

Prof. dr hab. Rafał Demkowicz-Dobrzański
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki UW
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa
demko@fuw.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej Sumita Routa p.t. „On Advantages of Non-Classical Resources in Information Theoretic Tasks: Communication and Correlations”

Streszczenie pracy

Rozprawa doktorska Pana Sumita Routa dotyczy zagadnień teoretycznej informacji kwantowej, a konkretnie potencjalnie przewagi jaką mogą dać zasoby kwantowe, w zagadnieniach komunikacji oraz generowania korelacji pomiędzy nie-lokalnymi układami fizycznymi.

Wyniki zaprezentowane w pracy są oparte na trzech publikacjach, z czego dwie zostały opublikowane w *Physical Review Research* i *New Journal of Physics* a jedna jest w formie preprintu na arxiv.org.

Rozdział 2 zawiera szerokie wprowadzenie do kwantowej teorii informacji ze szczególnym naciskiem na zagadnienia nieklasycznych korelacji i komunikacji. Wprowadzone są też koncepcje uogólnionych teorii probabilistycznych oraz teorii grafów, które dają podstawy do prezentacji oryginalnych wyników w kolejnych rozdziałach.

Rozdział 3 analizuje schemat komunikacyjny, w którym Alicja i Bob mogą komunikować się albo klasycznym albo kwantowym kanałem i celem jest aby Bob generował wyniki, które w połączeniu z danymi wejściowymi Alicji i Boba, spełniają pewną zadaną z góry relację. Celem jest zidentyfikowanie problemu, w którym można pokazać przewagę kanału kwantowego nad klasycznym o tej samej pojemności. Analizowana relacja, jest relacja wyrażona w formie własności grafów, tzw. problem etykietowania kilki grafu (ang. clique labeling problem). Autor pokazuje, że w przypadku prostszego zadania zwrotu przez Boba wartości spełniająca daną relację nie występuje kwantowy zysk, natomiast w trudniejszym problemie, w którym wymogiem dla Boba jest zwracanie z niezerowym prawdopodobieństwem wszystkich możliwych spełniających relację wartości, zysk kwantowy występuje i jest potencjalnie nieograniczony, przy wzrastającej złożoności problemu. Ponadto, rozważony jest wpływ współdzielonej losowości, która jeśli nie jest w żaden sposób ograniczona usuwa zysk kwantowy, jednak w sytuacji gdy ten zasób jest ograniczony, zysk kwantowy istnieje dla pewnej klasy problemów. Jako zastosowanie wspomnianych wyników, przedstawione jest operacyjne podejście do zagadnienia pomiarów w bazach wzajemnie nieobciążonych (ang. mutually unbiased basis).

W rozdziale 4, analizowany jest problem tzw. pomiarów uogólnionych, które nie są symulowane pomiarami rzutowymi, przy czym przyjęto tu bardziej restrykcyjną definicję, niż stosowana powszechnie w literaturze, wymagając by pomiar uogólniony był wyrażony przez

pomiar rzutowy w jednej wybranej bazie Udowodnione w szczególności twierdzenie, że przy takim ograniczeniu pomiarów, nie jest możliwe odróżnienie korelacji kwantowych od klasycznych w problemie lokalnych pomiarów na wielocząstkowym układzie kwantowym. Tym samym, wykorzystano tę obserwację do wykrywania sytuacji, gdy pomiary nie są symulowalne przez pomiary rzutowe, poprzez obserwację nieklasycznych korelacji wyników pomiarów. Podejście, zostało też rozszerzone na uogólnione modele probabilistyczne.

W rozdziale 5, analizowano problemy z ograniczoną klasyczną komunikacją i potencjalną przewagą występująca dzięki wykorzystaniu nieklasycznych korelacji. Skonstruowano klasę problemów komunikacyjnych, w naturalny sposób związanych z danymi nierównościami Bella, w których możliwe jest pokazania kwantowej przewagi. W szczególności, wskazano problemy, oparte o tzw. korelacje Hardy'ego, gdzie współdzielone klasyczne korelacje, nie pozwalają na uzyskanie jakiegokolwiek niezerowego zysku dla rozważanego problemu, podczas gdy kwantowe korelacje potencjalnie dają dowolnie duży zysk w modelach gdzie wymiar kwantowych układów rośnie. Przeprowadzono, numeryczną analizę optymalnych protokołów oraz ograniczenia na nie wykorzystując tzw. hierarchię NPA.

Ocena i uwagi

Od strony formalnej praca jest napisana bardzo porządnie. Rozdział 2, który pełni rolę wprowadzenia do zagadnień poruszanych w pracy, jest bardzo obszerny i zawiera wszystkie wyjaśnienia wszystkich pojęć niezbędnych do zrozumienia oryginalnych wyników zaprezentowanych w dalszej części rozprawy. Sama forma omówionych wyników, również jest bardzo dobra, choć część dowodów mogłaby z powodzeniem zostać przeniesiona do appendiksów celem uzyskania bardziej przejrzystego i czytelnego tekstu.

Jedyny formalny mankament, to niekonsekwentne numerowanie prac autora, które są podstawą rozprawy. We wstępnej części pracy wymienionych jest 5 publikacji [A-E], które można by uznać, że stanowią podstawę rozprawy. Jednak jedynie 3 pierwsze z nich są faktycznie podstawą rozprawy a pozostałe 2 publikacji [D-E] są merytorycznie związane ale nie są jawnie omówione w rozprawie. Co więcej w dalszej części rozprawy publikacje te otrzymują już standardowe bibliograficzne numerki, co wprowadza nie potrzebne zamieszanie.

Przechodzę teraz do oceny samej naukowej wartości wyników. Wyniki te są oryginalne, dotyczą ważnych zagadnień przewagi kwantowej w zagadnieniach problemów komunikacji, i są w mojej ocenie poprawne. Uzyskując je, autor wykazał się dużą biegłością i bardzo dobrą merytoryczną znajomością zagadnień informacji kwantowej oraz związanych z tym narzędzi matematycznych, taki jak teoria grafów, metod probabilistycznych oraz metod numerycznych wykorzystujących idee programowania pół-określonego. Jako takie, wyniki oraz sama rozprawa spełniają wymogi stawiane rozprawom doktorskim.

Same wyniki jednak, nie mają na tyle ogólnego charakteru, żeby mogły wnieść bardzo istotny wkład w całą dziedzinę. Rozważane modele i problemy komunikacyjne, sprawiają wrażenie, nie naturalnych problemów, które są istotne w komunikacji czy obliczeniach rozproszonych, a raczej „uszytych na miarę” problemów, dzięki którym nieco na siłę stara się wykazać obecność kwantowej przewagi. Szczególnie to widać w Rozdziale 3, gdzie ostateczny problem, dla którego przewaga jest znaleziona nie jest problemem, dla którego łatwo kogoś przekonać, że jest ważnym problemem komunikacyjnym.

Podobnie jest jeśli chodzi o wyniki zaprezentowane w Rozdziale 4, które w mojej ocenie najslabiej się bronią. Głównym powodem jest bardzo restrykcyjna definicja pomiarów symulowanych poprzez pomiary rzutowe, gdzie doktorant wymaga aby taki pomiar był wyrażony poprzez pomiar rzutowy wykonywany w jednej wybranej bazie. Standardowo, dopuszcza się mieszanki probabilistyczne pomiarów rzutowych wykonywanych w różnych bazach. W szczególności, uwzględnione są wtedy pomiary, które wykonuje się w standardowym protokole łamania nierówności Bella w wersji CHSH. Pojawia się więc ważne pytanie: czy jakiegokolwiek z wyników przedstawionych przez autora w Rozdziale 4, ostałyby się, gdyby przyjęć bardziej standardową definicję pomiarów symulowanych przez pomiary rzutowe?

Wyniki rozdziału 5 są w mojej ocenie najciekawsze i dają też nadzieje na to, że ich rozwinięcie może w przyszłości zaowocować wynikami, które mogą już stać się bardziej istotne z szerszego punktu widzenia całej dziedziny informacji kwantowej. Zadania komunikacyjne analizowane w tej części pracy, są w mojej ocenie bardziej naturalne, niż w pozostałych rozdziałach, a wyniki lepiej osadzone, dzięki pokazaniu zarówno dolnych jak i górnych ograniczeń na optymalne protokoły, uzyskane dzięki zastosowaniu zaawansowanych metod numerycznych.

Podsumowanie.

Rozprawa doktorska Pana Sumita Routa zawiera oryginalne wyniki naukowe, które spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Sam doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością dziedziny i potrafił przedstawić szerszy kontekst w ramach którego zaprezentował uzyskane wyniki. Wnoszę o dopuszczenie doktoranta do dalszej części postępowania.

Prof. dr hab. Rafał Demkowicz-Dobrzański

Elektronicznie podpisany przez Rafał
Demkowicz-Dobrzański; Uniwersytet
Warszawski

Data: 2025.12.12 11:20:08 +01'00'