

Gdańsk, 13 kwietnia 2026

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Stanisława Kurdziałka  
pt. *Noise and signal correlations in quantum metrology and imaging***

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska poświęcona zagadnieniom metrologii kwantowej oraz kwantowo inspirowanego obrazowania nadrozdzielczego. Celem pracy jest rozwój ogólnych narzędzi teoretycznych służących analizie fundamentalnych ograniczeń precyzji pomiarów w obecności korelacji sygnału oraz szumu, a także zbadanie roli korelacji czasowych w kontekście obrazowania nadrozdzielczego.

Rozprawa ma charakter teoretyczny i została przygotowana w formie cyklu powiązanych publikacji: czterech opublikowanych artykułów naukowych oraz jednego preprintu dostępnego w bazie arXiv.org. Należy podkreślić, że artykuły zostały opublikowane w renomowanych czasopismach międzynarodowych: trzy w *Physical Review Letters* oraz jeden w *New Journal of Physics*. Tematyka rozprawy wpisuje się w aktualny nurt badań nad technologiami kwantowymi, w szczególności nad wykorzystaniem efektów kwantowych do poprawy precyzji pomiarów fizycznych. Problematyka ta ma znaczenie zarówno fundamentalne, jak i aplikacyjne.

Wyniki opisane w poszczególnych publikacjach tworzą spójny dorobek obejmujący zarówno rozwój ogólnej teorii metrologii kwantowej, jak i jej zastosowania. Szczególne znaczenie mają rezultaty dotyczące fundamentalnych ograniczeń precyzji estymacji oraz roli korelacji obecnych w sygnale oraz szumie w metrologii kwantowej, które stanowią główny wkład rozprawy do światowej literatury.

Rozprawa zawiera szereg oryginalnych i istotnych wyników naukowych, które można podzielić na dwa główne obszary. Pierwszy z nich dotyczy fundamentalnych ograniczeń metrologii kwantowej. Rozwijane są ogólne metody optymalizacji kwantowej informacji Fishera dla złożonych, adaptacyjnych protokołów metrologicznych, uwzględniających obecność szumu, w tym jego korelacji. Szczególnie istotnym osiągnięciem jest wyprowadzenie uniwersalnych ograniczeń na precyzję estymacji oraz wykazanie asymptotycznej równoważności schematów adaptacyjnych i równoległych w przypadku nieskorelowanego szumu. Wynik ten rozwiązuje długo otwarty problem w teorii metrologii kwantowej i ma charakter fundamentalny.

Drugim obszarem badań jest zastosowanie metod metrologii kwantowej w obrazowaniu nadrozdzielczym. Wprowadzona zostaje nowa wielkość – podatność informacji Fishera na szum pomiarowy oraz analizowane jest jej znaczenie w praktycznych scenariuszach. W pracy wykazano, że korelacje sygnału mogą stanowić użyteczny zasób metrologiczny, prowadzący do zwiększenia odporności pomiarów na zakłócenia.

W szczególności każda z publikacji składających się na rozprawę wnosi odrębny, istotny wkład do rozwoju metrologii kwantowej.

W pracy [I] pt. *Quantum metrology using quantum combs and tensor network formalism* zostaje wprowadzony formalizm sieci tensorowych do opisu i optymalizacji adaptacyjnych protokołów metrologicznych. Opracowano algorytm umożliwiający efektywną optymalizację kwantowej informacji Fishera w protokołach o dużej liczbie użyć kanałów. Kluczowym osiągnięciem jest pokonanie problemu wykładniczego wzrostu złożoności obliczeniowej oraz znaczące rozszerzenie zakresu analizowanych układów. Zaproponowana metoda umożliwia w praktyce badanie protokołów metrologicznych obejmujących do  $N=50$  użyć kanału kwantowego, podczas gdy wcześniejsze podejścia były ograniczone do znacznie mniejszych przypadków  $N < 5$ . Praca ma charakter metodologiczny i dostarcza narzędzi wykorzystywanych w dalszych częściach rozprawy.

W artykule [II] pt. *Using Adaptiveness and Causal Superpositions Against Noise in Quantum Metrology* uzyskano, w mojej opinii, jeden z najważniejszych wyników całej rozprawy. Wyprowadzono uniwersalne ograniczenie na precyzję estymacji dla adaptacyjnych protokołów metrologicznych w obecności nieskorelowanego szumu, a następnie wykazano, że schematy adaptacyjne i równoległe są asymptotycznie równoważne pod względem osiągalnej precyzji estymacji. Wynik ten rozwiązuje długo otwarty problem w teorii metrologii kwantowej i ma charakter fundamentalny, wskazując, że adaptacyjność nie prowadzi (w reżimie asymptotycznym) do przewagi w precyzji estymacji. Co więcej, autorzy podsumowują ten rezultat śmiałym, ale prawdziwym stwierdzeniem: „we dare to say that the theory of single-parameter quantum metrology in the presence of uncorrelated noise is now complete”.

Kolejna publikacja [III] pt. *Universal Bounds for Quantum Metrology in the Presence of Correlated Noise* stanowi uogólnienie wyników uzyskanych w pracy [II], rozszerzając analizę z przypadku nieskorelowanego szumu na ogólne modele metrologiczne obejmujące korelacje czasowe i przestrzenne, opisywane formalizmem kwantowych grzebieni. W pracy tej wyprowadzono uniwersalne górne ograniczenia dla kwantowej informacji Fishera oraz zastosowano je do konkretnych modeli fizycznych, takich jak estymacja fazy w obecności skorelowanego szumu defazującego, czy kolizyjna termometria kwantowa. Pokazano również, że uzyskane ograniczenia mogą być ściślejsze niż dotychczasowe wyniki także w przypadku nieskorelowanego szumu. Uzyskane wyniki tworzą spójny obraz ograniczeń metrologii kwantowej zarówno w przypadku nieskorelowanego, jak i ogólnego szumu z korelacjami. Ważnym podkreślenia jest fakt, że kod służący do wyznaczania ograniczeń udostępniony został publicznie.

W artykule [IV] pt. *Measurement Noise Susceptibility in Quantum Estimation* wprowadzono nową wielkość – podatność informacji Fishera na szum pomiarowy, która pozwala ilościowo ocenić wpływ niedoskonałości pomiaru na precyzję estymacji. Pokazano, że wielkość ta jest użyteczna w analizie interferometrii oraz obrazowania nadrozdzielczego. Ciekawy wynik został opisany w *Appendix F*, gdzie przeanalizowano rolę korelacji sygnału i pokazano, że choć nie zwiększają one kwantowej informacji Fishera, to umożliwiają uzyskanie precyzji estymacji mniej podatnej na szum, co może stanowić zasób w obrazowaniu.

Ostatnia praca [V] pt. *Super-resolution microscopy via fluctuation-enhanced spatial mode demultiplexing* ma najbardziej eksperymentalny charakter. Pokazano, że czasowe korelacje sygnału optycznego, wynikające np. z migotania emiterów, mogą stanowić dodatkowy zasób w obrazowaniu nadrozdzielczym.

W szczególności wykazano, że fluktuacje emiterów pozwalają istotnie poprawić precyzję estymacji wyższych momentów przestrzennych, a jednocześnie umożliwiają zastąpienie złożonych schematów pomiarowych znacznie prostszymi pomiarami, przy zachowaniu pełnej informacji o parzystych momentach obiektu. Praca wskazuje również sposób implementacji eksperymentalnej proponowanego podejścia.

Uzyskane wyniki cechują się wysokim poziomem ogólności i mają potencjał szerokiego zastosowania w różnych dziedzinach fizyki kwantowej. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że część z nich dotyczy problemów o charakterze ogólnym, a nie jedynie szczegółowych modeli. Doktorant wykorzystuje zaawansowany aparat matematyczny, obejmujący m.in. teorię kanałów kwantowych, optymalizację kwantowej informacji Fishera oraz metody oparte na sieciach tensorowych. Wyprowadzenia są logiczne i spójne, a wnioski dobrze uzasadnione. Autor rozprawy wykazuje dobrą znajomość literatury przedmiotu oraz umiejętność umieszczenia własnych wyników w szerszym kontekście badawczym. Pewnym uzupełnieniem pracy mogłaby być bardziej rozbudowana dyskusja możliwości eksperymentalnej realizacji uzyskanych wyników. Choć rozprawa ma wyraźnie teoretyczny charakter, a w niektórych miejscach wskazane są potencjalne kierunki implementacji, szersze odniesienie do konkretnych układów fizycznych oraz warunków, w których rozważane protokoły mogłyby zostać zrealizowane, dodatkowo uwypukliłoby ich znaczenie.

Rozprawa prezentuje bardzo wysoki poziom naukowy, choć ze względu na znaczny stopień formalizmu oraz fakt, że większość wyników została opublikowana w czasopiśmie *Physical Review Letters*, gdzie obowiązuje znaczne ograniczenie objętości artykułów, jest wymagająca w odbiorze. Trudność ta jest jednak częściowo łagodzona przez dołączony wstęp, który wprowadza czytelnika do tematyki pracy.

Na koniec, ponieważ rozprawa ma formę cyklu publikacji wieloautorskich, należy odnieść się do wkładu doktoranta. We wszystkich pracach doktorant jest pierwszym autorem, a z jego oświadczeń wynika, że miał on istotny udział w uzyskaniu prezentowanych wyników.

## Podsumowanie

W mojej ocenie, recenzowana rozprawa doktorska wnosi oryginalny i znaczący wkład w rozwój dyscypliny nauki fizyczne, w szczególności metrologii kwantowej. Spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim i stanowi podstawę do nadania stopnia doktora.

Dodatkowo uważam, że rozprawa wyróżnia się na tle prac doktorskich przede wszystkim obecnością wyników o charakterze fundamentalnym, które w sposób spójny porządkują teorię metrologii kwantowej. Zasadniczo domknęto teorię jednoparametrowej metrologii kwantowej, wyprowadzając uniwersalne i nasycalne ograniczenia na precyzję estymacji w przypadku nieskorelowanego szumu, które doprowadziły do rozwiązania długo otwartego problemu równoważności równoległych i adaptacyjnych schematów metrologicznych. Dokonano również uogólnienia na przypadek skorelowanego szumu poprzez wyprowadzenie ogólnych ograniczeń obowiązujących w scenariuszach z korelacjami czasowymi i przestrzennymi, wypełniając istotną lukę w literaturze. Uzyskane wyniki mają charakter ogólny, wykraczają poza analizę konkretnych modeli i przyczyniają się do ujednoczenia opisu ograniczeń precyzji w metrologii kwantowej. Wysoki poziom naukowy rozprawy znajduje dodatkowe potwierdzenie w publikacji wyników w wiodących czasopismach międzynarodowych, w tym trzech artykułów w *Physical Review Letters*. Łącznie uzasadnia to wniosek o wyróżnienie rozprawy.

Witold Laskowski