

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Mateusza Mazelanika

Oceniana przeze mnie rozprawa doktorska „Atomowy generator i procesor kwantowych stanów światła” napisana została przez mgra Mateusza Mazelanika pod opieką dr hab. Rafała Demkowicza-Dobrzańskiego w Centrum Nowych Technologii Uniwersytetu Warszawskiego. Wyniki przedstawione w rozprawie zostały opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych.

Praca doktorska mgra Mateusza Mazelanika dotyczy wytwarzania oraz przetwarzania kwantowych stanów światła przez ultrazimne spulapkowane atomy.

Autor rozpoczyna swoją pracę od części teoretycznej wprowadzając opis światła oddziałującego z atomami. W rozpatrywanym układzie mamy do czynienia z atomem trójpoziomowym w konfiguracji lambda w którym elektron może zostać wzbudzony ze stanu podstawowego do wirtualnego stanu wzbudzonego a następnie emitując foton spaść do stanu wzbudzonego. Oczywiście możliwy jest też proces odwrotny. W wyniku uzasadnionych przybliżeń układ efektywnie opisywane jest za pomocą koherencji atomowej pomiędzy stanem podstawowym a docelowym stanem wzbudzonych (jeden z elementów macierzy gęstości atomu) oraz dwóch pól elektromagnetycznych sprzężonych z dwoma wykorzystywanymi przejściami elektronowymi. Powyższe trzy wielkości fizyczne (element macierzy gęstości i dwa pola el.) są zależne od położenia i czasu. Rozdział kończy się trzema, sprzężonymi ze sobą, równaniami na trzy omawiane wielkości.

W następnym rozdziale autor dokładnie opisuje układ doświadczalny.

Wyprowadzone równania teoretyczne obrazują proces w którym elektron znajdujący się w stanie podstawowym pochłania foton a następnie emituje inny foton przechodząc do stanu wzbudzonego. Jeśli teraz oświetlimy układ laserem tak aby pochłoniętych fotonów było dużo, to zaczniemy tworzyć pary: wyemitowany foton i wzbudzony atom (z elektronem w stanie wzbudzonym). Z równań opisujących dynamikę układu wynika że pęd przekazany atomowi podczas wzbudzenia oraz kierunek wyemitowanego fotonu są skorelowane. Tak więc będziemy mieli do czynienia ze skorelowanymi parami foton-atom. W omawianym układzie mamy też do czynienia z procesem odwrotnym do opisanego powyżej. Wzbudzony atom pochłaniając foton przechodzi do stanu podstawowego emitując inny foton. Jeśli mamy wzbudzone atomy to oświetlając układ laserem spowodujemy przejście wielu atomów wzbudzonych do stanu podstawowego przy jednoczesnej emisji skorelowanych fotonów.

W drugiej części pracy doktorskiej autor opisuje eksperymenty wykorzystujące powyżej opisane procesy. Rozpoczynając z atomami w stanie podstawowym, oświetlając układ najpierw pierwszym laserem, odczekując pewnie czas i oświetlając układ drugim, otrzymujemy pary skorelowanych fotonów.

W rozdziale czwartym pracy autor dokonuje analizy teoretycznej przewidywanego stanu kwantowego i pokazuje że ma on szanse złamać polaryzacyjne nierówności Bella. Ten rozdział stanowi wstęp teoretyczny do doświadczenia opisanego w rozdziale piątym w którym autor prezentuje wyniki pomiarów wytworzonego stanu Bella. Istotne jest, że autor bierze pod uwagę niedoskonałości układu doświadczalnego czyli obecność szumu, skończoną wydajność układu detekcji, czy niezerową temperaturę chmury atomów. Wszystkie te czynniki mają negatywny wpływ nie tylko na "kwantowość stanu" ale także na pomiar tej "kwantowości". Autor bardzo starannie analizuje wpływ wyżej opisanych czynników na parametr Bella. Opisuje pomiar parametru Bella w funkcji czasu przechowywania wzbudzenia atomowego w chmurze (odstęp czasu pomiędzy oświetleniem chmury przez pierwszy i drugi laser) oraz dokładnie opisuje model teoretyczny zależności parametru Bella od wspomnianego czasu. Wyniki doświadczenia jawnie demonstrują łamanie nierówności Bella. W przypadku zwiększania czasu przechowywania wzbudzenia atomowego w chmurze, zgodnie z oczekiwaniami, zmniejsza się procent modów łamiących nierówności Bella.

W rozdziale szóstym autor opisuje kolejny eksperyment dotyczący łamania nierówności Bella. Najważniejszą różnicą w stosunku do poprzedniego eksperymentu jest zastosowanie pomiaru warunkowego: drugi foton jest rejestrowany tylko wtedy gdy zarejestrowany jest pierwszy foton. To zdecydowanie przyspiesza zbieranie danych - w związku z tym można zebrać ich więcej co zdecydowanie zmniejsza niepewności pomiarowe. Pozwala to uzyskać parametr Bella który łamie omawiane nierówności o około trzydzieści odchyień standardowych. W drugiej części rozdziału autor stara się zrozumieć z jakich powodów uzyskana wartość parametru Bella jest około 20 procent mniejsza od maksymalnej. Wyróżnia kilka procesów powodujących to zmniejszenie i analizuje wpływ każdego z nich na wartość parametru Bella. Wartość parametru Bella wynikła z wyżej wspomnianej analizy zgadza się z wartością zmierzoną w eksperymencie.

W trzeciej części pracy autor opisuje zmodyfikowany układ doświadczalny. Poddaje chmurę atomów działaniu „prawdziwego” oraz „fikcyjnego” pola magnetycznego. Fikcyjne pole magnetyczne wytwarzane jest, korzystając z efektu ac-Starka, przez wiązkę laserową oświetlającą chmurę atomów. Wartość fikcyjnego pola magnetycznego jest proporcjonalna do natężenia światła laserowego, które można dość dowolnie kształtować w czasie i przestrzeni. Konsekwencją tego jest możliwość dość dowolnego przesuwania w czasie i przestrzeni poziomów energetycznych atomów. Umożliwia to przestrzenno-czasową kontrolę mapowania światła na koherencje atomową (pomiędzy poziomem podstawowym a docelowym wzbudzonym) oraz podobną kontrolę wyświecania światła przez chmurę atomową.

W rozdziale ósmym autor pokazuje w jaki sposób modulować całkowite pole magnetyczne w czasie i przestrzeni, tak aby na wyjściu z pamięci kwantowej otrzymać transformatę fouriera wchodzącego impulsu. Następnie opisuje realizację eksperymentalną tego pomysłu – konstruuje spektrometr o bardzo wysokiej rozdzielczości częstotliwościowej (około 20 kHz).

W rozdziale dziewiątym autor opisuje eksperyment którego celem jest wyznaczenie odległości dwóch identycznych profili gaussowskich o nieznacznie różnych centralnych częstościach. Metoda pomiaru prezentowana w pracy pozwala na wielokrotne wzmocnienie precyzji pomiaru wyżej wspomnianej odległości w stosunku do konwencjonalnych metod bezpośredniego obrazowania (direct imaging). Autor rozważa dwa profile z czynnikiem fazowym pomiędzy profilami. Czynniki te zmienia się w losowy sposób w każdej realizacji.

Główną ideą metody jest podział całkowitego profilu na część symetryczną i antysymetryczną względem częstości centralnej, oraz obserwacja, że praktycznie cała informacja o separacji profili jest ukryta w części antysymetrycznej. Umiejętne skorzystanie z możliwości przestrzenno-czasowej modulacji mapowania (oraz wyświetlania) światła na koherencję atomową umożliwia eksperymentalną realizację podziału wchodzącego sygnału na część symetryczną i antysymetryczną. Pomiary liczby fotonów obydwu części wraz z wyrafinowaną estymacją parametru separacji pozwala na osiągnięcie wysokiej wartości współczynnika nadrozdzielczości.

W rozdziale dziesiątym autor opisuje eksperyment trójwymiarowego obrazowania spójności atomowej. Po wprowadzeniu teoretycznym w którym prezentuje sposób odzyskania trójwymiarowego obrazu spójności z analizy wyświetlonego przez atomy światła, przechodzi do omówienia realizacji doświadczalnej tegoż pomysłu. Pokazuje w jaki sposób został odzyskany trójwymiarowy obraz spójności porównując go z obrazem wiązki laserowej użytej do wytworzenia wspomnianej spójności. Z rysunków widać wysoką wierność odzyskanej spójności. Tak jak w poprzednich rozdziałach autor poświęca wiele miejsca na analizę procesów które prowadzą do zmniejszenia wierności rekonstrukcji obrazu spójności.

W ostatniej części autor podsumowuje wyniki eksperymentów omawianych w rozprawie oraz omawia perspektywy kontynuacji badań.

Pracę doktorską mgra Mateusza Mazelanika oceniam bardzo dobrze. Autor prezentuje dokładne wprowadzenie teoretyczne z którego widać, że rozumie opis teoretyczny badanego układu. Omawia bardzo dokładnie używane techniki eksperymentalne. Argumentuje wybory jakich dokonuje w projektowaniu eksperymentu oraz analizie wyników. Na szczególne podkreślenie zasługuje analiza niedoskonałości oraz „niechcianych” procesów w układzie. Ta kluczowa analiza zajmuje sporą część pracy i świadczy o dogłębnym rozumieniu procesów zachodzących w układzie. Widoczne są też liczne odwołania do literatury świadczące o bardzo dobrej znajomości prac prowadzonych przez inne zespoły oraz ich związku z badaniami prowadzonymi przez autora.

Jednocześnie warto podkreślić, że przedstawione badania nie mają wcześniejszych odpowiedników w literaturze i zostały wykonane na unikalnym układzie doświadczalnym.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona mi do recenzji rozprawa doktorska spełnia, wymogi Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668).

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego z dziedziny optyki kwantowej, a także świadczy o ogólnej wiedzy Kandydata w tym zakresie oraz o jego umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Wnoszę o dopuszczenie mgra Mateusza Mazelanika do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Jednocześnie wnoszę o wyróżnienie rozprawy.

Paweł Zi