

2019 -01- 30 *JB*

Prof. dr hab. Jarosław Zaremba
Instytut Fizyki
Uniwersytetu Mikołaja Kopernika

Ocena rozprawy doktorskiej magistra Michała Dąbrowskiego
„Paradoks EPR w ciepło- i zimnoatomowych pamięciach kwantowych”

Wiele podstawowych problemów mechaniki kwantowej, analizowanie których było możliwe wcześniej jedynie drogą „eksperymentów myślowych”, stało bądź staje się dziś dostępnymi eksperymentalnie. Dotyczy to w szczególności zjawisk związanych z właściwościami kwantowych stanów splątanych, których fundamentalna rola w zagadnieniach interpretacyjnych mechaniki kwantowej znana była od wczesnych jej lat i czego słynnym przykładem jest paradoks Einsteina-Podolskiego-Rosena. Wielka obecnie aktywność badawcza na tym polu, obok znaczenia czysto poznawczego, motywowana jest wykorzystaniem fundamentalnych cech układów kwantowych do przetwarzania informacji. Badania nad informacją kwantową, łączące idee i narzędzia mechaniki kwantowej z problematyką teorii informacji stały się polem intensywnych badań, na którym obok głębokich zagadnień teoretycznych prawdziwym wyzwaniem jest problem praktycznej realizacji idei kwantowego przetwarzania informacji w realnych układach fizycznych. Nie przypadkiem istnieje bliski związek między tą problematyką a optyką kwantową. Osiągamy dziś, dzięki wielkiemu postępowi w dziedzinie technologii optycznych, wysoki poziom kontroli dynamiki procesu oddziaływania atomów z fotonami otwiera możliwości przetwarzania zakodowanej w stanach obiektów kwantowych informacji i wykorzystanie układów optycznych uważane jest za jedną z najbardziej obiecujących dróg do praktycznej realizacji kwantowych protokołów. W takie właśnie ramy wpisuje się rozprawa doktorska magistra Michała Dąbrowskiego.

Niezbędnym elementem dla urzeczywistnienia kwantowego przetwarzania informacji metodami optycznymi konieczne jest posiadanie, oprócz źródła nośników stanów kwantowych światła oraz narzędzi do ich detekcji, pamięci kwantowej, w której stany te mogłyby być zapisywane, przechowywane i z niej odzyskiwane w kontrolowany sposób. Rozprawa doktorska pana magistra Michała Dąbrowskiego poświęcona jest holograficznej wielomodowej pamięci atomowej przechowującej kolektywne wzbudzenia ośrodka atomowego, tzw. fale spinowe, generowane w procesie rozpraszania Ramana. W procesie takim kreowane są hybrydowe stany splątane rozproszonego fotonu stokesowskiego i fali spinowej, które mogą być następnie analizowane drogą konwertowania fali spinowej na foton w procesie rozpraszania antystokesowskiego. Rejestracja i systematyczna, wieloaspektowa analiza właściwości powstających w tym schemacie korelacji kwantowych jest tytułowym przedmiotem programu badawczego podjętego i opisanego w rozprawie.

W świetle powyższego uważam, że jest to program niezwykle aktualny i ważny dla dynamicznie rozwijanej, „gorącej” dziedziny współczesnych badań, jaką niewątpliwie jest informatyka kwantowa, a w szczególności implementacja jej schematów w realizowalnych układach fizycznych. Realizacja tego programu ma poważne znaczenie praktyczne, ale jednocześnie zagadnienia fizyczne, które rozważane są w jego ramach, sytuują go w perspektywie badań podstawowych wykraczających poza standardowo rozumiane ramy tematyczne optyki kwantowej. Wymagała ona zaplanowania, przygotowania i wykonania złożonych układów optycznych i subtelnych doświadczeń, a także zaawansowanej, wieloaspektowej interpretacji i dyskusji uzyskanych w nich danych. Od razu powiem, że Autor rozprawy wykonał zamierzone zadanie z pełnym sukcesem, a przedstawiona rozprawa

zawiera ciekawą, szczegółową i systematyczną prezentację przeprowadzonych badań oraz krytyczną dyskusję uzyskanych rezultatów. Od razu też podkreślę, że bardzo wysoką rangę naukową rozprawy obrazuje fakt, iż wyniki przedstawione w pracy stanowiły podstawę sześciu artykułów wieloautorskich opublikowanych w ostatnich trzech latach w renomowanych czasopismach: Nature Communications, Optics Express, Optica, Physical Review Letters, Physical Review A i Journal of Modern Optics. Doktorant jest pierwszym autorem w trzech z nich, co świadczy o znaczącej roli jaką odegrał w ich powstawaniu.

Rozprawa liczy 118 stron podzielonych na osiem rozdziałów, podsumowanie i trzy dodatki. Bibliografia pracy jest bardzo obszerna, zawiera 164 pozycje i w dominującej większości są to bardzo aktualne i publikowane w renomowanych czasopismach artykuły, co wyraźnie pokazuje bieżącą aktywność na polu badań naukowych dotyczących tej problematyki.

Rozprawę jako rozdział pierwszy rozpoczyna wprowadzenie, które moim zdaniem jest ważne dla całości prezentacji. Zawiera ono sprawnie skonstruowaną zwyczajową, zwięzłą zapowiedź tematyki i sformułowanie celów rozprawy, ale szczególnie zwraca uwagę jego ostatni paragraf, w którym Autor, formułując zasadniczą tezę i omawiając strukturę rozprawy, szczegółowo i precyzyjnie przedstawia wkład własny na każdym etapie pracy. Otóż wyniki, na podstawie których powstała rozprawa, są efektem pięknie i na światowym poziomie prowadzonej pracy zespołowej w Laboratorium Pamięci Kwantowych pod kierunkiem profesora Wojciecha Wasilewskiego. Praca zespołowa jest naturalnym i wręcz warunkującym postęp elementem dzisiejszej zaawansowanej i złożonej praktyki eksperymentalnej i już lektura przygotowanego przez Doktoranta opisu współpracy pokazuje ambicję, zakres i złożoność programu badawczego oraz ogrom pracy, którą trzeba było wykonać dla jego realizacji. Tak dokładny i rzeczowy opis własnego w nim udziału przez Doktoranta nie tylko ułatwia pracę recenzencką, ale, co ważniejsze, wraz z niebanalnie sformułowanymi podziękowaniami dla współpracowników, przekonuje i dobrze świadczy o umiejętności świadomej oceny własnej roli w tej współpracy oraz o tym, że magister Dąbrowski bardzo dobrze wykorzystał możliwość pracy w ośrodku o wiodących osiągnięciach w optyce kwantowej. Ten element tekstu zrobił na mnie zdecydowanie pozytywne wrażenie.

W zasadniczym korpusie pracy można wyróżnić trzy części: rozdziały drugi i trzeci to ogólne wprowadzenie w tematykę rozprawy, natomiast rozdziały od czwartego do ósmego prezentują wyniki badawcze uzyskane w trakcie pracy nad rozprawą, przy czym rozdziały czwarty, piąty i szósty omawiają zagadnienia związane z pamięcią w ciepłych, a siódmy i ósmy w zimnych zespołach atomów.

Rozdział drugi, relacjonując paradoks EPR, wprowadza zwięźle w dyskusję splątania oraz korelacji kwantowych. Omawiane są tu hierarchia korelacji oraz kryteria nieseparowalności, w szczególności tzw. świadkowie splątania dla przypadku dwucząstkowego stanu opisanego w zmiennych ciągłych położenia i pędu, jak w oryginalnej wersji eksperymentu myślowego EPR. Rozdział ten w zwięzły sposób zapowiada problemy fizyczne, które w dalszym ciągu pracy będą analizowane. Ważną częścią rozdziału trzeciego jest omówienie podstawowego dla realizacji wielomodowej pamięci mechanizmu fizycznego opartego na generacji kolektywnego wzbudzenia (fali spinowej) w zespole atomów rubidu w trakcie ramanowskiego rozpraszania stokesowskiego i jego odczytu w komplementarnym procesie antystokesowskim oraz formalizmu służącego do opisu tego mechanizmu, a także analiza powstających splątanych dwumodowych stanów ściśniętych fotonu i wzbudzeń ośrodka atomowego. Jest to zwięzły, ale klarowny i wystarczający dla zrozumienia istoty działania pamięci i detekcji generowanych w niej korelacji wykład.

Rozdziały od czwartego do szóstego omawiają realizację pamięci kwantowej w gazowym ośrodku ciepłych atomów rubidu 87. Rozdział czwarty poświęcony jest eksperymentalnej realizacji działającej pamięci atomowej w ciepłych parach rubidu oraz szczegółowemu badaniu jej charakterystyk, takich jak wielomodowość, a także omówieniu metody akwizycji i opracowania danych pomiarowych. W szczególności przedstawione są wyniki pomiarów rozkładów koincydencji kątowych pomiędzy fotonem stokesowskim i emitowanym z opóźnieniem w kierunku determinowanym warunkami dopasowania fazowego fotonem antystokesowskim. Wyniki te, podsumowane na rysunku 4.8, pokazują między innymi, że korelacje takie mogą być rejestrowane nawet z kilkumikrosekundowym opóźnieniem, co jest bardzo ważnym wynikiem będącym sygnaturą „czasu życia” pamięci. Co więcej, pamięć może być traktowana jako źródło oznajmianych fotonów antystokesowskich. Trudno przecenić znaczenie tej pierwszej realizacji i obserwacji opóźnionych w czasie korelacji kątowych pojedynczych fotonów i wyniki te zaowocowały pracą w *Physical Review Letters*. Rozdział piąty przedstawia pomysłowe, oryginalne wykorzystanie wielomodowej pamięci atomowej do sterowania kierunkiem fotonów antystokesowskich poprzez modyfikację kierunku wiązki odczytującej z wykorzystaniem zmiany warunków dopasowania fazowego w całym procesie rozpraszania, co umożliwia mikrosekundowy czas życia pamięci. Może to mieć ważne znaczenie praktyczne dla projektowania układu, który kierowałby fotony antystokesowskie do wybranego światłowodu. Przykład takich możliwości ilustrują na rysunkach 5.3 i 5.4 uzyskane mapy korelacji natężenia światła wokół zmienianych kierunków obu rejestrowanych fotonów. Wyniki te były opublikowane w artykule w *Optics Express*. Jak już była o tym mowa, w procesie ramanowskim, na którym opiera się idea atomowej pamięci kwantowej, generowany jest stan splątany fotonu i fali spinowej. Rozdział szósty prezentuje eksperymenty, w których badane są związane z tym splątaniem korelacje. W tym celu skonstruowano układ eksperymentalny umożliwiający drogą detekcji w polu dalekim i bliskim fotonów stokesowskich i antystokesowskich, w które konwertowane były wzbudzenia atomowe, analizę koincydencji w położeniach i pędach obu składników układu w stanie splątanym. Czytelne mapy tych koincydencji pokazuje rysunek 6.2, gdzie widać korelacje w położeniach i antykorelacje w pędach. Jest to spektakularny wynik, pokazujący korelacje w zmiennych ciągłych położeniach i pędzie, jak w oryginalnej wersji eksperymentu myślowego EPR. Ponadto widać, że realizacja tego efektu z użyciem zbudowanej pamięci pozwala na efektywne przetrwanie korelacji przez czas kilku mikrosekund. Z kolei rysunek 6.3 ilustruje koincydencje różnicy położenia i sumy pędów, gdzie, zgodnie z EPR, widać maksima utworzone przez liczby koincydencji w regionach wokół zer odpowiednich współrzędnych. Niezwykle ciekawy i pouczający wynik prezentuje rysunek 6.3d, który pokazuje w jaki sposób zmieniają się w funkcji czasu przechowywania w pamięci znalezione iloczyny wariancji sumy pędów i różnicy położenia na tle odpowiadających różnym „poziomom nieseparowalności” stanów według kryteriów opisanych w rozdziale drugim, a także liczba przechowywanych modów. Wyniki te opublikowane były jako list (wraz z materiałem uzupełniającym) w ważnym czasopiśmie *Optica*.

Rozdziały siódmy i ósmy poświęcone są realizacji pamięci oraz generacji wielowymiarowych przestrzennie stanów splątanych w zespole zimnych atomów. Motywacją i celem podjętych badań było zmniejszenie efektów związanych z termicznym ruchem atomów obecnym w realizacji pamięci ciepłatomowej. Wymagało to zaprojektowania i skonstruowania złożonego układu optycznego z pułapką magnetooptyczną, a działanie i możliwości zbudowanej z jego użyciem pamięci kwantowej bazującej na zimnym zespole atomów rubidu 87 są przedstawione w rozdziale siódmym. Istotną cechą przeprowadzonych eksperymentów jest niestosowanie procedur odejmowania szumu i przypadkowych koincydencji.

Spektakularnymi rezultatami są obserwacja kwantowych korelacji między rozproszonymi fotonami stokesowskimi i antystokesowskimi o czym świadczy wynosząca ponad siedemdziesiąt wartość uzyskanej wartości funkcji korelacji wzajemnej między nimi, wielomodowa pojemność pamięci - generacja fotonów w ponad sześciuset modach i czas przechowywania korelacji nieklasycznych sięgający pięćdziesięciu mikrosekund. O wadze tych osiągnięć świadczy ich publikacja w *Nature Communications*. Z kolei w rozdziale ósmym zademonstrowano wykorzystanie zimnoatomowej pamięci do eksperymentalnej generacji wielowymiarowego stanu splątanego i przeprowadzono analizę charakterystyk jego właściwości demonstrując sterowalność EPR. W tym kontekście przeprowadzono też porównawczą dyskusję kryteriów badania sterowalności, pokazując w szczególności, że entropowy świadek splątania może potwierdzać sterowalność w sytuacji, gdy kryterium oparte na wariancjach nie jest spełnione. Także rezultaty z tego rozdziału pracy były publikowane w *Physical Review A*.

Końcowy fragment rozprawy to podsumowanie, które nie tylko omawia w zwięzły sposób otrzymane rezultaty, ale zawiera też interesującą dyskusję perspektyw, które stwarza zrealizowany schemat pamięci dla przetwarzania informacji kwantowej. Byłbym tu ciekaw opinii Autora na temat ewentualnych możliwości i przydatności manipulacji wewnątrz pamięci; krótka wzmianka o manipulacjach magnetycznych w ostatniej części podsumowania wspomina o procesie tego typu.

Rozprawę zamykają trzy dodatki, poświęcone kolejno omówieniu formalizmu opisu rozpraszania Ramana w zakresie wykorzystywanym dla pokazania idei schematu konstrukcji pamięci, omówieniu różnych szczegółów doświadczalnych związanych ze sterowaniem eksperymentem i detekcją fotonów oraz omówieniu oryginalnego systemu filtrów zaprojektowanego dla minimalizacji szumów w eksperymentach z pamięcią ciepłatomową – opis tej oryginalnej konstrukcji był treścią osobnej publikacji w *Journal of Modern Optics*.

Powyższe omówienie rozprawy jest jedynie skrótowym, panoramicznym zasygnalizowaniem najważniejszych wyników. Lektura tekstu pozwala na stwierdzenie, iż rozprawa oparta jest o ogrom pracy koncepcyjnej i doświadczalnej na bardzo zaawansowanym poziomie. W tekście opisane są koncepcje i podstawy fizyczne wykonanych eksperymentów oraz szczegóły konstrukcyjne układów eksperymentalnych, warunki, w jakich prowadzono pomiary, procedury rejestracji i opracowania danych, krytyczna analiza efektów mających wpływ na jakość wyników, a także cenne uwagi porównawcze stawiające uzyskane wyniki na tle istniejącej literatury. Badania prezentowane w rozprawie wymagały opanowania przez Doktoranta różnych zaawansowanych układów i technik doświadczalnych oraz metodologii eksperymentalnej stawiających bardzo różnorodne wymagania w dziedzinie optyki i fizyki atomowej, a także odpowiedniego aparatu teoretycznego. Nie sposób tego wszystkiego zawrzeć w recenzji, ograniczę się więc jedynie do stwierdzenia, że jest to bardzo rzetelna i krytyczna prezentacja, która jednoznacznie przekonuje o bardzo wysokich kompetencjach i erudycji Autora w uprawianej tematyce.

Rozprawa skonstruowana jest w sposób przejrzysty i edytorsko efektowny. Czytelny układ materiału, podział na rozdziały i podrozdziały pozwalają na orientację w tekście, w którym widać dbałość o staranne jego przygotowanie. Zauważyłem jedynie niewielkie uchybienia, wymienię dla przykładu: kilka niedokładności we wzorach (jak brak indeksu w (3.23)), niezdefiniowanie częstości Rabiego dla klasycznej wiązki wobec pełnej definicji operatora Rabiego wcześniej, usterka we wzorze (3.1), gdzie symbol Δn wydaje się niekonsystentny z używanym w wielu miejscach symbolem wariancji czy oznaczenie symbolem częstości

Rabiego częstości pola przed wzorem (A.5)), „dwujęzyczny” opis fragmentu rysunku 7.2, czy pewna liczba literówek (w szczególności zamiast „kryterium wariacyjne” powinno być „wariancyjne”, co widać z odpowiednich formuł). Tego typu drobne i niezbyt liczne usterki nie mają znaczenia dla oceny całości rozprawy.

Jak widać z powyższego omówienia, rozprawę oceniam niezwykle wysoko, a jej lektura była dla mnie ciekawa i pouczająca. Miałem też przyjemność wysłuchania referatu magistra Michała Dąbrowskiego i odbycia z Nim dyskusji, co potwierdziło tę ocenę. Przygotowanie rozprawy postawiło przed Doktorantem bardzo wysokie wymagania eksperymentalne i teoretyczne, z którymi bardzo dobrze sobie poradził. O Jego dojrzałości naukowej świadczy widoczna staranność i ostrożność w pracy doświadczalnej oraz krytyczne podejście do otrzymywanych wyników, a także wspomniana już na początku umiejętność pracy w zespole.

Prowadzone i przedstawione przez Doktoranta badania dotyczą najbardziej aktualnych tematów w dziedzinie informatyki i optyki kwantowej. Prezentują one pionierskie osiągnięcia dotyczące wyrafinowanych realizacji eksperymentalnych kwantowej pamięci demonstrując możliwość generowania i przechowywania wielowymiarowego stanu splątanego pomiędzy pojedynczym fotonem a makroskopowym zespołem atomów wykazującego cechy paradoksu EPR. O randze naukowej rozprawy i uznaniu znaczenia uzyskanych wyników świadczy ich publikacja w czasopiśmie o bardzo wysokiej renomie. Nie mam wątpliwości, że rozprawa doktorska magistra Michała Dąbrowskiego spełnia z nadmiarem wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej Autora do publicznej obrony. Składam także wniosek o wyróżnienie rozprawy doktorskiej magistra Michała Dąbrowskiego.

Toruń, 25 stycznia 2019

