

dr hab. Emilia Witkowska
Oddział Fizyki Teoretycznej
Instytut Fizyki Polskiej Akademii Nauk
Aleja Lotników 32/46, 02-668 Warszawa
tel. 22 116 3175
e-mail: emilia.witkowska@ifpan.edu.pl

Warszawa, 12 marca 2023 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr Wojciecha Góreckiego

Przedłożona mi praca doktorska pod tytułem “Heisenberg limit beyond quantum Fisher information” została przygotowana pod kierunkiem dr hab. Rafała Demkowicza-Dobrzańskiego na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Część naukowa rozprawy została oparta na oryginalnych wynikach Autora opisanych w trzech publikacjach naukowych:

- [1] W. Górecki, R. Demkowicz-Dobrzański, H.M. Wiseman, D.W. Berry, *π -Corrected Heisenberg Limit*, Physical Review Letters **124**, 030501 (2020)
- [2] W. Górecki, R. Demkowicz-Dobrzański, *Multiple-Phase Quantum Interferometry: Real and Apparent Gains of Measuring All the Phases Simultaneously*, Physical Review Letters **128**, 040504 (2022)
- [3] W. Górecki, R. Demkowicz-Dobrzański, *Multiparameter quantum metrology in the Heisenberg limit regime: Many-repetition scenario versus full optimization*, Physical Review A **106**, 012424 (2022)

Praca doktorska mgr Wojciecha Góreckiego dotyczy podstaw teorii metrologii kwantowej, która jest obecnie szybko rozwijającą się dziedziną nauki na pograniczu fizyki, statystyki i teorii informacji kwantowej. Jednym z głównych zagadnień dyskutowanych w literaturze jest granica precyzji estymacji parametru w różnego rodzaju protokołach kwantowych, również z dekoherencją, czy też skończoną liczbą zasobów kwantowych. Praca doktorska Wojciecha Góreckiego bardzo dobrze wpisuje się w tę tematykę współczesnych badań. Autor skupia swoją uwagę na skalowaniu precyzji z liczbą cząstek tworzących układ stosując i jednocześnie rozwijając formalizm oparty na tzw. kwantowej estymacji Bayesowskiej i podejścia minimax. Tym samym, wychodzi poza typowo stosowane w literaturze narzędzie teoretyczne bazujące głównie na analizie kwantowej informacji Fishera. Poszczególne zadania, jak na przykład szczegółowa analiza efektywności estymacji wieloparametrowej w kontekście interferometrii i magnetometrii, są relatywnie nowatorskie. Warto dodać, że są to zadania bardzo trudne, wymagające biegłości w rachunkach analitycznych oraz ich głębokiego zrozumienia. Wybór tematyki badawczej uważam w pełni za trafny i uzasadniony. Wyniki badań mgr Wojciecha Góreckiego mają istotny wkład w rozwijanie podstaw teorii kwantowej metrologii. Mogą one również okazać się ważne w praktycznych zastosowaniach, takich jak efektywne planowanie przyszłych doświadczeń.

Rozprawa mgr Wojciecha Góreckiego została napisana w języku angielskim i liczy sto dwie strony łącznie z bibliografią. Składa się z siedmiu rozdziałów, wliczając wstęp i końcowe podsumowanie. Pierwszy rozdział ma charakter wprowadzenia do głównej tematyki rozprawy, jej struktury i głównych tez. Następne dwa rozdziały omawiają niezbędne pojęcia teorii metrologii kwantowej i znanych w literaturze wyników otrzymanych z zastosowaniem kwantowej informacji Fishera. Główne metody używane przez Autora są wprowadzone w rozdziale czwartym rozprawy i zastosowane do wyznaczenia granicy Heisenberga dla dowolnej unitarnej transformacji ze skończoną liczbą zasobów kwantowych. Rozdział piąty wprowadza do teorii wieloparametrowej estymacji, którą następnie Autor stosuje w rozdziale szóstym do wyznaczenia granicy Heisenberga w przykładowej interferometrii i magnetometrii. To właśnie rozdział czwarty i szósty stanowią główną część rozprawy zawierającą szczegółowy opis oryginalnych wyników Autora związanych, w mniejszym lub większym stopniu, z konkretnym artykułem wcześniej opublikowanym. Miejsce opublikowania wymienionych artykułów, a mianowicie prestiżowe *Physical Review Letters* oraz *Physical Review A* również świadczą o wartości zawartości merytorycznej rozprawy.

Pierwsza część prac mgr Wojciecha Góreckiego przedstawiona w dysertacji dotyczy granicy Heisenberga wyznaczonej metodą Bayesowską oraz podejściem minimax. Po wprowadzeniu podstawowych pojęć i metod, Autor przytacza dwa przykłady zastosowania formalizmu do estymacji nieznanej fazy w dwuramiennej interferometrii z ustaloną liczbą fotonów i z ustaloną średnią liczbą fotonów. Pokazuje, że granica Heisenberga posiada dodatkowy czynnik, przy czym jest to π^2 w pierwszym przypadku. Następnie Autor zadaje szereg pytań m.in. dotyczących uniwersalności wyniku dla dowolnej unitarnej transformacji interferometrycznej czy też zbioru, do którego należy wartość fazy. Mgr Wojciech Górecki przeprowadza ściśle rachunki analityczne wyznaczające granicę Heisenberga odpowiadając na poszczególne pytania. Warto zauważyć, że rachunki analityczne z zastosowaniem formalizmu Bayesowskiego (zaprezentowane w artykule [1]) zostały uzupełnione przez analizę w podejściu minimax umieszczoną tylko w dysertacji Autora. Wyniki przedstawione w tej części rozprawy są bardzo ciekawe, w szczególności zestawienie granicy dla dwóch różnych podejść. Zastanawia mnie logarytmiczna poprawka w równaniach (4.52) i (4.53). Czy wprowadza ona ograniczenia na zasób kwantowy charakteryzowany przez liczbę cząstek lub spektrum Hamiltonianu? Ciekawa jest również analiza unitarnej estymacji fazy z ograniczeniem na średnią energię. Szkoda, że Autor nie przytoczył przykładów układów fizycznych lub strategii kwantowej, kiedy ograniczenie na średnią energię ma znaczenie.

Druga część prac przedstawionych w pracy doktorskiej poświęcona jest analizie granicy Heisenberga w wieloparametrowej estymacji. Mgr Wojciech Górecki skupia się przede wszystkim na wyznaczeniu granicy w dwóch przypadkach: równoczesnej estymacji wszystkich parametrów i estymacji każdego z nich niezależnie. Autor analizuje wiele przykładów, obliczając analitycznie granice Heisenberga dla wieloramiennej interferometrii, pola magnetycznego w trzech kierunkach lub pola magnetycznego w dwóch rozdzielonych przestrzennie punktach, również omówionych w artykułach [2] i [3]. Wnioski wyciągnięte przez Autora sugerują przewagę strategii wspólnych pomiarów względem niezależnych, w niektórych przypadkach. Szczególnie ciekawy jest ostatni przykład rozważany przez Autora, który natychmiast nasuwa pytanie o estymację gradientu pola magnetycznego. Czy stosowany

formalizm byłby adekwatny w takim przypadku? Jaka byłaby granica Heisenberga związana z gradientem? Czy istnieje szczególny kwantowy protokół pozwalający na wysycenie takiej granicy? Jest to jednak zadanie, które zważywszy na złożoność tematyki, można uznać za zbyt wygórowane w odniesieniu do tej pracy doktorskiej.

Bardzo wysoko oceniam wartość naukową wyników zreferowanych w dysertacji. Warto dodać, że wiele opisanych rachunków analitycznych zostało przedstawionych po raz pierwszy. Nie mam żadnych uwag krytycznych dotyczących części merytorycznej, a pytania pojawiające się powyżej podyktowane są raczej ciekawością naukową.

Tytułem uwag końcowych, warto podkreślić odpowiednie wprowadzenie w tematykę badawczą i jasność sformułowanych hipotez badawczych. Jedynie sposób przedstawienia wyników jest dość jednolity w niektórych częściach rozprawy, przez co nieuwważny czytelnik może łatwo pogubić się w ilości przypadków i wyznaczonych dla nich granic Heisenberga. Autor wykorzystał w swojej pracy doktorskiej wiele naukowych pozycji bibliograficznych. Pod względem jakościowym literatura jest dobrana prawidłowo, jest zróżnicowana i bogata. Szkoda tylko, że stosowany format bibliografii jest najbardziej nieprzyjazny czytelnikowi – nienumerowane pozycje ułożone według kolejności alfabetycznej. Pomimo tych drobnych niedociągnięć, w mojej opinii rozprawa została napisana przejrzysto, a jej układ nie budzi większych zastrzeżeń.

Podsumowując, rozprawa mgr Wojciecha Góreckiego przedstawia oryginalne problemy naukowe i ich rozwiązania. Autor wykazał się biegłością w stosowaniu metod analitycznych, sprawnie posługując się formalizmem Bayesowskim i minimax, jak również kwantowej informacji Fishera. Widać też szerokie spektrum zainteresowań Autora. Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że praca doktorska mgr Wojciecha Góreckiego spełnia zwyczajowe i ustawowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim. **Wnoszę o dopuszczenie magistra Wojciecha Góreckiego do dalszych etapów postępowania doktorskiego.**

Emilia Lisowska

Rozprawę mgr Wojciecha Góreckiego uważam za wyróżniającą się. Wyniki przedstawione przez Autora stanowią istotny wkład w podstawy teorii metrologii kwantowej. Zaproponowany w pracach formalizm, przeprowadzone rachunki wyznaczające adekwatne granice Heisenberga dla poszczególnych zadań i kwantowych protokołów metrologicznych spotkały się z dużym zainteresowaniem środowiska naukowego. Zaprezentowane wyniki zostały opublikowane w czasopismach o najwyższej randze a wkład Autora rozprawy w ich powstanie jest istotny. Przedstawiony dorobek naukowy mgr Wojciecha Góreckiego jest również imponujący: razem piętnaście artykułów opublikowanych w wiodących czasopismach naukowych oraz nowe prace pojawiające się na publicznie dostępnym archiwum arXiv. Warto dodać, że nawet pierwsze prace Autora zawierające oryginalne rozwiązanie problemu dwóch atomów z oddziaływaniami dipolowymi cieszą się zainteresowaniem środowiska.