

## **Recenzja rozprawy doktorskiej**

### ***Control of quantum correlations in dissipative systems:***

### ***New quantum effects, and novel theoretical and experimental methods***

**autorstwa mgr Shilan Abo**

Recenzowana rozprawa doktorska jest spójnym dziełem złożonym z pięciu artykułów naukowych opublikowanych w bardzo dobrych czasopismach z fizyki. Praca koncentruje się na nieklasycznych korelacjach w układach otwartych, w szczególności opisuje ich generowanie, wzmacnianie, koncentrację i metody detekcji. Odkryto nowe zjawiska fizyczne, jak choćby hybrydową blokadę fotonowo-fononową i dużo uwagi poświęcono realnym parametrom doświadczalnym pozwalającym na obserwację wyprowadzonych teoretycznie efektów. Nie ma żadnej wątpliwości, że rozwiązano interesujące problemy, a dysertacja poszerza wiedzę z kwantowej optyki układów otwartych. Jasne jest z przedstawionych opisów prac, samych prac oraz oświadczeń współautorów, że mgr Abo jest biegła w swojej dziedzinie i świetnie zna obecny stan doświadczany optyki kwantowej. Co więcej, kieruje się ona postęпами doświadczalnymi przy wyborze tematów badań, co świadczy o jej dojrzałości naukowej. Koniecznie trzeba zaznaczyć, że autorka jest fizykiem teoretykiem, która z powodzeniem współpracuje z grupami doświadczalnymi i sama jest w stanie przeprowadzić "doświadczenia" za pomocą chmury kwantowej wraz z kompletną analizą danych i błędów. Chciałbym więc już na wstępie wyrazić opinię, że rozprawa spełnia wszystkie międzynarodowe standardy stawiane pracom doktorskim.

Przejdę teraz do poszczególnych rozdziałów rozprawy by opisać je bardziej szczegółowo i poprosić o pewne wyjaśnienia w czasie obrony. Dysertacja napisana jest w języku angielskim więc na koniec podsumuję pytania i prośby po angielsku.

W publikacji [P1] opisano metody detekcji nieklasycznych korelacji w (uogólnionych) stanach Wernera dwóch kubitów bez pełnej tomografii stanu. Metody te zastosowano by wykryć doświadczalnie kwantowe splątanie, sterowalność i Nielokalność. Wyniki są klarowne i chciałbym tylko dopytać o pewne, wydaje mi się nieprecyzyjne, sformułowanie w opisie pracy (zobacz pytanie 1 na końcu recenzji).

Publikacja [P2] opisuje systematycznie i kompletnie warunki do obserwacji blokad fotonowych, fononowych i hybrydowych oraz do obserwacji tunelowania indukowanego fotonami. Szczegółowo omówiono nierówności w terminach funkcji korelacji drugiego i wyższych rzędów, które odpowiadają tym zjawiskom. Praca skupia się na konkretnym, bliskim doświadczeniu, układzie opto-mechanicznym składającym się z nadprzewodzącej wnęki rezonansowej, zawierającej kubit, sprzężonej liniowo z pompowanym rezonatorem mikro-mechanicznym. Całość traktowana jest jak układ otwarty na otoczenie. Autorzy, między innymi, zidentyfikowali parametry układu, dla których mody fotonowe i fononowe nie wykazują blokad, a ich liniowe kombinacje (polarytony) wykazują blokadę. Jak widać studiowany jest złożony układ kwantowy, a pomimo tego opisy są klarowne i wszystkie założenia fizyczne zostały dokładnie omówione. Aby podkreślić kompletność pracy zaznaczę, że dodatkowo przedyskutowano następujące efekty: bunching, oscylacje korelacji, niekonwencjonalne blokady (wyjaśnione poglądowo i za pomocą tzw. niehermitowskiego hamiltonianu), odstrojenie pompy, statystyki nie-poissonowskie czy detekcję funkcji korelacji polarytonów. Mam komentarz historyczny do tej publikacji. Autorka podaje jako pierwsze doświadczenie wymagające kwantowej natury pola elektromagnetycznego pracę [73] z roku 1977. Chciałbym zwrócić uwagę na artykuł Johna Clausera z 1974 roku o "Experimental distinction between the quantum and classical field-theoretic predictions for the photoelectric effect" opublikowany w *Physical Review D* 9, 853.

Publikacja [P3] zasadza się na pomyśle, że nieliniowości wymagane do zaobserwowania blokad i tunelowania nie muszą być na poziomie głównego układu fizycznego, a być może mogą zostać wprowadzone w otoczeniu układu. Ta intuicja została przez autorkę potwierdzona w badaniach układu liniowego otwartego na ściśnione otoczenie i modelowanego przez równanie podstawowe z dwufotonowymi przejściami. Artykuł charakteryzuje ładne wprowadzenie, systematyczność, w dużym stopniu analityczne wyprowadzenia i ciekawa dyskusja nieklasyczości opisywanych efektów (np. obserwacja, że stany termiczne mogą symulować fotonowo indukowane tunelowanie). Chciałbym również podkreślić wyczerpujące Dodatki.

Motywacją do pracy [P4] są problemy z cechowaniem w kwantowym modelu Rabiego, w reżimie ultra-silnego oddziaływania. W szczególności, standardowe metody równania podstawowego wydają się nie działać w tym reżimie. Autorzy pokazują na przykładzie czystego rozfazowania, że faktycznie niezmienniczości ze względu na transformacje

cechowania nie ma i wypracowują rozwiązanie tego problemu poprzez zastosowanie nowego minimalnego sprzężenia. Praca ta została opublikowana w *Physical Review Letters* i przez ten format jest skrótowa (choć Dodatki są już dość systematyczne). Moim zdaniem jest to dobry przykład na wyższość dysertacji pisanych, w których można krok po kroku wprowadzić wiedzę niezbędną do głębszego zrozumienia tematu. Z tego powodu chciałbym prosić autorkę o opisanie podczas obrony cechowania dipolowego i podanie jak najprostszego przykładu braku niezmienniczości na transformacje cechowania (innego niż w publikacji [P4]).

Ostatnim rozważanym tematem jest modelowanie układów otwartych za pomocą niehermitowskich hamiltonianów, a w szczególności istnienie i poszukiwania tzw. punktów wyjątkowych (LEP, od punkt wyjątkowy Liouvillianu) w pełnej dynamice otwartej, która uwzględnia również skoki kwantowe. W publikacji [P5] autorka proponuje tomografię procesów kwantowych jako metodę wyznaczania LEP i implementuje w kilku wersjach odpowiedni protokół za pomocą symulatora kwantowego w chmurze IBM. Praca ma konkretne i bezpośrednio użyteczne Dodatki, podoba mi się również dyskusja błędów, w której ładnie widać jak uwzględnienie białego szumu w stanach wejściowych tomografii pozwala na bliskie dopasowanie do danych doświadczalnych. Autorka przekonuje, że metoda z tomografią procesu stanie się podstawowym narzędziem w studiowaniu LEP. Osobiście mam wątpliwości, gdyż opisana tomografia wymaga dużej ilości zasobów. Naturalnie pojawia się pytanie czy można LEP wykryć mniejszym kosztem, analogicznie do tego jak splątanie wykrywane jest za pomocą świadków splątania. Chętnie posłucham przemyśleń autorki na ten temat w czasie obrony.

Rozprawę kończy krótkie podsumowanie najważniejszych wyników i zwięzły opis badań na najbliższą przyszłość. W trzech Dodatkach zebrano odnośniki do publikacji składających się na rozprawę, oświadczenia współautorów i skrótowce.

Podsumowując, mgr Shilan Abo wykazała się doskonałą znajomością szeroko rozumianej optyki kwantowej, zarówno w obszarze teorii jak i doświadczenia. Rozprawa opisuje szereg nowych wyników, które jasno wychodzą poza dotychczasowe ramy dziedziny. Łatwo wyczuwalna jest niezależność naukowa doktorantki, co potwierdzają oświadczenia współautorów. W mojej opinii recenzowana dysertacja z naddatkiem spełnia formalne i zwyczajowe wymagania stawiane pracom doktorskim, wnioskuję więc o dopuszczenie kandydatki do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

T. Paterek

prof. dr hab. Tomasz Paterek

Uniwersytet Gdański

Questions to be addressed during the defense:

1. The author writes "Bell nonlocality represents nonlocal quantum correlations observable when both parties have unreliable detectors". Could you comment on the role the detection loophole plays in this statement?
2. Please elaborate a bit more on the first experiments demonstrating the quantum nature of the electromagnetic field. What were the competing models? In particular, would you find the following paper relevant? J. F. Clauser, Phys. Rev. D 9, 853 (1974).
3. Please introduce in more detail the dipole gauge and provide a simple example of the lack of gauge invariance (different than in your paper [P4]).
4. Do you think it could be possible to design a "Witness of LEP", i.e. is there a phenomenon (not requiring process tomography) with a result from which LEP can be concluded?