

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Aleksandry Krawiec pt. *Rozróżnialność pomiarów kwantowych*

Rozprawa doktorska Pani mgr Aleksandry Krawiec pt. *Rozróżnialność pomiarów kwantowych* dotyczy, jak wprost wskazuje tytuł, problemu rozróżniania pomiędzy pomiarami kwantowymi (dyskryminacji pomiarów kwantowych) w różnych scenariuszach. W szczególności doktorantka stawia sobie za cel odpowiedzieć na pytanie, czy schematy adaptacyjne mogą zwiększyć skuteczność rozróżniania.

Rozróżnianie pomiarów kwantowych jest istotnym i fundamentalnym problemem w mechanice i informatyce kwantowej. W ogólności możemy mówić o problemach rozróżniania stanów, kanałów (operacji) i pomiarów. Zdolność do dokładnego rozróżniania i identyfikowania stanów kwantowych lub pomiarów jest kluczowa dla różnych zastosowań w przetwarzaniu informacji, komunikacji i obliczeniach. Problemy te są wciąż aktualne. Dodatkowo, poruszany w tej rozprawie doktorskiej problem rozróżnialności pomiarów jest najmniej zbadany.

Rozprawa została napisana w języku angielskim, liczy 142 strony i została podzielona na 7 rozdziałów. Została opatrzona streszczeniem w języku polskim i angielskim. Zawiera również dwa dodatki przedstawiające dowody. Bibliografia zawiera 120 pozycji i wygląda na kompletną. Zwróciłem jedynie uwagę na brak odniesienia do publikacji *C. Datta et al New J. Phys. 23, 043021 (2021)*, która zdaje się zawierać interesujące wyniki warte zauważenia w rozprawie.

Pierwszy rozdział rozprawy zawiera wyczerpujące wprowadzenie do jej tematyki wraz z przedstawieniem aktualnego stanu wiedzy. Zaznajamia czytelnika z pojęciem rozróżnialności i jego rolą w informatyce. Przedstawia klasyfikację problemów dyskryminacyjnych oraz rolę, którą w nich odgrywa mechanika kwantowa. W tym rozdziale zostaje również postawiona teza rozprawy doktorskiej – strategie adaptacyjne mogą ulepszyć dyskryminację pomiarów.

W rozdziale drugim przedstawiono wprowadzenie do teorii informacji kwantowej, wstępne zagadnienia i narzędzia matematyczne, które będą używane w dalszej części. W tym zakresie rozdział jest bardzo pomocny. Chciałbym tylko zwrócić uwagę na jedną drobną kwestię, aczkolwiek mającą znaczenie dla rozumienia wielu obliczeń i wyników. Autorka rozprawy pisze „the most natural notion of distance between quantum channels is the diamond norm”. Myślę, że warto byłoby rozszerzyć ten komentarz o drobne uzasadnienie.

Rozdział trzeci skupia się na symetrycznej dyskryminacji, gdzie wykorzystujemy tylko jedną kopię stanu i rozważa dwie klasy pomiarów kwantowych: projektorowe pomiary von Neumanna oraz symetryczne, kompletne informacyjne pomiary – SIC POVM.

W tym miejscu pojawia się naturalne pytanie dotyczące wzajemnych relacji pomiędzy rozróżnianiem między stanami, operacjami (kanałami) i pomiarami. Na pierwszy rzut oka wygląda, że są to związane ze sobą kwestię, jako że składają się łącznie na rozkład wyników pomiarów, które otrzymujemy, a podział na przygotowanie, operacje i pomiar jest raczej umowny. Czy takich samych schematów / układów eksperymentalnych możemy używać do rozróżniania w ramach tych trzech elementów?

Rozdział czwarty zawiera bardzo dużo ciekawych rezultatów. Poświęcony jest strategiom rozróżniania, w których używamy wielu kopii (możemy wykonać pomiary kilkakrotnie). Porównuje strategie równoległe i adaptacyjne, nie wykazując przewagi tych drugich w przypadku pomiarów von Neumana i wykazując przewagę w przypadku SIC POVM, czy ogólnych POVM o rzędzie 1.

Rozdział piąty zajmuje się jednoznaczną (unambiguous) dyskryminacją dla przypadków jednej i wielu kopii stanu. Obliczone zostaje prawdopodobieństwo udanej dyskryminacji dla POVM z efektami o rzędzie 1 i porównane z wynikami dla pomiarów von Neumanna i SIC POVM. Zostają porównane przypadki z użyciem i bez użycia splątania. W przypadku metod z wielokrotnymi zapytaniami zostaje wyznaczona zależność prawdopodobieństwa udanej dyskryminacji od liczby zapytań. Rozdział zawiera tak dużo wyników, że bardzo pomocne byłoby krótkie podsumowanie na końcu rozdziału o ograniczeniach metody i optymalności wyników.

Rozdział szósty bada asymetryczną dyskryminację, opierając się na statystycznych metodach testowania hipotez i dowodząc warunków wykluczenia błędów fałszywie negatywnych. Sprawdzono również, czy adaptacyjny schemat poprawia asymetryczną dyskryminację.

Rozprawa kończy się podsumowaniem w rozdziale siódmym. W tym miejscu powrócę do mojej wcześniejszej uwagi. Liczba wyników zaprezentowanych w całej rozprawie doktorskiej jest bardzo duża i dotyczy różnych, często zmieniających się konfiguracji i sytuacji fizycznych. Wydaje się, że może byłoby warto pokusić się o syntetyczne podsumowanie uzyskanych wyników, być może nawet w formie graficznej (lub tabelarycznej) – szczególnie w zakresie optymalności, poprawy w schematach adaptacyjnych (teza rozprawy), itd. Liczę, iż doktorantka przedstawi takie zbiorcze i syntetyczne podsumowanie podczas obrony rozprawy.

Podsumowując, w rozprawie przedstawiono bardzo wiele interesujących wyników. Za najciekawsze z nich uważam te dotyczące rozróżniania w schemacie wielu kopii, w tym określenie minimalnej liczby kopii (zapytań) wymaganych do doskonałej dyskryminacji. W szczególności interesujące jest wykazanie, że schemat równoległy jest optymalny do rozróżniania pomiędzy pomiarami von Neumana w rozważanych scenariuszach. Korzyść z zastosowania schematu adaptacyjnego pojawia się w przypadku pomiarów uogólnionych. Sformułowano warunki, w których para pomiarów kwantowych wymaga schematu adaptacyjnego do doskonałej dyskryminacji. Jednym z ciekawych wyników jest to że w przypadku rozróżniania między SIC POVM okazało się, że w przypadku kubitów

można je albo doskonale rozróżnić po dwóch zapytaniach w schemacie równoległym, albo nie można ich rozróżnić doskonale po dowolnej skończonej liczbie zapytań. Innym ciekawym przykładem jest para SIC POVM (o wymiarze trzy), której pomiary nie mogą być doskonale rozróżnione po dowolnej skończonej liczbie zapytań w schemacie równoległym, ale mogą być doskonale rozróżnione po dwóch zapytaniach w schemacie adaptacyjnym.

Przed konkluzją recenzji chciałbym poczynić jeszcze komentarz dotyczących aktywności publikacyjnej pani mgr Aleksandry Krawiec. Jest ona autorką 11 artykułów naukowych opublikowanych w bardzo dobrych czasopismach naukowych włączając *npj Quantum Information*, *Quantum*, czy *Physical Review A*. Prace były cytowane łącznie ponad 60 razy, co szczególnie ze względu na krótki okres, który upłynął od publikacji, wskazuje na zainteresowanie środowiska przedstawianymi tam wynikami.

Konkluzja. Rozprawa doktorska mgr Aleksandry Krawiec zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, jakim jest zbadanie przewagi strategii adaptacyjnych w rozróżnianiu pomiarów kwantowych. Z naddatkiem spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane dysertacjom. Złożoność podjętej tematyki i sprawność w posługiwaniu się warsztatem badawczym specyficznym dla dyscypliny zasługuje na wyróżnienie. Wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie doktorantki do dalszych etapów postępowania.