

Recenzja pracy doktorskiej Raya Ganardi

„Correlations in mediated dynamics”

Praca doktorska Raya Ganardi poświęcona jest analizie pewnych aspektów korelacji w kwantowych układach złożonych. Badanie korelacji dostarcza cennych informacji o układzie fizycznym. Fizyka kwantowa wprowadza nowy rodzaj korelacji, których nie można zrealizować w fizyce klasycznej. Przykładem takich korelacji jest kwantowe splątanie, które stało się kluczowym zasobem nowoczesnych technologii kwantowych takich jak kryptografia kwantowa, kwantowa teleportacja czy też kwantowe obliczenia. Okazuje się, że oprócz kwantowego splątania istnieją inne nieklasyczne korelacje, np. kwantowy dyskord. Temat kwantowych korelacji posiada bardzo bogatą literaturę. Badania pana Ganardi w istotny sposób poszerzają naszą wiedzę o strukturze kwantowych korelacji i wpisują się w bardzo aktualny nurt badań. Zasadniczym problemem analizowanym przez doktoranta są korelacje w układzie złożonym AB, w którym podukłady A oraz B oddziałują poprzez układ pośredniczący M. W konsekwencji analiza korelacji w układzie AB dostarcza kluczowych informacji o strukturze układu pośredniczącego. Problemy postawione przez doktoranta uważam za bardzo ambitne, a uzyskane wyniki dowodzą, że doktorant posiada gruntowną wiedzę teoretyczną oraz znakomity warsztat badawczy. Wyniki zawarte w pracy zostały opublikowane w renomowanych czasopismach

- T. Krisnanda, **R. Ganardi**, S.-Y. Lee, J. Kim, and T. Paterek, Detecting nondecomposability of time evolution via extreme gain of correlations, *Phys. Rev. A* **98** 052321 (2018)
- **R. Ganardi**, M. Miller, T. Paterek, and M. Zukowski, Hierarchy of correlation quantifiers comparable to negativity, *Quantum* **6**, 654 (2022)

Przedstawiona do recenzji praca ma klasyczną strukturę pracy doktorskiej. Składa się z pięciu rozdziałów oraz bogatej bibliografii. Dodatkowo autor załączył tabelę symboli używanych w rozprawie. Tabela jest ułatwieniem dla czytelnika, chociaż jest niekompletna. Brakuje np. symboli używanych w rozdziale 4.

Zgrabnie napisany wstęp stanowi dobre wprowadzenie w tematykę rozprawy. Rozdział 2 umieszcza teorię korelacji w kontekście kwantowej teorii zasobów. Dodatkowo autor wprowadza miarę korelacji opartą na funkcji odległości w przestrzeni stanów kwantowych. Miara ta odgrywa istotną rolę w dalszej części rozprawy. Dwa kolejne rozdziały przedstawiają kluczowe wyniki rozprawy.

Rozdział 3 wprowadza nową funkcję odległości opartą na częściowej transpozycji (partial transpose distance) – Definicja 3.1 – i pokazuje, że popularna miara splątania tzw. ujemność (negativity) to minimalna odległość stanu kwantowego od zbioru macierzy gęstości poddanych operacji częściowej transpozycji. Autor stawia ciekawą hipotezę, że minimalna odległość jest zawsze osiągana dla elementu odpowiadającego stanowi PPT. Hipoteza ta jest poparta analizą numeryczną. Co ciekawe, autor pokazał, że dla klasy stanów posiadających dodatnią „binegativity”, hipoteza jest prawdziwa. Klasa ta zawiera wiele stanów kwantowych ważnych dla kwantowej teorii informacji, np. wszystkie stany czyste, stany dwóch kubitów, czy też 2-modowe stany Gaussowskie. Pokazuje to, że powyższa hipoteza jest prawdziwa dla szerokiej klasy interesujących stanów kwantowych. Znalezienie ogólnego dowodu jest ciekawym wyzwaniem. W odróżnieniu od odległości opartej na normie śladowej odległość oparta na częściowej transpozycji nie jest monotoniczna względem działania ogólnego kanału kwantowego. Autor pokazuje, że monotoniczność zachodzi dla klasy kanałów zwanych operacjami PPT, tzn. kanałów transformujących stany PPT w stany PPT. Nie doszukałem się w rozprawie definicji operacji PPT.

Odległość oparta na częściowej transpozycji wprowadza również górne ograniczenie na rozróżnialność stanów kwantowych za pomocą pomiarów uogólnionych, których wszystkie elementy są PPT. Jest to analog znanego ograniczenia Helstroma, które używa odległości opartej na normie śladowej. W dalszej części rozdziału autor analizuje miarę korelacji zdefiniowaną poprzez odległość opartą na częściowej transpozycji (wzór (3.31)). Miara ta jest obliczona dla pewnych szczególnych klas stanów. Twierdzenie 3.4 pokazuje ciekawe ograniczenie na całkowitą korelację w stanie czystym. Czy można to uogólnić na stany mieszane?

Rozdział 4 analizuje oddziaływanie układów A oraz B poprzez układ pośredniczący M. W szczególności autor stawia pytanie jakie własności układu M decydują o tym, że oddziaływanie między A i B można uznać za kwantowe, tzn. nieklasyczne. Motywacją do takich badań jest testowanie zaproponowanych ostatnio modeli kwantowej grawitacji oraz teoria symulatorów kwantowych. Autor definiuje oddziaływanie jako klasyczne jeśli odpowiednie Hamiltoniany opisujące oddziaływania AM i BM komutują. Własność ta ma związek z rozkładalnością operatora unitarnego działającego na iloczynie tensorowym przestrzeni Hilberta odpowiadających układom A, B oraz M (Definicja 4.1). Definicja 4.2 uogólnia pojęcie rozkładalności ma odwzorowania liniowe (super-operator). Termin „rozkładalność odwzorowania” używany jest w literaturze również w innym kontekście. Mianowicie, odwzorowanie dodatnie jest rozkładalne jeśli jest sumą odwzorowania zupełnie dodatniego i zupełnie ko-dodatniego. Pojęcie rozkładalności używane przez autora jest związane z pojęciem podzielności odwzorowania („divisibility”), które odgrywa kluczową rolę w analizie ewolucji Markowskiej. Najważniejsze wyniki dotyczące rozkładalności to:

1. wykazanie, że komutatywna rozkładalność operatora unitarnego ewolucji AMB jest równoważna komutowaniu Hamiltonianów oddziaływania,
2. wykazanie, że odwzorowanie rozkładalne posiada unitarne rozkładalne rozszerzenie Stinespringa (Stinespring dilation).

Dodatkowo doktorant wprowadził pojęcie rozkładalnego m-rozszerzenia (Definicja 4.4) i pokazał, że odwzorowanie SWAP na dwóch kubitach nie posiada rozkładalnego m-rozszerzenia dla dowolnego m. Czy wynik ten można uogólnić na wyższe wymiary? Czy znane są inne przykłady o takiej własności?

Ciekawy jest również związek między korelacjami w układzie AB a liczbą kroków w procedurze Trottera w przypadku symulacji ewolucji unitarnej.

Kolejny wynik dotyczy sytuacji, gdy układ pośredniczący jest niedostępny dla obserwatora. Doktorant znalazł warunki konieczne na rozkładalność odwzorowania (Twierdzenia 4.1 oraz 4.2). W konsekwencji wyprowadził warunki konieczne na istnienie rozkładalnego m-rozszerzenia (Wniosek 4.1). Wyniki te, jak pokazał autor, mogą być użyte do testowania „klasyczności” oddziaływań grawitacyjnych.

Praca jest starannie zredagowana. Struktura jest logiczna. Bibliografia jest właściwie dobrana. W bibliografii razi jednak pisanie nazwisk małą literą np. renyi, einstein, podolsky, rosen, itd. W pozycji [Gor76] brakuje dwóch autorów: Kossakowskiego i Sudarshana. Lista symboli jest niekompletna. Brakuje np. DEC, DEC(m), DIL(φ). Wolałbym widzieć te symbole zamiast np. Tr X, który jest jasny bez dodatkowego tłumaczenia. Te drobne uwagi nie wpływają na moją pozytywną ocenę pracy.

Ocena końcowa: Pracę doktorską pana Raya Ganardi oceniam bardzo wysoko. Uważam, że spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Doktorant postawił szereg ambitnych problemów i uzyskał bardzo ciekawe rezultaty. Przedstawione wyniki zostały opublikowane w bardzo dobrych czasopismach. Wnoszę o dopuszczenie pana Raya Ganardi do dalszego etapu przewodu doktorskiego.

Toruń, 18 sierpnia 2022

prof. dr hab. Dariusz Chruściński

Signature Not Verified

Dokument podpisany przez Dariusz
Chruściński; UMK
Data: 2022.08.17 10:25:38 CEST

