

Warszawa, 9. września 2024 r.

dr. hab Alexander Streltsov, prof. IPPT PAN
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN
ul. Pawińskiego 5B
02-106 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej
Pana mgr. **Giuseppe Viola**
p.t.:

Convex optimization methods for multipartite quantum experiments
złożonej do Rady Naukowej Dyscypliny Nauki Fizyczne
na Uniwersytecie Gdańskim

Praca doktorska zatytułowana „Convex optimization methods for multipartite quantum experiments” autorstwa Giuseppe Violi bada wykorzystanie mechaniki kwantowej w celu zwiększenia wydajności różnych zadań komunikacyjnych i decyzyjnych. Praca koncentruje się na wykorzystaniu strategii kwantowych w porównaniu ze strategiami klasycznymi, przy pomocy technik optymalizacji wypukłej.

Praca składa się z abstraktu, wprowadzenia, zwięzłego podsumowania wyników, perspektyw oraz następujących recenzowanych artykułów:

- [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.

We wstępie do rozprawy (rozdział 1) autor przedstawia, w jaki sposób mechanika kwantowa znacząco rozwinęła technologię od XX wieku, w szczególności dzięki protokołom takim jak niezależna od urządzenia kwantowa dystrybucja klucza i ekspansja losowości. Rozwój ten był możliwy dzięki badaniu nieklasycznych korelacji, które ułatwiają bezpieczną wymianę kluczy kryptograficznych między przestrzennie oddzielonymi agentami. Teza podkreśla również wpływ badań Bella na identyfikację korelacji kwantowych, których nie można osiągnąć w systemach klasycznych. Co więcej, podkreśla ona rolę programowania półskończonego (angl. semidefinite programming, SDP) i jego zastosowań, takich jak hierarchie NPA i metoda “see-saw”, w efektywnym rozwiązywaniu złożonych problemów kwantowych, które wymagają minimalizacji funkcji liniowych z dodatnimi ograniczeniami półnieskończonymi. We wstępie przedstawiono zwięzłe podsumowanie głównych wyników trzech artykułów naukowych.

Rozdział 2 zawiera podsumowanie wyników, zaczynając od podstawowych pojęć i metod niezbędnych do zrozumienia badań. Sekcja 2.1 rozpoczyna się od przeglądu notacji i definicji stosowanych w informatyce kwantowej. Następnie wprowadzono nierówności Bella,

które są kluczowe dla identyfikacji korelacji kwantowych, które wymykają się klasycznym wyjaśnieniom. W dalszej części rozdziału objaśniono programowanie półnieskończone, technikę numeryczną wykorzystywaną do rozwiązywania problemów optymalizacyjnych istotnych dla niniejszej rozprawy. W dalszej części opisano konkretną metodę SDP znaną jako metoda NPA i metoda "see-saw", które odpowiadają na pewne wyzwania obliczeniowe w kwantowej teorii informacji.

Sekcja 2.2 dotyczy wyzwań związanych z niedoskonałą komunikacją kwantową, szczególnie gdy fotony są używane do kodowania stanów kwantowych. Transmisja fotonów przez medium może prowadzić do absorpcji, powodując zdarzenia typu „no-click”, w których detektory nie rejestrują fotonów. Problem ten jest potęgowany przez niedoskonałe detektory i zwiększa się wraz z odległością, jaką muszą pokonać fotony. Aby poradzić sobie z tymi problemami, zaproponowano trzy strategie: strategię odrzucania (w której każda runda eksperymentu ze zdarzeniem braku kliknięcia jest odrzucana), strategię przypisywania (w której zdarzeniom braku kliknięcia przypisywana jest z góry określona wartość) oraz strategię zachowywania wszystkiego (w której zdarzenia braku kliknięcia są traktowane jako dodatkowe wyniki). Sekcje 2.3, 2.4 i 2.5 zawierają zwięzłe podsumowanie głównych wyników trzech artykułów, na których opiera się rozprawa. Rozdział 3 rozprawy przedstawia perspektywy, osadzając wyniki rozprawy w szerszym kontekście. Poniżej szczegółowo omówię każdy z artykułów.

Pierwszy artykuł

Pierwszy artykuł bada problem wydajności detekcji w detekcji splątania, koncentrując się na tym, jak ukryte zmienne mogą wpływać na zachowanie detektora, podobnie jak w testach Bella. W artykule omówiono, w jaki sposób ukryte zmienne mogą wpływać na obserwowane wspólne rozkłady prawdopodobieństwa w świadkach splątania poprzez kontrolowanie wydajności detektorów. Scenariusz ten może prowadzić do stroniczych wyników, jeśli nie zostanie odpowiednio uwzględniony.

Strategia odrzucania: Autorzy analizują strategię, w której zdarzenia bez kliknięć detektora są odrzucane. Sformułowali ten problem jako problem programowania półnieskończonego (SDP) w celu znalezienia minimalnej wartości oczekiwanej możliwej do osiągnięcia ze świadkiem splątania dla stanów rozłącznych, biorąc pod uwagę określoną skuteczność wykrywania. Krytyczna skuteczność wykrywania, poniżej której nie można wykryć splątania, jest wyprowadzana dla różnych świadków. Na przykład wykazano, że krytyczna wydajność dla konkretnego świadka Bella jest znacznie niższa niż w tradycyjnych eksperymentach Bella.

Strategia przydziału: W artykule zbadano również alternatywną strategię, w której nieobserwowanym zdarzeniom (niekliknięciom) przypisuje się określone wyniki. Autorzy wyprowadzają warunki, w których nie występuje fałszywe wykrycie splątania i formułują kolejne SDP w celu oszacowania minimalnej wartości świadka w ramach tej strategii.

Artykuł porównuje strategie odrzucania i przypisywania, podkreślając warunki, w których każda strategia może niezawodnie wykrywać splątanie. Wykazano, że strategia przypisania

wymaga starannego wyboru przypisań, aby uniknąć fałszywych alarmów, szczególnie w przypadku złośliwych detektorów.

Ogólnie rzecz biorąc, wyniki zapewniają rygorystyczne ramy do zrozumienia i optymalizacji wykrywania splątania w scenariuszach z niedoskonałymi detektorami, przy użyciu zaawansowanych narzędzi matematycznych, takich jak programowanie półnieskończone. Praca ta ma implikacje dla projektowania i analizy eksperymentów kwantowych, w których nieefektywność detektora może w przeciwnym razie zagrozić wiarygodności wyników.

Należy również podkreślić, że Giuseppe Viola jest głównym autorem tego artykułu.

Drugi artykuł

Drugi artykuł rozwija to, co autorzy nazywają „routed Bell experiment”, pomysł, który pozwala testować nielocalne zjawiska kwantowe na dużych odległościach, nawet przy niedoskonałej komunikacji. Propozycja eksperymentu obejmuje źródło, które wysyła stany kwantowe do dwóch agentów: jednego znajdującego się blisko źródła i drugiego, który może być blisko lub daleko od źródła, określonego przez losowy przełącznik. Bliscy agenci wykonują pomiary stanów kwantowych w celu znalezienia korelacji, które maksymalnie naruszają nierówność CHSH, kluczowy wskaźnik splątania kwantowego i nielokalności.

Autorzy przedstawiają dwa kluczowe wyniki, które są sformułowane jako twierdzenia. Twierdzenie 1 rozważa idealny scenariusz, w którym urządzenia pomiarowe w pobliżu źródła są doskonałe, co oznacza, że działają z wydajnością 100%. Twierdzenie 1 pokazuje, że gdy te doskonałe urządzenia są świadkami maksymalnie nielocalnych korelacji - w szczególności korelacji, które osiągają teoretyczną maksymalną wartość w nierówności CHSH - ta nielocalność może zostać rozszerzona na inne urządzenie pomiarowe umieszczone dowolnie daleko od źródła. Wynik ten wskazuje, że tak długo, jak bliskie urządzenia są doskonałe, wolne od luk nielocalne korelacje mogą być operacyjnie certyfikowane niezależnie od wydajności odległego urządzenia. Twierdzenie to jest istotne, ponieważ pokazuje, że w idealnych warunkach nielocalne zjawiska kwantowe mogą być obserwowane i certyfikowane na dowolną odległość.

Badanie dotyczy bardziej realistycznych scenariuszy, w których urządzenia w pobliżu źródła nie są doskonałe. Twierdzenie 2 wprowadza analityczny kompromis specyficzny dla nierówności CHSH, pokazując, że poziom nielocalności obserwowany przez bliskie urządzenia bezpośrednio wpływa na wymagania progowe dla odległego urządzenia. W szczególności, twierdzenie mówi, że im wyższa nielocalność wolna od luk jest obserwowana w pobliżu źródła, tym niższe są wymagania dotyczące wydajności i dokładności dla odległego urządzenia, aby nadal poświadczać nielocalne korelacje. Ten kompromis jest sformalizowany poprzez nierówność, która musi zostać naruszona, aby nielocalne korelacje były certyfikowane, nawet gdy urządzenia są niedoskonałe. Wynik ten ma kluczowe znaczenie dla praktycznych zastosowań, ponieważ zapewnia sposób na osiągnięcie nielocalności w realistycznych konfiguracjach eksperymentalnych, w których doskonałe urządzenia nie są dostępne.

Autorzy omawiają również techniki numerycznej optymalizacji wypukłej w celu ilościowego określenia maksymalnej mocy predykcyjnej przeciwnika kontrolującego źródło. Pozwala to

ocenić, w jaki sposób nieefektywność urządzeń używanych przez odległego agenta wpływa na stopień losowości, który można poświadczyć. Wyniki wskazują, że nawet przy niedoskonałych urządzeniach nadal można osiągnąć znaczną losowość, chociaż istnieje kompromis w zależności od poziomu nieefektywności urządzenia. W artykule zbadano optymalne warunki, w których agenci mogą poświadczyć, że wyniki pomiarów przeprowadzonych przez odległego agenta są prawdziwie losowe. Wiąże się to ze znalezieniem najlepszej konfiguracji eksperymentalnej, w tym rozmieszczenia agentów i charakterystyki używanych urządzeń, aby zmaksymalizować naruszenie nierówności CHSH i zapewnić wyniki wolne od luk.

Podsumowując, artykuł pokazuje, że przy starannym zaprojektowaniu i optymalizacji eksperymentu możliwe jest obserwowanie i certyfikowanie nielokalnych zjawisk kwantowych i losowości na dużych odległościach, nawet w obecności niedoskonałej komunikacji i urządzeń.

Zgodnie z informacjami o autorach publikacji, wszyscy autorzy mieli równy wkład w powstanie manuskryptu. Oznacza to, że Giuseppe Viola można przypisać 33,3% wkładu w ten artykuł.

Trzeci artykuł

Trzeci artykuł bada, w jaki sposób współdzielenie stanów kwantowych może zwiększyć wydajność w zadaniach komunikacyjnych, szczególnie w przypadku problemów opartych na grafach. Główny nacisk położono na dwa konkretne zadania: zadanie spotkania (rendezvous task) i zadanie dominacji (domination task).

W zadaniu spotkania, n agentów jest rozmieszczonych na wierzchołkach grafu i dąży do spotkania w tym samym węźle po przebyciu h krawędzi. Agenci znają strukturę grafu z wyprzedzeniem i mogą uzgodnić strategię przed ustaleniem swoich początkowych pozycji. Jednak po zajęciu pozycji nie mogą się ze sobą komunikować. Zadanie dominacji obejmuje n agentów losowo umieszczonych na grafie. Celem jest maksymalizacja liczby zdominowanych wierzchołków po przejściu przez h krawędzi, gdzie wierzchołek jest zdominowany, jeśli jest zajęty przez agenta lub sąsiaduje z wierzchołkiem zajmowanym przez agenta. Podobnie jak w przypadku zadania rendezvous, agenci nie mogą komunikować się po zajęciu pozycji i mogą jedynie wcześniej uzgodnić strategię. Artykuł wykorzystuje metody optymalizacji wypukłej do porównania strategii kwantowych z klasycznymi. Pokazuje, że strategie kwantowe mogą osiągnąć lepszą wydajność pod względem prawdopodobieństwa sukcesu.

W artykule wykorzystano różne metody numeryczne, w szczególności metody opracowane przez Navascués, Pironio, i Acín (NPA) do wykrywania nielokalnych korelacji oraz tak zwany algorytm see-saw, który jest również szeroko stosowany w literaturze na temat nielokalności. Przewaga kwantowa została obliczona jako procentowa poprawa prawdopodobieństwa sukcesu odpowiedniego zadania.

Autorzy wyczerpująco zbadali różne struktury grafów, pokazane na rys. 1 artykułu. W jednoetapowym zadaniu spotkania - tj. gdy agenci mogą wykonać tylko jeden krok - splątanie kwantowe zapewnia przewagę nad klasycznymi strategiami w kilku przypadkach,

zwłaszcza gdy agenci mogą wystartować z dowolnej pozycji. Podobne wyniki zaobserwowano dla jednoetapowego zadania dominacji. Autorzy porównali również sytuację, w której agenci mogą lub nie mogą startować z tych samych pozycji oraz gdy agenci są ograniczeni do strategii symetrycznych. W przypadku dwóch agentów we wszystkich tych przypadkach stwierdzono przewagę kwantową dla niektórych geometrii grafów. Dla trzech agentów nie znaleziono przewagi kwantowej.

Giuseppe Viola jest głównym autorem tego artykułu.

Podsumowanie

Podsumowując, rozprawa stanowi kompleksowe badanie tego, w jaki sposób mechanika kwantowa może poprawić wydajność komunikacji i zadań decyzyjnych za pomocą zaawansowanych technik optymalizacji. Rozprawa skutecznie wykorzystuje metody optymalizacji wypukłej, w szczególności programowanie półnieskończone, w celu sprostania wyzwaniom kwantowej teorii informacji. Trzy główne artykuły przedstawione w dysertacji wnoszą znaczący wkład w wykrywanie splątania z niedoskonałymi detektorami, rozszerzanie nielokalnych korelacji na duże odległości z realistycznymi niedoskonałościami urządzeń oraz optymalizację wydajności w zadaniach komunikacyjnych opartych na grafach przy użyciu strategii kwantowych. Każde badanie pokazuje, w jaki sposób podejścia kwantowe mogą oferować ulepszenia w stosunku do metod klasycznych, podkreślając praktyczne zalety włączenia technik kwantowych do ustawień komunikacyjnych. Wyniki artykułów nie tylko dostarczają teoretycznych postępów, ale także oferują praktyczne rozwiązania w zakresie optymalizacji eksperymentów i protokołów kwantowych. Przedstawione prace torują zatem drogę dla przyszłych badań w informatyce kwantowej, demonstrując potencjał mechaniki kwantowej do przesuwania granic technologii i rozwiązywania problemów w innowacyjny sposób.

Biorąc powyższe pod uwagę, stwierdzam, że rozprawa stanowi istotny wkład w dziedzinę informatyki kwantowej i spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie Giuseppe Violi do dalszych etapów przewodu doktorskiego.