

Recenzja rozprawy doktorskiej
Control of quantum correlations in dissipative systems: New quantum effects, and novel theoretical and experimental methods
autorstwa Pani mgr Shilan Abo

Rozprawa doktorska Pani mgr Shilan Abo została przygotowana pod kierunkiem promotora prof. dr hab. Adama Mironowicza oraz kopromotora dr hab. Ravindra Chhajlany, prof. UAM i dotyczy zagadnień związanych z kontrolą korelacji kwantowych w układach dyssypatywnych. W szczególności, Doktorantka skoncentrowała się na metodach służących do generacji, wzmacniania, kontrolowania oraz detekcji nieklasycznych korelacji rozważanych układów.

Przedstawiona, dysertacja składa się z pięciu oryginalnych prac, których współautorką jest Doktorantka. Są to prace wieloautorskie, a listy autorów są przedstawione w porządku wskazującym na stopień ich udziału w przygotowaniu prac. Ze złożonych przez Kandydatkę oświadczeń wynika, że wniosła ona znaczący, jeśli nie dominujący, wkład w przygotowanie wszystkich tych prac. Zostały one opublikowane w czasopismach o bardzo wysokiej randze, takich jak Scientific Reports (x2), Physical Review Letters oraz Physical Review A. Jedna z prac została opublikowana jako preprint w bazie arXiv. Baza danych WoS podaje wszystkie cztery wymienione wyżej i opublikowane artykuły wskazując, że uzyskały one łącznie 46 cytowań (45 bez autocytowań) – stan na dzień 1 kwietnia br. Należy tu zaznaczyć, że większość z nich, (42 cytowania) dotyczy pracy opublikowanej w Phys. Rev. A w roku 2019. Pozostałe prace zostały opublikowane niedawno, tak więc nie miały one szansy uzyskania większej liczby cytowań. Biorąc to wszystko pod uwagę, można stwierdzić, że świadczy to o wysokiej jakości przedstawionych tam wyników oraz o zainteresowaniu nimi w środowisku naukowym zajmującym się problematyką korelacji kwantowych.

Oprócz wspomnianych wyżej pięciu artykułów stanowiących zasadniczą część dysertacji, Doktorantka złożyła również liczący ponad sto czterdzieści stron przewodnik (zawierający również kopie wspomnianych artykułów). W przewodniku można znaleźć dodatki zawierające listę publikacji Autorki, listę używanych skrótów i akronimów oraz oświadczenia współautorów prac. Znajdują się tam też streszczenia dysertacji w językach polskim i angielskim oraz wstęp, w którym Doktorantka skrótowo wyjaśniła jaka była jej motywacja przy podejmowaniu tematu, a także czego

dotyczy złożona rozprawa i składające się na nią poszczególne prace (prezentacje motywacji można też znaleźć w opisach poszczególnych prac). Co ciekawe, czytelnik może w przewodniku znaleźć też tabelę ukazującą zakres tematyczny poszczególnych artykułów w odniesieniu do wybranych słów kluczowych. Widać tu wyraźnie wpływ zamiłowania do porządku i różnego rodzaju zestawień i porównań Promotora pracy. Jeśli idzie o cytowaną literaturę, to odpowiednie jej zestawienia znajdują się w artykułach składających się na rozprawę. Wspomniane spisy literatury zawierają odnośniki do istotnych, a czasami, fundamentalnych prac innych autorów. Śledząc te zestawienia można się utwierdzić w przekonaniu, że tematyka rozprawy oraz przedstawione tam wyniki mieszczą się w aktualnym nurcie badań światowych w zakresie szeroko rozumianych korelacji kwantowych.

Wracając do omówienia poszczególnych prac składających się na przedstawioną rozprawę, pierwsza z nich, *Experimental hierarchy of two-qubit quantum correlations without state tomography*, opublikowana została w czasopiśmie Scientific Reports. Doktorantka jest pierwszą osobą wymienioną na liście 7-u współautorów artykułu (lista nie została przedstawiona w porządku alfabetycznym). W pracy dyskutowane są kwantowe korelacje w układach dwukubitowych. W szczególności, mowa jest tam o hierarchii różnych rodzajów korelacji kwantowych oraz detekcji tychże. W omawianym artykule rozważana jest macierz korelacji 3x3 zbudowana za pomocą dwukubitowych parametrów Stokesa pozwalająca na wyznaczenie parametrów określających korelacje kwantowe dla stanów Wernera (oraz stanów typu Wernera). Dyskutowane są też miary sterowalności kwantowej oraz nielokalności Bella wraz z ich wzajemną hierarchią. Co stanowi istotny walor pracy, zaproponowano w niej układ doświadczalny i przeprowadzono pomiary omawianych wskaźników. Układ bazuje na elementach optyki liniowej oraz stanach polaryzacji pojedynczych fotonów. W pracy pokazano bardzo dobrą zgodność pomiędzy wynikami teoretycznymi przedstawionymi w artykule a rezultatami uzyskanymi w przeprowadzonych doświadczeniach. Co jest istotne, zaproponowany schemat pomiarów pozwala na wyznaczenie hierarchii korelacji wykonując pomiar 6-u elementów macierzy korelacji w przeciwieństwie do metod opartych na tomografii kwantowej, gdzie należy wykonać pomiary 15 parametrów. Chciałbym w tym miejscu podkreślić, że ze względu na połączenie rozważań teoretycznych z eksperymentem wykazującym poprawność tych pierwszych, niezwykle wysoko oceniam omawianą pracę.

Drugi artykuł stanowiący kolejny fragment rozprawy, zatytułowany *Hybrid photon-phonon blockade*, został również opublikowany w czasopiśmie Scientific Reports. Doktorantka jest tu pierwszym autorem z pośród wszystkich sześciu. W pracy omawiany jest hybrydowy układ optomechaniczny zawierający nadprzewodzący kubit umieszczony w rezonatorze mikrofalowym. Ten ostatni jest sprzężony z innym rezonatorem mikromechanicznym. Dla takiego układu, znajdując rozwiązania dla funkcji korelacji drugiego rzędu, określono warunki dla których

następuje hybrydowa blokada typu foton-fonon. Przeprowadzono dyskusję dotyczącą korelacji dla liczb bozonów w modach fotonowych, fononowych oraz hybrydowych modach układu, pokazując wartości dla jakich parametrów opisujących model pojawiają się blokada fotonowa/fononowa oraz fotonowo indukowane tunelowanie. W pracy zostały też szeroko przedyskutowane efekty związane z położeniem poziomów energetycznych układu. Co jest interesujące, dodatkowo przeprowadzono analizę modelu z użyciem podejścia wykorzystującego hamiltoniany niehermitowskie oraz omówiono różne schematy detekcji dyskutowanych efektów. To ostatecznie wyraźnie podnosi walory ocenianej pracy.

Kolejny, trzeci artykuł nosi tytuł *Two-photon blockade and photon-induced tunneling generated by squeezing* i został opublikowany w czasopiśmie *Physical Review A*. Doktorantka jest wprawdzie drugą z sześciu autorów, jednak ze złożonego oświadczenia wynika, że wniosła ona znaczący wkład w przygotowanie tej pracy. W pracy pokazano, że nie jest konieczna obecność nieliniowości w układzie dyskutowanym, wcześniej przez Hamsena i in. (*Phys. Rev. Lett.* 118:133604 (2017)) by uzyskać efekty blokady dwufotonowej. Wykazano, iż wystarczy sprząc układ z rezerwuarem w koherentnym bądź termicznym stanie ściętnym (wg. nazewnictwa poznańskiej szkoły optyki kwantowej), by uzyskać różnorodne efekty kwantowe. Są to blokada dwufotonowa, trzyfotonowe tunelowanie oraz trzy rodzaje niestandardowej blokady jednofotonowej. Efekty blokady dwufotonowej wydają się szczególnie ciekawe w kontekście eksperymentu przeprowadzonego w grupie Rempe w roku 2017.

Przechodząc do czwartej pracy składającej się na ocenianą dysertację, należy podkreślić, że została ona opublikowana w bardzo prestiżowym czasopiśmie *Physical Review Letters* we współpracy z grupą badaczy z Włoch. Kandydatka jest tu ponownie drugą z wymienionych autorów i wraz z pierwszym z nich wniosła dominujący wkład do pracy. Praca ta dotyczy niezwykle interesujących zagadnień bardzo silnych oddziaływań światło-materia, znacząco poszerzających dotychczasowe dyskusje dotyczące takich oddziaływań wewnątrz rezonatorów gdy zakładano ograniczenia co do siły takich oddziaływań. Autorzy koncentrują się na efekcie czystego defazowania, które gra istotną rolę w układach związanych z technologiami informatyki kwantowej oraz spektroskopii. W pracy pokazano jak poprawnie obliczyć współczynnik czystego zdefazowania w układach zawierających wnęki opisane za pomocą kwantowej elektrodynamiki, w szczególności dla przypadków modeli Rabiego oraz Hopfielda. Dla tego drugiego pokazano, że efekty czystego rozszczepienia w dolnej gałęzi polarytonowej mają tendencję do zmniejszania się w reżimie ultrasilnych sprzężeń i mają tendencję do zanikania wraz ze wzrostem siły sprzężenia. Z drugiej strony, dla górnych polarytonów wpływ czystego rozszczepienia wzrasta wraz ze wzrostem siły sprzężenia. Autorzy wysnuwają ogólny wniosek, że gdy mamy do czynienia z ultrasilnymi i głęboko silnymi sprzężeniami, uogólnione minimalne zamienniki sprzężeń powinny być stosowane jako odpowiednie transformacje hamiltonianów opisujących pola i układy

materialne. Można stwierdzić, że prezentowane w pracy wyniki dają nadzieję na pobudzenie badań eksperymentalnych w zakresie tematyki dyskutowanej w artykule i na uzyskanie nowych interesujących rezultatów.

Ostatnia z prac stanowiących złożoną przez Doktorantkę rozprawę nosi tytuł *Liouvillian Exceptional Points of Non-Hermitian Systems via Quantum Process Tomography*. Kandydatka jest tu pierwszą z pięciu autorów, a artykuł jest opublikowany jako preprint w serwisie arXive.org. Jest to praca będąca w pewnym związku z wcześniej omawianą pracą [P2], gdzie omawiano podejście związane z niehermitowskim hamiltonianem. Tutaj dyskutowane są punkty wyjątkowe związane z Liouvillianem. W pracy skoncentrowano się na sposobie ujawniania i scharakteryzowania takich punktów wyjątkowych za pomocą standardowej tomografii kwantowej. Autorzy pracy przeprowadzili rekonstrukcję tomograficzną liouvillianów przy użyciu operacji jedno- i dwukubitowych. Operacje te przeprowadzono na komputerze kwantowym IBM. W tym miejscu należy podkreślić, że termin eksperyment został użyty w sensie użycia symulatora kwantowego jakim jest komputer kwantowy. Na końcu należy wspomnieć, że, co jest również istotne z dydaktycznego punktu widzenia, w dodatku do artykułu przedstawiono porównanie różnych metod poszukiwania punktów osobliwych liouvillianów. Widać tu, że doktorantka podczas przygotowania materiałów do swojej dysertacji potrafiła korzystać z różnorodnych narzędzi, w tym najnowocześniejszej technologii komputerów kwantowych.

Po zapoznaniu się ze złożoną dysertacją oraz przewodnikiem do artykułów ją stanowiących, mogę z pełnym przekonaniem stwierdzić, że uzyskane oraz przedstawione przez Doktorantkę wyniki są oryginalne oraz bardzo ciekawe. Są one interesujące z różnych względów, gdyż mogą zainteresować nie tylko czytelników zajmujących się zagadnieniami fizycznymi z zakresu optyki kwantowej, ale też specjalistów z dziedziny informacji kwantowej oraz zajmujących się fundamentalnymi pytaniami dotyczącymi mechaniki kwantowej. Właśnie to, oraz fakt nawiązywania teoretycznych rozważań zaprezentowanych w rozprawie do sytuacji eksperymentalnych, wskazuje na dużą wartość uzyskanych przez Kandydatkę rezultatów. Uzyskując, a co najważniejsze, dojrzałe interpretując zaprezentowane w swojej dysertacji wyniki, Pani mgr Shilan Abo pokazała, że potrafi zastosować do rozwiązywania postawionych przed nią problemów odpowiedni aparat obliczeniowy. Pokazuje, że posiada umiejętność skutecznego wykorzystania różnych koncepcji i modeli fizycznych wykazując się przy tym znaczącą intuicją fizyczną oraz dużą biegłością i wyczuciem stosowanych metod.

Do obowiązków recenzenta należy też wspomnieć o niedociągnięciach znalezionych w dysertacji. W tym przypadku mogę z przyjemnością stwierdzić, że trudno jest znaleźć jakiegokolwiek usterki, nie wspominając o błędach w złożonej rozprawie. Można powiedzieć, że artykuły bronią się same, a przewodnik po nich został przygotowany niezwykle starannie oraz w wyczerpujący i przejrzysty sposób.

Podsumowując, mogę z przyjemnością stwierdzić, że recenzowana rozprawa autorstwa Pani mgr Shilan Abo spełnia z nawiązką wszystkie ustawowe oraz zwyczajowe wymagania stawiane takim dysertacjom. Omawiane w rozprawie wyniki są oryginalne, interesujące oraz wartościowe nie tylko z punktu widzenia przyszłych fundamentalnych badań w zakresie optyki kwantowej i korelacji kwantowych, ale też mogą być inspiracją przy projektowaniu i budowie urządzeń wykorzystujących kwantową teorię informacji. Zostały one opublikowane w czasopiśmie o bardzo wysokiej randze i uznaniu oraz doczekały się już cytowań w literaturze światowej. W mojej opinii, pomimo teoretycznego charakteru wkładu Doktorantki do tych prac, mogą one być inspiracją również dla eksperymentatorów. Sposób prezentacji i dyskusji uzyskanych przez Doktorantkę rezultatów jest jasny i czytelny, czyniąc ocenianą rozprawę składającą się z opublikowanych artykułów oraz znakomicie przygotowanego przewodnika, pomocnym źródłem informacji możliwych do wykorzystania przy studiowaniu zagadnień pokrewnych z tymi, omawianymi w dysertacji. Biorąc to wszystko pod uwagę, wnioskuję o wyróżnienie złożonej przez Panią mgr Shilan Abo rozprawy.

Na koniec, z pełnym przekonaniem wnioskuję o dopuszczenie Doktorantki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Wiesław Leoński