



Toruń, 17.04.2019

Prof. dr hab. Roman Ciuryło
Instytut Fizyki
Uniwersytet Mikołaja Kopernika

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Michała Parniak pt. : „Multimode quantum optics with spin waves and photons”.

Praca mgr. Michała Parniaka poświęcona jest wyrafinowanej inżynierii kwantowej fal spinowych oddziałujących z polem fotonowym. Głównym celem doktoranta była konstrukcja nowatorskiego rodzaju pamięci kwantowej. Jednak praca ta wychodzi poza prozaiczną użyteczność a jej autor dotyka podstawowych własności wzbudzeń kolektywnych i kwantowej interferencji fal spinowych. Tematyka ta świetnie wpisuje się w jeden z głównych nurtów współczesnej fizyki jakim jest dynamicznie rozwijająca się inżynieria kwantowa. Wśród wielu wyzwań, które sobie stawia jest konstrukcja komputera kwantowego. Ten dalekosiężny cel wymaga zastosowania odpowiedniej pamięci kwantowej, co staje się inspiracją dla wielu badaczy zajmujących się fizyką kwantową od materii skondensowanej, przez optykę kwantową po zdegenerowane gazy atomowe i molekularne. Kolektywne wzbudzenia i związana z nimi nadpromienistość w ostatnich latach ponownie wzbudziła duże zainteresowanie badaczy ze względu na propozycję budowy nowej generacji aktywnych optycznych zegarów atomowych. Ich konstrukcja stworzy nowe możliwości badań fundamentów fizyki w tym podstawowych własności czasu i przestrzeni oraz propagacji korelacji kwantowych.

Wyniki uzyskane przez mgr. Michała Parniak zostały opublikowane łącznie w 16 artykułach naukowych w latach 2014-2019. Jego prace były niemal pięćdziesiąt razy cytowane przez innych autorów. Wśród tych artykułów są: 4 prace poświęcone tematyce rozprawy doktorskiej oraz 6 prac związanych z nią. Ponadto doktorant jest współautorem 6 innych prac. Warto podkreślić, że był pierwszym autorem 8 prac a jego prace były publikowane w tak renomowanych periodykach jak: Physical Review Letters, Nature Communications, Optica, Journal of Modern Optics, Optics Express, Physical Review A, Applied Physics Letters. Na tym etapie kariery naukowej jest to imponujący dorobek naukowy i raczej bliższy temu czego się oczekuje w przypadku habilitacji niż doktoratu.



Oczywiście uzyskanie tak świetnego dorobku było możliwe nie tylko dzięki niezaprzeczalnemu talentowi i zdolnościom mgr. Michała Parniaka ale też dzięki możliwości pracy w bardzo prężnej grupie profesora Wojciecha Wasilewskiego, prowadzącej badania na najwyższym światowym poziomie. Z całą pewnością jako doktorant w pełni wykorzystał możliwości, które się przed nim otworzyły i należy mu to poczytać za dużą zasługę.

Przedstawiona do oceny rozprawa podzielona jest na dziewięć rozdziałów opatrzonych sześcioma dodatkami i bogatą bibliografią obejmującą ponad dwieście dwadzieścia pozycji. Pierwszy rozdział zawiera wprowadzenie do tematyki pamięci kwantowych i sposobów ich realizacji narzędziami optycznymi. Ponadto doktorant opisał w nim dość szczegółowo zarówno przebieg chronologiczny jak i swój wkład w prezentowane badania prowadzone we współpracy z innymi badaczami. Widać stąd jasno, że mgr Michał Parniak wykazał się dużym talentem i intuicją doświadczalną oraz zdolnością do samodzielnego i kreatywnego rozwiązywania pojawiających się problemów. Zarówno brał udział jak i przewodził w projektowaniu i przeprojektowaniu układów eksperymentalnych, ich budowie i przebudowie, pisaniu oprogramowania sterującego eksperymentem i analizującym dane, oraz testowaniu wypracowanych rozwiązań i zbieraniu danych doświadczalnych. Na szczególne podkreślenie zasługuje tu fakt, iż co prawda profesor Wojciech Wasilewski już od wielu lat postulował i zmierzał do obserwacji efektu Hong-Ou-Mandla w interferencji fal spinowych, to konkretna realizacja tego eksperymentu została zaproponowana i zrealizowana z sukcesem przez mgr. Michała Parniaka. Zasługuje to na szczególne podkreślenie.

Rozdział drugi przedstawia podstawowe struktury pojęciowe jak i ich matematyczne reprezentacje wykorzystywane w opisie oddziaływających ze sobą światła i atomów. Wychodząc od klasycznego opisu światła Autor pokrótce wprowadza jego kwantowanie, tradycyjnie definiuje stany koherentne, Focka i ściśnięte oraz opisuje efekt Hong-Ou-Mandla dwufotonowej interferencji i identyfikację światła nieklasycznego. Następnie przechodzi do opisu oddziaływania materii ze światłem poczynając od atomu dwupoziomowego, poprzez atom wielopoziomowy, proces Ramana, absorpcję dwufotonową i dynamiczny efekt Starka po sprzężenie stanów światła i atomów opisywanych przy pomocy fal spinowych.

Rozdział trzeci poświęcony jest aspektom konstrukcyjnym układu eksperymentalnego wykorzystywanego w tej pracy. Obejmuje: kamerę o jednofotonowej rozdzielczości, charakteryzację pułapki atomowej, kompensację niechcianych pól magnetycznych, weryfikację temperatury schłodzonej chmury atomowej, przedstawienie sekwencji czasowej cykli eksperymentalnych i generacji fal spinowych.

Rozdział czwarty zawiera opis jednego z głównych wyników tej rozprawy czyli demonstrację wielomodowej pamięci kwantowej, w której jednocześnie może być przechowanych ponad sześćset fotonów w rozseparowanych przestrzennie modach. Autor pokazał, iż nieklasyczne korelacje zapisane w falach spinowych utrzymują się do 50 μ s. W mej opinii osiągnięcia te są godne wyróżnienia. Warto w tym miejscu nadmienić iż wyniki te zostały wcześniej przedstawione w prac opublikowanej w Nature Communication, której pierwszym współautorem był mgr Michał Parniak.

Rozdział piąty opisuje nowy sposób manipulacji falami spinowymi przy pomocy dynamicznego efektu Straka. Idea zasadza się na wykorzystaniu światła daleko odstrojonego od rezonansu i przesunięciu energii stanów atomowych proporcjonalnym zarówno do natężenia tego światła jak i liczby magnetyczne opisującej stan. Tym sposobem, jak już w lata siedemdziesiątych proponował Cohen-Tannoudji, można wywołać efekt analogiczny do tego, który powoduje pole magnetyczne. To pozorne pole magnetyczne jest proporcjonalne do natężenia silnie odstrojonej wiązki laserowej. W połączeniu z użyciem przestrzennego modulatora fazy światła daje to możliwość generowania pozornego pola magnetycznego o dość arbitralnym rozkładzie przestrzennym w obrębie chmury zpułapkowanych zimnych atomów.

Rozdział szósty poświęcony jest kolejnemu znaczącemu osiągnięciu tej rozprawy. Jest nim po raz pierwszy przeprowadzona demonstracja efektu Hong-Ou-Mandla w interferencji dwóch fal spinowych wzbudzonych w pamięci kwantowej. Dzięki czasowemu oświetleniu silną wiązką laserową o periodycznym rozkładzie przestrzennym chmury atomów i zmianie energii ich stanów możliwa jest zmiana fazy jednych modów przestrzennych względem innych. Taki schemat pozwala wzbudzić dwa wybrane mody fal spinowych i interferować je z dobrze kontrolowaną różnicą faz tak by odczytać wzbudzenia z modów wyjściowych. Przy odpowiedniej różnicy faz obserwuje się podwójne wzbudzenie w jednym z modów wyjściowych. Również to osiągnięcie uważam za godne wyróżnienia. Wspomniane wyniki stały się podstawą pracy opublikowanej ledwie dwa miesiące temu w *Physical Review Letters*, której mgr Michał Parniak jest pierwszym współautorem.

Rozdział siódmy jest dość naturalną kontynuacją poprzedniego rozdziału i technik tam opracowanych. Zawiera jednak kolejne interesujące wyniki. Na szczególną uwagę zasługuje tu zaproponowanie protokołu, w którym w pamięci kwantowej, w różnych chwilach czasu zostaje zapisanych szereg pulsów światła a następnie przeprowadzana jest interferencja zapisanych fal spinowych i odczyt tak powstałych informacji z pamięci. Jest to demonstracja interferometrycznego procesora fal spinowych dla zapisanych w nich pulsów światła.

Rozdział ósmy idzie jeszcze dalej w inżynierii fal spinowych. Autor wykorzystuje spójną i kontrolowaną superpozycję dolnych stanów atomowych jako punkt startowy do dwufotonowego wzbudzenia a w konsekwencji do spontanicznej generacji pary dwóch skorelowanych fotonów. Ten schemat jest następnie wykorzystany do manipulacji nadpromienistością powstającą w tym układzie. Badanie tego typu procesów pozwoli zapewne rozszerzyć nasze rozumienie procesów kolektywnych w oddziaływaniu atomów z fotonami.

Ostatni rozdział dziewiąty zawiera zwięzłe podsumowanie całej rozprawy. Praca prezentuje bardzo wysoki poziom doświadczalny a uzyskane wyniki przedstawiają najwyższym stopień wyrafinowania jeśli chodzi o inżynierię fal spinowych sprzężonych z pulsami światła. Stawia to przedstawioną do oceny rozprawę magistra Michała Parniaka, wykonaną pod kierunkiem profesora Wojciecha Wasilewskiego, zdecydowanie w światowej czołówce otwierając nowe dotąd nie eksplorowane możliwości. Należy podkreślić, iż złożony opis teoretyczny badanych zjawisk w żadnym stopniu nie ustępuje maestrii eksperymentalnej. Oczywiście w każdym tekście można doszukać się drobnych uchybień. Uporządkowanie bibliografii jest nieco niejasne co utrudnia znalezienie

poszczególnych referencji np. [CDW17]. W podpisie Rysunku 6.1 brak odniesienia do panelu d). Na stronie 134, konieczne były odrębne poprawki Autora rozprawy, co daje jej dodatkowy walor oryginalności. Tekst pracy mimo obszernych dodatków może nastroczać pewnych trudności w odbiorze, głównie ze względu na złożoność prezentowanej tematyki. Nie bez znaczenia jest tu też bardzo szeroki zakres poruszanych zagadnień. Należy jednak podkreślić, iż praca jest świetnie opracowana od strony redakcyjnej i graficznej.

Podsumowanie tej recenzji ułatwia mi fakt, iż miałem przyjemność wcześniej wysłuchania wykładów mgr. Michała Parniaka, które nie pozostawiają żadnych wątpliwości co do tego, że mimo młodego wieku jest już ekspertem w dziedzinie inżynierii kwantowej i świetnym doświadczalnikiem. Jego rozprawa z nadmiarem spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane w przewodzie doktorskim. To też z pełnym przekonaniem stawiam wniosek o dopuszczenie mgr. Michała Parniaka do publicznej obrony jego rozprawy. Jednocześnie, biorąc pod uwagę bardzo wysoką ocenę całej rozprawy doktorskiej, wykraczający znacznie ponad średnią dorobek naukowy, oraz wskazane w recenzji osiągnięcia naukowe wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr. Michała Parniaka.

