

Prof. dr hab. Dariusz Chruściński
Instytut Fizyki UMK

Recenzja pracy doktorskiej mgra Stanisława Kurdziałka

Noise and signal correlations in quantum metrology and imaging

Praca doktorska mgra Stanisława Kurdziałka z nadmiarem spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Zarówno liczba zaprezentowanych wyników oraz, a może przede wszystkim, ich doniosłość, sprawiają, że jest to **praca wybitna**. Problemy postawione przez doktoranta uważam za bardzo ambitne, a uzyskane wyniki dowodzą, że doktorant posiada gruntowną wiedzę teoretyczną oraz znakomity warsztat badawczy.

Praca doktorska mgra Stanisława Kurdziałka poświęcona jest metrologii kwantowej. Metrologia kwantowa analizuje granicę precyzji pomiaru i odgrywa obecnie fundamentalną rolę w zastosowaniach fizyki kwantowej w nowoczesnych technologiach kwantowych. Kluczowe jest wykorzystanie efektów kwantowych do zwiększenia precyzji pomiaru. Na przykład wykorzystanie nieklasycznych stanów ściśniętych światła pozwala na istotne zwiększenie precyzji interferometrii optycznej i w rezultacie pozwala pokonać tzw. granicę szumu śrutowego skalującą się jak $1/N^{1/2}$, gdzie N oznacza liczbę fotonów. Wykorzystanie kwantowych korelacji (np. kwantowego splątania) pozwala na osiągnięcie tzw. granicy Heisenberga, w której precyzja estymacji skaluje się jak $1/N$. Przykładem są słynne stany $N00N$, które są N -fotonowymi stanami splątanymi. Stany takie pozwalają teoretycznie istotnie poprawić precyzję pomiaru. Z drugiej strony są podatne na niekorzystny wpływ otoczenia, który prowadzi do dekoherencji. Metrologia kwantowa bada zatem ograniczenia precyzji pomiaru implikowane przez fundamentalne prawa fizyki kwantowej. Jedną z fundamentalnych wielkości w kwantowej metrologii jest kwantowa informacja Fishera, która decyduje o precyzji estymacji nieznanymi parametrów. Praca doktorska mgra Kurdziałka analizuje fundamentalne ograniczenia na kwantową informację Fishera przy uwzględnieniu korelacji sygnału i szumu.

Jako rozprawę doktorską mgr Kurdziałek przedstawił 5 prac, z których cztery zostały opublikowane, a jedna jest dostępna w bazie eprintów arXive. Prace te zostały opublikowane w wiodących czasopismach z dziedziny: trzy prace w Phys. Rev. Lett. oraz jedna praca w New J. Phys. Opublikowanie trzech prac w Phys. Rev. Lett. w ciągu trzech lat jest bez wątpienia spektakularnym osiągnięciem całej grupy badawczej skupionej wokół promotora doktoratu. Publikacje w Phys. Rev. Lett. podlegają wymagającemu procesowi recenzji. Tym samym wyniki tych prac zostały już szczegółowo zweryfikowane w procesie publikacji przez

ekspertów w dziedzinie. Doktorant przedstawił również wprowadzenie do tematyki i dodatkowo zamieścił krótkie charakterystyki każdej z prac. Wstęp (15 stron) stanowi wartościowe wprowadzenie do zagadnień analizowanych w przedstawionych publikacjach. W szczególności dyskutuje różne protokoły metrologiczne, które są znakomicie zilustrowane na poglądowym schemacie. Doktorant zwraca uwagę na rozróżnienie schematów metrologicznych bez uwzględniania szumu oraz tych z szumem, przy czym, istotne jest czy szum jest nieskorelowany czy też występują korelacje. Kluczowymi schematami rozważanymi w pracy doktorskiej są tzw. adaptacyjne protokoły kwantowe, w których kolejne kanały kwantowe są próbkowane sekwencyjnie i dodatkowo w takim protokole można używać kanałów kontrolnych. W tym celu używana jest technika tzw. grzebieni kwantowych (*quantum combs*) dobrze znana z teorii kwantowych procesów stochastycznych. Doktorant zamieszcza również ciekawy przegląd ważnych rezultatów kwantowej metrologii uzyskanych w ostatnich latach. Ten profesjonalnie napisany wstęp dowodzi, że doktorant jest ekspertem w dziedzinie metrologii. Praca zawiera również bardzo dobry przegląd literatury zagadnienia z ostatnich kilku lat.

Lista publikacji doktoranta przedstawionych w rozprawie:

1. **S. Kurdziałek**, P. Dulian, J. Majasak, S. Chakraborty, and R. Demkowicz-Dobrzański, Quantum metrology using quantum combs and tensor network formalism, New Journal of Physics **27**, 013019 (2025)
2. **S. Kurdziałek**, W. Górecki, F. Albarelli, and R. Demkowicz-Dobrzański, Using Adaptiveness and Causal Superpositions Against Noise in Quantum Metrology, Physical Review Letters **131**, 090801 (2023)
3. **S. Kurdziałek**, F. Albarelli, and R. Demkowicz-Dobrzański, Universal Bounds for Quantum Metrology in the Presence of Correlated Noise, Physical Review Letters **135**, 130801 (2025)
4. **S. Kurdziałek** and R. Demkowicz-Dobrzański, Measurement Noise Susceptibility in Quantum Estimation, Physical Review Letters **130**, 160802 (2023)
5. **S. Kurdziałek**, Super-resolution microscopy via fluctuation-enhanced spatial modedemultiplexing, arXiv preprint: 2511.20790 (2025)

Mgr Kurdziałek jest we wszystkich pracach wieloautorskich pierwszym autorem. Doktorant zamieścił szczegółowy opis jego wkładu do każdej z prac. Bez wątpienia wkład mgra Kurdziałka jest fundamentalny. Dowodzi to, że autor rozprawy posiada znakomicie ugruntowaną wiedzę w dziedzinie oraz od kilku lat prowadzi aktywne badania naukowe, które doprowadziły do istotnych wyników opublikowanych w wiodących czasopismach.

Najważniejsze wyniki uzyskane przez doktoranta:

W pracy 1. opracowano wydajną metodę wyznaczania optymalnych, adaptacyjnych protokołów estymacji parametrów. Zastosowano w tym celu sieci tensorowe, które mogą reprezentować procesy kwantowe, tzw. *quantum combs* (grzebień kwantowy). Jest to nowatorskie uogólnienie wcześniejszych podejść, gdzie stosowano sieci tensorowe reprezentujące stany kwantowe. Ta nowa metoda drastycznie redukuje czasochłonność oraz zużycie pamięci przez algorytm i pozwala na analizę protokołów metrologicznych obejmujące do $N=50$ użyć kanału kubitowego. Dają to zdecydowaną przewagę nad poprzednimi metodami, które ograniczały się do $N=5$.

W pracy 2. wykazano, że w granicy dużej liczby użyć kanału $N \rightarrow \infty$, strategie adaptacyjne nie dają przewagi nad strategiami równoległymi pod względem skalowania precyzji. Rozwiązuje to dobrze znaną hipotezę w dziedzinie metrologii kwantowej i oznacza, że protokoły adaptacyjne, w których zmieniamy ustawienia aparatury w trakcie pomiaru na podstawie cząstkowych wyników, nie poprawiają ostatecznej dokładności bardziej niż prostsze schematy równoległe, gdy mamy do dyspozycji bardzo wiele powtórzeń. Praca ta analizuje również strategie wykorzystujące tzw. *quantum switch* (superpozycję kolejności zdarzeń, gdzie nie można jednoznacznie stwierdzić, czy kanał A był przed kanałem B). Wykazano, że superpozycje przyczynowe również nie dają przewagi asymptotycznej nad standardowymi metodami stosowanymi wcześniej. Mimo braku przewagi asymptotycznej, wykazano że adaptacyjność może być użyteczna, gdy parametry szumu nie są znane lub gdy mamy do czynienia z bardzo małą liczbą prób. Doktorant i współautorzy publikacji wyprowadzili nowe, ściśle ograniczenia na kwantową informację Fishera, które są prawdziwe dla najbardziej ogólnych scenariuszy adaptacyjnych. Uzyskanie nowych ograniczeń jest bez wątpienia bardzo istotnym wynikiem, który zapewne znajdzie zastosowanie w kolejnych badaniach. Doceniam elegancję analityczne wyprowadzenie powyższych ograniczeń.

Głównym osiągnięciem pracy 3. jest wyprowadzenie fundamentalnych ograniczeń opartych na kwantowej informacji Fishera na precyzję estymacji dla modeli, w których występują korelacje czasowe lub przestrzenne. W tym celu wykorzystano ponownie formalizm grzebieni kwantowych (quantum combs). Wykazano, że chociaż wyprowadzone ograniczenia nie zawsze są ściśle osiągalne, istnieje systematyczny sposób ich poprawiania poprzez zwiększanie złożoności obliczeniowej procedury (rozważanie większych bloków kanałów w kwantowym grzebieniu). Co ciekawe, okazuje się, że metoda zastosowana w tej pracy daje nietrywialne wyniki również dla kanałów całkowicie nieskorelowanych. Praca analizuje szczegółowo przypadek estymacji fazy w obecności skorelowanego szumu *defazowania*. W szczególności pokazano, że szum defazujący prostopadły do sygnału pozwala na zachowanie skalowania Heisenberga. Co ciekawe, rozwiniętą w tej pracy metodę zastosowano do badania ograniczeń precyzji w tzw. termometrii kolizyjnej, czyli szacowania parametrów środowiska (np. temperatury) poprzez serię oddziaływań (kolizji) z układem testowym. Modele kolizyjne są powszechnie używane w teorii kwantowych układów otwartych. Warto dodać, że dodatkowym efektem pracy jest powstanie pakietu w języku Python zawierającego funkcje do obliczania ograniczeń, jak również do przeprowadzania optymalizacji sieci tensorowych, który jest publicznie dostępny na platformie GitHub. Jest to przedmiotem kolejnej publikacji doktoranta, która nie znalazła się w rozprawie.

Standardowa kwantowa informacja Fishera opisuje sytuację idealnego pomiaru. W rzeczywistości jednak każde urządzenie pomiarowe wprowadza dodatkowo własny szum. Praca 4. wprowadza nową wielkość fizyczną: *Fisher Information Measurement Noise Susceptibility* (FI MENOS) – czyli podatność na szum pomiarowy. Doktorant (i współautorzy) pokazuje jak wyznaczyć podatność w ogólnym schemacie metrologicznym. Wielkość ta pozwala ilościowo określić, jak szybko tracimy informację o mierzonym parametrze, gdy pomiar ulega zaburzeniu. Jako zastosowanie tej nowej charakterystyki praca 4. analizuje nowoczesne techniki obrazowania. Wykazano, że technika oparta na FI MENOS pozwala wyznaczyć optymalną strategię obrazowania, która zapewnia nie tylko wysoką precyzję obrazowania, ale jednocześnie jest odporna na zaburzenia i błędy aparatury.

Jednoautorska praca 5 dostępna w bazie arXiv dyskutuje zastosowanie uzyskanych wyników do superprecyzyjnego obrazowania.

Warto dodać, że doktorant jest współautorem kilku innych prac dotyczących metrologii w tym samodzielnej pracy w renomowanym czasopiśmie Quantum. Bez wątpienia dorobek doktoranta jest wybitny. Na podkreślenie zasługuje wysoka kultura matematyczna przedstawionych do recenzji publikacji. Z przyjemnością czytałem również dodatkowe materiały, które uzupełniają publikacje w Phys. Rev. Letters. Jestem pod dużym wrażeniem zastosowanych technik matematycznych, w szczególności quantum combs, które pozwalają na analizę protokołów adaptacyjnych.

Nie zgłaszam uwag krytycznych do rozprawy. Naturalnym pytaniem, które nasuwa się przy studiowaniu rozprawy to czy i jak można uogólnić prezentowane wyniki na metrologię wieloparametrową. Doktorant rozważa konstrukcje, w których przestrzenie Hilberta są skończone wymiarowe. Czy można podobne techniki zastosować w przypadku nieskończonego wymiaru?

Ocena końcowa: Pracę doktorską mgra Stanisława Kurdziałka oceniam jako wybitną. Uważam, że z nadmiarem spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Doktorant postawił szereg ambitnych problemów i uzyskał bardzo ciekawe i ważne rezultaty. Przedstawione wyniki zostały opublikowane w bardzo dobrych czasopismach. Wnoszę o dopuszczenie pana mgra Stanisława Kurdziałka do dalszego etapu przewodu doktorskiego. Nie mam wątpliwości, że jego praca doktorska zasługuje na wyróżnienie. Rezultaty uzyskane przez doktoranta stanowią fundamentalny wkład do nowoczesnej metrologii kwantowej i szeroko rozumianej kwantowej teorii informacji. Moim zdaniem zaprezentowane wyniki wejdą szybko do kanonu literatury dotyczącej metrologii kwantowej.

Toruń, 19 kwietnia 2026



prof. dr hab. Dariusz Chruściński