

**Recenzja rozprawy doktorskiej magistra Rafaela Freitas dos Santos
„Certification of quantum states and measurements in contextuality scenarios”**

Problem badawczy:

Celem przedstawionej rozprawy doktorskiej jest stworzenie nowych protokołów certyfikacji stanów kwantowych, które bazowałyby na kontekstualności — nieklasycznej własności układów kwantowych, która jest uogólnieniem nielokalności Bella i stosuje się nawet do pojedynczych układów kwantowych o więcej niż dwóch stanach. Tematyka pracy dotyczy podstaw fizyki kwantowej i kwantowej teorii informacji. Dokładniej, wpisuje się w jeden z bardziej popularnych kierunków badań nad kontekstualnością kwantową. Zbadanie powyższego problemu wymagało od Kandydata zdobycia i zastosowania szerokiej wiedzy z zakresu fizyki, zatem przedstawiona rozprawa może śmiało być podstawą nadania stopnia doktora w dyscyplinie nauki fizyczne.

Rezultaty:

Rezultaty zaprezentowane przez Kandydata pochodzą z trzech prac. Zostały one opublikowane w międzynarodowych czasopismach naukowych, które cieszą się dużym poważaniem wśród fizyków, a w szczególności wśród naukowców zajmujących się teorią informacji kwantowej (wszystkie po 140 punktów na liście ministerialnej).

Pierwsza praca [Quantum 4, 302 (2020)] dotyczy zbadania scenariuszy kontekstualności zależnej od stanu, w których relacje współmierzalności opisane są przez n -cykl ($n = 2^m + 1$). Choć podobne scenariusze były badane wcześniej, ważnym wkładem tej pracy jest użycie metody sum kwadratów (sum of squares) w celu znalezienia maksymalnych kwantowych wartości łamania odpowiednich nierówności typu Bella oraz odpowiadających im stanów. Następnie udało się wyprowadzić zmodyfikowane nierówności dla takich scenariuszy, które pozwalają na samotestowanie stanów i pomiarów przy założeniu braku pamięci. Dokładniej, zakładając jedynie, że urządzenia pomiarowe nie posiadają pamięci i zwracają stan popomiarowy, zaobserwowanie maksymalnego kwantowego łamania gwarantuje, że układ musiał być w danym stanie, a użyte pomiary musiały być konkretnej postaci (wszystko z dokładnością do pewnego przekształcenia unitarnego i ewentualnego rozszerzenia rozmiaru układu). Otrzymane wyniki są ważne, ponieważ wnoszą wkład do badań nad certyfikacją

opartą na kontekstualności. Wcześniejsze metody certyfikacji oparte były o testy nielokalności, zatem badane stany musiały być splątane. Kontekstualność pozwala na znaczne rozszerzenie klasy certyfikowanych stanów.

Druga praca [Phys. Rev. A 106, 012431 (2022)] dotyczy samotestowania układów n kubitów i certyfikowania tzw. stanów grafowych. Pomimo domyślnego podziału całego układu na podsystemy, rozważane scenariusze nie zakładają wielu przestrzennie rozdzielonych obserwatorów (patrz np. Twierdzenie I). Tym razem certyfikacja stanów i pomiarów zakłada relacje komplementarności pomiędzy pomiarami, zatem nie jest w pełni niezależna od urządzenia (semi-device independent). Otrzymane wyniki są ciekawym rozszerzeniem nierówności MABK (Mermin-Ardehali-Belinskii-Klyshko) na lokalne układy. Co istotne, w tym scenariuszu ilość mierzonych korelatorów skaluje się wielomianowo z rozmiarem układu.

Moim zdaniem najciekawszy rezultat zawarty jest w trzeciej pracy [New Journal of Physics 25, 063018 (2023)], która również dotyczy samotestowania układów wieloczęściowych. Jednakże tym razem każdy z podukładów ma wymiar d , który jest liczbą pierwszą, a rozważany scenariusz jest typu Bella. Autorzy ponownie stosują metodę sum kwadratów w celu wyprowadzenia protokołu certyfikacji stanów grafowych i pomiarów, których wyniki mogą być liczbami zespolonymi. Powyższy rezultat zasługuje na szczególne uznanie, ponieważ protokół certyfikacji wymaga znajomości maksymalnego kwantowego łamania danej nierówności Bella (tzw. ograniczenia Tsirelsona), a wyprowadzenie takiego ograniczenia dla ogólnych nierówności Bella jest niezwykle trudne. Ponadto, ilość korelatorów w otrzymanych nierównościach skaluje się liniowo wraz z wielkością układu.

Podsumowując, przedstawione prace stanowią oryginalne rozwiązanie ważnych problemów badawczych oraz wnoszą istotny wkład do badań nad kontekstualnością i jej zastosowaniami w teorii informacji kwantowej. Zawarte w nich wyniki są na bardzo wysokim poziomie, co potwierdza fakt, że zostały opublikowane w wiodących czasopismach naukowych. Ponadto chciałbym zaznaczyć, że same prace zostały napisane w sposób bardzo przystępny, pomimo wielu skomplikowanych twierdzeń i dowodów.

Wkład Kandydata:

Wszystkie trzy prace wchodzące w skład rozprawy są wieloautorskie, a Kandydat jest pierwszym autorem dwóch z nich. Oświadczenia wskazują, że wkład Kandydata w powstanie tych prac jest znaczący, lub wręcz wiodący, co potwierdza jego gotowość do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej w przyszłości.

Inne uwagi:

Przedstawiona rozprawa została spisana w języku angielskim i jest tak zwaną spinką trzech prac. Poza samymi pracami i ich krótkim omówieniem rozprawa zawiera streszczenie (w języku polskim i angielskim) i obszerny wstęp, który w sposób przystępny zaznajamia czytelnika z podstawowymi

wiadomościami niezbędnymi do zrozumienia głównych rezultatów. We wstępie znajdziemy: historyczny zarys, wstęp do uogólnionych teorii probabilistycznych, wytłumaczenie idei kontekstualności i nielokalności Bella, pojęcie splątania kwantowego oraz podstawy samotestowania. Ponadto, na końcu rozprawy znajdziemy podsumowanie i zbiór literatury, który zawiera wszystkie istotne pozycje. Powyższe potwierdza, że Kandydat jest dobrze zorientowany w dziedzinie nauki, którą się zajmuje.

Wspomniany wstęp został napisany bardzo starannie i widać wyraźnie, że Kandydat dobrze przemyślał jego strukturę. Uważam, że prawie wszystkie ważne informacje zostały w nim zawarte. Jedyna rzecz, której mi brakuje, to dokładniejsze omówienie roli pamięci układu pomiarowego w scenariuszach kontekstualności. Taka informacja pozwoliłaby czytelnikowi na lepsze zrozumienie założenia stojącego za samotestowaniem. Mam ponadto jedną uwagę do równania (1.21) — stwierdza ono, że wartość korelatora dwóch sekwencyjnych pomiarów zależy od antykomutatora. W konsekwencji wartość korelatora nie zależy od kolejności pomiarów. To jednak nie jest prawdą. Powyższe równanie jest prawdziwe dla binarnych pomiarów, których wyniki przyjmują wartości $+1$ lub -1 . Można łatwo znaleźć prosty przykład, dla którego powyższy wzór nie zadziała: jeśli przygotujemy kubit w stanie $|0\rangle$ i będziemy sekwencyjnie mierzyć dwa operatory (projektory) $A=|0\rangle\langle 0|$ i $B=|+\rangle\langle +|$, korelator dla pomiaru $A \rightarrow B$ wyniesie $1/2$, a dla pomiaru $B \rightarrow A$ wyniesie $1/4$.

Podsumowując, przedstawiona całość prezentuje się znakomicie. Pomimo powyższych drobnych uwag, nie jestem w stanie doparzyć się żadnych istotnie słabych stron tej rozprawy. Jeszcze raz podkreślam staranność przygotowania tekstu oraz wysoką jakość otrzymanych wyników.

Wniosek końcowy:

Przedstawiona rozprawa doktorska zawiera oryginalne wyniki, które wnoszą znaczący wkład do badań nad kontekstualnością kwantową. Spełnia ona wszystkie wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim, zatem wnoszę o dopuszczenie jej do dalszej części postępowania. Ponadto, ze względu na wysoką jakość otrzymanych wyników i dużą staranność przygotowania całej rozprawy, wnoszę o jej wyróżnienie.



Paweł Kurzyński

Center for Theoretical Physics