



# Centrum Fizyki Teoretycznej Polskiej Akademii Nauk

Al. Lotników 32/46, 02-668 Warszawa  
Tel. (+48 22) 847 09 20, Fax/Tel: (+48 22) 843 13 69  
Email: [cft@cft.edu.pl](mailto:cft@cft.edu.pl)  
NIP 525-000-92-81 REGON 000844815

Warszawa, 07.07.2023

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

## **Recenzja pracy doktorskiej mgr Pauliny Lewandowskiej "Methods of validation of modern quantum architectures"**

Przedstawiona rozprawa doktorska to 179-stronicowa praca pisemna. Praca oparta jest w części na dwóch pierwszoautorskich publikacjach Autorki w pismach z listy filadelfijskiej, preprintu z bazy arXiv oraz otwartego pakietu oprogramowania, współautorstwa Doktorantki, udostępnionego w bazie GitHub. Oprogramowanie stanowi część inżynierską pracy. Praca napisana jest w języku angielskim, dobrą angielszczyzną.

### **1. Czy tematyka rozprawy jest aktualna i jak jest związana z rozwojem dyscypliny?**

Tematyka walidacji urządzeń kwantowych jest szeroko rozwijana w ostatnich latach w środowisku informatyki kwantowej zarówno od strony teoretycznej jak i praktycznej. Spowodowane jest to gwałtownym rozwojem technologii kwantowych, dla których kluczowe jest poprawne rozpoznanie jakimi faktycznymi operacjami oraz stanami kwantowymi operuje dane urządzenie. Zwłaszcza na obecnym etapie, kiedy mamy do czynienia z urządzeniami bardzo zaszumionymi. Wagę tego nietrywialnego zagadnienia rozpoznała też Komisja Europejska, która w dokumencie „Strategic Research Agenda on Quantum technologies” wymienia rozwój metod certyfikacji urządzeń kwantowych jako jeden z priorytetowych kierunków badań. Przedstawiona rozprawa doktorska skupia się na metodach walidacji pomiarów kwantowych. Jest to stosunkowo nowy i mniej zbadany obszar niż walidacja stanów kwantowych lecz równie ważny, gdyż pomiary kwantowe są nieodzowną częścią każdego algorytmu kwantowego.

### **2. Jaki jest problem naukowy podejmowany przez Autorkę i czy został on trafnie sformułowany?**

Autorka podejmuje kilka powiązanych między sobą problemów, dotyczących walidacji pomiarów von Neumanna, które są najbardziej podstawową i niosącą najwięcej informacji formą pomiarów kwantowych. Pierwszy to problem oceny skuteczności uczenia się zadanego pomiaru, mierzonej poprzez odpowiednio zdefiniowaną funkcję wierności między pomiarem docelowym a aktualnym. Drugi to problem dyskryminacji pomiarów von Neumanna, rozumiany jako rozróżnienie dwóch losowo generowanych pomiarów z jak najmniejszym prawdopodobieństwem błędu w scenariuszu symetrycznym. Trzeci to problem certyfikacji, gdzie celem jest minimalizacja prawdopodobieństwa błędu w scenariuszu asymetrycznym. Wszystkie trzy problemy są trafnie i przejrzyście sformułowane w postaci lematów i twierdzeń matematycznych oraz opatrzone są krótkimi ale treściwymi wstępami.

### **3. Czy Autorka rozwiązała postawiony problem i czy wykorzystwała w tym celu właściwe metody?**

Ogólny problem walidacji urządzeń kwantowych to wielopłaszczyznowe zagadnienie, a w zasadzie grupa zagadnień, które dopiero od niedawna zaczynają być systematycznie badane. W tym kontekście Autorka rozwiązuje postawione problemy tak jak one są sformułowane, tzn. formułuje problemy w ścisły matematycznie sposób a następnie prezentuje szczegółowe dowody. Jest to typowy sposób postępowania w informacji kwantowej. Za najważniejsze wyniki przedstawione w rozprawie należy uznać Twierdzenie 6 wraz z Pretty Good Learning Scheme, oryginalną analizę struktur kauzalnych w Rozdziale 5, Twierdzenia 8 i 9, oraz Twierdzenie 12. Należy podkreślić, że wszystkie te wyniki są nietrywialne i skomplikowane technicznie. Część matematyczna uzupełniona jest symulacjami na maszynie IBMQ oraz algorytmami numerycznymi, implementującymi znalezione procedury walidacji.

W rozprawie Autorka stosuje ogólną taktykę polegającą na sprowadzaniu zagadnienia walidacji pomiarów do stosunkowo lepiej zbadanego zagadnienia walidacji stanów i kanałów kwantowych. Jest to jak najbardziej właściwa metoda ogólna. W tym kontekście, ciekawa jest Uwaga 4. Nasuwa się pytanie dlaczego splątanie pomaga w certyfikacji pomiarów choć jest bez znaczenia dla certyfikacji kanałów unitarnych? W rozwiązaniu poszczególnych problemów znajdziemy również szereg ciekawych metod szczegółowych. Np. wykorzystanie deterministycznej teleportacji wieloportowej do szacowania średniej wierności w dowodzie Tw. 8, próba przewyciężenia uzyskanych ograniczeń na wierność poprzez zastosowanie nieustalonych struktur kauzalnych i formalizmu macierzy procesów, czy też zastosowanie q-zakresu numerycznego. Dobór literatury jest bardzo dobry choć można było uwzględnić kilka powiązanych prac, np. M. Farkasa.

### **4. Na czym polega oryginalny wkład Autorki w dyscyplinę?**

Zadeklarowany oryginalny wkład Autorki do rozprawy to przede wszystkim zastosowanie nieustalonych struktur kauzalnych i macierzy procesów do zagadnienia uczenia się pomiarów. Numeryczne dane potwierdzają nieznaczną przewagę takich struktur nad resztą dla dostatecznej ilości kroków. Kolejne wkłady to opracowanie dyskryminacji jednokubitowych pomiarów Fouriera i Tw. 9 oraz rozszerzenie platformy numerycznej PyQBench z dyskryminacji do certyfikacji pomiarów, oparte na wynikach Rozdziału 8. Rozumiem też, że Autorka ma swój wiodący wkład w pozostałe wyniki matematyczne rozprawy (oprócz Tw. 8, pochodzącego z pracy [2]), jest pierwszą Autorką odpowiednich publikacji, oraz w opracowanie platformy PyQBench. Wkład ten jako wkład w dziedzinę oceniam jako dobry, odpowiadający poziomowi doktoratu.

### **5. Jakie jest znaczenie poznawcze oraz znaczenie praktyczne wkładu Autorki?**

Znaczenie poznawcze to przede wszystkim szereg interesujących, oraz wg mojej wiedzy nowych, ograniczeń na szeroko rozumianą rozróżnialność pomiarów kwantowych. Jest to na pewno istotne z punktu widzenia tak świeżej dziedziny jaką jest walidacja pomiarów. Opracowane konkretne schematy walidacji, pakiety numeryczne oraz symulacje na prawdziwym komputerze kwantowym, potwierdzającym wyniki teoretyczne, nadają również pracy bardzo interesujące znaczenie praktyczne, największe z dotychczas ocenianych przeze mnie doktoratów. Mam nadzieję, że wpływ tych metod będzie rósł wraz z rozwojem technologii kwantowych.

## **6. Czy rozprawa świadczy o dostatecznej wiedzy Autorki w zakresie nauk technicznych i w szczególowej wiedzy w odpowiadającej zakresowi badań?**

Pierwsze trzy rozdziały pracy to wstęp teoretyczny, omawiający analizowane zagadnienie, niezbędne narzędzia matematyczne oraz, co najważniejsze, potrzebne pojęcia z teorii informacji kwantowej. Autorka pokazuje tutaj bardzo solidny poziom wiedzy z podstaw informatyki kwantowej i mechaniki kwantowej. W kolejnych rozdziałach narzędzia te są sprawnie wykorzystywane do dowodzenia skomplikowanych technicznie twierdzeń. Zwłaszcza dowód Twierdzenia 6 robi wrażenie. Świadczy to o bardzo dobrym opanowaniu przez Autorkę zarówno aparatu matematycznego jak i technik dowodzenia w informacji kwantowej. Autorka również swobodnie posługuje się formalizmem obwodów kwantowych. Uzupełnia to część inżynierska, gdzie Autorka wciela teorię w praktykę i przedstawia pakiet oprogramowania, implementujący kryteria dyskryminacji pomiarów von Neumanna z Rozdziału 6. Przeprowadza również symulacje na komputerze kwantowym IBMQ Kolkata. Razem daje to obraz wszechstronnej wiedzy Autorki z zakresu walidacji kwantowej, od matematyki po inżynierię.

## **7. Jakie są słabe strony rozprawy?**

Rozprawa zawiera cały szereg ciekawych i wysoce nietrywialnych twierdzeń matematycznych, np. Twierdzenie 6 czy też Twierdzenie 12. Twierdzenia te pochodzą z wieloautorskich prac [1-4] i w tej sytuacji Autorka mogła trochę dokładniej opisać swój wkład w ich powstanie. Np. Tw. 6 ma wielostopniowy, skomplikowany dowód, opisany w Dodatku A, i dobrze byłoby wiedzieć, za które części tego imponującego technicznie dowodu odpowiedzialna jest Autorka.

Podsumowując, przedstawiona rozprawa doktorska Pani mgr Pauliny Lewandowskiej spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Wnoszę więc o dopuszczenie mgr Pauliny Lewandowskiej do dalszego etapu przewodu doktorskiego.