

Warszawa, 13.03.2020

Dr hab. Jarosław Korbicz
Centrum Fizyki Teoretycznej PAN
02-668 Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej mgra Mate Farkasa

"Certifying quantum measurements: Mutually unbiased bases and measures of incompatibility"

Przedstawiona praca doktorska mgra Mate Farkasa składa się z trzech publikacji w renomowanych czasopismach takich jak Physical Review Letters, Physical Review A oraz New Journal of Physics. Publikacje są wieloautorskie, w jednej Doktorant jest pierwszym autorem, w dwóch pozostałych jest formalnie drugim ale z oświadczeń współautorów wynika, że jego wkład jest taki sam jak pierwszego autora.

Tematyka pracy dotyczy intensywnie badanego ostatnio na świecie zagadnienia samotestowania. Jest to nowy i świeży nurt badań informatyki kwantowej. Jego celem, w ogólnym zarysie, jest jak najdokładniejsze odtworzenie na podstawie prawdopodobieństw pomiarowych i przy minimalnych założeniach, scenariuszy kwantowych które te prawdopodobieństwa generują. Jest to więc coś w rodzaju zagadnienia odwrotnego dla pomiaru kwantowego. I podobnie jak inne zagadnienia odwrotne w fizyce, samotestowanie jest zarówno ważne w praktyce jak i skomplikowane technicznie. Duże znaczenie praktyczne, a co za tym idzie i duże zainteresowanie badaczy, wynika z roli samotestowania w rozwijających się intensywnie technologiach kwantowych. W praktycznych aplikacjach jedyne z czym mamy do czynienia to statystyki pomiarów. Zdiagnozowanie na ich podstawie czy i w jakim trybie kwantowym działa dane urządzenie staje się kluczowe. Jest to często wysoce nietrywialne zadanie, co wynika z bardzo ubogich danych wejściowych i minimalnych założeń pobocznych, wymagające specyficznych i ciężkich narzędzi matematycznych. To między innymi widać w pracach Doktoranta. Z dwóch głównych nurtów samotestowania, opartym na nierównościach Bella i na scenariuszu "przygotuj i zmierz", Doktorant rozwija ten drugi. W tym scenariuszu jeden eksperymentator, Alicja, generuje ciąg stanów kwantowych numerowanych pewnym wskaźnikiem. Drugi eksperymentator, Bob, próbuje zidentyfikować otrzymany stan przy pomocy pomiarów kwantowych, co generuje ciąg prawdopodobieństw warunkowych. W odróżnieniu jednak od starszych zadań informacji kwantowej, samotestowanie nie koncentruje się tylko na badaniu korelacji pomiędzy kodowaniem i dekodowaniem lecz stara się odtworzyć z dokładnością do transformacji unitarnej stany oraz pomiary a przynajmniej pewne ich cechy. Aby zadanie nie było trywialne, ogranicza się możliwy wymiar układu kwantowego (jest to tzw. założenie o semi niezależności sprzętowej). Na wzór nierówności Bella, z prawdopodobieństw pomiarowych buduje się pewne kombinacje liniowe, np. średnie prawdopodobieństwo sukcesu, i bada się jakie więzy narzucają na nie różne scenariusze: scenariusz klasyczny, różne realizacje danego wymiaru kwantowego, bądź cechy pomiarów. Jedną z takich cech jest fundamentalnie ważna wzajemna kompatybilność pomiarów, którą również bada w swej rozprawie Doktorant.

Główne wyniki pracy

W teoretyczno - doświadczalnej publikacji [A], opublikowanej w bardzo prestiżowym Physical Review Letters, Doktorant bada pewien konkretny i popularny w literaturze scenariusz zwany kwantowym kodem z losowym dostępem $2^d \rightarrow 1$. Alicja koduje dwa znaki w z d-literowego

alfabetu w jednym stanie kwantowym a Bob stara się je odczytać przy pomocy dwóch zestawów pomiarów. Scenariusz ten przypomina scenariusz Bella ale z braku naturalnej struktury tensorowej, zamiast splątania rozważa się sekwencyjne pomiary na niższych wymiarowych układach, dobranych tak by całkowity wymiar był równy założonemu. Główną badaną wielkością jest średnie prawdopodobieństwo sukcesu odczytu, o którym wiadomo z wcześniejszych badań, że wykrywa kwantowość. Tzn. istnieje scenariusz kwantowy dla którego to prawdopodobieństwo jest wyższe niż dla dowolnego scenariusza klasycznego. Niejasne natomiast było zachowanie się tej wielkości przy pomiarach sekwencyjnych. Głównym wynikiem pracy jest matematyczne twierdzenie stanowiące, że średnie prawdopodobieństwo sukcesu dla d -wymiarowego kodu z losowym dostępem rozróżnia wszystkie scenariusze produktowe. Dowód jest wysoce nietrywialny, intensywny technicznie i jako produkt uboczny wygenerował kilka ciekawych lematów. Sądząc z dołączonych oświadczeń współautorów, Doktorant miał wiodący (na równi z pierwszym autorem) wkład w tę pracę i mniemam również w rachunki. Świadczy to o jego bardzo wysokiej sprawności technicznej. Uzyskany rezultat jest bez wątpienia ważny i oryginalny. Jego wysoka waga wynika zarówno ze zrozumienia w nowy sposób jak czułe są prawdopodobieństwa pomiarowe jak i z możliwych zastosowań praktycznych. Te ostatnie obrazuje doświadczenie optyczne, przeprowadzone na podstawie wyników teoretycznych w ramach tej samej pracy. Grupa doświadczalna zbadła wymiarowość generowanego przez źródło stanu światła i prowadzonych na nim pomiarów, pokazując, że był to nieredukowalny do sekwencji kwantowy wymiar 1024 . Łatwo sobie wyobrazić zastosowania tego typu testów w urządzeniach kwantowych, których poprawne funkcjonowanie zależałoby od rzeczywistej wymiarowości. Tego typu współpraca teoretyczno - doświadczalna jest bardzo ceniona w środowisku, co zresztą widać po randze czasopisma gdzie opublikowano wyniki.

W pracy [B], gdzie z oświadczenia współautora wynika, że Doktorant ma przeważający wkład (i jest pierwszym autorem), rozszerzono teoretyczne badania z pracy [A]. Tematem badań jest kwantowe ograniczenie na średnie prawdopodobieństwo sukcesu odczytu kodu. Uzupełniając i rozszerzając wyniki wcześniejszych badań innych zespołów, w pracy uzyskano kilka nowych i ciekawych rezultatów. Po pierwsze, udowodniono, że to co postulowano dotychczas jako granicę kwantową faktycznie nią jest. Dokładniej, dopuszczenie w rozważanym scenariuszu 2^{d-1} najbardziej ogólnych pomiarów kwantowych (POVM) nie poprawia znanej granicy kwantowej. Po drugie, osiągnięcie tej granicy implikuje, że użyte przy dekodowaniu pomiary pochodzą od tzw. wzajemnie nieobciążonych baz. Twierdzenia te dotyczą idealnej sytuacji osiągnięcia granicy kwantowej. Z praktycznego punktu widzenia ciekawsze natomiast jest co się dzieje w sytuacji gdy obecne są zaburzenia, np. szum. Odpowiedź na to daje dalsza część pracy, gdzie wyprowadzono ograniczenia jakie nakłada średnie prawdopodobieństwo sukcesu na wzajemne nieobciążenie i na rząd pomiarów. Znalezione ograniczenia pozwalają ilościowo oszacować odstępstwo od idealnej sytuacji pomiarowej i stanowią bezpośredni interfejs między teorią a doświadczeniem. Podobnie jak i w poprzedniej pracy, również tu na uwagę zasługuje zaprzęgnięty poważny aparat matematyczny, np. nieoczywiste szacowania norm operatorowych.

Problem odporności pomiarów na zaburzenia jest rozwinięte i uogólnione w pracy [C]. Widać, że Doktorant przy pracy nad poprzednimi publikacjami znalazł słabo zbadany temat i metodycznie go trawersował, dokładając nowe wątki. W pracy syntetycznie zbadano odporność na szum fundamentalnego dla całej teorii kwantowej jak i dla praktycznych zastosowań zagadnienia wzajemnej niekompatybilności pomiarów. Choć na temat niekompatybilności i nieoznaczoności kwantowej napisano książki, okazuje się, że wciąż są niezbadane aspekty tego fenomenu. W pracy [C] wypracowano najpierw własny, uniwersalny schemat badania odporności na szum, w którym jako miary użyto maksymalnej ilości szumu jaką można dodać bez utraty niekompatybilności. Jest to naturalna, operacyjnie umotywowana wielkość, zwłaszcza w świetle popularnych ostatnio teorii zasobów. Jej pewnym niedostatkiem jest to, że zależy jawnie od wybranego modelu szumu (tzn. od tego co się dodaje do operatorów pomiaru). Zbadano pięć takich modeli, a co za tym idzie pięć

miar, szeroko używanych w literaturze. Wyniki zebrane są w tabeli, pokazującej monotoniczność poszczególnych miar względem pre- i post-obróbki, górną i dolną granicę oraz wartość dla wzajemnie nieobciążonych baz. Uzyskano szereg nowych i nieoczywistych rezultatów, m. in. okazuje się, że wzajemnie nieobciążone bazy nie zawsze są najbardziej niekompatybilnymi pomiarami i zależy to od użytego szumu. To bardzo nieintuicyjny wynik i tym ciekawszy, że wzajemnie nieobciążone bazy badane są intensywnie od kilkunastu lat. Technicznie, praca jest bardzo wymagająca i zawiera kilkadziesiąt stron rachunków. Jak wskazują oświadczenia współautorów, Doktorant wraz z pierwszym autorem są głównymi wykonawcami pracy co zasługuje na duże uznanie.

Ocena końcowa

Przedstawione przez Doktoranta wyniki stanowią moim zdaniem oryginalny i istotny wkład do nowo powstającej dziedziny kwantowej certyfikacji i samotestowania. Publikacje wchodzące w skład rozprawy wskazują również na wyśmienity warsztat badawczy Doktoranta. Badane zagadnienia są dość szerokie, choć punktem startowym badań był w zasadzie tylko jeden scenariusz przygotuj i zmierz typu $2^d \rightarrow 1$. Okazał się dość płodny i w związku z tym nasuwa się pytanie czy Doktorant ma pomysły na nowe scenariusze pomiarowe, poza oczywistym zwiększeniem liczby kodowanych znaków z dwóch do n ? Uważam też uzyskane wyniki za ważne, przede wszystkim z punktu widzenia nowych technologii kwantowych ale też i dla rozumienia fundamentalnych własności pomiarów kwantowych. Ciekawe co ta nowa wiedza wnosi do innych działów informatyki kwantowej. Np. scenariusz przygotuj i zmierz jest dobrze znany z teorii kanałów kwantowych. Czy wyniki uzyskane dla samotestowania mają jakieś znaczenie dla kanałów kwantowych?

Co prawda Ustawodawca nie każe mi oceniać dołączonego do prac przewodnika, co w przypadku prac doktorskich z fizyki jest mocno wątpliwą praktyką, pozwolę sobie jednak na kilka słów komentarza. Na podstawie dołączonego opisu mogę jednoznacznie stwierdzić, że rozumienie przez mgra Farkasa zarówno bezpośredniego tematu badań jak i ogólnych podstaw informatyki kwantowej jest dojrzałe i głębokie. Swobodnie operuje on teorią, ma bardzo szerokie zaplecze pojęciowe, logicznie wprowadza i układa niezbędne fakty. Dobór literatury, zarówno w pracach jak i w przewodniku, jest wręcz przykładowy. Doktorant bardzo skrupulatnie i rzetelnie cytuje zarówno starsze, klasyczne pozycje jak i najnowsze wyniki badań. Sam z ciekawością dowiedziałem się o kilku nie znanych mi wcześniej pozycjach literatury. Bardzo interesujące są też dalsze perspektywy nakreślone przez Doktoranta, m. in. eksperyment na podstawie wyników publikacji [B] czy wprowadzone wraz ze współpracownikami nowe operacyjne pojęcie wzajemnego nieobciążenia pomiarów, stricte szersze od analogicznego pojęcia dla baz. O ile rozumiem otwiera to zupełnie nowy kierunek badań, potwierdzając błyskotliwość i samodzielność Doktoranta.

Podsumowując, bardzo wysoko oceniam przedstawioną rozprawę doktorską mgra Mate Farkasa, spełnia ona z nadmiarem ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Wnoszę więc o dopuszczenie Pana mgra Mate Farkasa do dalszego etapu przewodu doktorskiego. Równocześnie wnoszę o wyróżnienie przedstawionej rozprawy doktorskiej na podstawie wiodącego wkładu mgra Farkasa do wysokopunktowanej teoretyczno - doświadczalnej publikacji [A], wchodzącej w skład tej rozprawy.



dr hab. Jarosław Korbicz