artykule [Physical Review A 110, 012407 (2024)], dotyczy wykrywania oddziaływań wielociałowych za pomocą kwantowej informacji Fishera (*Quantum Fisher Information*, QFI). Autorzy analizują rodzinę symetrycznych Hamiltonianów typu Isinga zawierających oddziaływania k-ciałowe oraz wyprowadzają ograniczenia na wartości QFI dla stanów produktowych. Pokazano, że QFI porządkuje się względem rzędu oddziaływania: im wyższy rząd sprzężenia w Hamiltonianie, tym większe wartości QFI mogą zostać osiągnięte. Dzięki temu naruszenie odpowiednich ograniczeń pozwala wnioskować o obecności oddziaływań wielociałowych bez konieczności wykonywania pełnej tomografii stanu kwantowego. Autorzy analizują również bardziej realistyczne modele fizyczne, takie jak model XY z oddziaływaniami trójciałowymi, pokazując że proponowane podejście może być stosowane także w bardziej złożonych sytuacjach dynamicznych.

Całość rozprawy tworzy spójny i konsekwentnie realizowany program badawczy poświęcony ograniczeniom dotyczącym powstawania, obserwacji i charakterystyki korelacji kwantowych. Uzyskane wyniki dotyczą zarówno fundamentalnych aspektów mechaniki kwantowej — takich jak natura nielokalności, relacyjność zasobów kwantowych czy ograniczenia dynamiki splątania — jak i metod pozwalających na bardziej wiarygodną analizę oraz charakteryzację złożonych układów kwantowych. Od strony edytorskiej praca jest poprawnie napisana, jedynie bardzo nieliczne błędy np. równanie 2.9 na str. 11.

Podsumowując, przedłożona rozprawa doktorska reprezentuje wysoki poziom naukowy zarówno pod względem merytorycznym, jak i formalnym. Poruszane w niej zagadnienia należą do aktualnego i intensywnie rozwijanego nurtu badań z zakresu teorii informacji kwantowej oraz fundamentów mechaniki kwantowej. Na szczególne podkreślenie zasługuje spójność programu badawczego, wysoki poziom opublikowanych prac oraz znaczący wkład Kandydata w uzyskane wyniki. Przedstawione rezultaty świadczą o bardzo dobrym przygotowaniu teoretycznym Kandydata, umiejętności samodzielnego prowadzenia badań naukowych oraz zdolności do formułowania i rozwiązywania złożonych problemów z zakresu współczesnej fizyki teoretycznej. W mojej ocenie mgr Paweł Samuel Cieśliński wykazał się dojrzałością naukową oraz istotnym wkładem w rozwój badań nad korelacjami kwantowymi i ich fundamentalnymi ograniczeniami.

Stwierdzam, że przedłożona rozprawa spełnia wymagania określone w Ustawie Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce oraz odpowiada zwyczajowym wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim w dyscyplinie nauki fizyczne. W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie mgr Pawła Samuela Cieślińskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Artur
Panasinski.

Wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr Pawła Samuela Cieślińskiego zasługuje na wyróżnienie ze względu na bardzo wysoki poziom naukowy, oryginalność uzyskanych wyników oraz ich znaczenie dla współczesnych badań z zakresu teorii informacji kwantowej i fundamentów mechaniki kwantowej. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w czołowych międzynarodowych czasopismach naukowych, a Kandydat w większości tych prac jest pierwszym autorem. Rozprawa wyróżnia się także dojrzałością metodologiczną, szerokim zakresem podejmowanych problemów oraz umiejętnym połączeniem zagadnień fundamentalnych z nowoczesnymi metodami teorii informacji kwantowej. W mojej ocenie praca mgr Pawła Samuela Cieślińskiego wyraźnie przekracza standardowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim, co uzasadnia wniosek o jej wyróżnienie.

*Artur
Banasinski*