

Streszczenie

Niniejsza rozprawa doktorska przedstawia znaczący wkład w dziedzinie informacji kwantowej, podejmując szereg zróżnicowanych problemów, obejmujących takie tematy jak optymalne pomiary, metrologia kwantowa, termodynamika kwantowa oraz koncepcja designów w kontekście kanałów kwantowych.

Rozprawa rozpoczyna się pedagogicznym wprowadzeniem do mechaniki kwantowej i informacji kwantowej, napisanym tak, aby było przystępne dla studentów studiów licencjackich, a nawet dla osób bez doświadczenia w naukach ścisłych, szczególnie w dwóch pierwszych sekcjach. W tej części wyjaśniam podstawowe różnice między klasyczną a kwantową przestrzenią stanów, podkreślam probabilistyczną naturę teorii kwantowej indukowaną przez proces pomiarowy oraz opisuję, jak zamknięte i otwarte układy kwantowe ewoluują odpowiednio pod wpływem unitarnych i ogólnych kanałów kwantowych.

Pierwsza część wyników przedstawia klasyfikację dwukubitowych pomiarów von Neumanna po uwzględnieniu klas równoważności względem transformacji lokalnych. Pokazujemy, że wszystkie izosplątane pomiary należą do jednej z czterech odrębnych rodzin ciągłych; wszelkie nakładanie się tych rodzin jest miary zero i, z wyjątkiem baz stanów produktowych, żadna rodzina nie jest w pełni zawarta w innej. Analizujemy ich zastosowanie w trójkątnych sieciach kwantowych i stwierdzamy, że w takim układzie podrodzina zawierająca Elegancki Łączny Pomiar (eng. *Elegant Joint Measurement*) generuje optymalne rozkłady wyników z perspektywy nierozróżnialności wyników i uczestników. Przyszłe prace mogą rozszerzyć te wyniki na bardziej złożone systemy i pomiary, z potencjalnymi zastosowaniami w sieciach obejmujących stany wyższych wymiarów rozdzielone między węzły.

W drugiej części, metody interferometrii $SU(1,1)$ w ich interpretacji detektora przemieszczeń zostały przełumaczone na układy spinowe z wykorzystaniem jednoosiowego ściskania (eng. *one-axis twisting* lub *one-axis squeezing*). Tutaj wykazujemy, że protokół ściskania-rotacji-rozściskania wykonany z odpowiednim stopniem ściskania zapewnia optymalną skalę Heisenberga informacji kwantowej Fishera (*quantum Fisher information, QFI*) w zależności od rozmiaru spinu. W szczególności, pół-maksymalne ściskanie zapewnia stabilne skalowanie Heisenberga dla dowolnej równikowej osi rotacji. Przewaga kwantowa, mierzona skalowaniem QFI, jest utrzymywana przy rozważaniu względnych rotacji między dwoma ramionami interferometru spinowego, choć z mniejszą odpornością na zmiany stopnia ściskania.

W trzeciej części proponujemy metodę przybliżania dowolnych operacji termicznych za pomocą algorytmu składającego się z dwupoziomowych markowskich operacji termicznych przeprowadzanych na systemie z pamięcią zainicjalizowaną w równowadze termicznej. Twierdzenie jest poparte dowodami analitycznymi dla nieskończonej temperatury i, w ograniczonym zakresie, dla skończonej temperatury. W ostatnim przypadku zbieżność do operacji, które nie są objęte dowodami analitycznymi, są poparte szeroką analizą numeryczną. Na koniec rozszerzamy wyniki

przedstawione w naszym oryginalnym artykule, prezentując metodę, która powinna pozwolić na pełny dowód analityczny zbieżności proponowanego algorytmu.

Część czwarta bada problem ścisłej katalizy dla operacji termicznych, gdzie niemożliwa w inny sposób transformacja jest umożliwiona przez wprowadzenie katalizatora, który jest odzyskiwany w niezmiennym stanie po przeprowadzeniu transformacji na rozszerzonym układzie. W tej części wprowadzamy koncepcję regionu katalizowanego, zawierającego wszystkie przejścia, dla których może istnieć katalizator umożliwiający transformację. Ponadto wyznaczamy ograniczenia na strukturę i wymiarowość stanu katalizatora, ułatwiając praktyczne obliczenia; co najważniejsze, wykazujemy, że istnieją przejścia w wymiarze 3, które mogą być katalizowane w warunkach skończonej temperatury — co do których społeczność naukowa dotąd sądziła, że są niemożliwe. Na koniec przedstawiamy przykładowe zastosowanie wyznaczonych ograniczeń do generowania splątania poprzez katalizę, pokazując potencjalne korzyści wynikające z wprowadzenia pomocniczego systemu katalizatora.

W ostatniej części wprowadzamy pojęcie deseni na kanałach jako specjalizację deseni wepchniętych (*pushforward designs*), dostarczając narzędzia do uśredniania funkcji wielomianowych przez kanały kwantowe z wykorzystaniem skończonych zbiorów kanałów. Podajemy podstawowe własności takich deseni i przedstawiamy metodę konstrukcji przez indukcję z deseni unitarnych. W szczególności rozważamy desenie indukowane z grupy Clifforda, znanej jako unitarny 3-deseń, i rozszerzamy je, prezentując rodzinę 49 jednokubitowych kanałów, które poprzez wprowadzenie odpowiedniego zestawu wag zapewniają ważone 3-desenie kanałów dla dowolnej wymiarowości środowiska. Na koniec, na podstawie średnich stanów Choi, proponujemy metodę określania efektywnej wymiarowości środowiska poprzez minimalizację parametru ϵ dla deseni na kanałach. Aby zilustrować to podejście, oceniamy efektywną wymiarowość środowiska symulatorów komputerów kwantowych IBM oraz IBM Kyoto, rzeczywistym procesorze kwantowym (*Quantum Processing Unit, QPU*).

Dwa tematy przewijają się przez całą pracę: optymalność i pomiar. Te tematy wyznaczają przyszłe kierunki badań, sugerując dowody optymalności i dalsze udoskonalenia, szczególnie w termodynamice kwantowej. Niniejsza praca rozwija nasze zrozumienie procesów informacji kwantowej i stanowi podstawę do przyszłych eksploracji w tej dziedzinie, podejmując zarówno teoretyczne, jak i praktyczne aspekty pomiarów kwantowych, optymalności i katalizy.