



NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ

Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

Toruń, 08.05.2026

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Pawła Samuela Cieślińskiego
pt. "Fizyczne ograniczenia na powstawanie i obserwacje korelacji o charakterze ściśle
kwantowym"**

Recenzowana rozprawa doktorska została przygotowana na Wydziale Matematyki, Fizyki i Informatyki Uniwersytetu Gdańskiego pod kierunkiem prof. dr. hab. Wiesława Laskowskiego. Przedmiot badań, których wyniki zostały przedstawione w rozprawie, wpisuje się w dyscyplinę nauki fizyczne. Rozprawa została przedstawiona w formie spójnego tematycznie cyklu sześciu publikacji naukowych, poświęconych fizycznym ograniczeniom związanym z powstawaniem oraz obserwacją korelacji o charakterze ściśle kwantowym.

Na cykl ten składają się następujące prace:

[A] P. Cieśliński, J. Dziewior, L. Knips, W. Kłobus, J. Meinecke, T. Paterek, H. Weinfurter, W. Laskowski, *Valid and efficient entanglement verification with finite copies of a quantum state*, npj Quantum Information 10, 14 (2024).

[B] P. Cieśliński, M. Kowalczyk, W. Laskowski, T. Vértesi, *How likely are you to observe non-locality with imperfect detection efficiency and random measurement settings?*, New Journal of Physics 27, 074504 (2025).

[C] C. Cepollaro, A. Akil, P. Cieśliński, A.-C. de la Hamette, Č. Brukner, *Sum of Entanglement and Subsystem Coherence Is Invariant under Quantum Reference Frame Transformations*, Physical Review Letters 135, 010201 (2025).

[D] P. Cieśliński, L. Knips, M. Kowalczyk, W. Laskowski, T. Paterek, T. Vértesi, H. Weinfurter, *Unmasking the Polygamous Nature of Quantum Nonlocality*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America 121, e2404455121 (2024).

[E] P. Cieśliński, W. Kłobus, P. Kurzyński, T. Paterek, W. Laskowski, *The fastest generation of multipartite entanglement with natural interactions*, New Journal of Physics 25, 093040 (2023).

[F] P. Cieśliński, P. Kurzyński, T. Sowiński, W. Kłobus, W. Laskowski, *Exploring many-body interactions through quantum Fisher information*, Physical Review A 110, 012407 (2024).

Lista ta pośrednio świadczy o wysokiej jakości dorobku pana mgr. Cieślińskiego: prace składające się na rozprawę zostały opublikowane w czasopismach cenionych w międzynarodowym



Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl



NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ

Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

środowisku naukowym, w tym w tak prestiżowych tytułach jak *PNAS* i *Physical Review Letters*. Na osobne odnotowanie zasługuje praca [C], której współautorem nie jest promotor rozprawy, a pan mgr Cieśliński występuje w niej jako trzeci autor. Z jednej strony nakazuje to ostrożność w przypisywaniu Doktorantowi roli wiodącej w tej konkretnej publikacji, z drugiej jednak świadczy o jego aktywnym udziale w niezależnej współpracy naukowej oraz o rozpoznawalności jego kompetencji poza macierzystym zespołem badawczym. W kontekście całego cyklu należy zarazem podkreślić, że Doktorant jest pierwszym autorem pięciu spośród sześciu prac, a jego znaczący wkład w powstanie poszczególnych publikacji potwierdzają oświadczenia współautorów dołączone do rozprawy.

Tematyka rozprawy koncentruje się wokół fizycznych ograniczeń związanych z powstawaniem, obserwacją i weryfikacją korelacji o charakterze ściśle kwantowym. Wspólnym motywem przedstawionych prac jest pytanie o warunki, w których efekty takie jak splątanie kwantowe, nielokalność Bella czy kwantowa superpozycja mogą zostać wytworzone i zaobserwowane, a stany wykazujące takie własności jednoznacznie odróżnione od stanów dopuszczających opis klasyczny. Jest to problematyka bardzo aktualna: znajdujemy się obecnie w okresie intensywnego rozwoju technologii kwantowych, dla których umiejętność wytwarzania, klasyfikowania i wykrywania stanów o własnościach ściśle kwantowych ma znaczenie kluczowe. Dotyczy to zarówno badań podstawowych nad strukturą teorii kwantowej, jak i potencjalnych zastosowań w komunikacji kwantowej, metrologii kwantowej, przetwarzaniu informacji kwantowej oraz symulacjach kwantowych. O znaczeniu podjętej tematyki świadczy również wspomniany wyżej fakt publikacji wyników w czasopismach należących do najważniejszych forów publikacji w tej dziedzinie.

Rozprawa składa się z części wprowadzającej, w której Doktorant omawia kolejno motywację, założenia i najważniejsze rezultaty publikacji wchodzących w skład cyklu, oraz z dołączonych kopii tych publikacji. Część wprowadzająca spełnia podstawową funkcję informacyjną: pozwala zorientować się, jakie problemy zostały podjęte w poszczególnych publikacjach i jakie wyniki uzyskano w każdej z nich. Jednocześnie uważam ją za najsłabszą część rozprawy. Zwyczajowo wstęp do rozprawy doktorskiej, również rozprawy przedstawionej w formie cyklu publikacji, pełni rolę szerszego wprowadzenia do tematyki badań. Powinien być adresowany nie tylko do wąskiego grona ekspertów, lecz także do czytelników dopiero rozpoczynających pracę w danym obszarze, na przykład młodszych studentów, doktorantów z pokrewnych specjalności czy zainteresowanych fizyków spoza bezpośredniej tematyki rozprawy. W takim ujęciu wstęp powinien wprowadzać podstawowe pojęcia, zarysowywać szerszy kontekst uzyskanych wyników, omawiać najważniejsze narzędzia metodologiczne wspólne dla rozprawy oraz pokazywać relacje między poszczególnymi pracami na poziomie bardziej ogólnym niż streszczenie każdej publikacji z osobna. Tego elementu w recenzowanej rozprawie w dużej mierze zabrakło. Część wprowadzająca nie stanowi właściwego wprowadzenia do tematu w sensie dydaktycznym i syntetycznym. Ma raczej charakter serii krótkich rozdziałów streszczających poszczególne publikacje. Brakuje w niej bardziej



Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl



NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ

Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

rozbudowanego omówienia wspólnych pojęć i narzędzi przewijających się przez rozprawę: splątania, nielokalności Bella, losowych pomiarów, skończonej statystyki pomiarowej, kwantowych układów odniesienia, kwantowych granic szybkości czy kwantowej informacji Fishera. Obecny tekst zakłada u czytelnika dość wysoki poziom wcześniejszej znajomości tych zagadnień i przechodzi szybko do streszczania wyników. W efekcie część wprowadzająca nie wykorzystuje w pełni szansy, jaką daje rozprawa w formie cyklu publikacji: możliwości autorskiego spojrzenia z dystansu na własne wyniki, ich wzajemne powiązania oraz ich miejsce w szerszym krajobrazie współczesnej informacji kwantowej.

Praca [A] dotyczy weryfikacji splątania w sytuacji, gdy liczba dostępnych kopii badanego stanu jest ograniczona. Jest to problem bardzo istotny eksperymentalnie, zwłaszcza w układach wielocząstkowych, gdzie niskie częstości koincydencji utrudniają zebranie dużej statystyki pomiarowej. Za szczególnie wartościowe uważam przesunięcie akcentu z pytania o przekroczenie granicy separowalności przez świadek splątania na realistyczne pytanie o wiarygodność i efektywność takiego wnioskowania przy skończonej liczbie danych. Autorzy proponują model pomiaru korelacji kwantowych przy ograniczonej statystyce oraz analizują go zarówno w ujęciu częstościowym, jak i bayesowskim, jasno pokazując konieczność kontroli błędów statystycznych pierwszego i drugiego rodzaju. Praca pokazuje, że samo wykrycie własności kwantowych nie jest jedynie problemem formalnym, lecz zależy od dostępnych zasobów eksperymentalnych i sposobu interpretacji surowych danych pomiarowych. W tej części rozprawy szczególnie zainteresował mnie efekt, że w warunkach bardzo niskiej statystyki większa liczba pomiarów nie musi automatycznie prowadzić do lepszej procedury weryfikacji splątania. Autorzy wskazują przykład, w którym wykonanie 12 pomiarów może być korzystniejsze niż wykonanie 13, a dodatkowy pomiar pogarsza relację pomiędzy wiarygodnością a efektywnością testu. Ten wynik wydaje się nieintuicyjny. Poproszę doktoranta o skomentowanie go szerzej przy okazji obrony.

Praca [B] opisuje problem prawdopodobieństwa zaobserwowania łamania nierówności Bella w realistycznym scenariuszu, w którym kierunki pomiarowe Alicji i Boba nie są kalibrowane, a wydajność detekcji ograniczona. Jest to naturalne rozwinięcie wcześniejszych badań nad losowymi pomiarami: z jednej strony eliminują one konieczność precyzyjnej kalibracji oddalonych układów odniesienia, z drugiej jednak wymagają uwzględnienia faktu, że w rzeczywistym eksperymencie część zdarzeń nie zostaje zarejestrowana. Za szczególnie wartościowe uważam połączenie tych dwóch ograniczeń w jednym formalizmie oraz pokazanie, że ograniczona wydajność detekcji może być do pewnego stopnia kompensowana przez zwiększenie liczby ustawień pomiarowych. Ciekawy i ważny jest również wynik wskazujący, że typowość nielokalności utrzymuje się powyżej krytycznej wartości wydajności detekcji. W rozprawie brakuje mi jednak szerszego komentarza fizycznego dotyczącego mechanizmu stojącego za istnieniem tak wyraźnego progu: dlaczego dopiero jego przekroczenie pozwala obserwować łamanie nierówności Bella z dużym prawdopodobieństwem, a poniżej niego efekt ten gwałtownie zanika. Proszę Doktoranta o odniesienie się do tej kwestii podczas obrony.



Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl



NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ

Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

Praca [C] dotyczy relacji pomiędzy splątaniem i koherencją podukładu w formalizmie kwantowych układów odniesienia. Za najważniejszy wynik pracy należy uznać wykazanie, że dla czystych stanów dwuczęściowych suma splątania i koherencji podukładu, mierzonych za pomocą wielkości opartych na entropii von Neumanna, pozostaje niezmiennicza przy transformacjach kwantowych układów odniesienia. Wynik ten jest ciekawy koncepcyjnie, ponieważ sugeruje, że splątanie i lokalna superpozycja nie powinny być traktowane jako całkowicie niezależne zasoby, lecz jako wielkości, które mogą przechodzić jedna w drugą przy zmianie kwantowej perspektywy. Na szczególne uznanie zasługuje sposób wprowadzenia problemu w samej publikacji: obrazowy przykład przedstawiony na początku artykułu jest bardzo dobrze dobrany i w prosty, intuicyjny sposób pokazuje zasadniczą ideę pracy. Dzięki temu formalny wynik uzyskuje przejrzystą interpretację fizyczną. Interesujące byłoby doprecyzowanie, w jakim stopniu otrzymany wynik zależy od założeń dotyczących struktury rozważanego układu. W szczególności proszę Doktoranta o komentarz, czy opisaną relację pomiędzy splątaniem i koherencją podukładu można uogólnić na układy złożone z cząstek różnych rodzajów, na przykład opisanych przestrzeniami Hilberta o różnych wymiarowościach.

W pracy [D] autorzy rozpatrują problem poligamii nielokalności Bella, czyli możliwości jednoczesnego łamania nierówności Bella w kilku przekrywających się podukładach układu wielocząstkowego. Jest to wynik interesujący zarówno z punktu widzenia podstaw mechaniki kwantowej, jak i intuicji dotyczącej struktury korelacji kwantowych. Standardowo nielokalność Bella kojarzona jest raczej z ograniczeniami monogamicznymi: silne korelacje nielocalne pomiędzy wybranymi podukładami wykluczają możliwość równie silnych korelacji z innymi. W pracy [D] pokazano jednak, że obraz ten nie jest uniwersalny. Dla układów o liczbie cząstek większej niż trzy możliwe jest skonstruowanie takiej nierówności Bella i takiego stanu kwantowego, dla których kilka nierówności jest łamanych jednocześnie. Za szczególnie wartościowe uważam powiązanie wyniku z realizacją eksperymentalną dla fotonów (Rys. 5.1), gdzie uzyskano imponującą jakościową zgodność.

Praca [E] zajmuje się problemem ograniczeń na szybkość generowania wielocząstkowego splątania przy użyciu oddziaływań dwu- i wielociałowych. Autorzy analizują, jak szybko można przygotować silnie splątane stany wielocząstkowe, jeśli dostępny Hamiltonian zawiera jedynie oddziaływania co najwyżej dwuciałowe. Problem ten jest istotny zarówno dla podstaw teorii informacji kwantowej, jak i dla praktycznych realizacji technologii kwantowych, w których oddziaływania wielociałowe są zwykle trudne do bezpośredniej implementacji. Ciekawe jest moim zdaniem pokazanie, w jaki sposób sama struktura oddziaływań ogranicza tempo wytwarzania splątania. Mam jednak pytanie o praktyczne znaczenie uzyskanych wyników: jak istotne z punktu widzenia realnych platform kwantowych może być skrócenie czasu przygotowania stanu o czynnik rzędu 2, przewidywane w przypadku wykorzystania oddziaływań wielociałowych zamiast wyłącznie dwuciałowych? Czy jest to różnica, która w typowych układach eksperymentalnych mogłaby jakościowo zmienić osiągalność danego stanu (na przykład ze względu na dekoherencję lub



Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl



NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ

Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

wymóg przygotowania wielu kopii stanu), czy raczej należy ją traktować przede wszystkim jako wynik o znaczeniu fundamentalnym? Proszę również o doprecyzowanie jednostek czasu użytych na rysunkach.

Problem oddziaływań wielociałowych jest również tematem pracy [F], która dotyczy wykorzystania kwantowej informacji Fishera do weryfikacji obecności tych oddziaływań. Zaproponowano procedurę pozwalającą odróżniać efekty możliwe do uzyskania przy oddziaływaniach jedno- i dwuciałowych od tych, które wymagają oddziaływań wyższego rzędu, opartą o analizę kwantowej informacji Fishera. Jestem ciekawa czy istnieje praktyczny próg czułości tej procedury, poniżej którego efekty oddziaływań rzędów wyższych niż 2 stają się nierozróżnialne od niepewności modelu lub szumu eksperymentalnego? O komentarz poproszę przy okazji obrony.

Przedstawiony cykl publikacji stanowi wartościowy i spójny tematycznie wkład do badań nad fizycznymi ograniczeniami powstawania i obserwacji korelacji kwantowych. Rozprawa dotyczy problematyki aktualnej i ważnej, łączącej aspekty fundamentalne z zagadnieniami istotnymi dla rozwoju technologii kwantowych. Na szczególne podkreślenie zasługują szeroki i dojrzały warsztat teoretyczny doktoranta oraz wysoka jakość dorobku publikacyjnego. Przedstawione uwagi krytyczne nie zmieniają mojej pozytywnej oceny rozprawy i nie podważają wartości merytorycznej uzyskanych rezultatów. Stwierdzam zatem, że **rozprawa doktorska pana mgr. Pawła Samuela Cieślińskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy** ustawy "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce", **oraz zwyczajowe kryteria merytoryczne** przyjmowane w dyscyplinie nauki fizyczne. **Wnoszę o dopuszczenie pana mgr. Pawła Samuela Cieślińskiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego, w tym do publicznej obrony rozprawy.**

Karoline Stojak



Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl