NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ
Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

Institute of Physics

Toruń, 12.12.2022

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Mateusza Mazelanika
pt. „Atomowy generator i procesor kwantowych stanów światła"

W dniu 14 października 2022 r. przedłożono mi do recenzji rozprawę doktorską pana mgr. Mateusza Mazelanika pt. „Atomowy generator i procesor kwantowych stanów światła". Rozprawa składa się z dziesięciu rozdziałów. Otwierają ją trzy rozdziały wprowadzenia, przedstawiające kolejno tematykę pracy, wstęp teoretyczny i opis układu eksperymentalnego. Rozdziały 4 - 6 poświęcone są opisowi eksperymentów z generatorem stanów Bella. Kolejne cztery rozdziały (rozdziały 7 - 10) poświęcone są opisowi eksperymentów z pamięcią gradientową. Rozprawę kończy rozdział 11 przedstawiający podsumowanie pracy i perspektywy.

We wstęp teoretycznym (rozdział 2) pan Mateusz Mazelanik opisuje oddziaływanie wyidealizowanego atomu trójpoziomowego (w układzie lambda) z klasyczną falą elektromagnetyczną. Stan atomu opisywany jest w formalizmie macierzy gęstości a jego dynamika opisana jest równaniem Master, co umożliwia dodanie wyrazu odpowiedzialnego za dekoherencję (zanik spójności jest opisany fenomenologicznie poprzez wprowadzenie dwóch parametrów γ i Γ). W limicie małej liczy wzbudzeń, pan Mateusz Mazelanik wyprowadził proste analityczne wyrażenie opisujące koherencję miedzy dwoma dolnymi stanami układu lambda, identyfikując w nim kolejne wyrazy odpowiedzialne za przejście Ramana, przesunięcie Starka dla pola zmiennego, przesunięcie Zeemana oraz poszerzenie mocą. Licząc odpowiedni ślad złożenia operatora momentu dipolowego i macierzy gęstości otrzymano makroskopową polaryzację, co umożliwiło opisanie wpływu ośrodka atomowego na propagację fali elektromagnetycznej. Część teoretyczna zakończona jest sformułowaniem trzech sprzężonych ze sobą równań opisujących wolnozmienną amplitudę dwóch wiązek laserowych i dynamikę ośrodka atomowego. Po przeczytaniu wstępu teoretycznego odczuwałem pewien niedosyt z uwagi na to, że autor ograniczył się tylko do klasycznego opisu fali elektromagnetycznej. Jednak we wstępie do opisu eksperymentu z polaryzacyjnymi stanami Bella (rozdział 4) pan Mateusz Mazelanik opisał kwantyzację pola elektromagnetycznego i kolejno uogólniał odpowiednie równania wcześniej przedstawione dla przypadku klasycznego pola elektromagnetycznego, co razem z rozdziałem 2 stanowi jasny i solidny wstęp teoretyczny do ocenianej tu rozprawy.

W rozdziale 3 autor opisał układ eksperymentalny. W kolejnych sekcjach tego rozdziału opisał on pułapkę magnetooptyczną, układy generowania, przełączania i stabilizacji pola magnetycznego, układy laserowe, oraz układ elektroniczny sterujący całym systemem eksperymentalnym. W kolejnych sekcjach pan Mateusz Mazelanik opisał też układ modulujący przestrzennie natężenie jednej z wiązek laserowych (co później wykorzystano do indukowania zależnego od położenia efektu Starka), układ wąskiego filtra optycznego bazującego na silnym przejściu atomowym, oraz kamerę czułą na pojedyncze fotony. Rozdział poświęcony układowi eksperymentalnemu zakończony jest opisem siły przejść linii D1 i D2 w izotopie 87 rubidu i analizą optymalnego wyboru przejść dla zreferowanych w rozprawie eksperymentów. Rozdział 3 jest niezwykle gęsty, tzn. opisano bardzo złożony układ eksperymentalny na zaledwie 14 stronach (lub około 7 po odliczeniu rysunków). Opis jest treściwy – podano tylko istotne fakty i wartości najważniejszych parametrów

Nicolaus Copernicus University in Toruń
Institute of Physics
Grudziądzka Street 5, 87-100 Toruń, Poland
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl

eksperymentalnych. Rozdział ten jednak pozostawia pewien niedosyt związany z trudnością pełnego zrekonstruowania przez czytelnika układu eksperymentalnego. Np. pominięto dyskusję wytwarzania próżni i uzyskanych poziomów próżni, dyskusję systemów stabilizowania laserów, czy schemat i bardziej szczegółową dyskusję kamery czułej na pojedyncze fotony. Podobnie zdjęcia z rysunków 3.1 i 3.2 nie są do końca czytelne i w oparciu o nie trudno zrekonstruować dokładne położenie i geometrię cewek pola magnetycznego czy przebieg wiązek laserowych.

Pierwsza część rozprawy doktorskiej opisująca oryginalne wyniki badawcze zaczyna się od opisu eksperymentów nad generowaniem i analizowaniem stanów Bella (rozdziały 4 - 6). Rozdział 4 rozpoczyna się wstępem teoretycznym wprowadzający kwantowy opis światła oraz idee fal spinowych wraz z ich kwantowym opisem. Wytłumaczono idee zapisu i odczytu fal spinowych w ośrodku atomowym (gdzie atomy idealizowane są jako trójpoziomowe układy typu lambda). W obecności silnej wiązki zapisującej spontanicznie generowany jest foton (foton sygnałowy) i skorelowana z nim fala spinowa. Informacja niesiona przez falę spinową jest odzyskana gdy w obecności silnej wiązki odczytującej fala spinowa jest przekształcana w foton jałowy. Istotą eksperymentów przedstawionych w tym i kolejnych rozdziałach jest fakt, że tak wygenerowana para fotonów sygnałowy + jałowy (które w ogólności generowane są w pewnym odstępie czasowym) jest kwantowo skorelowana. Dla mnie niesamowite w tym schemacie eksperymentalnym jest to, że stan późniejszego fotonu jałowego jest wcześniej zapisany w ośrodku atomowym w taki sposób że informacja o stanie jest rozdystrybuowana w całej próbce atomowej (tzn. każdy atom w pewnym niewielkim stopniu niesie pojedyncze wzbudzenie i tylko jako całość tworzą dany stan kwantowy fali spinowej). W dalszej części pan Mateusz Mazelanik opisuje układ podwójnego interferometru pozwalającego przekształcić tak wygenerowany stan dwufotonowy w polaryzacyjny stan Bella. W rozdziale 5 autor opisuje metodologię ilościowego charakteryzowania tak wytworzonych stanów splątanych poprzez analizę pomiarów koincydencyjnych. Ogromne wrażenie robi fakt, że splątanie przeżywa nawet relatywnie długi czas (rzędu 50 us) po którym dokonano odczytu fali spinowej i przekształcono ją w foton jałowy (ilościowo wyraża to np. spadek widzialności w funkcji czasu na rysunku 5.6). W rozdziale 6 pan Mateusz Mazelanik wykorzystuje polaryzacyjne stany Bella w technice obrazowania jałowego.

Druga część rozprawy doktorskiej (rozdziały 7 - 10) poświęcona jest realizacji i wykorzystaniu pamięci gradientowej w wyżej opisanym ośrodku atomowym. Idea pamięci gradientowej (opisanej w rozdziale 7) zasadza się na umieszczeniu próbki w gradiencie pola magnetycznego. Wówczas szybkość ewolucji fazy koherencji zależy od położenia w próbce co efektywnie zmienia w czasie wektor falowy wygenerowanej w próbce spójności. Umożliwia to kontrolowane dostrajanie i odstrajanie od dopasowania fazowego pomiędzy odpowiednimi wiązkami światła i periodyczną koherencją atomową. W rozdziale 8 opisano eksperyment w którym dodatkową przestrzenną modulację fazy koherencji wprowadzono poprzez nałożenie na próbkę wiązkę laserową o mocy zmodulowanej przestrzennie co wyindukowało zależne od położenia przesunięcie Starka. Wykorzystano to do zaimplementowania w układzie pamięci gradientowej czasowego odpowiednika dwóch soczewek oddalonych o pewną odległość co umożliwiło zrealizowanie czasowego odpowiednika obrazowania dalekiego pola. W rozdziałach 9 i 10 wykorzystano atomową pamięć gradientową do implementacji protokołu nadrozdzielczej spektroskopii oraz trójwymiarowego obrazowania rozkładu spójności atomowej w próbce.

Rozprawa obejmuje bardzo szeroki zakres materiału (zarówno opis teoretyczny, opis skomplikowanego układu eksperymentalnego i przede wszystkim opis szeregu oryginalnych wyników pomiarowych i ich analizy). Jakkolwiek nieco ponad 140 stron jest jak najbardziej właściwą objętością typowych rozpraw doktorskich, przy tak szerokim zakresie materiału w niektórych miejscach opis układu i wyników wydawał się niewystarczająco szczegółowy. Praca od strony językowej i formalnej

została napisana bardzo starannie (nieliczne uwagi techniczne do rysunków czy błędy językowe które udało mi się wychwycić w mojej ocenie nie są warte wspominania w recenzji). Pewnym mankamentem rozprawy jest to, że nie została napisana w języku angielskim co istotnie zwiększyłoby liczbę odbiorców.

W rozprawie tej wyraźnie widać, że autor cechuje się dojrzałością w formułowaniu złożonych konstrukcji myślowych. Pan Mateusz Mazelanik klarownie potrafi przedstawiać złożone zagadnienia, właściwie przedstawia kolejne problemy skupiając się tylko na ich istotnych aspektach. Z jednej strony autor w sposób ciekawy dla czytelnika potrafił zakreślić szerszy kontekst swoich badań szeroko odnosząc się do współczesnej literatury. Z drugiej strony jasno tłumaczył trudne techniczne zagadnienia i szczegóły wyprowadzeń matematycznych. To wyraźnie pokazuje, że pan Mateusz Mazelanik mimo młodego wieku jest już dojrzałym i niezależnie myślącym badaczem.

W mojej ocenie rozprawa ta jest ponadprzeciętna i poziomem merytorycznym odpowiada pracom tworzonym w najlepszych grupach na świecie (każda z dwóch wyżej opisanych części pracy mogłaby spokojnie stanowić osobną rozprawę doktorską). Z pracy jednoznacznie wynika, że pan Mateusz Mazelanik jest niezwykle utalentowanym badaczem (zarówno jest doskonałym eksperymentatorem ale też biegle włada stroną teoretyczną) i w trakcie swojego doktoratu wykonał tytaniczną pracę. W mojej ocenie ogromne znaczenie dla otrzymania tak silnych wyników miało też unikalne środowisko w którym praca była realizowana. Na Wydziale Fizyki UW działa niezwykle prężne środowisko z wiązane z optyką kwantową (zarówno teorią i eksperymentem), a pierwsze eksperymenty z falami spinowymi były rozwijane już ponad dekadę temu przez prof. Wojciecha Wasilewskiego.

Rozprawę tę przeczytałem z ogromnym zainteresowaniem i sprawiło mi to dużo satysfakcji. Pomysły schematów eksperymentalnych, zaawansowanie teoretyczne i rzeczywista realizacja eksperymentalna są imponujące. Praca skłania do wielu przemyśleń i refleksji w trakcie których nasuwał się szereg pytań i uwag dotyczących pracy. Co ciekawe w ostatnim rozdziale „Podsumowanie i perspektywy" autor już zamieści odpowiedź na niektóre z nich, np. połączenie pamięci gradientowej z generowaniem par splątanych fotonów czy odniesienie się do pułapki dipolowej i sieci optycznej. Chciałbym prosić doktoranta o odpowiedź lub ustosunkowanie się do kilku przykładowych pytań lub uwag.

- Czy mogę prosić o rozszerzenie dyskusji dotyczącej możliwości dalszego schładzania (zwiększania gęstości w przestrzeni fazowej) i wykorzystania pułapki dipolowej lub sieci optycznej? Co więcej można osiągnąć w tych eksperymentach dzięki większej gęstości i niższej temperaturze? Czy dałoby się prowadzić generacje splątanych fotonów i przechowywanie fali spinowej bez wyłączania pułapki? Co z przesunięciem Starka od pola pułapkującego?
- Odnośnie rozdziału 7.2.1, ile impulsów w obecnej realizacji eksperymentalnej można zapisać i odczytać (rozumiem, że to jest kompromis pomiędzy różnymi czynnikami ale w praktyce jakiego rzędu wielkości to jest liczba?).
- Po przeczytaniu rozdziału 8.3 i opisu rysunku 8.2 nie jest dla mnie jasne jak jest zmodulowana wiązka indukująca zależne od położenia przesunięcie Starka.
- Na końcu sekcji 5.1.3 jest: „Rozmiar antydiagonalnej korelacji σ_y jest stowarzyszony z rozmiarem chmury atomowej i stanowi rozmiar modu fotonów jałowych. Stosunek tego rozmiaru do wielkości obserwowanego obszaru kwantyfikuje ilość dostępnych modów pamięci". Proszę o rozszerzenie tej dyskusji i wyjaśnienie ostatniego zdania.

Konkludując, niniejsza recenzja jednoznacznie uzasadnia stwierdzenie, że przedłożona rozprawa doktorska pana mgr. Mateusza Mazelanika pt. „Atomowy generator i procesor kwantowych stanów światła" prezentuję ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie nauk fizycznych oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej a jej przedmiotem jest oryginalne rozwiązanie kilku wyżej wymienionych problemów naukowych. Rozprawa ta spełnia wszelkie wymagania odnośnie oryginalności i jakości badań stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ze względu na ponadprzeciętną wartość naukową przedstawionych wyników wnoszę o wyróżnienie tej rozprawy. Pan Mateusza Mazelanik w pracach będących podstawą niniejszej rozprawy wykazał się unikalnym połączeniem kompetencji eksperymentalnych i teoretycznych. Przeprowadził szereg niezwykle trudnych prac eksperymentalnych na bardzo złożonym układzie łączącym zaawansowane technologie laserowe, fotoniczne, próżniowe i złożone systemy kontrolno-pomiarowe. Szeroka wiedza teoretyczna i dogłębne zrozumienie optyki kwantowej pozwoliły mu wypracować oryginalną metodologię eksperymentalną (np. w eksperymentach realizujących protokół nadrozdzielczej spektroskopii czy w generowaniu nielokalnych stanów splątanych). Ocenę tę potwierdza też fakt, że wyniki przedstawione w rozprawie stanowią podstawę kilku artykułów naukowych opublikowanych w prestiżowych czasopismach takich jak Nature Communication czy Optica. Wyniki te są istotne zarówno z perspektywy badań podstawowych jak i przyszłych zastosowań inżynierii stanów kwantowych.

dr hab. Piotr Wcisło, prof. UMK
Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej
Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu