

Streszczenie rozprawy doktorskiej mgr Shilan Abo

Temat rozprawy: *Control of quantum correlations in dissipative systems: New quantum effects, and novel theoretical and experimental methods*

W dysertacji pt. „Kontrola korelacji kwantowych w układach dyssypatywnych: Nowe zjawiska kwantowe oraz nowatorskie metody teoretyczne i eksperymentalne” opracowano i zastosowano metody kwantowe do generacji, wzmacniania, kontrolowania i detekcji nieklasycznych korelacji w układach dyssypatywnych. Metody te umożliwiły mi przewidzenie nowych efektów kwantowych takich jak hybrydowa blokada fotonowo-fononowa czy też blokada dwufotonowa uzyskana poprzez ściskanie światła. Wyniki tych badań zostały opisane w pięciu artykułach, których jestem współautorem. Poniżej przedstawione są cele tych badań i podsumowane główne wyniki rozprawy.

Korelacje kwantowe, takie jak splątanie kwantowe, sterowanie kwantowe (zwane też sterowaniem Einsteina-Podolsky’ego-Rosena, EPR), nielokalność Bella, ściskanie światła, czy też antygrupowanie fotonowe są krytycznymi zasobami technologii kwantowych, w szczególności mają kluczowe znaczenie w kwantowym przetwarzaniu informacji i metrologii kwantowej. Niestety stany kwantowe są wyjątkowo wrażliwe na szумы środowiskowe, które powodują tłumienie ich amplitudy i fazy. Dlatego też, kwestią niezwykle ważną jest opracowanie metod kontroli i przechowywania korelacji kwantowych w układach dyssypatywnych. W rozprawie opisano i zastosowano różne metody, które umożliwiają lepszą kontrolę kwantowych układów dyssypatywnych, a także umożliwiają generację i detekcję nowych zjawisk kwantowych przydatnych w technologiach kwantowych, m.in. jako nowe źródła pojedynczych fotonów i fononów.

Splątanie kwantowe, sterowanie EPR i nielokalność Bella redukują się do tego samego typu korelacji kwantowych w układach dwukubitowych w stanach czystych; jednak dyssypacja takich układów dwukubitowych może ujawnić ich fundamentalne różnice. Zbadano numerycznie i analitycznie hierarchię tych efektów na przykładach stanów Wernera, które są mieszaninami stanu singletowego (tj. dwukubitowego stanu maksymalnie splątanego) i (separowalnego) stanu maksymalnie zmieszanego (tj. białego szumu). Ponadto zbadano bardziej złożoną hierarchię uogólnionych stanów Wernera, zdefiniowanych jako dowolne dwukubitowe stany

czyste zaszumione białym szumem. Co ważniejsze, przedstawiano wyniki naszych eksperymentów demonstrujących hierarchię tych korelacji kwantowych dla stanów Wernera bez zastosowania pełnej tomografii stanów kwantowych (QST) [Sci. Rep. **13**, 8564 (2023)]. Wcześniejsze badania doświadczalne opierały się na pomiarach odpowiadających wyłącznie pełnej tomografii stanów.

Ponadto w rozprawie opisano zjawiska nieklasyczne, takie jak różne rodzaje blokad fotonowych i tunelowania indukowanego fotonami oraz ich odpowiedniki fononowe. W szczególności, w pracy [Sci. Rep. **12**, 17655 (2022)] opisano nowy rodzaj blokady, który nazwaliśmy hybrydową blokadą fotonowo-fononową. Zjawisko to polega na blokowaniu wzbudzeń w modzie hybrydowym generowanym w wyniku liniowego sprzężenia modów optycznych i fononowych. Zademonstrowano w jaki sposób efekt ten można wywołać w kwantowym układzie optomechanicznym i opisano układy eksperymentalne, w których generacja i obserwacja tego nowego zjawiska jest możliwa. Ponadto omówiono możliwość zaobserwowania niekonwencjonalnych jedno- i wielofotonowych blokad, które mogą być wywołane w układzie liniowym sprzężonym ze ściśniętym rezerwuarem, jak to opisano w pracy [Phys. Rev. A **100**, 053857 (2019)]. W tym przypadku nieliniowość, która jest odpowiedzialna za generację blokady fotonowej w liniowym układzie kwantowym jest indukowana przez jego liniowe sprzężenie z nieliniowym rezerwuarem kwantowym.

Fizyka otwartych kwantowych układów w przypadkach ultrasłabego i tzw. głęboko-słabego sprzężenia światła z materią jest również omawiana w rozprawie. Szczegółowo zbadano zjawisko rozfazowania układów kwantowych będące głównym czynnikiem utrudniającym implementację algorytmów kwantowych i tym samym rozwój praktycznych technologii kwantowych. Wyjaśniono wpływ czystego rozfazowania światła i materii, w przypadkach ultrasłabego i głęboko-słabego sprzężenia, stosując uogólnione równania podstawowe dla dwóch dobrze znanych modeli oddziaływania światła z materią bez zastosowania przybliżenia rotującej fali, tj.: (i) kwantowego modelu Rabiego opisującego układ dwupoziomowy sprzężony z pojedynczym modem wnęki rezonansowej oraz (ii) modelu Hopfielda opisującego kolektywne (bozonowe) wzbudzenia materii oddziałującej z jednomodowym polem wnęki. Wyjaśniono w rozprawie, że postać Hamiltonianu szumu dla składników takich układów może zależeć od oddziaływania światła z materią, a zatem może zależeć od zastosowanego cechowania. Jednakże, jeśli zmiany wywołane przez oddziaływania, jak również transformacje cechowania są poprawnie zastosowane, wówczas można uzyskać prawidłowe współczynniki niezmiennicze względem ce-

chowania, tak jak opisano to w pracy [Phys. Rev. Lett. **130**, 123601 (2023)]. W rozprawie policzono i szczegółowo omówiono współczynniki rozfazowania zależne od stanów oddziałujących układów światła z materią przy uwzględnieniu fluktuacji w stopniach swobody światła lub w stopniach swobody materii.

W idealnych warunkach fizycznych można rozważać unitarną ewolucję układów hermitowskich zakładając ich całkowitą izolację od otoczenia, podczas gdy układy niehermitowskie w bardziej realistycznych modelach fizycznych ewoluują (zwykle) w sposób nieunitarny. Dynamika realistycznego układu jest opisana przez równanie podstawowe, które opisuje, w jaki sposób energia, spójność i informacja kwantowa są tracone do środowiska. Równanie podstawowe w standardowej postaci Goriniego, Kossakowskiego, Sudarshana i Lindblada składa się z członu uwzględniającego hamiltonian hermitowski, który opisuje unitarną ewolucję układu, oraz z członu niehermitowskiego określonego przez tak zwane dyssypatory Lindblada opisujące nieunitarną ewolucję układu. Zgodnie z metodą trajektorii kwantowych (zwaną też metodą skoków kwantowych), umożliwiającą rozwiązywanie i intuicyjną interpretację równań podstawowych, te dyssypatory mogą być rozdzielone na dwa człony: zależne i niezależne od skoków kwantowych. W ten sposób hermitowski hamiltonian może być przekształcony w hamiltonian niehermitowski, który opisuje układ, który ulega dyssypacji bez skoków kwantowych. Drugi człon dyssypatorów Lindblada opisuje ewolucję układu wywołaną skokami kwantowymi, które wynikają z ciągłych pomiarów układu wykonywanych przez otoczenie. Skoki kwantowe są zwykle istotne dla dokładnego opisu mikroskopijnych otwartych układów kwantowych i uzyskania wyników zgodnych z teorią pomiarów kwantowych. Ewolucja bez skoków kwantowych, która jest określona przez małe perturbacje w układzie opisanym przez Hamiltonian niehermitowski, może prowadzić do nowych fundamentalnych typów ewolucji. Jednym z ciekawych przykładów takiego nowego zachowania w niehermitowskiej mechanice Carla Bendera jest pojawienie się (półklasycznych) punktów wyjątkowych, w których niektóre wartości i wektory własne niehermitowskiego hamiltonianu stają się zdegenerowane. W rozprawie omówione kwantowe punkty wyjątkowe Liouvillianów (LEP), które są zdefiniowane jako degeneracje wartości i wektorów własnych kwantowego Liouvillianu (przy uwzględnieniu efektu skoków kwantowych), zamiast rozważania półklasycznych punktów wyjątkowych odpowiadających degeneracjom niehermitowskiego hamiltonianu (z pominięciem skoków kwantowych). W rozprawie wykazano teoretycznie i eksperymentalnie, że można zaobserwować kwantowe punkty wyjątkowe stosując tomografię procesów kwantowych (QPT). Celem potwierdzenia tych przewidywań

teoretycznych, przeprowadziłam eksperymenty kwantowe w chmurze na procesorze kwantowym IBMQ [e-print arXiv:2401.14993 (2024)]. Wyniki te jednoznacznie pokazały możliwości eksperymentalne generowania, kontroli i detekcji kwantowych punktów wyjątkowych w układach o małej liczbie kubitów z wykorzystaniem kwantowej tomografii procesów.