

Recenzja pracy doktorskiej
pt. „*Bell non-locality and certification in quantum devices*”
mgr. Gabriela Pereiry Alvesa

Ogólny zarys. Praca doktorska pt. „*Nielokalność Bella i certyfikacja urządzeń kwantowych*” została przygotowana przez Gabriela Pereirę Alvesa pod kierunkiem dr hab. Jędrzeja Kaniewskiego na Uniwersytecie Warszawskim. Rozprawa ma formę cyklu trzech artykułów badawczych, których współautorem jest Kandydat. Dwa z nich zostały opublikowane w renomowanym czasopiśmie fizycznym *Physical Review A*, natomiast ostatni został zamieszczony w bazie preprintów arXiv.org. Cykl poprzedzony jest dwoma rozdziałami uzupełniającymi, które nakreślają kontekst i motywację badawczą oraz wprowadzają bardziej szczegółowe pojęcia i techniki, takie jak nielokalność Bella, hierarchia NPA czy optymalizacja huśtawkowa, które są wykorzystywane w artykułach. Każda publikacja poprzedzona jest również krótkim podsumowaniem uzyskanych wyników i opisem wkładu Autora w jej powstanie. Prace doktorską wieńczą uwagi końcowe. Cały dokument napisany jest w języku angielskim na bardzo dobrym poziomie, co ułatwia jego czytanie i zrozumienie. Ma on jednak dwie drobne wady, które warto tutaj wymienić:

1. Uważam, że w rozdziale końcowym rozprawy Autor mógł dodać kilka zdań nakreślających możliwe kierunki dalszych badań, które wynikają z otrzymanych wyników; taką dyskusję można niemniej jednak znaleźć na końcu każdego z artykułów.
2. W rozdziale 2 nie ma żadnej wzmianki o technikach uczenia maszynowego, przez co można odnieść wrażenie, że trzeci artykuł występuje w rozprawie nieco na doczepkę.

Badania. Praca poświęcona jest charakteryzacji korelacji nieklasycznych w dwóch scenariuszach, scenariuszu Bella i scenariuszu przygotuj i zmierz (ang. *prepare and measure*), które są jednymi z najczęściej rozważanych w literaturze ram do eksploracji nieklasycznych aspektów teorii kwantowej. W istocie oba scenariusze to doskonały obszar do testowania jak daleko teoria kwantów odbiega od fizyki klasycznej i jakie są jej ograniczenia. Jednocześnie, owe korelacje są wykorzystywane jako zasoby do interesujących zastosowań, z których jednym jest certyfikacja kwantowych stanów i pomiarów, co jest kolejnym obszarem zainteresowania pracy. Choć powyższe obszary były intensywnie badane w ostatnich latach, nadal istnieją istotne zagadnienia, które wymagają dalszej eksploracji, takie jak na przykład związek między niezgodnością pomiaru a nielokalnością Bella, który jest badany w pracy. Z drugiej strony, potrzebne są nowe narzędzia lub podejścia, które pozwoliłyby na uzyskanie ważnych przełomów w dziedzinie. Niniejsza praca jest odpowiedzią na te potrzeby. W rzeczywistości nie tylko wprowadza ona szereg nietrywialnych wyników dotyczących charakteryzacji powyższych form korelacji nieklasycznych, które stanowią niezwykle wartościowy wkład w tę dziedzinę, ale także bada potencjał metod uczenia maszynowego w kontekście nielokalności Bella. Poniżej opisuję bardziej szczegółowo uzyskane wyniki i krótko je komentuję.

Praca nr 1. Pierwszy artykuł rozprawy koncentruje się na dwuosobowym scenariuszu Bella i wprowadza ogólną konstrukcję funkcjonałów Bella, które osiągają maksymalną wartość kwantową przez dowolne pary d -wynikowych niekompatybilnych projektywnych pomiarów kwantowych i maksymalnie splątany stan

kwantowych dwóch kubitów, gdzie d jest dowolną liczbą naturalną większą niż dwa. Udowodniono, że dla dowolnej pary takich pomiarów, z otrzymanego funkcjonału można stworzyć nietrywialną nierówność Bella, tzn. taką, która jest łamana przez pewne korelacje kwantowe. Następnie Autor bada użyteczność tych nierówności Bella do certyfikacji, pokazując, że przy pewnych założeniach pozwalają one na samotestowanie dwuciałowego stanu maksymalnie splątanego o dowolnym wymiarze podukładu. Pokazano jednocześnie, że choć podobnego twierdzenia nie można udowodnić dla pomiarów kwantowych, operatory pomiaru muszą spełniać pewne relacje algebraiczne. Zbadano również odporność nierówności na szum, przyjmując prosty model szumu, w którym początkowy stan czysty jest zaburzony przez biały szum. Celem jest znalezienie nierówności Bella, która wykazuje łamanie kantowe dla najniższej wartości parametru mieszania. Autorzy wyprowadzają tutaj dolne ograniczenie na maksymalne wartości klasyczne rozważanych funkcjonałów, a także dowodzą, że są one osiągalne dla dowolnego parzystego wymiaru podukładu przy bardzo specyficznych pomiarach. Różnica pomiędzy maksymalnymi wartościami kwantową i klasyczną daje ową odporność na biały szum.

To bardzo interesująca praca, która z jednej strony idealnie wpisuje się w podejmowane w ostatnich latach wysiłki zmierzające do stworzenia nierówności Bella, dla których można analitycznie wyznaczyć maksymalne wartości kwantowe wraz ze stanem i pomiarami kwantowymi osiągającymi te wartości. Takie nierówności mają bowiem kluczowe znaczenie w kontekście zastosowań nielokalności Bella w zadaniach kwantowej informacji w wersji niezależnej od urządzeń (ang. *device-independent*). Konstruowanie ich dla konkretnych realizacji kwantowych jest jednak bardzo trudnym zadaniem; nie istnieją bowiem ogólne metody analityczne pozwalające osiągnąć ten cel. Z drugiej strony, w pracy udowodniono, że każda para niekompatybilnych pomiarów d -wynikowych może łamać maksymalnie nierówności Bella i w tym sensie jest optymalna dla pewnych zastosowań w wersji niezależnej od urządzeń. Praca ta więc świetnie uzupełnia wcześniejsze badania innych naukowców eksplorujących związek między niekompatybilnością pomiarów kwantowych a nielokalnością Bella; można tutaj wspomnieć o pracy [14] pokazującej, że każda para niekompatybilnych pomiarów projektywnych pozwala na łamanie nierówności Bella.

Zabrakło mi jednak w pracy lub w samym doktoracie krótkiej dyskusji na temat możliwości uogólnienia konstrukcji na przypadek większej liczby niekompatybilnych pomiarów. Dla dowolnego zestawu pomiarów, które są parami niekompatybilne, można by potencjalnie osiągnąć ten cel sumując kilka funkcjonałów Bella opracowanych w pracy, z których każdy byłby dopasowany do innej pary pomiarów. Nie jest jednak jasne, czy konstrukcja zaprezentowana w pracy może być uogólniona na przypadek, w którym pomiary mogą nie być parami niekompatybilne, ale cały zestaw jest niekompatybilny w tym sensie, że nie istnieje wspólny wektor współdzielony przez wszystkie bazy pomiarowe. Proponuję, aby Autor skomentował ten aspekt w trakcie obrony.

Praca nr 2. Druga praca koncentruje się na kwantowych kodach swobodnego dostępu (QRAC), które są dwuosobowymi zadaniami komunikacyjnymi wykazującymi, podobnie jak scenariusz Bella korelacje nieklasyczne, ale są prostsze do analizy. Stanowią zatem atrakcyjną alternatywę dla scenariusza Bella, gdzie kosztem założenia, że układ kwantowy przesyłany między obserwatorami ma ustalony wymiar, można uzyskać bardziej ogólne wyniki analityczne. Dlatego też QRAC są intensywnie badane w literaturze, również w kontekście certyfikacji stanów kwantowych i pomiarów; przykładowo, ogólny schemat samotestowania dowolnych zbiorów stanów czystych i pomiarów ekstremalnych został ostatnio zaproponowany przez Navascués, Vértesiego i Araújo. Nawiasem mówiąc uważam, że w Rozdziale 2, który zawiera krótkie wprowadzenie do kwantowych kodów swobodnego dostępu, Autor powinien był wspomnieć o ostatnich wynikach dotyczących certyfikacji stanów i pomiarów w tym scenariuszu.

W pracy Kandydat rozważa ogólniejszą wersję kodów, w której wejścia do urządzeń pomiarowych nadawcy i odbiorcy mogą być losowane z dowolnego rozkładu, a nie z jednorodnego jak to ma miejsce w przypadku dotychczas rozważanych kodów; dalej kody te będą nazywane kodami obciążonymi. Otwiera to zupełnie nowe możliwości z punktu widzenia badania korelacji nieklasycznych w scenariuszu przygotuj i zmierz. Co więcej,

nowe kody mogą być również interesujące z punktu widzenia certyfikacji kwantowej. Nadal jednak, aby zachować spójność z oryginalnym sformułowaniem kodów, a także aby nieco uprościć charakterystykę ich ogólniejszej wersji, zakłada się, że wejścia nadawcy i odbiorcy są nieskorelowane.

Obciążone kody są badane w pracy zarówno od strony analitycznej, jak i numerycznej. Na froncie analitycznym Autorzy z jednej strony wprowadzają kilka uproszczeń do bardzo trudnego problemu wyznaczania optymalnych strategii klasycznych. Z drugiej strony, w szczególnych przypadkach, w których dane wejściowe nadawcy składają się z wielu bitów lub dwóch ditek, wyprowadzane są ograniczenia górne na maksymalne wartości kwantowe prawdopodobieństwa sukcesu w przypadku pomiarów rzutowych, a osiągalność tych ograniczeń jest dokładnie badana. W najprostszych przypadkach obciążonych kodów, takich jak $2^2 \rightarrow 1$, formułowane są również oświadczenia certyfikacyjne dla pomiarów. Następnie, od strony numerycznej Autorzy wprowadzają pakiet obliczeniowy, który między innymi zawiera metodę typu huśtawkowego pozwalającą ograniczać maksymalne wartości kwantowe obciążonych kodów od dołu. To podejście jest testowane dla kilku przypadków kodów i uzyskane wyniki są porównywane z wyprowadzonymi ograniczeniami analitycznymi, co jest bardzo dobrze podsumowane na rys. 4, 5 i 6.

To bardzo cenna praca, w której dogłębnie zbadano ogólniejszą wersję kodów swobodnego dostępu i podano szereg nietrywialnych i istotnych wyników. Mam jednak małą uwagę krytyczną. Uważam, że w artykule bądź w pracy doktorskiej, Autor mógł poświęcić kilka zdań na dyskusję na temat możliwości, jakie ten nowy scenariusz wnosi do problemu certyfikacji. O ile rozumiem, że wyprowadzenie wyników dotyczących certyfikacji dla bardziej złożonych b-QRAC wykraczających poza najprostsze przypadki wymienione w artykule jest zadaniem trudnym, to jednak Autor mógł zawrzeć w pracy swój punkt widzenia na temat tego, czy obciążone kody mogą wnieść coś nowego do tego obszaru. Proponuję, aby Autor odniósł się do tego aspektu w trakcie obrony.

Praca nr 3. Trzecia publikacja stanowiąca tezę ponownie dotyczy nielokalności Bella, tym razem w najprostszym scenariuszu, zwyczajowo zwanym scenariuszem CHSH, obejmującym dwóch obserwatorów, z których każdy może wykonać dwa różne pomiary dwuwynikowe na swoim podukładzie. Celem jest tutaj zbadanie użyteczności metod uczenia maszynowego (ML) w problemie decydowania, czy dane korelacje spełniające warunki niesygnalizacyjne są kwantowe, czy nie. Autorzy skupiają się głównie na sieciach neuronowych i maszynach wektorów nośnych, które spośród testowanych technik ML wydają się najlepiej odpowiadać powyższemu celowi. Rozważane są dwa przypadki na poziomie korelacji, w których można skutecznie ocenić wydajność uczenia maszynowego. Pierwszy, a zarazem prostszy, to ten, którym wszystkie lokalne wartości oczekiwane pomiarów są ustalone jako zero, a drugi to ten, w którym dozwolona jest cała przestrzeń CHSH. W pierwszym przypadku granicę zbioru korelacji kwantowych można analitycznie opisać za pomocą prostych nierówności, podczas gdy w drugim przypadku nie ma analogicznego opisu analitycznego, jednak zbiór kwantowy można bardzo dokładnie przybliżyć za pomocą hierarchii NPA.

Chociaż praca ta nie wprowadza żadnych nowych konkluzji jeśli chodzi o nasze rozumienie korelacji kwantowych w najprostszym scenariuszu Bella, to nadal stanowi ona niezwykle cenny wkład w tę dziedzinę, ponieważ stanowi pierwsze tak kompleksowe badanie oceniające wydajność technik uczenia maszynowego w określaniu brzegu zbioru korelacji kwantowego. W rzeczywistości formułuje ona szereg wniosków na temat zalet i ograniczeń stosowania takich technik w problemach związanych z nielokalnością kwantową. Ponadto artykuł jest dobrze napisany, dostarcza wielu przydatnych szczegółów na temat technik uczenia maszynowego, dzięki czemu może służyć jako dobry punkt odniesienia dla każdego zainteresowanego zastosowaniem tych metod do problemów związanych z nielokalnością Bella.

Konkluzja. Jest to z pewnością solidna praca doktorska, która zawiera szereg cennych i wysoce nietrywialnych wyników dotyczących korelacji nieklasycznych, takich jak nielokalność Bella, a także pogłębia naszą wiedzę na temat skuteczności technik uczenia maszynowego w problemach związanych z nielokalnością Bella. Chociaż spośród wszystkich wyników najbardziej zaimponowała mi ogólna konstrukcja nierówności Bella dla dowolnej

pary niekompatybilnych pomiarów kwantowych, uważam, że wszystkie prace będą miały znaczący wpływ na dziedzinę. Innym aspektem wartym podkreślenia jest to, że wszystkie publikacje tworzące rozprawę są bardzo dobrze napisane i naprawdę dogłębnie badają dany problem. W szczególności dowodzą, że Autor zdobył niezbędną wiedzę, aby uzyskać stopień doktora w dyscyplinie nauki fizyczne. Z drugiej strony wszystkie uwagi krytyczne wymienione w mojej recenzji są niewielkiego kalibru i nie wpływają na moją pozytywną ocenę rozprawy.

W związku z tym stwierdzam, że niniejsza praca doktorska spełnia wszystkie wymogi ustawowe i dlatego wnoszę o dopuszczenie mgr. Gabriela Pereiry Alvesa do kolejnych etapów postępowania doktorskiego, a w szczególności do publicznej obrony.

Remigiusz Augustek

14.11.2024