

Streszczenie rozprawy doktorskiej ”Kwantowa dokoherencja i struktury korelacyjne”

Jan Tuziemski

promotor rozpraw: prof. dr hab. Paweł Horodecki

promotor pomocniczy rozpraw: dr Jarosław Korbicz

12 września 2016

Motywacja

Korelacje pomiędzy podukładami tworzącymi dany układ fizyczny odgrywają ważną rolę w wielu dziedzinach fizyki takich jak teorie: informacji kwantowej [1, 2], materii skondensowanej [3], kwantowej dekoherencji [4, 5, 6], czy w problemie wyłaniania się klasycznej rzeczywistości ze świata rządzonego prawami mechaniki kwantowej [7]. Pomimo tego, że badania nad znaczeniem korelacji w różnych zagadnieniach fizycznych prowadzone są już od pewnego czasu to wciąż wiele interesujących problemów pozostaje nierozwiązanych. Jako przykład można tu podać problematykę dotyczącą związku pomiędzy różnymi rodzajami korelacyjnych struktur kwantowych a wydajnością protokołów kwantowego przetwarzania informacji. W roku 2012 ukazała się praca [8], w której ogłoszono, że w protokole zdalnego przygotowania stanu (ang. remote state preparation) kluczowe znaczenie dla wydajności protokołu mają struktury korelacyjne zawarte w separowalnych stanach kwantowych. Wynik ten, podważający dotychczasowe przekonania badaczy zajmujących się tą tematyką, wzbudził duże zainteresowanie a także pewne kontrowersje. Również rola struktur korelacyjnych w problemie uzyskania w ramach praw mechaniki kwantowej opisu klasycznej rzeczywistości nie jest w pełni zrozumiana i pomimo dotychczasowych opracowań [7] cały czas jest przedmiotem badań. Niedawno grupa gdańskich naukowców uczyniła kolejny krok w celu zrozumienia tego problemu, podając w pracy [9] strukturę stanów kwantowych opisującą pewien układ centralny wraz z dostępną dla obserwatorów częścią środowiska, z którym układ ten oddziałuje. Struktura ta pozwala wielu obserwatorom uzyskać informację o stanie danego układu nie zmieniając go. Takie struktury stanów kwantowych nazywa się strukturami rozgłaszającymi (ang. spectrum broadcast structures). W trakcie pracy nad rozprawą przewidywania teorii struktur rozgłaszających zostały sprawdzone tylko w jednym modelu fizycznym [10], w którym na dielektrycznej sferze rozpraszane są fotony. Z wyżej wymienionych powodów w rozprawie podjęto tematykę związaną z wybranymi problemami dotyczącymi roli struktur korelacyjnych w kwantowej teorii informacji a także zagadnienia wyłaniania się klasycznej rzeczywistości ze świata rządzonego prawami mechaniki kwantowej. Główną motywacją do napisania rozprawy było rozstrzygnięcie kwestii wpływu poszczególnych typów kwantowych struktur korelacyjnych na wydajność protokołu zdalnego przygotowania stanu oraz sprawdzenie czy dynamika w modelach fizycznych, w których centralny układ oddziałuje ze środowiskiem złożonym z kwantowych oscylatorów harmonicznym, prowadzi do powstania struktur rozgłaszających. Odnośnie drugiego zagadnienia skupiono się przede wszystkim na jednym z najważniejszych modeli teorii układów otwartych oraz teorii dekoherencji¹, w którym centralnym układem jest oscylator

¹W literaturze jest on określanym czasem jako jeden z modeli kanonicznych [6].

harmoniczny. Model powszechnie nazywany jest modelem kwantowego ruchu Browna.

Cele rozprawy

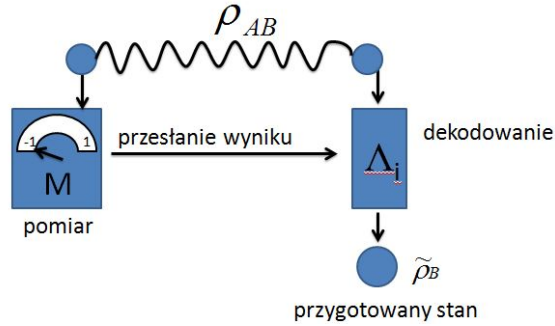
Pierwszym celem rozprawy jest zbadanie związku pomiędzy różnymi rodzajami kwantowych korelacji a wydajnością protokołu zdalnego przygotowania stanu, w szczególności rozstrzygnięcie kwestii czy kwantowe korelacje zawarte w kwantowych stanach splątanych mogą prowadzić do niższej wydajności protokołu niż kwantowe korelacje zawarte w stanach separowalnych.

Drugim celem rozprawy jest określenie czy w modelu kwantowego ruchu Browna dynamika prowadzi do powstania struktur rozgłaszających oraz, w przypadku pozytywnego rozstrzygnięcia tej kwestii, możliwie najdokładniejsze scharakteryzowanie tego procesu przez podanie skal czasowych procesów dekoherencji i przesyłania klasycznej informacji o układzie do środowiska a także określenie liczby podukładów środowiska potrzebnych do jego zajęcia, jak również zbadanie wpływu parametrów środowiska (takich jak temperatura czy struktura spektrum częstotliwość oscylatorów środowiska) na omawiany proces.

Otrzymane wyniki

W pierwszej części rozprawy rozważono protokół zdalnego przygotowania stanu, w którym nadawca (zwyczajowo okreśłany jako Alicja) ma za zadanie przesłać odbiorcy (zwyczajowo określanemu jako Bob) stan kwantowy pochodzący z dwuwymiarowej przestrzeni Hilberta. Nadawca posiada pełną wiedzę na temat stanu, który ma przesłać, natomiast odbiorca zna tylko pewną cechę tego stanu np. płaszczyznę z której pochodzi wektor Blocha opisujący stan. Dodatkowo nadawca i odbiorca dysponują podukładami układu kwantowego będącego w stanie skorelowanym, na których mogą wykonywać pewne operacje. Nadawca może również przesłać odbiorcy wiadomość przy pomocy klasycznych środków komunikacji. Ogólny schemat protokołu jest następujący: na początku, na podstawie stanu który ma zostać przygotowany, nadawca określa pomiar i wykonuje go na swoim podukładzie układu wspólnego, następnie przesyła wynik pomiaru do odbiorcy. W zależności od treści otrzymanej wiadomości odbiorca wykonuje na swoim podukładzie układu wspólnego procedurę dekodowania. Schemat ten przedstawiono również na Rysunku 1. W rozprawie zdefiniowano najbardziej ogólny typ protokołu zdalnego przygotowania stanu, w którym nadawca może wykonać na swojej części współdzielonego układu kwantowego uogólniony pomiar kwantowy – POVM, podczas gdy odbiorca dowolny kanał kwantowy². Wprowadzono również ograniczenie na długość klasycznej wiadomości, którą nadawca może przesłać odbiorcy, do długości 1 bitu (ograniczenie to jest naturalne z punktu widzenia problemu, ponieważ zapobiega bezpośredniemu przesłaniu opisu stanu). Wykazano, że formuła użyta do określenia wydajności protokołu zastosowana w pracy [8] jest błędna, ponieważ przy jej pomocy nie jest się w stanie odróżnić stanów ortogonalnych, co powoduje że przypadki, w których protokół zakończył się porażką są traktowane na równi z tymi, w których zakończył się sukcesem. Dlatego w analizie przeprowadzonej w rozprawie użyto innej, poprawnej formuły określającej wydajność protokołu. W oparciu o powyżej omówione założenia podano optymalną postać protokołu w przypadku, gdy układ wspólny opisany jest stanem zawierającym jedynie kwantowe korelacje separowalne. Na podstawie tego protokołu udowodniono, że w najbardziej ogólnym protokole zdalnego przygotowania stanu stany splątane nie mogą prowadzić do niższej wydajności protokołu niż ta uzyskana przy pomocy stanów separowalnych. Pomimo zastosowania błędnej formuły określającej wydajność protokołu wyniki pracy [8] sugerują, że mogą istnieć pewne scenariusze, w których dodatkowe ograniczenia nałożone na operacje wykonywane przez nadawcę lub odbiorcę, prowadzą do sytuacji w których powyższy wniosek nie jest prawdziwy. Chcąc sprawdzić czy tak rzeczywiście jest w rozprawie dokonano optymalizacji funkcji wydajności

²W omawianej wcześniej pracy [8] rozważano jedynie ograniczone wersje protokołu, co rodziło podejrzenia, że otrzymane w ten sposób wyniki nie są ogólne.



Rysunek 1: Ogólny schemat protokołu przesłania stanu. Pomiar M jest uogólnionym kanałem kwantowym a Λ_i jest dekodującym kanałem kwantowym.

protokołu ze względu na pomiary nadawcy. Następnie rozważono dwie klasy operacji dekodujących z ograniczeniami: kanały niezależne od wyboru układu współrzędnych w płaszczyźnie, z której pochodzi wektor Blocha przygotowywanego stanu oraz kanały bistochastyczne. W obu omawianych przypadkach, przy założeniu szczególnej struktury stanu wspólnego, dokonano ostatecznej analitycznej optymalizacji protokołu ze względu na operacje dekodujące i zaprezentowano przykłady stanów separowalnych prowadzących do wyższej wydajności protokołu niż pewne stany splątane.

Podsumowując pierwszą część pracy, wykazano, że w najbardziej ogólnym protokole zdalnego przygotowania stanu kwantowe korelacje zawarte w stanach splątanych nie mogą prowadzić do gorszej wydajności protokołu niż kwantowe korelacje zawarte w stanach separowalnych. Natomiast gdy istnieją dodatkowe ograniczenia na wykonywane operacje, powyższe stwierdzenie przestaje być prawdziwe. Wyniki tej części rozprawy zostały opublikowane w pracy [11].

W drugiej części rozprawy sprawdzono, czy dynamika w modelu kwantowego ruchu Browna prowadzi do powstania struktur rozgłaszających. W tym celu rozważano strukturę stanu częściowo zredukowanego, opisującego oscylator centralny wraz z dostępną dla obserwatorów częścią oscylatorów środowiska, z którym układ oddziałuje (pozostała część stopni swobody środowiska nie jest włączona do opisu). Strukturę takiego stanu można scharakteryzować przy pomocy dwóch funkcji. Pierwsza z nich, nazywana czynnikiem dekoherencji, jest związana z nieobserwowanymi podukładami środowiska i prowadzi do zaniku możliwych cech kwantowych, takich jak stany superpozycji czy kwantowe korelacje, na poziomie stanu częściowo zredukowanego. Druga z nich określa, czy na podstawie pomiarów dostępnego dla siebie fragmentu środowiska obserwatorzy są w stanie uzyskać informację na temat stanu układu centralnego. Gdy obydwie funkcje osiągają z czasem odpowiednią wartość można stwierdzić, że doszło do uformowania się struktury rozgłaszającej. W dalszej części tekstu funkcje będą nazywane funkcjami diagnozującymi. W rozprawie początkowo wyprowadzono wyrażenia na funkcje diagnozujące dla przypadku, w którym układ centralny jest źródłem zależnej od czasu siły wymuszającej działającej na oscylatory harmoniczne tworzące środowisko. Założenie takie pozwoliło uzyskać wyrażenia na funkcje diagnozujące w postaci analitycznej, początkowo dla termicznych stanów środowiska. Następnie wynik ten uogólniono na stany będące iloczynem tensorowym dowolnych jednomodowych stanów Gaussowskich. Przedyskutowano zależność funkcji diagnozujących od temperatury wskazując, że w omawianym przypadku wzrost temperatury prowadzi do wzmocnienia procesu dekoherencji natomiast pogarsza on możliwości zapisywania i odczytywania informacji z podukładów środowiska. Wykazano, że istnieją przypadki w których proces dekoherencji może być niezależny od temperatury. Następnie przystąpiono do rozważania modelu kwantowego ruchu Browna. Początkowo rozważano jego uproszczone wersje. W pierwszej z nich pominięto całkowicie operator Hamiltona zarówno oscylatora centralnego jak i oscylatorów środowiska, pozostawiając jedynie operator Hamiltonian opisujący oddziaływanie pomiędzy układem centralnym a środowiskiem. Takie przybliżenie (w literaturze teorii dekoherencji znane jako measurement

limit), pozwoliło w sposób całkowicie analityczny zbadać proces powstawania struktur rozgłaszających, udowodnić, że w omawianym przybliżeniu dochodzi do niego zawsze (po dostatecznie długim czasie) i określono skale czasowe procesu. Następnym krokiem było włączenie do rozważań operatora Hamiltona środowiska. Do sprawdzenia powstawania struktur rozgłaszających posłużono się twierdzeniem z dziedziny funkcji prawie periodycznych, które do tej pory nie było stosowane w literaturze odnoszącej się do teorii dekoherencji. W obu omawianych przypadkach dzięki powstaniu struktury rozgłaszającej wielu obserwatorów uzyskuje dostęp do informacji o położeniu centralnego oscylatora.

Ostatecznie rozważono pełen model kwantowego ruchu Browna. Uzasadniono, dlaczego w rozprawie nie można posłużyć się znanymi w literaturze analitycznymi rozwiązaniami problemu – pozwalają one na badanie jedynie zredukowanego stanu oscylatora centralnego a rozszerzenie rozwiązania na środowiskowe stopnie swobody prowadzi do wyrażeń nienadających się do analizy. Do wyznaczenia dynamiki przystąpiono zakładając, że układ centralny wywiera znaczący wpływ na środowisko, natomiast wpływ środowiska na układ centralny może zostać zaniedbany. Przybliżenie takie (znane jako recoilles limit) jest często stosowane w pracach dotyczących dekoherencji. Stosując rozumowanie podobne do przybliżenia Borna-Oppenheimera rozwiązano dynamikę układu oraz środowiska. Następne rozważania przeprowadzone zostały dla przypadków, w których stan początkowy oscylatora centralnego jest stanem ściśniętym pędowo³. Posiada on duże koherencje w bazie położeniowej, które (uwzględniając wyniki analizy przeprowadzonej uprzednio dla modeli uproszczonych) powinny zanikać. Rozważono również stany ściśnięte położeniowo, których początkowe koherencje w bazie położeniowej są niewielkie natomiast swobodna ewolucja oscylatora prowadzi do ich zwiększenia (do pewnego poziomu). Korzystając z wyprowadzonych uprzednio formuł na funkcje diagnozujące przeprowadzono analizę powstawania struktur rozgłaszających gdy środowisko opisane jest przy pomocy ciągłej funkcji gęstość spektralnej, jak również w przypadku gdy opis zadany jest przez parametry poszczególnych podukładów środowiska. Zanalizowano wpływ struktury spektrum częstości oraz ściśnięcia stanu początkowego oscylatorów środowiska na proces tworzenia się struktury rozgłaszającej. Wykazano różnice w powstawaniu tej struktury dla stanów ściśniętych pędowo i położeniowo oscylatora centralnego. W oparciu o prawo wielkich liczb opracowano również analityczną technikę pozwalającą na określenie skal czasowych procesu dekoherencji oraz transferu informacji o układzie do środowiska oraz liczbę oscylatorów konieczną do zajścia obu tych procesów. Na końcu zwrócono uwagę na nowatorski, nieznany dotychczas, dynamiczny charakter powstającej w omawianym modelu struktury rozgłaszającej. Stan oscylatora centralnego ewoluuje w czasie, a w środowisku dostępna jest częściowa informacja o jego ewolucji. Niektóre wyniki z tej części rozprawy zostały opublikowane w pracach [12, 13, 14].

Prace niewchodzące na skład rozprawy

Autor brał również udział w badaniach, których wyniki nie zostały włączone do rozprawy [15, 16, 17].

Bibliografia

- [1] M. A. Nielsen i I. L. Chuang. *Quantum Computation and Quantum Information: 10th Anniversary Edition*. 10th. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2011.
- [2] M. M. Wilde. *Quantum Information Theory*. 1st. New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2013.
- [3] N. Laflorencie. “Quantum entanglement in condensed matter systems”. W: *Physics Reports* 646 (2016). Quantum entanglement in condensed matter systems, s. 1–59.

³Stan taki charakteryzuje się mniejszą nieoznaczonością pędu niż stan podstawowy kwantowego oscylatora harmonicznego

- [4] W. H. Zurek. “Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical”. W: *Rev. Mod. Phys.* 75 (3 2003), s. 715–775.
- [5] E. Joos, H. Zeh, C. Kiefer, D. Giulini, J. Kupsch i I. Stamatescu. *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*. Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [6] M. Schlosshauer. *Decoherence: And the Quantum-To-Classical Transition*. The Frontiers Collection. Springer, 2007.
- [7] W. H. Zurek. “Quantum Darwinism”. W: *Nature* 5 (2009).
- [8] B. Dakic, Y. O. Lipp, X. Ma, M. Ringbauer, S. Kropatschek, S. Barz, T. Paterek, V. Vedral, A. Zeilinger, C. Brukner i P. Walther. “Quantum discord as resource for remote state preparation”. W: *Nat Phys* 8.9 (2012), s. 666–670.
- [9] R. Horodecki, J. K. Korbicz i P. Horodecki. “Quantum origins of objectivity”. W: *Phys. Rev. A* 91 (3 2015), s. 032122.
- [10] J. K. Korbicz, P. Horodecki i R. Horodecki. “Objectivity in a Noisy Photonic Environment through Quantum State Information Broadcasting”. W: *Phys. Rev. Lett.* 112 (12 2014), s. 120402.
- [11] P. Horodecki, J. Tuziemski, P. Mazurek i R. Horodecki. “Can Communication Power of Separable Correlations Exceed That of Entanglement Resource?” W: *Phys. Rev. Lett.* 112 (14 2014), s. 140507.
- [12] J. Tuziemski i J. K. Korbicz. “Dynamical objectivity in quantum Brownian motion”. W: *EPL (Europhysics Letters)* 112.4 (2015), s. 40008.
- [13] J. Tuziemski i J. K. Korbicz. “Objectivisation In Simplified Quantum Brownian Motion Models”. W: *Photonics* 2.1 (2015), s. 228.
- [14] J. Tuziemski i J. K. Korbicz. “Analytical studies of Spectrum Broadcast Structures in Quantum Brownian Motion”. W: *J. Phys. A* to appear ().
- [15] A. Miranowicz, P. Horodecki, R. W. Chhajlany, J. Tuziemski i J. Sperling. “Analytical progress on symmetric geometric discord: Measurement-based upper bounds”. W: *Phys. Rev. A* 86 (4 2012), s. 042123.
- [16] J. Tuziemski i K. Horodecki. “On the Non-locality of Tripartite Non-signaling Boxes Emerging from Wirings”. W: *Quantum Info. Comput.* 15.13-14 (2015), s. 1081–1108.
- [17] R. Ramanathan, J. Tuziemski, M. Horodecki i P. Horodecki. “No Quantum Realization of Extremal No-Signaling Boxes”. W: *Phys. Rev. Lett.* 117 (5 2016), s. 050401.