

Warszawa, 14 stycznia 2016 r.

Prof. dr hab. Jan Mostowski
Instytut Fizyki PAN
Warszawa

Recenzja pracy doktorskiej mgr Radosława Chrapkiewicza pt. „Generation and characterization of spatially structured few-photon states of light”.

Praca doktorska pt. „Generation and characterization of spatially structured few-photon states of light” pana mgr. Radosława Chrapkiewicza jest napisana po angielsku. Liczy 203 strony, jest podzielona na trzy części i 9 rozdziałów, zawiera też 5 dodatków. Spis literatury jest obszerny, zawiera 249 pozycji, w olbrzymiej większości współczesnych.

Praca dotyczy doświadczeń nad wielomodowymi stanami pola elektromagnetycznego zawierającego niewielką liczbę fotonów. Jest to zgodne z bardzo współczesnym kierunkiem badań dotyczących kwantowych stanów pola elektromagnetycznego, ich charakteryzacji, oddziaływania z materią oraz wykorzystania stanów fotonowych w informatyce kwantowej.

W pracy doktorskiej mgr. Radosława Chrapkiewicza poruszone są trzy zagadnienia. Pierwsze dotyczy budowy i analizy działania kamery ze wzmacniaczem obrazu. Druga część dotyczy badania oddziaływania wielomodowego rozpraszania Ramana i zastosowania tego zjawiska do konstrukcji pamięci kwantowych. Część trzecia poświęcona jest opisowi doświadczeń i analizie nieklasycznej interferencji fotonów i pomiarze holograficznym funkcji falowej fotonu.

Pierwsza część, jak wspomniałem, dotyczy konstrukcji kamery z wzmocnieniem obrazu i zliczania pojedynczych fotonów. Autor skonstruował oryginalną kamerę, której działanie oparte jest o układy sCMOS. Układ wzmacniania obrazu oparty jest o wzmacnianie sygnału fotoelektronów i zamianę strumienia elektronów na obraz. Układ jest na tyle wydajny, że pozwala na rejestrację pojedynczych fotonów. Kamera zbudowana jest z elementów fabrycznych, ale jej konstrukcja jest oryginalna. Autor gruntownie zbadał możliwości tej kamery. Jak pisze autor, kamera charakteryzuje się bardzo niskimi ciemnymi zliczeniami.

W dalszym ciągu autor prowadzi wyczerpującą dyskusję zliczeń fotonów za pomocą swojej kamery w różnych przypadkach. Dotyczy to różnych stanów kwantowych, w szczególności stanów Focka, stanów koherentnych oraz stanów ściśniętych. Ważnym i ciekawym zagadnieniem rozwiązany w pracy jest rekonstrukcja statystyki fotonów na podstawie obserwowanych zliczeń.

Trzeba wziąć pod uwagę fakt, że fotony padające na kamerę jedynie inicjują powstawanie lawiny fotoelektronów. Te fotoelektrony dają obraz obserwowany na kamerze. Rekonstrukcja statystyki fotonów nie jest więc banalna, obserwacje są silnie zniekształcone przez proces wzmocnienia. Przedstawioną w pracy rekonstrukcję statystyki fotonów uważam za rozwiązanie ciekawego i niebanalnego zagadnienia.

Sam nie jestem fizykiem doświadczalnikiem ale uważam, że jej zbudowanie jest poważnym osiągnięciem technicznym, kamera umożliwiła autorowi prowadzenie dalszych badań nad stanami fotonów, co jest omówione w dalszej części recenzji.

W drugiej części pracy badane jest zjawisko Ramana w parach rubidu. Całość jest przedstawiana jako badanie pamięci kwantowej. Trzeba jednak zdać sobie sprawę z tego, że słowo „pamięć” używane jest tu w wąskim sensie, atomy rubidu (w których autor obserwuje zjawisko Ramana) mogą pozostać wzbudzone przez pewien krótki czas. W tym wzbudzeniu może być zakodowana informacja, można ją odczytać wykorzystując zjawisko rozpraszania antystokesowskiego.

Opis zjawiska Ramana rozpoczyna się od szczegółowego opisu układu doświadczalnego i opisu pomiarów. Ośrodkiem są pary rubidu w komórce utrzymywanej w dość wysokiej temperaturze. Układ doświadczalny zawiera lasery, modulatory austro-optyczne oraz szereg filtrów, które odgrywają bardzo istotną rolę. Detektorem promieniowania jest omawiana poprzednio kamera.

Następnie opisywane są wyniki rozpraszania stokesowskiego, szczególną uwagę zwrócił autor na wielodomowość powstającego promieniowania. Bardzo cenna jest dyskusja zaniku spójności atomowej w wyniku dyfuzji atomów. Ten fragment pracy doktorskiej uważam za bardzo ciekawy, choć autor nie przywiązuje do tego wyniku szczególnej uwagi, jak sądzę.

Dalsza część poświęcona jest badaniom korelacji między impulsami promieniowania stokesowskiego i antystokesowskiego. To są najważniejsze, moim zdaniem, wyniki autora w części dotyczącej efektu Ramana. Korelacje pojedynczych fotonów stokesowskich i antystokesowskich stanowią najbardziej istotny wkład do zrozumienia tego zjawiska Ramana na podstawowym poziomie kwantowym.

W części trzeciej (rozdziały 8 i 9) autor bada nieklasyczną interferencję fotonów. W rozdziale 8 opisane zostały doświadczenia nad interferencją amplitud stanów dwufotonowych, czyli tak zwany efekt Hong-Ou-Mandel'a. Zjawisko to znane jest od dawna i wykorzystywane w różnych działach optyki pojedynczych fotonów. W niniejszej pracy zostało zademonstrowane w nowym kontekście. Nie użyto standardowej procedury opartej o użycie interferometru Macha – Zendera, ale

zastosowano inną nową metodę doprowadzenia do interferencji kwantowych amplitud. Metoda polega na wykorzystaniu pary fotonów o prostopadłych polaryzacjach, skręcania polaryzacji oraz rozdzielacza. Skonstruowany układ stwarza możliwość obserwacji interferencji kwantowych amplitud identycznych fotonów jak również rozróżnialnych fotonów. Kamera opisana w pierwszej części pracy okazała się idealnym narzędziem do obserwacji omawianego zjawiska. Uzyskane wyniki pięknie ilustrują efekt identyczności fotonów.

W następnym rozdziale autor dyskutuje pomiar fazy poprzecznej części funkcji falowej fotonu. Pomiar opiera się na tej samej idei co holografia, czyli na interferencji mierzonego fotonu ze znanym fotonem. W przypadku pomiaru fazy pojedynczego fotonu autor rozszerzył tę ideę do interferencji dwufotonowej, czyli efektu Hong-Ou-Mandel'a. Jest to konieczne, gdyż standardowa interferencja pojedynczych fotonów w zasadzie nie zachodzi. Jak zademonstrował autor dwufotonowa interferencja doskonale nadaje się do wyznaczenia fazy poprzecznej części funkcji falowej fotonu. Pomiary dokonane zostały za pomocą kamery ze wzmacnianiem obrazu.

Pomiar fazy fotonu jest dokonywany nie wprost, wymagana jest numeryczna procedura odtworzenia fazy z pomiarów. Do tego celu autor w nietrywialny sposób zaadaptował znany algorytm.

Uwaga krytyczna. Na stronie 137 autor pisze „single have an entirely indeterminate phase” (pisownia oryginalna), czyli „fotony mają nieokreśloną fazę”. A kilka linijek dalej: „... relies on overlapping of the unknown photon $|\psi_u\rangle$ to be characterized with a known reference photon $|\psi_r\rangle$ having a flat local phase”, polega na nałożeniu nieznanego fotonu $|\psi_u\rangle$ czyli „podlegającemu charakteryzacji na foton odniesienia $|\psi_r\rangle$ o stałej lokalnej fazie”. A to oznacza, że foton odniesienia jednak ma fazę (lokalną).

Praca ma w znacznym stopniu charakter monograficzny. Zamieszczonych jest bardzo dużo informacji o szczegółach doświadczalnych, które mogą one mieć znaczeni przy podejmowaniu dalszych prac z użyciem istniejącego układu doświadczalnego i ewentualnie przy modernizacji istniejącego układu. Z tego punktu widzenia praca jest bardzo wartościowa.

Praca doktorska mgra Radosława Chrapkiewicza jest oparta o 10 publikacji z czołowych czasopism. Wszystkie te publikacje są wieloautorskie. W gruncie rzeczy recenzowana praca doktorska podsumowuje znaczną część wyników uzyskanych w ciągu ostatnich lat w laboratorium kierowanym przez promotora, dr hab. Wojciecha Wasilewskiego. Na początku każdej z trzech części pracy doktorskiej autor opisuje wkład poszczególnych osób w uzyskane wyniki. Jest to moim zdaniem bardzo uczciwe podejście, z jednej strony podkreślona jest umiejętność autora do pracy w grupie, z

drugiej nie przypisuje on sobie wszystkich wyników i wszystkich zasług. Jak wynika z pracy mgr Radosław Chrapkiewicz brał czynny udział w pracach, które w sumie złożyły się na niniejszą rozprawę doktorską. Udział ten dotyczy wszystkich elementów prowadzonych doświadczeń, planowanie, budowa aparatury, przeprowadzanie pomiarów, tworzenie softwaru do kontroli doświadczeń i do analizy danych, interpretacja wyników. Warto podkreślić, że w wielu doświadczeniach mgr Radosław Chrapkiewicz był osobą wiodącą.

Pracę doktorską pana mgra Radosława Chrapkiewicza oceniam bardzo wysoko. Praca dotyczy współczesnych zagadnień bardzo szybko rozwijającego się działu fizyki, jakim jest optyka kwantowa. Należy podkreślić, że wszystkie doświadczenia opisane w pracy doktorskiej zostały wykonane na Uniwersytecie Warszawskim. Aparatura, dość wyrafinowana, została zbudowana przez autora albo innych pracowników Zakładu Optyki.

Praca doktorska pana mgra Radosława Chrapkiewicza pokazuje, że autor potrafi planować i prowadzić samodzielną pracę doświadczalną z fizyki. Stawiam więc wniosek o dopuszczenie autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ze względu na bardzo wysoki poziom merytoryczny pracy i dużą liczbę niebanalnych wyników wnioskuję też o wyróżnienie tej pracy.



Jan Mostowski