

Uzasadnienie – dr hab. Michał Studziński

W tym momencie świat stoi w obliczu kolejnej rewolucji kwantowej idącej w kierunku praktycznego wykorzystania praw mechaniki kwantowej w ramach globalnej cyfryzacji społeczeństwa. To co do tej pory było domeną naukowców i zamkniętych hermetycznie wydziałów i ośrodków badawczych znajduje zastosowanie w różnych gospodarki i przemysłu. Podejmowane są próby wykorzystania praw mikroświata do zwiększenia wydajności istniejących oraz zaproponowania nowych metod obliczeniowych, optymalizacyjnych czy transmisyjnych. Jest to wyraźnie widoczne m.in. dzięki działaniom teoretycznym i eksperymentalnym tak wielkich graczy na rynku IT jak Google, IBM czy Amazon i ich ścisłej współpracy z największymi ośrodkami akademickimi na świecie.

W swoim osiągnięciu habilitacyjnym autor postanowił wyjść naprzeciw oczekiwaniom społeczności naukowej, a w pewnych aspektach także praktykom. Osiągnięcie habilitacyjne dotyczy analizy efektywności istniejących oraz konstrukcji nowych modeli procesorów kwantowych oraz badania destruktywności szumu w obwodach kwantowych, będących podstawowym budulcem wszelkich urządzeń kwantowych. Badania prowadzone były w strefie zgniotu pomiędzy fundamentalnymi ograniczeniami nakładanymi przez mechanikę kwantową na sam proces kwantowych obliczeń a realiami środowiska eksperymentalnego. Cały cykl wyników spięty był wspólnym aspektem technicznym, polegającym na konstrukcji unikalnych narzędzi matematycznych inspirowanych teorią reprezentacji grup i algebr macierzowych. Przedstawione dzieło jest także istotnym osiągnięciem matematycznym. Stanowi ono istotny wkład w rozwój teorii reprezentacji i rozwój metod matematycznych fizyki, a skalą swojego skomplikowania i zaangażowania stoi na równi z aspektem fizycznym habilitacji. Czyni to przedłożoną rozprawę w pewnym sensie interdyscyplinarną, która dowodzi szerokich kompetencji autora w dziedzinie technik matematycznych, a także biegłego poruszania się na perymetrze współczesnej informatyki kwantowej umiejscowionej w kontekście praktycznych zastosowań. Zostało to zresztą podkreślone przez recenzentów habilitacji (np. recenzja Profa. Marka Kusia) oraz listach rekomendacyjnych. Dodatkowo, fakt niezwyklej oryginalności i ważkości rezultatów może potwierdzać opublikowanie wyników zawartych w osiągnięciu w tak prestiżowych czasopismach naukowych jak *Physical Review Letters* czy *Quantum* oraz ścisła współpraca naukowa z naukowcami z jednego z najbardziej renomowanych uniwersytetów na świecie - Uniwersytetu w Cambridge w Wielkiej Brytanii. Warto w tym miejscu podkreślić fakt, że habilitant właśnie na Uniwersytecie w Cambridge odbył swój pierwszy, trzyletni staż podoktorski pod opieką współtwórcy pierwszego protokołu teleportacji kwantowej Profa. Richarda Jozsy. To właśnie podczas tego stażu autor opublikował cztery z dziesięciu prac wchodzących w skład dzieła habilitacyjnego. Resztę prac naukowych autor stworzył podczas realizacji grantu Narodowego Centrum Nauki na Uniwersytecie Gdańskim - nadal zachowując współpracę międzynarodową oraz rozwijając współpracę krajową. Stanowi to znaczącą aktywność naukową realizowaną w krajowych i zagranicznych ośrodkach naukowych, a także jest istotnym wkładem w rozwój dyscypliny. Zostało to docenione na arenie międzynarodowej, mianowicie uzyskane wyniki były prezentowane w formie referatów na najbardziej prestiżowej konferencji w środowisku jaką jest *Quantum Information Processing* w latach 2018 oraz 2021. Wynik dotyczący optymalnych procesorów kwantowych został zauważony przez edytorów czasopisma *Quantum* oraz społeczność i został wyróżniony towarzyszącym artykułem

napisanym przez jednego z wiodących naukowców młodego pokolenia Dr. Marco Tulio Quintino (Uniwersytet Sorboński). Habilitant wygłosił liczne odczyty na międzynarodowych konferencjach naukowych, a także był zapraszany do wygłoszenia seminariów we wiodących ośrodkach naukowych na świecie. Dodatkowo, habilitant za swoje wyniki, stanowiące część habilitacji uzyskał Stypendium Ministra Edukacji i Nauki dla wybitnych młodych naukowców w roku 2021.

Poniżej omówione zostaną krótko najważniejsze wyniki osiągnięte przez habilitanta, wraz z ich znaczeniem dla rozwoju dyscypliny i społeczności naukowej.

1. Pełen opis nowych tzw. uniwersalnych programowalnych procesorów kwantowych (ang. universal programmable quantum processors, UPQP), zdolnych do efektywnej pracy z dużą ilością kwantowej informacji. Innymi słowy, zdolnymi do wykonywania konkretnego programu na więcej niż jednym stanie kwantowym jednocześnie. Zaproponowane modele do obliczeń kwantowych wykorzystują jeden z podstawowych zasobów informacji kwantowej jakim jest kwantowa teleportacja oraz stany splątane. W pracach podano i zbadano dwie komplementarne klasy takich procesorów – probabilistyczne oraz deterministyczne. Uzyskane wyniki pozwoliły też na rozwiązanie otwartego od 2008 roku problemu dotyczącego UPQP operującego na jednym niskowymiarowym stanie kwantowym. Mianowicie, podano pełną charakterystykę takiego procesora w przypadku, gdy mamy do czynienia z układem o wyższym wymiarze. W przypadku tym udowodniono, że model taki jest nadal wydajny i dzięki temu może być wykorzystany do przetwarzania większej ilości kwantowej informacji. W aspekcie badań nad UPQP, zbadano także aspekt ich degradowalności. Inaczej mówiąc, zbadano jak rozważane procesory zachowują się przy wielokrotnym ich użyciu, dotykając aspektu ich ewentualnej praktyczności. Udowodniono, że w najbardziej istotnym z praktycznego punktu widzenia, to jest w przypadku procesora deterministycznego, może on być wykorzystywany wielokrotnie, bez szkody dla zadanego procesu obliczeniowego. Rozważania powyższe wpisują się w szerszą narrację, a mianowicie w badania nad strukturą tzw. kowariantnych kanałów kwantowych, których to autor również podaje klasyfikację. Ostatnio obserwuje się także wzmożone zainteresowanie teorią UPQP, mianowicie wiele grup badawczych, bazując na osiągnięciach habilitanta pokazuje konstrukcję efektywnych obwodów kwantowych symulujących działanie opisywanych procesorów kwantowych. Jest to niezwykle przełom, wszak jeszcze parę lat temu powszechne było sądzenie, że wszelkie propozale praktycznej realizacji opisywanych procesorów są skazane na niepowodzenie, przede wszystkim ze względu na znaczną złożoność problemu. Dodatkowo, badane procesory odgrywają istotną rolę w konstrukcji ataków kryptograficznych, badaniach związków z teorią złożoności obliczeniowej, a nawet swoim zasięgiem dotykają takich tematów jak pewne aspekty teorii grawitacji kwantowej i strun. Szeroki wachlarz zastosowań teoretyczno-praktycznych dowodzi istotności podjętych przez habilitanta badań naukowych.

2. Wszelkie protokoły przetwarzania informacji kwantowej oraz ich propozale realizacji w postaci obwodów kwantowych, nie ważne jak bardzo efektywne i przekonujące teoretycznie, muszą zmierzyć się z próbą praktyczności. Mianowicie, w warunkach eksperymentalnych oraz praktycznych wdrożeniach technologii kwantowych nie można uniknąć destruktywnego oddziaływania z otoczeniem, zwanego dalej szumem. Wielkim wyzwaniem dla współczesnych

technologii kwantowych jest identyfikacja źródeł szumów i sprawna diagnostyka błędów powstałych w procesie działania potencjalnego urządzenia. Z punktu widzenia praktycznych zastosowań, interesują nas oczywiście metody tanie eksperymentalnie i jednocześnie możliwe efektywne. Jedną z takich metod jest protokół losowego testowania porównawczego (ang. randomized benchmarking protocol, RB), którego nie będziemy tutaj opisywać. W dziele habilitacyjnym autor podaje nowy protokół RB, który swoimi możliwościami zastosowań znacznie przewyższa protokoły RB dotąd wypracowane przez środowisko. Rezultaty te, jako pierwsze na świecie oferują efektywne narzędzia do porównywania oraz wykrywania szerokiego, motywowanego eksperymentalnie wachlarza złożonych modeli szumów (aspekt doświadczalny), a także dostarczają obliczalnych ograniczeń, kiedy badany obwód, poprzez swoje oddziaływanie z otoczeniem nie daje już kwantowej przewagi i może być klasycznie symulowalny (aspekt teoretyczny). Co więcej, zaproponowany model nie zależy od architektury obwodu kwantowego, co czyni go uniwersalnym w swoich zastosowaniach. Swoje wyniki autor przetestował w reżimie urządzeń NISQ (Noisy intermediate-scale quantum), w tym protokołów hybrydowych kwantowo-klasycznych odgrywających obecnie kluczową rolę w potencjalnych zastosowaniach, np. w chemii kwantowej i projektowaniu związków o zadanych własnościach. Podsumowując, wyniki dotyczące nowego protokołu RB mają bardzo jasną interpretację operacyjną – określają moc obliczeniową realistycznych, zaszumionych urządzeń kwantowych. Uzyskane wyniki zostały opublikowane w jednym z najbardziej prestiżowych czasopism fizycznych Physical Review Letters.

3. Wszystkie rezultaty bazują na istniejących w badanych układach symetriach, które oczywiście w pierwszej kolejności habilitant musiał zidentyfikować. Pozwoliło to na zaprzęgnięcie już wcześniej znanych narzędzi, a także użycia wypracowanej przez autora teorii reprezentacji pewnej szczególnej algebry operatorów. Zarówno opisywane wyżej UPQP oraz protokoły RB należą do klasy problemów wykazujących podobne symetrie. Mamy tu do czynienia z klasyczną teorią reprezentacji grupy symetrycznej, gdzie pomimo długiej i bogatej historii dziedziny autor także dostarczył nowych, nietrywialnych rezultatów. Mowa tutaj w szczególności o obliczaniu śladów częściowych z baz operatorowych rozpinających poszczególne nieredukowalne reprezentacje algebry grupowej. W przypadku, istotnym dla badań nad UPQP, autor dotknął obszarów całkowicie dziewiczych, gdzie w literaturze przedmiotu istniały tylko szczątkowe informacje. Autor w celu rozwiązania zagadnienia czysto teorio-informatycznego musiał zbudować najpierw pełną teorię matematyczną dostarczając opisu nieredukowalnych reprezentacji macierzowych grupy symetrycznej zaburzonej przez jedną lub wiele częściowych transpozycji. Autor dotyka zagadnień, które faktycznie były i są w obszarze zainteresowania fizyków matematycznych oraz informatyków kwantowych. Wypracowane narzędzia matematyczne zostały użyte do redukcji ogólnych problemów programowania wypukłego do programowania liniowego, jeżeli tylko w badanym układzie występują symetrie - co stanowi istotny wpływ na dziedzinę, ponieważ bardzo wiele problemów w informacji kwantowej (i nie tylko) może być właśnie przepisanych jako problem optymalizacyjny z symetriami. Wypracowana teoria matematyczna znajduje naturalne zastosowanie także w innych dziedzinach fizyki - fizyce cząstek elementarnych, kwantowej teorii grawitacji, fizyce ciała stałego (badania hamiltonianów antyferromagnetyków), czy

nowej dziedziny nauki jaką jest quantum machine learning. Świadczy to o ciągle znacznym potencjale zastosowań wypracowanego przez habilitanta aparatu matematycznego.