

# Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Giuseppe Viola „Convex optimization methods for multipartite quantum experiments”

## Uwagi wstępne

Forma recenzowanej rozprawy obejmuje 89 stron, praca jest napisana w języku angielskim i składa się z kilku kluczowych części, z wprowadzenia, preliminariów, czterech publikacji naukowych oraz bibliografii. Tytuł pracy oddaje jej zawartość, co jest istotne z punktu widzenia czytelnika i badaczy zainteresowanych podobną tematyką. Część wprowadzająca jest zorganizowana w rozdziałach, które prowadzą od wprowadzenia do zaawansowanych badań nad kwantowymi protokołami komunikacyjnymi. Początkowo autor przedstawia tło badawcze oraz podstawowe pojęcia, takie jak nierówności Bella, programowanie nieujemnie określone, techniki optymalizacji (metody Navascués-Pironio-Acín oraz See-Saw). Następnie analizuje wpływ niedoskonałej komunikacji na certyfikację splątania, opisuje nowy routowany eksperyment Bella do badania nielokalności na dużych odległościach oraz omawia metody wykrywania splątania. Ostatni rozdział dotyczy zadań na grafach, gdzie badana jest przewaga kwantowa w problemach komunikacyjnych. Praca zawiera zbiór artykułów naukowych, których doktorant jest współautorem:

- [A] G. Viola, N. Miklin, M. Gachechiladze, M. Pawłowski. Entanglement witnessing with untrusted detectors. *J. Phys. A: Math. Theor.* 2023; 56 425301.
- [B] A. Chaturvedi, G. Viola, M. Pawłowski. Extending loophole-free nonlocal correlations to arbitrarily large distances. *npj Quantum Inf* 2024;10, 7
- [C] G. Viola, P. Mironowicz. Quantum strategies for rendezvous and domination tasks on graphs with mobile agents. *Phys. Rev. A* 2024;109, 042201.

Do rozprawy dołączono oświadczenia współautorów wyżej wymienionych prac, z których można wywnioskować, iż doktorant miał wpływ na uzyskane w nich wyniki.

## Przedmiot rozprawy

Praca [A] dotyczy wykrywania splątania kwantowego przy użyciu niepewnych detektorów, koncentrując się na problemie detekcji splątania w scenariuszach, gdzie detektory są niepewne, ale ustawienia pomiarowe pozostają zaufane. Autorzy analizują wyzwania związane z efektywnością detekcji w kontekście kryptografii kwantowej oraz eksperymentów Bella, gdzie niskie wydajności detekcji mogą prowadzić do fałszywych wyników. W pracy zaproponowano nowatorskie podejście, które wykorzystuje świadków splątania oraz programowanie nieujemnie określone do poprawy szacowania wymaganych wydajności detekcji, oferując bardziej precyzyjne metody niż dotychczasowe podejścia. Głównym wynikiem pracy jest opracowanie nowego podejścia do detekcji splątania w eksperymentach fotonicznych z niepewnymi detektorami, opartego na analizie dwóch strategii radzenia sobie z utratą detekcji: odrzucania i przypisywania. Autorzy pokazują, że optymalizację w tych przypadkach można sformułować jako problem programowania nieujemnie określonego, co pozwala na dokładne oszacowanie krytycznej wydajności detekcji dla różnych stanów kwantowych. Dla stanu Bella wartość krytyczna to  $1/\sqrt{3}$  dla strategii odrzucania. Praca wprowadza nowy paradygmat częściowej niezależności od urządzeń, gdzie jedynie część detekcyjna procesu pomiaru jest niepewna, co może być istotne dla bezpieczeństwa kryptografii kwantowej.

Praca [B] dotyczy możliwości certyfikacji nieklasycznych korelacji kwantowych na dużych odległościach w eksperymentach typu Bella, w których standardowo występuje problem z luką detekcyjną. Luka ta może prowadzić do błędnych wniosków o Nielokalności kwantowej, jeśli zbyt wiele splątanych cząstek nie zostanie wykrytych. Autorzy proponują nową metodę, polegającą na losowym wybieraniu lokalizacji urządzeń pomiarowych w każdej rundzie eksperymentu, co pozwala na certyfikację korelacji nielokalnych na dowolnie dużych dystansach, gdy urządzenia blisko źródła działają bezbłędnie. Praca wprowadza analityczny związek między nielokalnością wykrywaną blisko źródła a wymaganiami na efektywność detekcji i widoczność na dużych odległościach oraz proponuje techniki numeryczne do szacowania krytycznych parametrów w złożonych sieciach pomiarowych.

Główny wynik pracy polega na wprowadzeniu nowego schematu eksperymentów Bell'a, który umożliwia przezwycięzenie luki detekcyjnej, największej przeszkody w certyfikacji nielokalnych korelacji na dużych odległościach. Autorzy proponują tzw. "routowane" eksperymenty Bell'a, w których lokalizacja urządzeń pomiarowych jest wybierana losowo w każdej rundzie. Dzięki temu, gdy urządzenia

blisko źródła wykazują silne nielokalne korelacje wolne od luk, można certyfikować nielokalność na większych odległościach, nawet przy bardzo niskiej efektywności detekcji i widoczności.

Schemat ten umożliwia rozszerzenie silnych korelacji nielokalnych na dowolną liczbę urządzeń umieszczonych daleko od źródła oraz certyfikację nielokalności przy użyciu standardowych urządzeń komercyjnych. Może również służyć do wdrażania protokołów kwantowej dystrybucji kluczy (DIQKD), chociaż obecne podejście jest podatne na pewne aktywne ataki.

Praca dotyczy [C] zastosowania splątania kwantowego do rozwiązywania problemów koordynacji działań przez rozproszonych agentów w teorii grafów, ze szczególnym uwzględnieniem dwóch zadań: rendezvous (spotkanie) oraz dominacji w grafach. W artykule badane jest, jak splątanie kwantowe może być wykorzystane do usprawnienia współpracy między agentami dążącymi do wspólnego celu, nawet w sytuacjach, gdy komunikacja między nimi jest ograniczona lub nieobecna.

W pracy wykorzystano programowanie półokreślone (SDP) i metody takie jak Navascués-Pironio-Acín (NPA) oraz metodę wahadłową, aby zbadać, w jaki sposób zasoby kwantowe mogą przekroczyć ograniczenia klasyczne w takich zadaniach. Praca prezentuje również symulacje numeryczne na różnych strukturach grafów, które pokazują przewagę strategii kwantowych nad klasycznymi.

Głównym wynikiem pracy jest wykazanie, że splątanie kwantowe może zapewniać przewagę nad klasycznymi strategiami w zadaniach koordynacji rozproszonych agentów, takich jak spotkanie oraz dominacja w grafach, jednak tylko w przypadku dwóch agentów. W badaniach nad tymi zadaniami, przeprowadzonych na różnych typach grafów, wykazano przewagę kwantową dla scenariuszy dwuagentowych, natomiast nie udało się zaobserwować podobnej przewagi w przypadku trzech agentów.

Wynik ten sugeruje, że splątanie kwantowe może być efektywne dla zadań z dwoma agentami, ale jego zastosowanie do większej liczby agentów pozostaje otwartym pytaniem, wymagającym dalszych badań. Artykuł wskazuje na potrzebę poszukiwania przykładów i zrozumienia przyczyn braku kwantowej przewagi dla większej liczby agentów, a także na możliwość wykorzystania tej metody do wyszukiwania nierówności Bella dla zadań o różnej liczbie wejść i wyjść.

## Ocena końcowa i wnioski

Rozprawa doktorska mgra Giuseppe Violi pt. "Convex optimization methods for multipartite quantum experiments" stanowi ważny wkład w rozwój nauki, zarówno z perspektywy teoretycznej, jak i praktycznej. Trzy omówione artykuły wskazują, że splątanie kwantowe i nielokalność mogą znacząco poprawić wydajność rozproszonych zadań, takich jak certyfikacja korelacji nielokalnych na duże

odległości czy koordynacja agentów w problemach grafowych. Największe korzyści obserwowane są w scenariuszach dwuagentowych, natomiast w przypadku większej liczby agentów przewaga kwantowa staje się trudna do uzyskania. Badania te sugerują, że zastosowania kwantowe wymagają precyzyjnego dostosowania do specyfiki zadań, co otwiera pole do dalszych badań nad ograniczeniami i możliwościami strategii kwantowych w bardziej złożonych scenariuszach.

Istotnym osiągnięciem naukowym autora jest zastosowanie splątania kwantowego i nielokalności w rozwiązywaniu praktycznych problemów rozproszonych zadań, takich jak koordynacja działań agentów na grafach oraz certyfikacja korelacji nielokalnych na duże odległości. Rozprawa wnosi znaczący wkład w rozwój teorii i zastosowań informatyki kwantowej, szczególnie w kontekście wykorzystywania zasobów kwantowych do poprawy efektywności zadań, które tradycyjnie opierały się na metodach klasycznych. Prace te rozszerzają możliwości zastosowania technologii kwantowych, jednocześnie wskazując na nowe wyzwania i otwierając kierunki dalszych badań w obszarze wykorzystania przewagi kwantowej w różnych scenariuszach wieloagentowych.

**Uważam że przedstawiona rozprawa spełnia wymogi ustawowe stawiane pracom doktorskim w dziedzinie nauk ścisłych i przyrodniczych w dyscyplinie nauki fizyczne i wnoszę o przyjęcie jej przez Radę Dyscypliny Nauki fizyczne Uniwersytetu Gdańskiego w Gdańsku, oraz o dopuszczenie do publicznej obrony.**

prof. dr hab. Zbigniew Puchała