

dr hab. Wiesław Laskowski, prof. UG
Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki
Uniwersytet Gdański
80-952 Gdańsk, ul. Wita Stwosza 57
e-mail: wieslaw.laskowski@ug.edu.pl

Gdańsk, dnia 01.06.2016 r.

Dziedzinat Wydziału Fizyki UW
Seksja ds. pracowniczych
Wpłynęło dn. 01.06.2016
podpis 

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Marcina Jarzyny
pt. *Phase Coherence in Quantum Metrology and Communication*

Rozprawa doktorska mgra Marcina Jarzyny ma charakter teoretyczny i dotyczy wpływu dekoherencji na wydajność kwantowej estymacji parametru oraz klasycznej komunikacji za pomocą kwantowego kanału (zwanej dalej przeze mnie „komunikacją”). Rozważany jest również związek pomiędzy tymi dwoma teoriami. Tematyka podjętych badań leży na styku metrologii i przetwarzania informacji, obszarów dynamicznie rozwijającej się kwantowej informacji, gdzie poszukuje się kwantowych efektów mogących usprawnić realizację pewnych procesów, między innymi takich jak właśnie estymacja parametru, czy przesyłanie informacji.

Rozprawa doktorska opiera się o wyniki z pięciu prac naukowych i jednego preprintu umieszczonego w bazie arxiv.org, których doktorant jest współautorem. Prace zostały opublikowane w bardzo dobrych czasopismach fizycznych: *Phys. Rev. Lett.*, *Phys. Rev. A*, *New J. Phys.*, *Opt. Express*. We wszystkich pięciu opublikowanych pracach doktorant jest pierwszym autorem, co pozwala przypuszczać, że wniósł do nich istotny wkład. Artykuły są cytowane ([1] – 25 razy, [2] – 7 razy, [3] – 4 razy, [4] – 1 raz), co dowodzi, że wyniki w nich zawarte cieszą się zainteresowaniem środowiska.

Rozprawa napisana jest w języku angielskim. Liczy 148 stron, jest podzielona na 6 rozdziałów i zawiera 6 dodatków. Poprzedzona jest streszczeniem w języku angielskim.

Pierwszy rozdział stanowi wstęp. Rozpoczyna się od przedstawienia historii i aktualnego stanu rozwoju metrologii kwantowej i komunikacji. W obu przypadkach autor przedstawia najważniejsze etapy rozwoju i podaje odnośniki do literatury. Na uwagę zasługuje fakt, że doktorant nie ogranicza się wyłącznie do przedstawienia rozwoju teorii, ale również przytacza realizacje eksperymentalne. Istotnym elementem wstępu jest zasygnalizowanie związku pomiędzy estymacją a komunikacją. Na pierwszy rzut oka dziedziny te wydają się rozłączne. Okazuje się jednak, iż główne zadanie każdej z nich (estymacja parametru i przesyłanie informacji) można wyrazić w języku drugiej. Wstęp kończy się przedstawieniem zawartości kolejnych rozdziałów.

Drugi rozdział pełni również rolę wstępu, w którym przedstawione są pojęcia i narzędzia, z których autor będzie korzystał w zasadniczej części rozprawy. W rozdziale zostają wprowadzone pojęcia stanu, pomiarów, zasady nieoznaczoności Heisenberga, ewolucji, splątania (w tym istotne z punktu widzenia zagadnienia – różnice pomiędzy splątaniem cząstek a splątaniem w modach), czy stanów użytecznych w kwantowej metrologii i komunikacji.

W tym miejscu mam dwa komentarze. Należy zwrócić uwagę na użyte przez autora pojęcie „nonlocal” (nielokalne) w odniesieniu do stanów, których korelacje prowadzą do łamania nierówności Bella (str. 13, 14). Trzeba w tym miejscu zaznaczyć, że nierówności Bella zostały wyprowadzone na gruncie założeń nie tylko *lokalności* ale i *realizmu*. W oparciu o aktualny stan wiedzy nie potrafimy jednoznacznie wskazać, które z tych założeń (czy oba) stoi w sprzeczności z przewidywaniami mechaniki kwantowej. Muszę jednak przyznać, iż pojęcie „kwantowa nielokalność” funkcjonuje w slangu naukowym w tym kontekście.

Druga moja uwaga dotyczy przykładów stanów użytecznych w kwantowej metrologii i komunikacji. Autor wymienił stany Gaussowskie, spinowe stany ściśnione i tzw. *matrix product states*. W mojej opinii brakuje odniesienia w tym katalogu do popularnych w kwantowej informacji stanów o określonej ilości cząstek, np. GHZ/N00N (wspomniane później np. w sekcji 3.4.1), Dicke’go/twin-fock (anonimowo podany we wzorze 2.10). Można argumentować, że należą one właściwie do klasy *matrix product states*, ale w mojej opinii są na tyle szczególne, że wymagają indywidualnego przywołania. W przypadku stanów GHZ/N00N i pewnej rodziny stanów Dicke’go możliwe jest osiągnięcie górnej granicy precyzji estymacji fazy (granica Heisenberga; w przypadku rodziny stanów Dicke’go – z dokładnością do stałej), choć ich użyteczność w metrologii silnie zależy od strat (jak opisano to dla stanu N00N w rozdziale 3.7.2). Oba stany mają też zastosowania w przetwarzaniu informacji kwantowej.

Trzecim rozdziałem rozpoczyna się zasadnicza część rozprawy. Rozważany jest tam wpływ dekoherencji na protokoły metrologii kwantowej. Autor rozpoczyna rozdział wstępem, w którym przedstawia klasyczną i kwantową teorię estymacji wraz z przykładem estymacji fazy w interferometrze Macha – Zehndera (wolnym od dekoherencji). W tym rozdziale pojawiają się pierwsze oryginalne wyniki. W rozdziale 3.6 pokazano, że asymptotyczna optymalna precyzja w granicy dużej liczby cząstek w podejściu lokalnym i Bayessowskim są takie same w przypadku nieskorelowanej dekoherencji, różnią się o czynnik π w przypadku wolnym od dekoherencji i zasadniczo nie są ze sobą związane w przypadku kolektywnej dekoherencji. W rozdziale 3.7 autor zajmuje się problemem efektywnej numerycznej optymalizacji precyzji w obecności dekoherencji. Optymalizowane są: informacja Fishera (podejście lokalne) i koszt (podejście Bayessowskie). Optymalizacja jest konieczna, ponieważ ogólne ograniczenia na precyzję wynikające z praw mechaniki kwantowej nie muszą być nasycane. Zaproponowane zostały dwa algorytmy: wykorzystujący *matrix product states* (wydajny nawet dla dużej ilości cząstek) i iteracyjny. Algorytmy zostały zilustrowane przekonującymi przykładami, w których optymalna precyzja jest osiągnięta lub prawie osiągnięta. Ciekawym wynikiem zawartym w tym rozdziale, choć chyba mało podkreślonym, jest to, że w przypadku nieskorelowanej dekoherencji nie ma potrzeby używać stanów wysoce splątanych, by osiągnąć optymalną precyzję.

W czwartym rozdziale przenosimy się do tematyki wpływu dekoherencji na komunikację. Podobnie jak w poprzednim przypadku rozdział rozpoczyna się od wprowadzenia podstawowych pojęć oraz przedstawienia przykładowych praktycznych realizacji protokołów komunikacyjnych – kodowania informacji i jej odbioru (detekcji). Wyniki doktoranta przedstawione są w rozdziale 4.5, gdzie koncentruje się on na komunikacji za pomocą kanału stratnego i defazującego oraz małej średniej liczbie fotonów. W przypadku kanału stratnego i konkretnego wyboru metody kodowania i detekcji otrzymano wynik, w którym wydajność komunikacji skaluje się ze średnią liczbą fotonów podobnie jak optymalna. Ciekawym wynikiem jest to, że wykorzystując nieklasyczne stany światła otrzymujemy polepszenie szybkości komunikacji (*communication rate*), lecz zanika ono dla małych średnich liczb fotonów i dużych strat. W przypadku kanału niezależnie defazującego w każdym pulsie światła można osiągnąć szybkość komunikacji taką jak w przypadku bezszumowym poprzez zastosowanie kolektywnej detekcji na dużej liczbie pulsów. W przypadku nieskorelowanej detekcji uzyskanie takiej wydajności nie jest możliwe.

Niezwykle interesującym zwieńczeniem pracy jest rozdział piąty, w którym pokazana jest relacja pomiędzy kwantową teorią estymacji i komunikacją. Do tej pory te dwa zagadnienia były prezentowane w pracy rozłącznie. Rozdział rozpoczyna się od podania intuicji, które dalej zostają sformalizowane. W podejściu Bayessowskim wykorzystano teorię zniekształceń (*rate-distortion theory*), za pomocą której możemy powiązać szybkość komunikacji i koszt Bayessowski (rozdział 5.3). Podobny związek możemy uzyskać również dla wielkości lokalnych wiążąc informację wzajemną (*mutual information*) z informacją Fishera (rozdział 5.4). Ten drugi związek rozważany jest w reżimie silnej i słabej estymacji. Co ciekawe, w tym drugim przypadku uzyskujemy efekt superaddytywności, gdy jako stanów wejściowych używamy stanów splątanych lub gdy na wyjściu używamy pomiarów kolektywnych. Po lekturze tego rozdziału nasuwa się pytanie, czy odnosimy jakąś korzyść z faktu wykazania relacji pomiędzy estymacją kwantową i komunikacją oraz powiązania ze sobą podstawowych pojęć z tych dziedzin. Czy jest to właśnie wyrażenie „wielkości” super-addytywności γ i Γ (własności komunikacyjnych) w języku informacji Fishera (wielkość „metrologiczna”)?

Rozprawę kończy obszerne podsumowanie, w którym zostały wymienione wszystkie uzyskane wyniki.

Rozprawa jest zredagowana bardzo dobrze. Stanowi ułożoną logicznie spójną całość. Dodatkowym jej atutem są starannie przygotowane rysunki. Ciekawym pomysłem jest umieszczanie notatek, pełniących w pewnym sensie rolę przypisów. Autor umieszcza tam ważne zagadnienia, ale nie na tyle istotne, by tworzyły oddzielny podrozdział, czy były częścią głównego tekstu.

Podczas pisania rozprawy autor nie uniknął drobnych błędów i niezręczności edytorskich. Jako przykład można podać używanie łącznika „-” zamiast myślnika „—”, np. „... in a polynomial time - as compared to ...”, kilka literówek, czy urwane zdanie. Pewne trudności w czytaniu sprawiał mi wybór sposobu cytowania bibliografii w postaci: nazwisko [rok], bez żadnego wyróżnienia. Powoduje to często pojawianie się dziwnych konstrukcji, np. „from the work of Caves Caves [1981]” (na str. 2), czy “with the number of particles Berry and Wiseman [2000]” (również na str. 2). Powyższe uwagi nie mają jednak istotnego znaczenia w odbiorze pracy i w zasadzie są dostrzegalne dla tego, kto skupia się na tym, by je odnaleźć.

Podsumowując, w rozprawie zostało przedstawionych bardzo dużo ważnych i niezmiernie ciekawych wyników. Mają one znaczenie dla rozwoju takich obszarów kwantowej informacji jak kwantowa metrologia i komunikacja, co potwierdza fakt opublikowania głównych wyników w najlepszych czasopismach fizycznych. Rozprawa bez wątpienia zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego (nawet kilku), jakim jest ukazanie wpływu dekoherencji na wydajność kwantowej metrologii i komunikacji oraz ustanowienie relacji pomiędzy tymi dwiema dziedzinami. Zgromadzony materiał badawczy mógłby śmiało posłużyć do napisania dwóch rozpraw doktorskich. Autor przedstawia wyniki w ścisły i przystępny sposób. Rozprawa z naddatkiem spełnia zwyczajowe i ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim. Wnoszę więc o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie doktoranta do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy.

Wiesław Leskander

dr hab. Wiesław Laskowski, prof. UG
Instytut Fizyki Teoretycznej i Astrofizyki
Uniwersytet Gdański
80-952 Gdańsk, ul. Wita Stwosza 57
e-mail: wieslaw.laskowski@ug.edu.pl

Gdańsk, dnia 01.06.2016 r.

Dziekanat Wydziału Fizyki UW
Sekoja ds. pracowniczych
Wypłynęło dn. 9.06.2016
podpis

**Syntetyczne uzasadnienie wniosku o wyróżnienie
rozprawy doktorskiej mgra Marcina Jarzyny
pt. *Phase Coherence in Quantum Metrology and Communication***

W rozprawie mgra Marcina Jarzyny pt. *Phase Coherence in Quantum Metrology and Communication* zostało przedstawionych bardzo dużo ważnych i niezmiernie ciekawych wyników. Mają one znaczenie dla rozwoju takich obszarów teorii kwantowej informacji jak kwantowa metrologia i klasyczna komunikacja za pomocą kwantowego kanału. Potwierdza to fakt opublikowania głównych wyników w najlepszych czasopismach fizycznych (*Phys. Rev. Lett.*, *Phys. Rev. A*, *New J. Phys.*, *Opt. Express*).

Rozprawa bez wątplenia zawiera oryginalne rozwiązanie problemu naukowego (a nawet kilku) a zgromadzony materiał badawczy mógłby śmiało posłużyć do napisania dwóch rozpraw doktorskich. Autor przedstawia wyniki w ścisły i przystępny sposób. Rozprawa z naddatkiem spełnia zwyczajowe i ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim.

Wiesław Laskowski