

Recenzja pracy doktorskiej Máté Farkasa

„Certifying quantum measurements: mutually unbiased bases and measurements incompatibility”

Praca doktorska Máté Farkasa z nadmiarem spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Dotyczy to zarówno ilości zaprezentowanych wyników oraz, a może przede wszystkim, ich jakości. Problemy postawione przez doktoranta uważam za bardzo ambitne, a uzyskane wyniki dowodzą, że doktorant posiada gruntowną wiedzę teoretyczną oraz znakomity warsztat badawczy.

Praca doktorska Máté Farkasa poświęcona jest analizie pewnych protokołów kwantowej teorii informacji związanych z przetwarzaniem i przesyłaniem informacji. Kwantowa teoria informacji proponuje szereg protokołów obliczeniowych i kryptograficznych opartych o fundamentalne prawa fizyki kwantowej, które w teorii są bardziej efektywne i bezpieczne niż tradycyjne protokoły klasycznej teorii informacji. Ich praktyczne zastosowanie wymaga jednak odpowiedniej procedury weryfikacyjnej, która np. w przypadku protokołu kryptograficznego, zapewnia nas o jego bezpieczeństwie. Takie procedury weryfikacji są od wielu lat badane. Najbardziej rygorystyczna metoda certyfikacji protokołu, zwana „samotestowaniem” (self-testing), jest zazwyczaj bardzo trudna do implementacji w eksperymencie. Należy podkreślić, że większość wyników w tej dziedzinie dotyczy układów niskowymiarowych. Dodatkowo, większość procedur jest często mało praktyczna, gdyż wymaga certyfikacji całego układu, a nie konkretnych własności układu. Praca doktorska Máté Farkasa proponuje nowe metody certyfikacji, które są mniej wymagające w praktyce oraz stosują się do układów wysokowymiarowych.

Na pracę doktorską składają się trzy prace opublikowane w prestiżowych pismach:

1. E. A. Aguilar, M. Farkas, D. Martínez, M. Alvarado, J. Cariñe, G. B. Xavier, J. F. Barra, G. Cañas, M. Pawłowski, G. Lima, *Certifying an irreducible 1024-dimensional photonic state using refined dimension witnesses*, *Phys. Rev. Lett.* **120**, 230503 (2018)
2. M. Farkas, J. Kaniewski, *Self-testing mutually unbiased bases in the prepare-and-measure scenario*, *Phys. Rev. A* **99**, 032316 (2019)
3. S. Designolle, M. Farkas, J. Kaniewski, *Incompatibility robustness of quantum measurements: a unified framework*, *New J. Phys.* **21**, 113053 (2019).

Prace są wieloautorskie. Dostarczone oświadczenia współautorów pozwalają stwierdzić następujący udział doktoranta:

1. Praca 1 (10 autorów): udział M. Farkasa 30%
2. Praca 2 (2 autorów): udział M. Farkasa 40%
3. Praca 3 (2 autorów): udział M. Farkasa 70%

Przedstawione prace zostały uzupełnione wprowadzeniem „Summary of PhD Dissertation” w języku angielskim. Jest to znakomicie zredagowany blisko 60-stronicowy tekst, który zawiera zarówno wprowadzenie do zagadnień certyfikacji, jak i dyskusję najważniejszych wyników pracy doktorskiej. Chociaż dodatek sam w sobie nie podlega ocenie, to stanowi on spójną prezentację i świadczy o dużej kulturze naukowej autora.

W pracy 1. doktorant zaproponował nową klasę tzw. świadków wymiaru (chodzi o wymiar przestrzeni Hilberta związanej z układem kwantowym). Konstrukcja tych świadków oparta jest na analizie znanego protokołu *Quantum Random Acces Code* (QRAC). Cechą szczególną tego świadka jest to, że daje różne ograniczenia w zależności od tego czy dany układ kwantowy daje się zredukować do niższej wymiarowych podukładów. Jest to istotnie nowa własność, która nie była zagwarantowana przez inne świadki wymiaru rozważane wcześniej w literaturze. Co ciekawe ta teoretyczna analiza została zaimplementowana w laboratorium do certyfikacji nieredukowalności 1024-wymiarowego stanu fotonowego. Tym samym analiza teoretyczna znalazła natychmiastowe zastosowanie w eksperymencie.

Praca 2. dotyczy analizy baz wzajemnie komplementarnych („nieobciążonych”) i ich związku z protokołem QRAC ($2^d \rightarrow 1$). Znane było wcześniej ograniczenie na prawdopodobieństwo sukcesu w schemacie, w którym pomiary są realizowane przez projektory rzędu-1. Co więcej, ograniczenie jest realizowane przez pomiary stowarzyszone z bazami wzajemnie komplementarnymi. Doktorant pokazał, że

- tego ograniczenia nie można poprawić przy użyciu pomiarów uogólnionych,
- ograniczenie może być zrealizowane jedynie przez pomiary rzutowe wzajemnie komplementarne.

Tym samym powyższy wynik jest przykładem „samotestowania” baz wzajemnie komplementarnych w schemacie „przygotuj-i-zmierz” (prepare and measure scenario). Wynik ten jest bardzo ciekawy i stanowi istotny wkład do naszej wiedzy o własnościach baz wzajemnie komplementarnych. Co więcej, autorzy pracy zastosowali bardzo ciekawe techniki z analizy macierzowej (np. nierówności znalezione ostatnio przez Kittaneha).

Praca 3. dotyczy problemu (nie)kompatybilności pomiarów kwantowych. W najprostszym schemacie pomiarów rzutowych kompatybilność (albo współmierzalność) jest równoważna komutatywności odpowiednich obserwabli. W przypadku pomiarów uogólnionych kompatybilność dwóch pomiarów A_a oraz B_b oznacza istnienie takiego pomiaru $G_{\{ab\}}$, który odtwarza wyniki uzyskane przez A oraz B . Przykładem niekompatybilnych pomiarów rzutowych są pomiary realizowane przez projektory na bazy wzajemnie komplementarne: w tym przypadku pomiar w jednej bazie powoduje, że pomiar w drugiej jest całkowicie losowy. W literaturze znanych było wiele miar niekompatybilności, ale ich własności i zależności między nimi nie były do końca znane. Doktorant (oraz współautorzy pracy 3) dokonali istotnego postępu w zrozumieniu tego zagadnienia. Podano naturalne własności takiej miary – monotoniczność względem klasycznej transformacji stochastycznej na wynikach pomiaru (post-processing), oraz względem unitalnej operacji kompletnie dodatniej na elementach POVM (pre-processing). Wprowadzono miarę niekompatybilności opartą na „odporności”

pomiarów na zaszumianie (robustness) – jest to analog znanej w teorii kwantowego splatania „robustness of entanglement”. „Zaszumianie” zależy od konkretnego modelu szumu. W pracy 3. bazując na koncepcji miary opartej na „odporności” pomiarów na zaszumianie oraz wybierając odpowiedni model szumu odtworzono konkretne miary niekompatybilności rozważane wcześniej przez innych autorów. Co więcej dokonano szczegółowej analizy porównawczej (Tabela 1 na str. 19 w pracy 3.). Okazuje się, że niektóre z tych miar nie spełniają wymogu monotoniczności względem post-processing i pre-processing. Co więcej, miary te dają różną odpowiedź na pytanie o najbardziej niekompatybilne pomiary. Dla jednej z miar pokazano, że takie pomiary realizowane są przez wspomniane wcześniej pomiary rzutowe zdefiniowane przez wzajemnie komplementarne projektory. Dodatkowo, wynik ten nie zależy od wymiaru układu (tzn. odpowiedniej przestrzeni Hilberta). Natomiast w przypadku innych miar pokazano, że mogą istnieć pomiary będące bardziej niekompatybilne niż te realizowane przez wzajemnie komplementarne projektory. Praca ta bez wątpienia wejdzie do kanonu prac o (nie)kompatybilności pomiarów.

Ocena końcowa: Pracę doktorską Máté Farkasa oceniam bardzo wysoko. Uważam, że z nadmiarem spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Doktorant postawił szereg ambitnych problemów i uzyskał bardzo ciekawe rezultaty. Przedstawione prace zostały opublikowane w bardzo dobrych czasopismach. Stanowią one koherenty i logiczny ciąg prac prezentujący zarówno teorię jak i bardzo ciekawe zastosowania. Wnoszę o dopuszczenie pana Máté Farkasa do dalszego etapu przewodu doktorskiego. Uważam, że jego praca doktorska w pełni zasługuje na wyróżnienie.

Toruń, 17 marca 2020

prof. dr hab. Dariusz Chruściński