

prof. dr hab. Adam Miranowicz
Wydział Fizyki
Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
ul. Uniwersytetu Poznańskiego 2, 61-614 Poznań

Poznań, 3.12.2020

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pana mgr. Krzysztofa Chabudy

pt. „Sieci tensorowe w metrologii kwantowej”

Oceniana przeze mnie rozprawa doktorska pt. „Sieci tensorowe w metrologii kwantowej” została napisana przez Pana mgr. Krzysztofa Chabudę pod opieką naukową promotora Pana dr. hab. Rafała Demkowicza-Dobrzańskiego w Katedrze Optyki Kwantowej i Fizyki Atomowej w Instytucie Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego. Postępowanie w sprawie nadania stopnia doktora Panu mgr. Krzysztofowi Chabudzie zostało formalnie wszczęte w dniu 9 III 2020, czyli gdy już obowiązywały przepisy nowej Ustawy.

Najistotniejsze wyniki dysertacji zostały opublikowane w prestiżowych czasopismach. Mianowicie, w *Nature Communications* (o wskaźniku cytowań: 12.121) ukazał się w tym roku artykuł pt. “Tensor-network approach for quantum metrology in many-body quantum systems” autorstwa K. Chabudy, J. Dziarmagi, T. J. Osborne’a i promotora R. Demkowicza-Dobrzańskiego oraz w *New Journal of Physics* (o wskaźniku cytowań: 3.539) ukazał się w 2016 roku artykuł pt. “The quantum Allan variance” autorstwa K. Chabudy, I. D. Leroux i R. Demkowicza-Dobrzańskiego. Wspomnę też o dwóch dodatkowych artykułach, których współautorem jest Doktorant, choć tematyka tych prac wykracza poza zakres dysertacji. Mianowicie, jest to artykuł pt. “Certainty relations, mutual entanglement and non-displaceable manifolds” opublikowany w *Physical Review A* (o wskaźniku cytowań: 2.777) w 2015 roku oraz praca pt. “1,8- Diamidocarbazoles: an easily tuneable family of fluorescent anion sensors and transporters” opublikowana w *Organic and Biomolecular Chemistry* (o wskaźniku cytowań: 3.412) w 2018 roku.

Warto podkreślić, że w tych dwóch artykułach, których wyniki zostały omówione w rozprawie, Kandydat był pierwszym autorem. Wspomnę również, że tegoroczna praca Kandydata w *Nature Communications* ma już 7 cytowań wg Google Scholar (w dniu 16.11.2020), co może świadczyć o dużym zainteresowaniu tematyką, ale też o nowatorskim i fundamentalnym charakterze wyników Kandydata. Ta ostatnia praca jest cytowana m.in. w 50-stronicowym artykule przeglądowym na temat “Photonic quantum metrology” (umieszczonym w elektronicznej bazie artykułów arXiv:2003.05821v1 w marcu 2020 r.) autorstwa grupy Fabio Sciarrino. Na marginesie wspomnę, że praca Kandydata z r. 2016 pt. “The quantum Allan variance” ma 15 cytowań wg Google Scholar.

Rozprawa dotyczy propozycji kompleksowego zastosowania formalizmu kwantowych sieci tensorowych typu macierzowych operatorów produktowych (MPO, ang. matrix product operators) celem rozwiązania pewnych fundamentalnych problemów metrologii kwantowej.

Metody kwantowych sieci tensorowych są od lat stosowane jako abstrakcyjny język graficzny do modelowania układów fizycznych i ich dynamiki. W informatyce kwantowej znajdują zastosowanie do opisu, m.in.

kanalów, map wieloliniowych, stanów, algorytmów i procesów umożliwiających przetwarzania informacji kwantowej. Na marginesie wspomnę, że świetnym wprowadzeniem do tej tematyki są dwustustronicowe wykłady Jacoba Biamonte pt. „Lectures on Quantum Tensor Networks” umieszczone w elektronicznej bazie artykułów arXiv:1912.10049. Choć szkoda, że ta wyśmienita monografia, chyba jedyna w zakresie zastosowań sieci tensorowych w informatyce kwantowej, nie została zacytowana w rozprawie.

Dysertacja ta jest też poświęcona metrologii kwantowej, która pod względem komercyjnych zastosowań wydaje się najbardziej obiecującą dziedziną informatyki kwantowej i technologii kwantowych drugiej generacji, obok bezpiecznej komunikacji kwantowej. Dlatego też metrologia kwantowa jest rozwijana w ramach m.in. flagowego projektu Unii Europejskiej. Dotychczas, prawdopodobnie najbardziej spektakularnym praktycznym wykorzystaniem metrologii kwantowej jest zastosowanie ściśniętych stanów światła w detekcji fal grawitacyjnych w detektorach Advanced LIGO i Advanced Virgo. Kandydat podkreślił w dysertacji, że prace Acernese i in. oraz Tse i in. z roku 2019 potwierdzają, że „aktualnie wykorzystanie stanów ściśniętych odpowiada za wzrost liczby obserwacji aż do 50%” w tych eksperymentach.

Celem metrologii kwantowej jest oszacowanie nieznanych parametrów wykorzystujących zasoby kwantowe (takie jak splątanie kwantowe czy też ściskanie światła), których zastosowanie może prowadzić do fundamentalnego poprawienia precyzji pomiarów w porównaniu do klasycznych metod pomiarowych. Głównym obecnie wyzwaniem metrologii kwantowej jest wyznaczenie ograniczeń kwantowych dla wielowymiarowych operatorów gęstości i wielowymiarowych parametrów bazując na pionierskich pracach Helstroma i Holevo w uzupełnieniu zasad nieoznaczoności. I właśnie to wyzwanie jest centralnym problemem analizowanym w dysertacji.

Niestety metody metrologii kwantowej są zwykle typu *brute force* i stają się numerycznie nieefektywne dla układów wielokubitowych z powodu wykładniczego wzrostu wymiaru przestrzeni Hilberta wraz z liniowym wzrostem liczby kubitów. Często ten problem nazywa się przekleństwem wymiarowości (ang. the curse of dimensionality) i dotyczy nie tylko metrologii kwantowej, ale i całej informatyki kwantowej.

W ciągu dosłownie kilku ostatnich lat zaproponowano wiele nowatorskich metod, które może pozwolą uwolnić się od tej klątwy wymiarowości w metrologii kwantowej. Wymienię kilka z tych najnowszych propozycji: praca [1] H. Yuana i C.-H. Funga pt. „Quantum Parameter Estimation with General Dynamics” [npj Quantum Inf. 3, 14 (2017)]; praca [2] M. G. Genoniego i T. Tufarelliego pt. „Non-orthogonal Bases for Quantum Metrology” [J. Phys. A 52, 434002 (2019)]; praca [3] M. Fanizy i in. pt. „Beyond the Swap Test: Optimal Estimation of Quantum State Overlap” [Phys. Rev. Lett. 124, 060503 (2020)]; praca [4] F. Albarelliego, J. F. Friela i A. Datty’ego pt. „Evaluating the Holevo-Cramer-Rao Bound for Multiparameter Quantum Metrology” [Phys. Rev. Lett. 123, 200503 (2019)]; praca [5] M. Tsanga, F. Albarelliego i A. Datty’ego pt. „Quantum Semiparametric Estimation” [Phys. Rev. X 10, 031023 (2020)] oraz właśnie wspomniana praca [6] Kandydata i współpracowników pt. „Tensor-Network Approach for Quantum Metrology in Many-Body Quantum Systems” [Nat. Commun. 11, 250 (2020)]. Warto podkreślić, że w większości te wyniki zostały opublikowane w najbardziej prestiżowych czasopismach, oczywiście wliczając dwie publikacje Kandydata, co świadczy o fundamentalnym i nowatorskim charakterze tych badań, ale też o aktualności tej tematyki badawczej.

Rozprawa liczy 100 stron i składa się z czterech głównych rozdziałów, które można podzielić na dwie części. Część pierwsza, na którą składają się dwa rozdziały, jest interesującym i obszernym wprowadzeniem

do metrologii kwantowej, teorii estymacji i sieci tensorowych. Część druga, również złożona z dwóch rozdziałów, przedstawia najważniejsze wyniki Autora. W rozdziale 3, Kandydat sformułował kwantowy model metrologii w ujęciu sieci tensorowych, co jest moim zdaniem najbardziej wartościowym wkładem Kandydata w rozwój informatyki kwantowej. W szczególności Autor opisał w tym rozdziale optymalizację kwantowej informacji Fishera (QFI, ang. Quantum Fisher Information) dla układów o skończonej liczbie cząstek oraz w przypadku asymptotycznym w granicy nieskończonej liczby cząstek. Jak wiadomo kwantowa informacja Fishera jest wielkością lokalnie zależną od macierzy gęstości ρ_ϕ na wyjściu kanału kwantowego i pierwszej pochodnej $\dot{\rho}_\phi$ wokół wartości estymowanego parametru. Dlatego też Kandydat przestawił te wielkości, a także symetryczną pochodną logarytmiczną (SLD, ang. Symmetric Logarithmic Derivative), jako macierzowe operatory produktowe (MPO), celem optymalizacji kwantowej informacji Fishera. W rozdziale 4 zostały opisane trzy przykładowe zastosowania ogólnego formalizmu Kandydata, tj. (1) pomiar pola magnetycznego w obecności lokalnie skorelowanego szumu, (2) stabilizacja zegara atomowego i (3) wierność (ang. fidelity) wielociałowego stanu termicznego. Najważniejsze wyniki tych dwóch rozdziałów zostały opublikowane przez Kandydata w Nature Communications.

Omówię teraz bardziej szczegółowo niektóre z najciekawszych wyników tej dysertacji.

Stosując formalizm sieci tensorowych typu nieskończonych macierzowych operatorów, Kandydat był w stanie oszacować maksymalną precyzję parametrów pomiarowych, jak również znaleźć optymalne stany sondujące układy kwantowe w zakresie dotychczas niezbadanym z uwagi na złożoność obliczeniową (wspomnianą klątwę wymiarowości). W szczególności Doktorant zbadał modele z szumem krótkiego zasięgu. Ponadto, Kandydat zastosował techniki nieskończonych macierzowych operatorów produktowych (tzw. iMPO, ang. infinite MPO), co pozwoliło na bezpośrednie i efektywne określenie asymptotycznej precyzji pomiarowej w granicy nieskończonej liczby cząstek. Moim zdaniem są to wyniki światowego kalibru.

Potencjał obliczeniowy tego formalizmu w metrologii kwantowej został pokazany na przykładzie znalezienia optymalnych strategii stabilizacji zegara atomowego (gdzie dominują czasowe korelacje szumu) oraz optymalnego pomiaru pola magnetycznego (gdzie dominują przestrzenne korelacje szumów). Analiza szumu czasowo-skorelowanego jest wysoce nietrywialnym problemem nawet jeśli szum jest modelowany jako proces Ornsteina–Uhlenbecka, który jest procesem stacjonarnym, gaussowskim i markowowskim. I właśnie taki proces został założony w dysertacji.

Wydaje się, że sieci tensorowe mogą też znaleźć zastosowanie w problemach z szumem niemarkowskim i to jest jeden z ciekawych kierunków badań, które mogą być podjęte w przyszłości przez Kandydata i jego współpracowników. Na przykład opisu czujników kwantowych z wykorzystaniem centrów NV (ang. nitrogen-vacancy centers) nie można sprowadzić do klasycznego procesu stochastycznego i zwykle wymagane jest uwzględnienie niemarkowskich własności dynamiki kwantowej. Zgadzam się z opinią Autora wyrażoną w podsumowaniu pracy w Nature Communications, że zaproponowany przez Niego formalizm sieci tensorowych może ułatwić znalezienie i zastosowanie lepszych modeli metrologicznych z czasowo-skorelowanym szumem niemarkowskim, gdzie skuteczne narzędzia do znajdowania optymalnych protokołów metrologicznych w takich przypadkach nie zostały jeszcze opracowane.

Na marginesie dodam, że Meyer, Borregaard i Eisert, w swojej tegorocznej pracy pt. „A variational toolbox for quantum multi-parameter estimation” umieszczonej w elektronicznej bazie artykułów arXiv:2006.06303 w czerwcu 2020 r., wspomnieli o możliwości wykorzystania kwantowych sieci tensorowych w realizacji ich

modelu estymacji powołując się w tym kontekście wyłącznie na artykuł Kandydata w Nature Communications. Konkretnie, ta niemiecko-duńsko-holenderska grupa wspomniała o możliwości zapisania uogólnionych operatorów pomiaru POVM (ang. positive operator valued measures) na sieciach tensorowych celem hybrydowej realizacji wieloparametrowej estymacji kwantowej. To jest jedynie jeden z przykładów pokazujących, że wyniki Kandydata są już inspiracją dla innych badaczy do zastosowania kwantowych sieci tensorowych jako obiecującej platformy metrologii kwantowej.

Dysertacja jest napisana bardzo starannie, precyzyjnie i jest logicznie spójna, choć miejscami łatwiej było mi zrozumieć regularne artykuły Kandydata, aniżeli niektóre paragrafy tej rozprawy głównie dlatego, że jej Autor zastosował kilkadziesiąt skrótów i skrótowców, których definicje łatwiej znaleźć w artykułach Kandydata, niż w tej 100-stronicowej dysertacji. Niektóre tytuły rozprawy brzmią enigmatycznie, np. " ρ_ϕ i $\dot{\rho}_\phi$ w reprezentacji MPO" (co jest tytułem roz. 3.2) czy też "SLD w reprezentacji MPO" (tytuł roz. 3.3). Przeglądając jedynie spis treści trudno się domyślić co dokładnie oznacza ρ_ϕ . Ponadto dla optyka kwantowego, skrótowiec SLD zwykle kojarzy się z superluminescyjnymi diodami (ang. superluminescent diodes), aniżeli z symetryczną pochodną logarytmiczną (ang. symmetric logarithmic derivative). Szkoda, że Autor nie dodał spisu użytych skrótowców i symboli matematycznych na końcu rozprawy oraz, że nie rozwinął ich do pełnej nazwy w tytułach wszystkich rozdziałów. Niemniej ta drobna uwaga krytyczna nie obniża w sposób istotny mojej bardzo wysokiej oceny merytorycznej tej rozprawy.

W podsumowaniu, uważam, że cele rozprawy doktorskiej zostały wyraźnie określone i konsekwentnie zrealizowane. Rozwiązany został interesujący i aktualny problem badawczy, a osiągnięte wyniki reprezentują światowy poziom naukowy.

Recenzowana rozprawa i wymienione publikacje jednoznacznie świadczą o tym, że Pan mgr Chabuda jest dojrzałym naukowcem umiejącym posługiwać się zaawansowanymi metodami informatyki kwantowej, metrologii kwantowej, sieci tensorowych i elektrodynamiki kwantowej.

Przedstawiona praca doktorska jest dojrzałym i nowatorskim spojrzeniem na zagadnienia metrologii kwantowej. Moim zdaniem jest to wartościowa i stojąca na wysokim poziomie naukowym praca badawcza wnosząca nowe interesujące wyniki o charakterze fundamentalnym.

Reasumując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska pt. „Sieci tensorowe w metrologii kwantowej” spełnia, w mojej opinii, wszelkie wymogi stawiane Ustawą 2.0, tj. Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668). Tym samym stwierdzam, że rozprawa ta stanowi oryginalne rozwiązanie przez jej Autora problemu naukowego z dziedziny metrologii kwantowej, a także świadczy o ogólnej wiedzy Kandydata w zakresie nowoczesnych metod informatyki kwantowej oraz świadczy o Jego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej na najwyższym poziomie światowym.

Dlatego też z przyjemnością wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. Krzysztofa Chabudy do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Adam Miranowicz