

prof. dr hab. Zbigniew Puchała
Instytut Informatyki
Teoretycznej i Stosowanej PAN
ul. Bałtycka 5, 44-100 Gliwice

Gliwice, 6 wrzesień 2024 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Owidiusza Makuty „Genuine multipartite entanglement and nonlocality of quantum stabilizer states”

Uwagi wstępne

Forma recenzowanej rozprawy obejmuje 139 stron, praca jest napisana w języku angielskim i składa się z kilku kluczowych części i składa się z wprowadzenia, preliminariów, czterech publikacji naukowych oraz bibliografii. Tytuł pracy precyzyjnie oddaje jej zawartość, co jest istotne z punktu widzenia czytelnika i badaczy zainteresowanych podobną tematyką. Praca zawiera zbiór artykułów naukowych, których doktorant jest współautorem:

- [A] O. Makuta, B. Kuzaka, R. Augusiak, Fully non-positive-partial-transpose genuinely entangled subspaces, *Quantum* 7, 915 (2023).
- [B] O. Makuta, R. Augusiak, All genuinely entangled stabilizer subspaces are multipartite fully non- local, *arXiv preprint arXiv:2312.08757*
- [C] O. Makuta, L. T. Ligthart, R. Augusiak, No graph state is preparable in quantum networks with bipartite sources and no classical communication, *npj Quantum Inf.* 9, 117 (2023).
- [D] X. Coiteux-Roy, O. Makuta, F. Curran, R. Augusiak, M.-O. Renou, The genuinely multipartite nonlocality of graph states is model-dependent, *arXiv preprint arXiv:2404.15861*

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

Przedmiot rozprawy

Zbiór artykułów, będący częścią rozprawy doktorskiej, skupia się na badaniu wielocząstkowego splątania i nielokalności w mechanice kwantowej, szczególnie w odniesieniu do stanów kwantowych opisywanych formalizmem stabilizatorowym quditów. Analizowane są zarówno standardowe definicje tych zjawisk, jak i warianty w modelu sieci operacji lokalnych i dzielonych zasobów losowych (LOSR). Autor rozwija kryteria pozwalające wykrywać i charakteryzować splątanie oraz wykazuje, że wielocząstkowe splątane stany qubitów są również nielocalne w sensie eksperymentów typu Bell. Praca bada także, w jakim stopniu stany grafowe quditów mogą być generowane w sieci LOSR, co ma istotne znaczenie dla kwantowych sieci komunikacyjnych.

Głównym rezultatem artykułu [A] jest uogólnienie warunków charakteryzujących *genuine multipartite entanglement* (GME) w formalizmie stabilizatorowym dla quditów, czyli systemów o dowolnym wymiarze lokalnym. Autorzy udowodnili, że warunek GME dla quditów jest podobny do tego dla qubitów, z tą różnicą, że ograniczone generatory stabilizatora nie muszą antykomutować, lecz nie mogą komutować. Ponadto, wprowadzili uogólnienie formalizmu wektorowego stabilizatorów dla wymiarów będących liczbami pierwszymi, co pozwoliło oszacować maksymalny wymiar podprzestrzeni stabilizatorowej GME. Na koniec pokazano, że warunek NPT (ujemność transpozycji częściowej) jest konieczny i wystarczający do opisu splątania w stabilizatorowej podprzestrzeni.

Autor rozprawy odegrał kluczową rolę w artykule, przede wszystkim poprzez pełne sformułowanie dowodów dla wyników w Sekcji 3, obejmujących warunek wtedy i tylko wtedy dla wielocząstkowego splątania (GME) w podprzestrzeniach stabilizatorowych quditów, warunek wystarczający oparty na formalizmie wektorowym, a także konstrukcję największej znanej podprzestrzeni stabilizatorowej GME dla dowolnej liczby quditów o wymiarach będących liczbami pierwszymi. Doktorant sformułował również dwie kluczowe hipotezy (Conjectures 1 i 2) oraz pomógł w dowodzie Twierdzenia 5. Ponadto napisał większość artykułu, w tym istotne sekcje i dodatki.

Głównym wynikiem pracy [B] jest wykazanie, że każda stabilizatorowa podprzestrzeń qubitów, która jest *genuinely multipartite entangled* (GME), prowadzi do *genuinely multipartite full nonlocality* (MFNL), co obejmuje zarówno stany czyste, jak i mieszane działające na tej podprzestrzeni. Autorzy udowodnili, że dla każdej takiej podprzestrzeni można znaleźć lokalne pomiary, które generują maksymalnie splątane stany dla każdej możliwej bipartycji qubitów. To potwierdza hipotezę Gisin'a dla stabilizatorowych podprzestrzeni qubitów. Ponadto, autorzy pokazali, że podejście to nie jest bezpośrednio uogólnialne na quditowe podprzestrzenie, ale nadal można je zastosować do stanów grafowych quditów, dowodząc ich MFNL.

Doktorant miał kluczowy wkład w artykuł, w pełni formułując dowody wszystkich wyników oraz pisząc większość manuskryptu, w tym oba dodatki.

Głównym rezultatem artykułu [C] jest wykazanie, że żadne nietrywialne stany grafowe o lokalnych wymiarach będących liczbami pierwszymi nie mogą być generowane za pomocą sieci LOSR (Local Operations and Shared Randomness) z bipartyjnymi źródłami stanów kwantowych. Oznacza to, że te stany mają głębokość splątania równą 3 w zmodyfikowanej definicji opartej na modelu sieci LOSR. Autorzy rozwiązyali trzy kluczowe problemy związane z dowodem: ulepszyli technikę inflacji, zmienili sposób klasyfikacji stanów grafowych, oraz sformułowali nowe nierówności dla operatorów w wyższych wymiarach. Dodatkowo, opracowali argument dotyczący wierności, który określa, jak blisko stan mieszany musi być docelowego stanu grafowego, aby nadal posiadał głębokość splątania 3 w modelu LOSR.

Doktorant miał kluczowy wkład w projekt, w tym sformułowanie jego głównej idei. Odpowiadał za pełne opracowanie dowodów dla głównego wyniku (Twierdzenie 1), alternatywnej nierówności (Lemma 2) oraz podziału stanów grafowych na klasy ułatwiające dowód (Lemma 4). Ponadto, doktorant napisał większość manuskryptu, w tym materiał dodatkowy, oraz stworzył wszystkie cztery ilustracje.

W pracy nukowej [D] głównym rezultatem jest rozszerzenie zbioru stanów wielocząstkowych, które wykazują nielokalność w modelu LOSR (Local Operations and Shared Randomness). Autorzy udowodnili, że wszystkie stany grafowe typu *caterpillar* dla qubitów są GMNL (genuinely multipartite nonlocal), wszystkie stany klastrowe dla quditów o wymiarach będących liczbami pierwszymi są LOSR-GMNL, a wszystkie stany GHZ dla quditów o dowolnym wymiarze są LOSR-GMNL. Te wyniki zostały udowodnione dla dowolnej liczby podsystemów. Dodatkowo, skonstruowano klasę nierówności umożliwiających wykrycie LOSR-GMNL w stanach typu caterpillar, co sprawia, że te rezultaty są odporne na szum.

W drugiej części pracy wprowadzono nową definicję nielokalności – Local-Operations-and-Neighbour-Communication GMNL (LONC-GMNL), w której strony mogą komunikować się ze swoimi najbliższymi sąsiadami w sieci. Kluczową właściwością tego modelu jest to, że nielokalność stanu zależy od struktury sieci, co pokazano na przykładzie stanów klastrowych i GHZ.

Doktorant miał istotny wkład w pracę, współtworząc ideę projektu oraz pełniąc kluczową rolę w opracowaniu dowodów dla kilku twierdzeń, w tym dla twierdzeń dotyczących przygotowania stanów klastrowych w modelu LONC oraz LOSR-GMNL stanów klastrowych i GHZ dla quditów. Doktorant zajmował się także pochodzeniem nierówności użytych w jednym z twierdzeń oraz napisał części tekstu głównego dotyczące LOSR-GMNL, a także większość dodatków (A-E oraz część F).

Ocena końcowa i wnioski

Rozprawa doktorska mgr Owidiusza Makuty pt. "Genuine multipartite entanglement and nonlocality of quantum stabilizer states" stanowi ważny wkład w rozwój nauki, zarówno z perspektywy teoretycznej, jak i praktycznej. Praca koncentruje się na szczegółowej analizie i charakteryzacji wielocząstkowego splątania i nielokalności stanów stabilizatorowych, przy użyciu zaawansowanych narzędzi teoretycznych, takich jak technika inflacji oraz nowe definicje nielokalności.

Artykuły zawarte w rozprawie dostarczają nowatorskich wyników w zakresie klasyfikacji i wykrywania stanów GME i GMNL w różnych modelach kwantowych. Analiza losr-GMNL stanów grafowych oraz wprowadzenie nowego modelu LONC-GMNL są szczególnie znaczące, jako że odgrywają kluczową rolę w kwantowej teorii informacji, zwłaszcza w kontekście detekcji i analizy splątania kwantowego, które jest jednym z fundamentów współczesnej fizyki kwantowej.

Praca Owidiusza Makuty jest innowacyjna w swoim podejściu, ponieważ autor wykorzystuje różne techniki, takie jak rozszerzenie klasy nierówności oraz nowe metody klasyfikacji stanów grafowych, co pozwala na szersze zrozumienie i zastosowanie wyników. Dzięki temu, wyniki przedstawione w rozprawie nie tylko poszerzają naszą wiedzę teoretyczną, ale także otwierają nowe możliwości badawcze i zastosowania praktyczne, na przykład w kontekście technologii kwantowych, takich jak kryptografia kwantowa czy kwantowe przetwarzanie informacji.

Istotnym osiągnięciem badawczym autora jest nie tylko poszerzenie klasy stanów nielokalnych w modelu LOSR oraz wprowadzenie nowych nierówności, ale także analiza różnych rodzajów stanów kwantowych w kontekście ich nielokalności i splątania. Szczególnie ważnym wynikiem jest odkrycie, że wszystkie nietrywialne stany grafowe dla wymiarów lokalnych będących liczbami pierwszymi mają głębokość splątania równą 3 w modelu LOSR, co ma istotne znaczenie dla teorii i praktyki kwantowej.

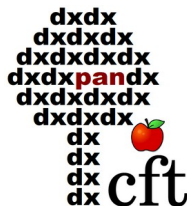
Analiza ta nie tylko wnosi nowe informacje do teorii kwantowego splątania i nielokalności, ale także podkreśla znaczenie zaawansowanych technik analitycznych w badaniu stanów kwantowych.

Warto podkreślić, że doktorant wykazał się nie tylko dogłębną znajomością teoretycznych aspektów badanych zagadnień, ale także zdolnością do ich kreatywnego rozwinięcia i zastosowania w nowych kontekstach. Jego praca jest dowodem na wysoki poziom kompetencji badawczych, umiejętności analitycznych oraz zdolności do rozwiązywania złożonych problemów naukowych. Wkład mgra Owidiusza Makuty w rozwój nauk fizycznych, a w szczególności teorii kwantowej informacji, jest znaczący i otwiera nowe kierunki badań, które mogą być kontynuowane przez przyszłych badaczy. Praca ta stanowi ważne osiągnięcie w dziedzinie fizyki, przyczyniając się do lepszego zrozumienia złożonych zjawisk kwantowych i ich potencjalnych zastosowań.

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 Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk, oraz o dopuszczenie do publicznej obrony.

 Digitally signed by
Zbigniew Puchała
Date: 2024.09.06
12:16:00 CEST

prof. dr hab. Zbigniew Puchała



Center for Theoretical Physics

Polish Academy of Sciences

Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warsaw

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

E-mail: cft@cft.edu.pl, NIP: 525-000-92-81, REGON: 000844815

Konkluzja recenzji rozprawy doktorskiej
(Conclusion of dissertation review)

Genuine multipartite entanglement and nonlocality of quantum stabilizer states

Tytuł rozprawy (Dissertation title):

Owidiusz Makuta

Autor rozprawy (Author of the dissertation):

Pozytywna ocena (Positive conclusion):

X

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa spełnia wszystkie wymagania ustawowe i zwyczajowe stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania doktorskiego, uwzględniając publiczną obronę.

(I conclude that the presented dissertation meets the formal and customary requirements for doctoral dissertations and I recommend its admission to subsequent stages of the procedure, including the public defense.)*



Ocena negatywna (negative conclusion)

Stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa nie spełnia wszystkich wymagań ustawowych i zwyczajowych stawianych rozprawom doktorskim i dlatego nie rekomenduję dopuszczenia jej do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

(I conclude that the presented dissertation does not meet the formal and customary requirements for doctoral dissertations and therefore I do not recommend its admission to subsequent stages of the doctoral procedure.)*

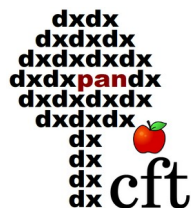
Uzasadnienie powyższej oceny znajduje się w raporcie będącym załącznikiem 1.

(The justification of the above assessment can be found in the detailed report in the attachment 1.)

Digitally signed by
Zbigniew Puchała
Date: 2024.09.06
12:13:03 CEST

Data i podpis
(Date and signature)

*Zaznacz ocenę (Please tick the box with your conclusion)



Center for Theoretical Physics
Polish Academy of Sciences

Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warsaw

Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69

E-mail: cft@cft.edu.pl, NIP: 525-000-92-81, REGON: 000844815

Załącznik 1: Recenzja rozprawy doktorskiej

(Attachment 1: Review of the dissertation)