

Streszczenie rozprawy doktorskiej
***“Genuine multipartite entanglement and nonlocality
of quantum stabilizer states”***

Na początkowym etapie teoria kwantowa nie była powszechnie uznawana za prawidłowy opis fizyki w mikroskali, ponieważ wiele jej właściwości wydawało się przeczyć dobrze ugruntowanym zasadom natury. Być może najbardziej kontrowersyjne pod tym względem było splątanie kwantowe, ponieważ pozornie wymagało natychmiastowego wpływu między dwoma oddzielnymi przestrzennie zdarzeniami. Doprowadziło to do opracowania alternatywnego modelu zwanego modelem zmiennych ukrytych, który miał na celu wyjaśnienie zachowania stanów kwantowych w ramach teorii zgodnej z zestawem zasad zwanych lokalnym realizmem. Ostatecznie w 1964 roku Bell wykazał, że każda teoria przestrzegająca lokalnego realizmu jest niezgodna z mechaniką kwantową, tj. że zachowanie niektórych stanów splątanych, zwanych nielokalnymi, nie może być wyjaśnione za pomocą zmiennych ukrytych.

Jednak te same cechy, które sprawiły, że splątanie i nielokalność stały się tak kontrowersyjne, pokazują również ich potencjalną przewagę w zastosowaniach takich jak obliczenia czy kryptografia. Z tego powodu splątanie i nielokalność były przedmiotem intensywnych badań zarówno ze względu na ich praktyczne znaczenie, jak i kluczowe cechy pokazujące, że teoria kwantowa znacząco odbiega od fizyki klasycznej. Podczas gdy przypadek dwucząstkowy jest już dość dobrze scharakteryzowany, bardziej ogólny scenariusz wielocząstkowy pozostaje znacznie mniej zbadany.

W niniejszej rozprawie badamy dwa pojęcia wieloczęściowego splątania i nielokalności: standardowe, zwykle używane w literaturze oraz te wywodzące się ze scenariusza zwanego siecią lokalnych operacji i współdzielonej losowości (sieć LOSR), który opiera się na sieci złożonej z dowolnej liczby użytkowników i źródeł niesygnalizujących korelacji, w ramach której użytkownicy nie mogą komunikować się klasycznie, ale mogą współdzielić pewne klasyczne korelacje w postaci współdzielonej losowości. W szczególności koncentrujemy się na najbardziej ekstremalnych, a jednocześnie najbardziej wartościowych formach tych korelacji, zwanych prawdziwym wielocząstkowym splątaniem i nielokalnością. W naszych wysiłkach skupiamy się na stanach kwantowych wywodzących się z kubitowego formalizmu stabilizatorów, który jest znany z zastosowania w konstruowaniu kwantowych kodów korekcji błędów. Formalizm ten zapewnia wydajny i bardzo wygodny w obsłudze opis wieloczęściowych układów kwantowych, a jednocześnie jest wystarczająco szeroki, aby objąć kilka ważnych klas stanów, takich jak stany grafowe.

W ramach standardowej definicji splątania, wprowadzamy ogólne ramy pozwalające nam wykrywać i charakteryzować splątanie w kuditowym formalizmie stabilizatorów. Opierając się na nim, przedstawiamy konieczne i wystarczające kryterium na prawdziwe wielocząstkowe splątanie kuditowej podprzestrzeni stabilizowanej, tj. aby każdy czysty stan z podprzestrzeni, jak również każdy stan mieszany zdefiniowany na niej, był prawdziwie wieloczęściowo splątany. Następnie dowodzimy, że podprzestrzeń stabilizowana jest prawdziwie wieloczęściowo splątana wtedy i tylko wtedy, gdy każda częściowa transpozycja dowolnego mieszanego stanu kwantowego działającego na podprzestrzeń jest niedodatnia. Co ciekawe, wyniki te mogą sugerować, że w formalizmie stabilizatora nie ma prawdziwie wieloczęściowych stanów splątanych z dodatnimi częściowymi transpozycjami.

Następnie pokazujemy, że każda prawdziwie wieloczęściowo splątana podprzestrzeń stabilizatora kubitów jest również prawdziwie wieloczęściowo nielokalna. W rzeczywistości udowodniliśmy nawet silniejszy wynik, pokazując, że każdy czysty stan z i każdy stan mieszany zdefiniowany na prawdziwie wieloczęściowej splątanej podprzestrzeni stabilizatora może wytwarzać korelacje pomiarowe w eksperymencie Bella, które są nielocalne w najsilniejszym możliwym sensie, co oznacza, że nie mają wkładu pochodzącego z żadnego rodzaju lokalnego modelu zmiennej ukrytej.

W drugiej części rozprawy zajmujemy się wspomnianym wcześniej modelem sieci LOSR. Działając w tym modelu, pokazaliśmy, że żaden kwantowy stan grafowy o wymiarze lokalnym będącym liczbą pierwszą nie może być wytworzony przez sieć LOSR z dwucząstkowymi źródłami stanów kwantowych. Z jednej strony oznacza to, że głębokość splątania stanów grafu w pojęciu splątania opartym na sieci LOSR wynosi co najmniej trzy. Z drugiej strony, nasz wynik implikuje, że klasyczna komunikacja jest niezbędna do przygotowania stanów grafowych w sieciach kwantowych opartych na źródłach dwucząstkowych. Co więcej, pokazaliśmy, że niektóre podklasy kuditowych stanów grafowych, a mianowicie kubitowe gąsienicowe stany grafowe, kuditowe stany klastrowe o wymiarze lokalnym będącym liczbą pierwszą oraz kuditowe stany Greenbergera-Horne'a-Zeilingera, prowadzą do prawdziwie wielostronnych nielokalnych korelacji w modelu sieci LOSR. Wynik ten ustanawia równoważność prawdziwego splątania i nielokalności w modelu sieci LOSR dla tych szczególnych klas stanów. W wyprowadzeniu wyników dotyczących sieci kwantowych intensywnie wykorzystano metodę inflacji.

Owidiusz Makuta