



Prof. dr hab. Paweł Błasiak
Oddział Fizyki Teoretycznej IFJ PAN

Kraków, 4 maja 2026

**Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgr. Pawła Cieślińskiego
“Fizyczne ograniczenia na powstawanie i obserwacje korelacji
o charakterze ściśle kwantowym”**

Rozprawa doktorska Pana mgr. Pawła Cieślińskiego jest zbiorem sześciu artykułów poprzedzonych zwięzłym streszczeniem. W jej skład wchodzi następujące prace:

- (A) Paweł Cieśliński, Jan Dziewior, Lukas Knips, Waldemar Kłobus, Jasmin Meinecke, Tomasz Paterek, Harald Weinfurter, Wiesław Laskowski
Valid and efficient entanglement verification with finite copies of a quantum state
npj Quant. Inf. **10** 14 (2024).
- (B) Paweł Cieśliński, Mateusz Kowalczyk, Wiesław Laskowski, Tamás Vértesi
How likely are you to observe non-locality with imperfect detection efficiency and random measurement settings?
New J. Phys. **27** 074504 (2025).
- (C) Carlo Cepollaro, Ali Akil, Paweł Cieśliński, Anne-Catherine de la Hamette, Časlav Brukner
Sum of Entanglement and Subsystem Coherence Is Invariant under Quantum Reference Frame Transformations
Phys. Rev. Lett. **135** 010201 (2025)
- (D) Paweł Cieśliński, Lukas Knips, Mateusz Kowalczyk, Wiesław Laskowski, Tomasz Paterek, Tamás Vértesi, Harald Weinfurter
Unmasking the Polygamous Nature of Quantum Nonlocality
PNAS **121** (44) e2404455121 (2024)
- (E) Paweł Cieśliński, Waldemar Kłobus, Paweł Kurzyński, Tomasz Paterek, Wiesław Laskowski
The fastest generation of multipartite entanglement with natural interactions
New J. Phys. **25** 093040 (2023).
- (F) Paweł Cieśliński, Paweł Kurzyński, Tomasz Sowiński, Waldemar Kłobus, Wiesław Laskowski
Exploring many-body interactions through quantum Fisher information
Phys. Rev. A **110** 012407 (2024).

Wszystkie artykuły są wieloautorskie i zostały opublikowane w bardzo dobrych czasopismach naukowych. Istotny wkład Kandydata w każdy z tych projektów badawczych nie budzi żadnej wątpliwości. Siłą każdej prężnej grupy badawczej są młodzi, utalentowani i twórczy doktoranci — taką osobą jest niewątpliwie Pan Paweł Cieśliński.

Problem badawczy

Rozprawa doktorska Pana Pawła Cieślińskiego dotyczy ograniczeń narzucanych przez mechanikę kwantową na generowanie kwantowych korelacji oraz na możliwość ich eksperymentalnej obserwacji. Tematykę artykułów wchodzących w skład rozprawy można, w pewnym uproszczeniu, podzielić na trzy kategorie.

- Do pierwszej grupy należą prace [A] i [B], poświęcone ograniczeniom eksperymentalnym i wychodzące naprzeciw praktyce laboratoryjnej. Praca [A] dotyczy analizy świadków splątania przy ograniczonej statystyce pomiarowej, natomiast praca [B] podejmuje problem ograniczonej detekcji w eksperymentach Bella z losowym wyborem ustawień pomiarowych.
- Drugą grupę tworzą prace [C] i [D], które dotyczą koncepcyjnych zagadnień w podstawach teorii kwantów. Praca [C] dotyczy niezmienników transformacyjnych w kwantowych układach odniesienia, natomiast praca [D] pokazuje prawdziwie poligamiczny charakter kwantowych korelacji.
- Do trzeciej grupy zaliczyłbym prace [E] i [F], w których analizowane są szczegółowe problemy związane z wielociałowymi oddziaływaniami opisywanymi Hamiltonianami typu Isinga. Praca [E] dotyczy możliwości szybkiego generowania wielocząstkowego splątania, zaś praca [F] omawia problem rozpoznawania rzędu oddziaływań przy użyciu kwantowej informacji Fishera.

Moim zdaniem prace te tworzą spójną i dobrze umotywowaną całość, trafnie ujętą w tytule rozprawy, tzn. *"Fizyczne ograniczenia na powstawanie i obserwacje korelacji o charakterze ściśle kwantowym"*. Co więcej, ich różnorodność dobrze świadczy o szerokich kompetencjach Kandydata oraz o jego umiejętności efektywnej pracy w zespole. W tym kontekście warto również odnotować dwa dodatkowe artykuły, które nie zostały włączone do rozprawy:

- (1) Paweł Cieśliński, Satoya Imai, Jan Dziewior, Otfried Gühne, Lukas Knips, Wiesław Laskowski, Jasmin Meinecke, Tomasz Paterek, Tamás Vértesi
Analysing quantum systems with randomised measurements
Phys. Rep. **1095** 1-48 (2024).
- (2) Paweł Cieśliński, Marcin Markiewicz, Konrad Schlichtholz, Jan-Åke Larsson, Marek Żukowski
Unquestionable Bell theorem for interwoven frustrated down conversion processes
Phys. Rev. Lett. **136** 090206 (2026).

Pierwszy z nich jest pracą przeglądową dotyczącą analizy stanów kwantowych w eksperymentach z losowymi pomiarami. Drugi artykuł stanowi przyczynek do dyskusji nad łamaniem nierówności Bella w eksperymentach kaskadowych z parametryczną konwersją.

Najważniejsze wyniki

W pracy [A] przedstawiono podejście do problemu weryfikacji splątania przy ograniczonej statystyce pomiarowej. Zaproponowany model pomiaru korelacji kwantowych umożliwia wiarygodne wnioskowanie o łamaniu kryteriów opartych na świadkach splątania oraz optymalizację samego kryterium, zarówno w ujęciu częstościowym, jak i bayesowskim. Problem ten ma istotne znaczenie metodologiczne dla praktycznej analizy danych eksperymentalnych.

Tematyka pracy [B] dotyczy możliwości obserwacji łamania nierówności Bella przy losowym wyborze kierunków pomiarowych. Nowością w tej pracy jest uwzględnienie ograniczonej wydajności detektorów. Problem wychodzi naprzeciw wielkoskalowym zastosowaniom testów nielokalności Bella, gdzie uzgodnienie i kalibracja lokalnych układów odniesienia mogą stanowić poważne wyzwanie eksperymentalne. W pracy wyprowadzono analityczne ograniczenia efektywności w eksperymentach z losowymi ustawieniami dla maksymalnie splątanych stanów dwóch kubitów oraz dwóch ustawień po każdej stronie eksperymentu. Przypadek większej liczby ustawień i cząstek przeanalizowano metodami programowania liniowego pokazując, że spadek efektywności można w ten sposób skutecznie kompensować. Dla stanu GHZ i dwóch ustawień wyprowadzono ponadto nową nierówność Bella z istotnie lepszym ograniczeniem na krytyczną wydajność detekcji.

Praca [C] poświęcona jest transformacjom pomiędzy uogólnionymi układami odniesienia, w których rolę układu referencyjnego pełni cząstka kwantowa. Przy takich transformacjach zarówno ilość koherencji w podukładzie, jak i jego splątanie (mierzone entropią von Neumanna) nie są zachowane oddzielnie. Głównym wynikiem pracy jest twierdzenie, że suma tych dwóch wielkości pozostaje niezmiennikiem takich transformacji, przynajmniej dla dwuczęściowych układów opisanych stanem czystym. Wynik jest bardzo ciekawy z punktu widzenia interpretacji nielokalności Bella w obecności trzeciego, kwantowego układu odniesienia.

Problematyka podjęta w pracy [D] dotyczy współdzielenia nielokalności w układach wielu cząstek. Jedną z istotnych własności teorii niesygnalizujących jest tzw. monogamia nielokalności, czyli brak możliwości równoczesnego łamania nierówności Bella w najprostszym scenariuszu — dwa ustawienia i dwa wyniki — pomiędzy parą AB oraz parą BC w układzie trzech cząstek ABC ($N=3$). Mechanika kwantowa, będąc teorią niesygnalizującą, oczywiście się do niej stosuje. Otwarte pozostawało jednak pytanie, w jakim stopniu własność ta rzeczywiście wyróżnia teorię kwantów. W pracy pokazano, że jest przeciwnie do oczekiwań: korelacje w mechanice kwantowej mogą mieć wysoce poligamiczny charakter. Innymi słowy, przypadek trzech układów $N=3$ jest szczególny. Dla większej liczby układów ($N \geq 4$) można znaleźć kwantowe stany oraz wielocząstkowe nierówności Bella łamane równocześnie na każdym podzbiorze $N-1$ podukładów. Wynik sprawdzono również eksperymentalnie dla sześciu cząstek ($N=6$). Jest to, moim zdaniem, bardzo ciekawy rezultat, który wpisuje się w ważny nurt badań podstawowych nad strukturą korelacji dopuszczalnych przez teorię kwantów.

W pracy [E] przeanalizowano ograniczenia czasowe na generowanie wielokubitowych stanów splątanych w układach z oddziaływaniami dwuczłonowymi o różnym zasięgu. Wychodząc od ograniczenia Mandelstama-Tamma, autorzy zaproponowali metodę poszukiwania Hamiltonianów minimalizujących czas generowania wysokosymetrycznych stanów, takich jak GHZ, W, Dicke i AME. Pokazano jak optymalnie konstruować takie Hamiltoniany, oraz jak czas generacji rozważanych stanów skaluje się wraz z rosnącą liczbą kubitów, ilustrując tym samym przewagę tej metody nad schematami sekwencyjnymi.

W pracy [F] rozważono ograniczenia na maksymalną kwantową informację Fishera dla stanów produktowych oraz Hamiltonianów typu Isinga o ustalonym rzędzie oddziaływań. Ponieważ ograniczenia te porządkują się rosnąco względem maksymalnego rzędu oddziaływania, można je wykorzystać do weryfikacji obecności odpowiednich członów w Hamiltonianie. Pomysł ten zilustrowano, analizując trójkubitowy model XY z domieszką członów trójczłonowych.

Pytania do treści rozprawy

Lektura rozprawy nasunęła mi kilka pytań, które wynikają przede wszystkim z chęci lepszego zrozumienia motywacji, zakresu oraz możliwych konsekwencji przedstawionych wyników. Część z nich wybiega poza szczegółowe problemy rozważane w rozprawie, niemniej z dużym zainteresowaniem wysłucham zarówno odpowiedzi, jak i opinii Kandydata.

[A-1] Ograniczona statystyka wynika zazwyczaj z małej liczby interesujących koincydencji w eksperymencie. Wiąże się to z odrzuceniem części danych eksperymentalnych, a więc post-selekcją. Jak wiadomo, taka procedura może prowadzić do pojawienia się pozornych korelacji, czyli tzw. selection bias. Czy w zaproponowanej analizie świadków splątania istnieje możliwość uwzględnienia również tego typu efektów?

[B-1] Jak rozumiem, w rozważonym scenariuszu problem uzgodnienia lokalnych układów odniesienia modelowany jest przez losowy wybór kierunków dla których mierzona jest funkcja korelacji. Taki pomiar wymaga utrzymania/kontroli danego kierunku w długiej sekwencji eksperymentów, a następnie wykonania kolejnych sekwencji w innych losowych kierunkach. Zastanawia mnie, czy w ramach tego modelu mieści się również scenariusz, w którym uczestnicy otrzymują losowe układy odniesienia, a potem mierzą — z pełną lokalną kontrolą — w wybranych przez siebie, np. dwóch, kierunkach, w tychże układach odniesienia. Jak w takim wariancie wyglądałyby typowość lokalności oraz krytyczna wydajność detekcji potrzebna do łamania nierówności Bella?

[C-1] Rozważane transformacje układów odniesienia, jak pisze Autor, *“dotyczą perspektywy cząstek kwantowych, a nie rzeczywistej zmiany aparatury pomiarowej”*. Czy dobrze rozumiem, że jest to ‘pasywne’ ujęcie zmiany układu odniesienia? Jeśli tak, to jak wyglądałby w tym kontekście obraz ‘aktywny’ takich transformacji? Jak w takim ujęciu należałoby rozumieć względność splątania i nielokalność Bella?

[D-1] Doceniając wynik uzyskany w pracy, chciałbym zapytać o komentarz do następującego, nieco przewrotnego stwierdzenia: *“Brak sygnalizacji w teorii wymusza monogamię, ale mimo to każda taka teoria może cieszyć się poligamią”*. Czy w problemie współdzielenia nielokalności istnieje jakaś szczególna cecha mechaniki kwantowej, która odróżnia ją od ogólnych teorii niesygnalizujących?

[D-2] Mechanika kwantowa jest oczywiście teorią szczególną, np. nie wszystkie niesygnalizujące korelacje można w jej ramach zrealizować. Wynika to z formalizmu matematycznego, który określa, jakie stany i pomiary są fizycznie dopuszczalne. W pracy pokazano istnienie szczególnych stanów, dla których można zaobserwować poligamię nielokalności. Czy — przy zachowaniu swobody wyboru pomiarów — można scharakteryzować klasę stanów, dla których taka poligamia występuje? Jako analogię można tu przywołać twierdzenie Gisin’a, charakteryzujące dwucząstkowe stany czyste łamiące nierówność Bella.

[D-3] Mechanika kwantowa uchodzi za teorię daleką od potocznej intuicji, dlatego szczególnie interesujące byłoby znalezienie sposobu popularyzatorskiego przedstawienia wyników uzyskanych w pracy. Czy pojęcia monogamii i poligamii nielokalności można wykorzystać nie tylko jako trafne terminy techniczne, lecz także jako punkt wyjścia do prostej analogii z życia codziennego? Innymi słowy, czy dałoby się opowiedzieć istotę problemu w formie przystępnej historii o tym, kto z kim, kiedy i na jakich zasadach może dzielić określone (ko)relacje? To pytanie traktuję jako otwarte i niebanalne wyzwanie z zakresu popularyzacji nauki, które — w moim przekonaniu — omawiany wynik w pełni uzasadnia.

[E-1] Czy istnieje prosta intuicja stojąca za tym, że czas generacji stanu GHZ jest taki sam dla $N=3$ i $N=4$ oraz $N=5$ i $N=6$, a także kolejnych par? Dlaczego podobny fenomen nie występuje dla innych rozważonych stanów?

[E-2] Relacja Mandelstama-Tamma nie jest jedynym znanym ograniczeniem na czas kwantowej ewolucji stanów. Czy inne ograniczenia tego typu, np. Margolusa-Levitina, mogłyby prowadzić do lepszych wyborów dwuczątkowych Hamiltonianów generujących pożądane stany?

[F-1] Zastanawia mnie, jakie znaczenie praktyczne może mieć zaproponowana analiza modeli Isinga. Czy istnieje perspektywa systematycznej analizy modeli Isinga w sytuacji, gdy struktura oddziaływań nie jest z góry znana?

Podsumowanie

Przedstawiona rozprawa stanowi oryginalne i wartościowe rozwiązanie szeregu bardzo ciekawych problemów badawczych z dziedziny informacji kwantowej oraz podstaw teorii kwantów. Jej wyniki oceniam jako istotny wkład w zrozumienie zarówno praktycznych, jak i teoretycznych ograniczeń dotyczących generowania i obserwacji korelacji kwantowych.

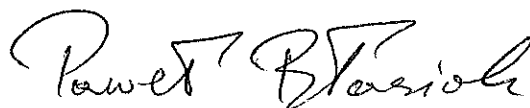
Podsumowując, stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana Pawła Cieślińskiego pt. *“Fizyczne ograniczenia na powstawanie i obserwacje korelacji o charakterze ściśle kwantowym”* spełnia w stopniu wykraczającym ponad standardowe wymagania wszystkie ustawowe i zwyczajowe kryteria stawiane rozprawom doktorskim. **Wnoszę zatem o dopuszczenie jej do dalszej części postępowania doktorskiego.**

Wniosek o wyróżnienie

Rozprawa doktorska Pana Pawła Cieślińskiego obejmuje szerokie spektrum istotnych problemów w dziedzinie podstaw fizyki oraz informacji kwantowej. Prace wchodzące w skład rozprawy zostały opublikowane w bardzo dobrych czasopismach naukowych. Choć mają one zasadniczo charakter teoretyczny część z nich jest bezpośrednio motywowana praktyką eksperymentalną, co dodatkowo podkreśla ich znaczenie.

Aby uzasadnić moją wysoką ocenę, posłużę się jednym przykładem. Na szczególne wyróżnienie zasługuje zwłaszcza praca opublikowana w prestiżowym czasopiśmie PNAS, w której pokazano prawdziwie poligamiczny charakter kwantowych korelacji. Jest to wynik zaskakujący i oryginalny, którego niewiele osób w środowisku mogłoby się spodziewać. Co więcej, przewidywania teoretyczne zostały w tej pracy potwierdzone eksperymentalnie.

Uważam, że dorobek Kandydata jest wyjątkowo bogaty, dojrzały i naukowo wartościowy. Świadczy on nie tylko o bardzo dobrym przygotowaniu merytorycznym, lecz także o samodzielności badawczej, twórczej odwadze oraz ponadprzeciętnych umiejętnościach pracy zespołowej. Ze względu na oryginalność podjętych problemów, wysoką jakość uzyskanych wyników oraz rangę opublikowanych prac **wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej Pana mgr. Pawła Cieślińskiego.**



Paweł Błasiak

