



dr hab. Lech Jakóbczyk, prof. UW
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Wrocławski
Wrocław

Recenzja w postępowaniu habilitacyjnym doktora Rafała Demkowicza - Dobrzańskiego

Dr Rafał Demkowicz - Dobrzański jest adiunktem w Instytucie Fizyki Teoretycznej na Wydziale Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego. Studia magisterskie z fizyki ukończył w roku 2003 również na Uniwersytecie Warszawskim. Tam też otrzymał w roku 2007 stopień doktora nauk fizycznych w zakresie fizyki na podstawie rozprawy pod tytułem: *Rola korelacji w kwantowej teorii estymacji i możliwość dekorelacji stanów kwantowych*.

1. Ocena osiągnięć naukowych będących podstawą ubiegania się o stopień doktora habilitowanego.

Podstawą do ubiegania się o stopień doktora habilitowanego jest cykl dziesięciu publikacji (publikacje [1 - 10] w spisie zamieszczonym w Autoreferacie) zatytułowany: *Fundamentalne ograniczenia na precyzję w metrologii kwantowej*. Metrologia kwantowa zajmuje się estymacją parametrów od których zależą stany układu kwantowego, poprzez pomiary odpowiednich obserwabli. I tak w przypadku pomiarów przy zastosowaniu interferometru Macha - Zehndera, estymuje się różnice opóźnień fazowych w dwu ramionach interferometru, rejestrując liczbę fotonów w obu detektorach. Jeśli w eksperymencie używa się światła klasycznego opisanego poprzez stan koherentny, to z uwagi na poissonowskie

fluktuacje liczby fotonów, skalowanie niepewności estymacji fazy ze średniej liczby fotonów, jest postaci $1/\sqrt{n}$. Jest to tak zwana standardowa granica kwantowa. Ogólne prawa mechaniki kwantowej a w szczególności nierówność Heisenberga, pozwalają jednak znaleźć lepsze ograniczenie na precyzję estymacji fazy: niepewność fazy skaluje się jak $1/n$, co nazywa się granicą Heisenberga. Granicę Heisenberga można osiągnąć poprzez przygotowanie układu w odpowiednich stanach o nietrywialnych korelacjach kwantowych, czyli stanach splątanych. W przypadku interferometru Macha - Zehndera, takimi stanami są na przykład tak zwane stany N00N.

W pracach stanowiących podstawę wniosku habilitacyjnego analizowany jest problem estymacji fazy przy uwzględnieniu efektów dekoherencji. Jest to niezwykle ważne zagadnienie, gdyż dekoherencja występuje we wszystkich realizacjach eksperymentalnych. W optyce kwantowej, jest to w głównej mierze spowodowane stratami fotonów. Nawet niewielkie straty fotonów niszczą subtelną strukturę stanów typu N00N i granica Heisenberga może nie być osiągnięta. Systematycznej analizie tych problemów poświęcone są prace habilitanta.

Optymalna estymacja fazy w obecności strat w tak zwanym podejściu lokalnym analizowana jest w pracach [5 - 9]. Podejście lokalne oparte jest na kwantowej nierówności Cramera - Rao wyrażonej w terminach kwantowej informacji Fishera. Optymalny stan maksymalizuje informację Fishera, co w przypadku idealnym (mamy wtedy do czynienia ze stanami czystymi) prowadzi do stanów typu N00N. Po uwzględnieniu strat, wyjściowy stan światła jest stanem mieszanym i wyrażenie na informację Fishera jest bardzo złożone. W tym kontekście szczególnie interesująca jest moim zdaniem praca [8], gdzie znaleziono postać informacji Fishera w dwu przypadkach: strat w jednym ramieniu interferometru lub w dwóch ramionach jednocześnie. Analiza informacji Fishera pozwoliła uzyskać wyniki sugerujące, że obecność strat niszczy granicę Heisenberga. Ponadto znaleziono tam stany optymalne, które nie mają struktury stanów N00N (które w obecności strat nie są optymalne). Jak wynika z rezultatów pracy [6], poprawa precyzji powyżej standardowej granicy kwantowej jest możliwa jedynie w przypadku światła nieklasycznego: wykorzystanie wielokrotnych odbić pojedynczych fotonów czy klasycznych wiązek światła nigdy

tego nie zapewni. Niezwykle ważna w tym kontekście jest praca [5], która opisuje rezultaty eksperymentu realizującego optymalną strategię estymacji fazy przy wykorzystaniu stanów dwufotonowych. Eksperyment pokazuje wyraźną przewagę takich stanów nad stanami klasycznymi czy też stanami N00N, jeśli chodzi o precyzję pomiaru fazy w obecności strat. Podsumowanie powyższych aspektów metrologii kwantowej stanowi praca [7], opublikowana w Nature Photonics.

W pewnych sytuacjach lokalne podejście do problemu estymacji fazy jest niewystarczające. Wtedy bardziej praktyczne jest globalne podejście (podejście Bayesowskie). W takim przypadku przyjmuje się pewien rozkład a priori parametru fazy a następnie minimalizuje się średni koszt estymacji, gdzie funkcja kosztu jest zadana w naturalny sposób. Prace [3 - 4] zawierają rezultaty dotyczące Bayesowskiej estymacji fazy w obecności strat. W pracy [4] rozkład a priori był rozkładem jednostajnym na odcinku $[0, 2\pi]$ (brak jakiegokolwiek wiedzy na temat fazy). Znalezione w niej przy użyciu metod numerycznych optymalne stany i precyzję estymacji. Uzyskano też, co jest bardzo ważnym rezultatem, analityczne wzory na ograniczenie możliwej do osiągnięcia precyzji estymacji w dwóch przypadkach: strat tylko w jednym ramieniu oraz takich samych strat w obu ramionach. Rezultaty te pokazują, że obecność strat powoduje asymptotyczne skalowanie precyzji w postaci klasycznej (to znaczy $1/\sqrt{n}$), pomnożonej przez współczynnik który może być większy od 1.

W pracach omawianych powyżej analizowany był wpływ dekoherencji na skalowanie precyzji w interferometrii wynikającej jedynie ze strat fotonów. W pracy [1] opublikowanej w Nature Communication, sformułowane zostało ogólne podejście do problemu ograniczeń na optymalną precyzję w metrologii kwantowej dla ogólnych modeli dekoherencji. W wielu przypadkach możliwe jest wyprowadzenie ograniczeń na precyzję estymacji analizując jedynie geometrię kanałów kwantowych modelujących dekoherencję. Jest to metoda tak zwanej klasycznej symulacji, pozwalająca wyrazić ograniczenie na osiągalną precyzję poprzez specyficzne odległości kanału od brzegu przestrzeni kanałów. Gdy te odległości są niezerowe (co jest typowe dla większości modeli dekoherencji), asymptotyczne skalowanie ma charakter klasyczny i nie jest możliwe osiągnięcie granicy Heisenberga. Warto podkreślić to, że wynik ten ma charakter uniwersalny. W niektórych przypadkach dekoherencji należy stosować ogólniejszą metodę tak zwanego rozszerzenia kanału. Wtedy

ograniczenie na precyzję estymacji zadane jest przez wielkości wyrażone w terminach operatorów Krausa reprezentujących dany kanał kwantowy. Powyższe metody zastosowano do analizy konkretnych przykładów dekoherencji takich jak depolaryzacja, defazowanie i emisja spontaniczna. We wszystkich przypadkach dekoherencja prowadzi do asymptotycznego skalowania precyzji postaci $1/\sqrt{n}$, zmodyfikowanego przez stałe multiplikatywne. Stałe te zostały znalezione w jawnej postaci.

Habilitant zajmował się również zagadnieniami estymacji wieloparametrowej. Problemom tym poświęcone są prace [2,10]. Szczególnie interesująca jest praca [10], gdzie analizowano problem uzgodnienia orientacji kartezyjskich układów odniesienia poprzez przesyłanie optymalnych stanów n - qubitowych. Problem ten został rozwiązany przy użyciu informacji Fishera jako narzędzia do optymalnej estymacji elementu grupy $SU(2)$. Uzyskano elegancki wynik pokazujący, że optymalne stany są opisane przez punkty na sferze Blocha odpowiadające wierzchołkom brył platońskich.

W mojej opinii prace będące podstawą wniosku habilitacyjnego wnoszą bardzo istotny wkład do dziedziny metrologii kwantowej. Znaleźć w nich można nowatorskie idee i rozwiązania fundamentalnych problemów. Bardzo wysoko oceniam umiejętności habilitanta, zarówno jego biegłość w posługiwaniu się subtelnymi metodami matematycznymi jak i znajomość metod numerycznych. Chociaż większość prac przedstawionego cyklu to prace wieloautorskie, to jednak jak wynika z przedstawionych oświadczeń współautorów, wkład habilitanta do tych prac był znaczący albo wręcz dominujący.

2. Ocena pozostałych osiągnięć naukowych

Równie imponujące są pozostałe osiągnięcia naukowe dra Rafała Demkowicza - Dobrzańskiego. Dorobek naukowy poza wnioskiem habilitacyjnym stanowi 16 prac (publikacje [11 - 26]). Dotyczą one szeroko pojętej problematyki kwantowej teorii informacji. Oprócz prac [11] i [12] zawierających kontynuację badań w dziedzinie metrologii kwantowej (prace te zamieszczone w Autoreferacie jako preprinty już są opublikowane), znajdujemy tutaj publikacje dotyczące kryptografii i komunikacji kwantowej (prace [14,15], [17], [20]), teorii korelacji i splątania (prace [13], [16], [18,19], [21], [23-25]) oraz klonowania stanów

kwantowych (prace [22], [26]). Szczególne wrażenie wywierają prace [18,19] dotyczące dekorelacji stanów, czyli procesowi umożliwiającemu zachowanie jak największej ilości informacji zawartych w stanach podukładów przy jednoczesnym całkowitym usunięciu korelacji między podukładami. Bardzo ciekawa jest również praca [23] gdzie zostały zbadane własności wielocząstkowych zgodności (concurrence) ze względu na lokalne operacje i klasyczną komunikację.

Uważam, że publikacje stanowiące pozostały dorobek naukowy habilitanta mają bardzo wysoką wartość naukową. Pokazują też rozległość jego zainteresowań naukowych i umiejętność współpracy. Warto dodać, że w okresie od złożenia wniosku habilitacyjnego do chwili obecnej, liczba cytowań prac dra Demkowicza - Dobrzańskiego zwiększyła się do 304 (bez autocytowań) a jego indeks Hirscha wzrósł do 9.

3. Kierowanie i udział w projektach badawczych

Dr Rafał Demkowicz - Dobrzański kierował trzema projektami badawczymi: krajowym 1 PO3B 129 30, w ramach konsorcjum SIQS i w ramach międzynarodowego projektu QUASAR. Oprócz tego brał udział w siedmiu projektach badawczych.

4. Ocena działalności dydaktycznej, popularyzatorskiej i organizacyjnej

Jak wynika z dostarczonych materiałów, dr Rafał Demkowicz - Dobrzański prowadził wiele zajęć dydaktycznych, przede wszystkim z Mechaniki kwantowej, Kwantowej informacji, Kryptografii i komunikacji kwantowej oraz Kwantowej teorii pomiaru i estymacji. Sprawował (bądź sprawuje) opiekę nad pięcioma pracami licencjackimi i trzema magisterskimi. Jest również opiekunem naukowym dwóch doktorantów. Habilitant prowadził również szeroką działalność popularyzatorską poprzez wielokrotny udział w organizowaniu Festiwalu Nauki, wygłoszeniu szeregu wykładów popularno - naukowych, prowadzeniu warsztatów z fizyki, nauczaniu fizyki w liceum i napisaniu artykułów popularno - naukowych opublikowanych w miesięczniku Delta. Działalność organizacyjna habilitanta to udział w organizacji konferencji Quantum Optics VI i VIII oraz organizacja warsztatów FAMO, Optyka i Informatyka Kwantowa 2 i 3.

5. Podsumowanie

Jak wynika z powyższej analizy, wyniki naukowe i osiągnięcia publikacyjne dra Rafała Demkowicza - Dobrzańskiego pokazują, że jest badaczem na poziomie światowym w dziedzinie kwantowej teorii informacji w szczególności w metrologii kwantowej. O wadze wyników naukowych habilitanta świadczą jego wystąpienia konferencyjne (w tym 12 wykładów zaproszonych) oraz współpraca zagraniczna (Niemcy, Anglia, Szwajcaria, Włochy, Hiszpania) i krajowa (Gdańsk).

Stwierdzam, że osiągnięcia naukowe dra Rafała Demkowicza - Dobrzańskiego znacznie przewyższają ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane w postępowaniu habilitacyjnym i z wielką satysfakcją wnoszę by Rada Wydziału Fizyki Uniwersytetu Warszawskiego podjęła uchwałę o nadaniu mu stopnia doktora habilitowanego.



dr hab. Lech Jakóbczyk, prof. UW