

Dr hab. Michał Zawada

Toruń, 18 stycznia 2016

KL FAMO, Instytut Fizyki Uniwersytetu Mikołaja Kopernika w Toruniu

**Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgra Radosława Chrapkiewicza**

**p.t. „Generation and characterization of spatially structured few-photon states of light”**

Praca doktorska mgra Radosława Chrapkiewicza została wykonana w Zakładzie Optyki Instytutu Doświadczalnej UW pod kierunkiem dra hab. Wojciecha Wasilewskiego. Przedmiotem jej są wyniki badań poświęconych generacji za pomocą nowego typu źródła kilkustanowych stanów światła oraz charakteryzacji ich struktur przestrzennych i właściwości ich statystyk m.in. za pomocą specjalnie skonstruowanego nowego typu detektora.

Rezultaty badań zostały zawarte w prawie dziesięciu pracach, w tym dwóch w *Optics Express*, dwóch w *Optics Letters*, dwóch w *Journal Of Modern Optics* i po jednej w *Journal of the Optical Society of America B* i *Optics Communications*. Nie wątpię, że lista publikacji nie jest jeszcze zamknięta.

Rozprawa jest niezwykle obszerna, liczy 203 strony, w tym streszczenie, listę publikacji autora, spis treści i zawierającą 249 pozycji bibliografię. Część merytoryczna rozprawy przedstawiona na 174 stronach składa się ze wstępu, kolejnych ośmiu rozdziałów zgrupowanych w trzy części i kilku załączników. Na początku każdej z trzech części autor dokładnie określa, jaki zakres przedstawionych zadań i wyników jest jego autorskim wkładem.

Wstęp, będący zarazem pierwszym rozdziałem pracy, zawiera opis najważniejszych zastosowań optyki kwantowej oraz wprowadzenie teoretyczne do najważniejszych jej aspektów. Część przedstawionej wiedzy teoretycznej to tzw. ogólna wiedza podręcznikowa, a część to bardziej szczegółowe wyprowadzenia niezbędne do prawidłowej interpretacji wyników przedstawionych we właściwej części pracy. Z tego powodu rozdział ten może wydawać się zbyt rozbudowany, niemniej jednak bardzo pomaga on, zwłaszcza czytelnikowi niebędącemu teoretykiem, w pełnym zrozumieniu tezy i wyników zawartych w dysertacji.

KRAJOWE LABORATORIUM FIZYKI ATOMOWEJ, MOLEKULARNEJ I OPTYCZNEJ

INSTYTUT FIZYKI UMK  
ADRES: ul. Grudziądzka 5/7  
87-100 Toruń

TELEFON: (56) 611 3333 FAX: (56) 622 5397  
E-MAIL: famo@fizyka.umk.pl  
STRONA WWW: <http://famo.fizyka.umk.pl>

Autor nie ustrzegł się w tym rozdziale drobnych błędów i nieścisłości, np. w przedstawieniu w pierwszym akapicie strony 15 postaci stanu mieszanego.

Rozdziały drugi, trzeci i czwarty, zgrupowane w pierwszą część pracy, opisują budowę i charakterystykę zbudowanej specjalnie na potrzeby doświadczeń przedstawionych w dysertacji kamery ze wzmacniaczem obrazu. Rozdział drugi skupia się na konstrukcji kamery opartej na dostępnym komercyjnie sensorze sCMOS i wzmacniaczu obrazu opartym na płycie mikrokanalikowej. W porównaniu do zwykłej kamery CCD ze wzmacniaczem obrazu system ten jest szybszy i posiada mniej ciemnych zliczeń. W rozdziale trzecim przedyskutowane zostały teoretyczne własności zliczania fotonów skonstruowanej kamery ze szczególnym uwzględnieniem efektów nasycenia. Wprowadzone w tym rozdziale metody, w szczególności metoda tomografii i detektora kwantowego, zostały wykorzystane w rozdziale czwartym. W metodzie tej statystyka mierzonych fotonów jest związana ze statystyką zmierzoną detektorem za pomocą macierzy prawdopodobieństw warunkowych.

W rozdziale czwartym najpierw kalibrowana jest macierz prawdopodobieństw warunkowych za pomocą stanów koherentnych, których statystyka może być precyzyjnie określona, a następnie poprawność wyznaczenia macierzy prawdopodobieństw warunkowych jest przetestowana przez rekonstrukcję stanów o znanych statystykach. W tej i w następnych częściach autor używa lasera o świetle ciągłym do wytworzenia na tyle krótkich i słabych impulsów światła, aby można było mówić o stanach dwu lub kilkunastofotonowych. Na przykład w rozdziale 4.1 autor pisze o bramkowaniu za pomocą modulatora akustyczno-optycznego w zakresie od 100 ns do 5.5  $\mu$ s. Ponieważ i w tej i w dalszych częściach istotna jest synchronizacja pomiędzy impulsami światła, ciekawi mnie, czy w jakikolwiek sposób na wyniki wpływa skończona prędkość fali dźwiękowej w modulatorze akustyczno-optycznym i wynikające z niej opóźnienie impulsu wynoszące np. dla modulatorów szklanych ok. 160 ns na każdy milimetr drogi pomiędzy przetwornikiem piezoelektrycznym a pozycją rozpraszania fali świetlnej.

Część druga dysertacji, zawierająca rozdziały piąty, szósty i siódmy, opisuje źródło wielomodowych przestrzennie fotonów oparte na układzie pamięci atomowej w ciepłych parach rubidu. Zapis i odczyt tej pamięci odbywa się wyniku kolektywnego rozpraszania Ramana w pobliżu linii D1 izotopu  $^{87}\text{Rb}$ . W rozdziale piątym opisany jest układ eksperymentu, w którym po przepompowaniu optycznym wszystkich atomów do stanu  $F=1\ 5^2S_{1/2}$  pamięć zapisywana jest przez rozpraszanie Stokesa w pobliżu przejścia  $F=1\ 5^2S_{1/2} - F'=1\ 5^2P_{1/2}$  i po krótkim czasie odczytywana przez rozpraszanie antystokesowskie w pobliżu przejścia  $F=1\ 5^2S_{1/2} - F'=2\ 5^2P_{1/2}$ . Rozdział ten jest do pewnego stopnia rozwinięciem części pomiarów przedstawionych w pracy magisterskiej Pana mgra Radosława Chrapkiewicza. Prezentowany w dysertacji układ naturalnie jest bardziej rozbudowany wobec prezentowanego w pracy magisterskiej. Interesuje mnie zwłaszcza jeden szczegół: konieczność zastosowania wnek

Fabry'ego-Pérotą do spektralnego i przestrzennego wyczyszczenia światła laserowego. W pracy podana jest wartość FSR powyższych wnęk, niestety brak jest informacji o ich finezji. Nie jest to opisane w pracy, ale domyślam się, że długość tych wnęk musi być stabilizowana do częstotliwości światła laserowego, a to sugeruje obecność modulacji bądź światła laserowego, bądź długości wnęki. Jak i czy te ewentualne modulacje wpływają na przedstawiane wyniki i czy nie można zastąpić wnęki wąskim filtrem interferencyjnym i światłowodem?

W rozdziale szóstym prezentowane są wyniki doświadczalne przestrzennie wielomodowego rozpraszania Ramana dla stosunkowo dużego natężenia światła. Badanie dekoherencji pomiędzy zapisem i odczytem pamięci atomowej spowodowanej dyfuzją atomów w obecności gazu buforowego pozwoliło na bardzo dokładne wyznaczenie współczynników dyfuzji atomów rubidu w obecności czterech różnych gazów buforowych. Ciekawi mnie, czy autor może ocenić, czy znany efekt penetracji atomów He z atmosfery do środka komórek szklanych w jakimkolwiek stopniu wpływa na wartość wyznaczonych współczynników dyfuzji.

Rozdział siódmy przedstawia pomiary korelacji przestrzennych pomiędzy rozpraszaniem stokesowskim i odbywającym się po skończonym czasie rozpraszaniem antystokesowskim. Prezentowane wyniki dowodzą, że układ potrafi zapamiętać informację o pierwotnym rozkładzie przestrzennym przez czas kilku mikrosekund. Dzięki zastosowaniu prezentowanej w części pierwszej dysertacji kamery ze wzmacniaczem obrazu korelacje przestrzenne obserwowane były aż do zakresu pojedynczych wzbudzeń atomowych.

Część trzecia, zawierająca rozdziały ósmy i dziewiąty, poświęcony jest badaniom dwufotonowej interferencji za pomocą skonstruowanej kamery ze wzmacniaczem obrazu. W przedstawionych eksperymentach dwa wysoce nierozróżnialne fotony generowane są w procesie parametrycznej konwersji w dół. W rozdziale ósmym prezentowane są pierwsze obserwacje rozdzielonej przestrzennie interferencji Honga-Ou-Mandela. Efekt ten jest następnie przebadany pod kątem skończonej rozróżnialności przestrzennej interferujących fotonów. Wreszcie w rozdziale dziewiątym opisany jest, moim zdaniem najciekawszy, holograficzny pomiar przestrzennej struktury pojedynczego fotonu. Specjalnie stworzony algorytm pozwala na rekonstrukcję struktury lokalnej fazy przestrzennej pojedynczego fotonu na podstawie wyników dwufotonowej interferencji. W rozdziale brakuje mi jedynie stwierdzenia, dlaczego równoczesny pomiar amplitudy prawdopodobieństwa funkcji falowej nie jest ograniczony wspomnianą na początku rozdziału zasadą nieoznaczoności Heisenberga.



Pod względem naukowym praca prezentuje bezsprzecznie wyniki na najwyższym światowym poziomie, czego dowodem są związane z nią liczne publikacje. Pod względem edytorskim, na pierwszy rzut oka praca wygląda ślicznie. Praca jest napisana w języku angielskim i, poza kilkoma drobnymi literówkami i błędami językowymi, w wysoce poprawnym języku angielskim. Oczywiście, jak w każdej dysertacji, zdarzają się potknięcia, jak np. wielokrotnie powtarzany pleonazm „100°C degrees”. Układ pracy jest czytelny i logiczny. Jedynie niezbyt szczęśliwym był pomysł autora, aby każdy rozdział zaczynał się oddzielnym wstępem i kończył oddzielnym streszczeniem. Pomysł, który w zamierzeniu miał ułatwiać czytelnikowi lekturę pracy, spowodował, że na początku czytamy streszczenie całej pracy, następnie na początku każdej części czytamy streszczenie części, na początku rozdziału czytamy streszczenie rozdziału, na końcu rozdziału czytamy, co było w rozdziale, wraz z krótkim opisem, czego możemy spodziewać się w rozdziale następnym. Całość zakończona jest rozległym podsumowaniem pracy. O ile wstęp i zakończenie pierwszych dwóch rozdziałów są faktycznie skrótowe, z każdym następnym rozdziałem autor czuje się coraz pewniej i zakończenia rozdziałów ósmego i dziewiątego zajmują ponad stronę maszynopisu każde. Także podsumowanie pracy zajmuje prawie siedem stron maszynopisu. Wydaje mi się, że przy tak obszernej pracy można było poświęcić na wstępy i podsumowania trochę mniej miejsca.

Podsumowując, stwierdzam, że przedłożona rozprawa spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie mgra Radosława Chrapkiewicza do publicznej obrony jego rozprawy.

W mojej ocenie najcenniejszym elementem rozprawy jest holograficzny pomiar przestrzennej struktury pojedynczego fotonu. Artykuł raportujący opisane pomiary nie został jeszcze opublikowany, niemniej ze względu na wysoką wartość naukową jestem pewien, że zostanie on przyjęty w bardzo dobrym czasopiśmie. Osiągnięcie to uzasadnia mój wniosek o wyróżnienie rozprawy pana mgra Radosława Chrapkiewicza.