

Prof. dr hab. Daniel Lisak

09.12.2021

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu

Instytut Fizyki, Grudziądzka 5/7

87-100 Toruń

Recenzja rozprawy doktorskiej pana Adama Leszczyńskiego pt. „Przestrzenna modulacja fazy jako nastawny mechanizm transferu informacji między światłem, a pamięcią kwantową”

W niniejszej pracy Autor bada wybrane aspekty zastosowania chmury zimnych atomów ^{87}Rb posiadających strukturę energetycznych typu trójpoziomowego układu lambda do budowy pamięci kwantowej. Zaproponowano i zbudowano oryginalny układ doświadczalny i przebadano możliwości zapisu i odczytu informacji z pamięci. Kluczową rolę dla możliwości efektywnego zapisu i odczytu informacji z wielomodowej pamięci odgrywa tu dopasowanie fazowe, które Autor szczegółowo analizuje. Procesy zapisu i odczytu z pamięci bazują na nierezonansowym rozpraszaniu Ramana, które jest jedną z kilku stosowanych technik oraz efekcie Zeemana i wytworzeniu tzw. fikcyjnego pola magnetycznego za pomocą efektu ac-Starka. W połączeniu z zaproponowanym tu przestrzennym modulatorem amplitudy rozwiązanie to umożliwia uzyskanie rozdzielczości przestrzennej połączonej z możliwością szybkiego przełączania pola, co jest ważne dla selektywnego odczytu informacji z pamięci, gdzie pole to umożliwia przestrzenną modulację precesji spinów oscylujących w polu magnetycznym, zgodnie z efektem Zeemana. Wykorzystując tę technikę eksperymentalnie zaprezentowano możliwość kompensowania aberracji układu obrazującego bezpośrednio na falach spinowych. Układ przestrzennej modulacji fazy został połączony z pamięcią kwantową typu *gradient echo memory* (GEM), co zaowocowało konstrukcją unikalnego spektrometru cechującego się bardzo wysoką rozdzielczością rzędu 20 kHz w przedziale widma rzędu 1 MHz, odpowiadającym szerokości emisji linii atomowej. Spektrometr został dokładnie scharakteryzowany pod kątem wydajności, rozdzielczości i szerokości pasma. Ostatnia część rozprawy jest koncepcyjna i skupia się na propozycji oryginalnego układu umożliwiającego konwersję fal spinowych z różnych modów przestrzennych pamięci kwantowej na ciąg impulsów możliwych do przesyłania światłowodem jednomodowym. Proponowane rozwiązanie, bazujące na pierścieniowej wnęce optycznej i kontrolowanym kierunku wiązki odczytującej zapewne doczeka się niedługo weryfikacji doświadczalnej.

Rozprawa podzielona została na 7 rozdziałów, tworząc logiczną i spójną całość. Wstęp jasno opisuje motywację do podjęcia badań. Był to szereg pomysłów na wykorzystanie dopasowania fazowego do udoskonalenia wielomodowej pamięci kwantowej. Widoczna jest dobra orientacja Autora w mnogości potencjalnych zastosowań pamięci kwantowej, takich jak dystrybucja splątania kwantowego czy przetwarzanie informacji kwantowej z wykorzystaniem czasowej struktury światła. W związku sposób wyjaśniono tu również podstawowe pojęcia stosowane w dalszej części pracy z licznymi dobrze dobranymi referencjami. W kontekście oceny rozprawy cenny jest szczegółowy opis wkładu pracy Autora w prezentowane badania. Większość materiału została już opublikowana w pracach wieloautorskich. Rozdział 1.4 jasno wskazuje, że wkład pana Leszczyńskiego w badania był znaczący i



obejmował w zasadzie wszystkie aspekty pracy: budowę elementów układu doświadczalnego, pomiary, analizę i interpretację danych, jak i wkład w koncepcję dalszego rozwoju eksperymentów. Ten znaczący wkład potwierdzony jest też pierwszym i drugim miejscem na liście autorów w trzech artykułach bezpośrednio związanych z wynikami doktoratu.

Rozdział drugi wprowadza podstawową teorię oddziaływania atomów ze światłem, dla atomów posiadających trójpoziomowy układ λ . Przedstawiono opis ewolucji macierzy gęstości atomu trójpoziomowego i ewolucję światła w obecności pola sprzęgającego i spójności atomowej. Opis rozszerzono do układu λ z wieloma poziomami wzbudzonymi. Wprowadzony formalizm zastosowano do pokazania własności rozważanego układu. Pokazano, że, oddziaływanie światło-atomy można opisać jako złożenie transformacji obrotów na małych odcinkach czasoprzestrzennych, konwertujących fotony na wzbudzenia atomów. Rozważono też straty z powodu dekoherencji i absorpcji. Pokazano, że najważniejszym powodem strat w konwersji światła na spójność atomową jest poszerzenie natężeniowe związane z wiązką sprzęgającą i jednofotonowa absorpcja światła przez atomy. Opis teorii nie budzi zastrzeżeń. Jest zwięzły, dobrze dobrany do problematyki rozprawy i dowodzi, że Autor opanował wiedzę teoretyczną. Niemniej jednak dla czytelników mniej zaznajomionych z tematem przydały by się referencje do odpowiednich podręczników lub artykułów źródłowych, np. odnośnie równań Maxwella-Blocha.

W rozdziale trzecim, który opisuje pierwsze otrzymane wyniki doświadczalne, dokonano weryfikacji możliwości przestrzennego modulowania fazy fal spinowych. Po omówieniu od strony teoretycznej efektu przesunięcia ac-Starka opisano budowę układu doświadczalnego. Opis jest zwięzły i skupia się na głównych elementach układu. Zainteresowany czytelnik może tu poczuć pewien niedosyt informacji. O ile w artykułach naukowych taka prezentacja byłaby optymalna, to w rozprawie doktorskiej warto by pokazać również pełen schemat układu doświadczalnego. Na przykład brakuje opisu układu do wytwarzania chmury atomów rubidu. Zademonstrowano, że za pomocą zbudowanego układu doświadczalnego możliwa jest modulacja fazy przestrzennej precesji spinów atomów za pomocą przestrzennie zmodulowanego natężenia światła laserowego oraz uzyskano interferencje między różnymi fragmentami chmury atomowej. Zidentyfikowano też ograniczenia doświadczalne wynikające z niejednorodności wiązki laserowej.

W rozdziale czwartym zademonstrowano nakładanie na sygnał odczytu dowolnej jednowymiarowej fazy przestrzennej, na przykładzie precyzyjnego skompensowania fazy wprowadzonej do sygnału przez soczewkę cylindryczną. Osiągnięto wysoką wierność kompensacji, rzędu 95% przy niewielkiej utracie mocy (ok. 20%) w procesie kompensacji. Z Rys. 4.2 można nawet odnieść wrażenie, że obraz ze skompensowaną fazą wygląda lepiej od oryginału. Za pomocą interferencyjnego pomiaru zadanej fazy na kamerze bliskiego pola wykazano wierność jej kompensacji na poziomie 95%. Scharakteryzowano też stabilność fazy pomiędzy jej kolejnymi odczytami i zidentyfikowano główne źródła dekoherencji fazy w układzie doświadczalnym. Przedstawione analizy są bardzo cennym materiałem umożliwiającym określenie perspektyw dalszego zastosowania przestrzennej modulacji fazy i optymalizacji układu eksperymentalnego. W samym opisie układu brakuje mi trochę szczegółów technicznych, np. dotyczących wymaganych i uzyskanych dokładności częstotliwości, stabilności natężeń promieniowania laserowego i podobnie jak w rozdziale trzecim,

pozostałej części układu eksperymentalnego. Warto też zauważyć, że wierność kompensacji zdefiniowana równaniem (4.1) będzie zależała nie tylko od faktycznej jakości kompensacji ale też od rozmiaru obrazu na kamerze poza rozpatrywaną wiązką światła.

Rozdział piąty przedstawia pomysł wykorzystania pamięci kwantowej do budowy soczewki czasowej i na jej bazie spektrometru o wysokiej rozdzielczości. Jest to bardzo ciekawy i oryginalny pomysł w którym czas życia pamięci, ograniczony w praktyce termicznym ruchem atomów w chmurze, wyznacza rozdzielczość spektrometru. Zbadano zależność rozdzielczości i szerokości pasma od rozmiaru chmury atomów i od natężenia światła lasera sprzęgającego. W praktyce zademonstrowano, że można uzyskać widmo impulsu światła o szerokości spektralnej rzędu 1 MHz z rozdzielczością kilkudziesięciu kHz, zależną od wydajności. Choć wyższą rozdzielczość przy szerszym pasmie emisji można uzyskać stosując wnękę optyczną, to taki pomiar wymaga skanowania jej długości, a więc nie jest bezpośrednio konkurencyjny z otrzymanym tu wynikiem.

W szóstym rozdziale opisano koncepcję budowy konwertera fal spinowych na czasowy ciąg fotonów, które mogą być sprzężone do światłowodu jednomodowego. Jest to ważny element potencjalnego układu pamięci kwantowej umożliwiający przesłanie odczytanej informacji do kolejnych układów. Propozycja zastosowania pierścieniowej wnęki rezonansowej do zwiększenia wydajności selektywnego odczytu z pamięci kwantowej i korekcji dopasowania fazowego za pomocą gradientu pola magnetycznego połączone ze sterowaniem kątem wiązki za pomocą modulatora akustooptycznego wydają się obiecujące.

Od strony edytorskiej praca jest dobrze napisana, choć zwięzły styl z licznymi podsumowaniami raczej odpowiada stylowi krótkich artykułów niż pojedynczej rozprawy doktorskiej. Niemniej jednak nie jest to istotne dla zrozumienia prezentowanych wyników i ich znaczenia, a czasami nawet je ułatwia. W kilku rysunkach brakuje skali do danych prezentowanych w postaci mapy kolorów, np. rys. 3.2, 4.2. Zauważyłem pewną liczbę dość żargonowych sformułowań, skrótów myślowych i literówek, choć nie ma ich dużo. Poniżej kilka przykładów:

Sformułowanie „... koncepcje wokół których obraca się niniejsza praca” wydaje mi się dość niefortunne,

Brak opisu symboli ω_g , ω_h , ω_e przy równaniu (2.1).

Symbol skalarny dla wektora falowego „ k_s ”, str. 17 .

Brak zdefiniowania liczby kwantowej F , używanej na str. 21.

Czegoś brakuje w zdaniu „Po uformowaniu atomy są przez 15ms pompowane za pomocą do stanu $|g\rangle$...”, str. 32-33.

W zdaniu „Ponadto sygnał posiada średnicę jedynie 0,1 mm” (str. 61) chodzi raczej o średnicę wiązki sygnałowej.

Na Rys. 5.3a mamy mieszanę polsko angielską „sprężenie” i „signal” .

Na str. 65 brak rozwinięcia lub referencji do „platformy XMDS2”.

Podsumowując, wartość naukową rozprawy doktorskiej pana Adama Leszczyńskiego oceniam bardzo wysoko. Tematyka badań skupiona na praktycznej realizacji pamięci kwantowej jest bardzo aktualna i realizowana w wielu najlepszych ośrodkach światowych, z którymi skutecznie konkuruje grupa prof. Wasilewskiego. W rozprawie Autor w przekonywujący i dobrze uzasadniony naukowo

sposób przedstawił analizę zastosowania przestrzennej modulacji fazy do przekazywania informacji do i z pamięci kwantowej. Oryginalne pomysły zostały eksperymentalnie zrealizowane i gruntownie przebadane pod kątem zgodności z przewidywaniami. Dowodzi to zarówno opanowania wiedzy teoretycznej, jak i umiejętności rozwiązywania specyficznych problemów doświadczalnych. Oczywiście sukces tych badań był możliwy dzięki pracy w bardzo dobrej grupie ale szczegółowy opis wkładu poszczególnych współautorów jasno wskazuje, że udział pana Leszczyńskiego był tu bardzo istotny. Sama prezentacja rozprawy również stoi na wysokim poziomie, a nieliczne zauważone niedociągnięcia nie obniżają wysokiej wartości naukowej rozprawy. Równoległe z rozprawą badania zostały opublikowane w renomowanych czasopismach naukowych. Biorąc pod uwagę przedstawione powyżej argumenty stwierdzam, że rozprawa spełnia wszystkie wymagania odnośnie oryginalności i jakości badań i ich prezentacji stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ze względu na wartość naukową i potencjalny wpływ otrzymanych wyników na rozwój praktycznych zastosowań fizyki kwantowej wnoszę też o wyróżnienie rozprawy.

Uzasadnienie wniosku o wyróżnienie: Badania zrealizowane w ramach doktoratu pana Leszczyńskiego skutkowały opublikowaniem trzech bardzo dobrych artykułów, które potencjalnie mogą być ważnym krokiem w zastosowaniach optyki kwantowej. Publikacja w Optics Letters z 2018 r. prezentuje nowe możliwości szybkiej i precyzyjnej przestrzennej manipulacji fikcyjnym polem magnetycznym za pomocą efektu ac-Starka, w stosunku do tradycyjnego podejścia z wykorzystaniem jedynie pola magnetycznego. Pokazano, że korekcja niejednorodności wiązki laserowej może być zrealizowana modulatorem przestrzennym światła, co skutkuje kilkukrotnym wydłużeniem czasu koherencji spinowej, a także, że można w ten sposób przenieść wybrany wzór rozkładu natężeń na precesję spinów atomowych, co w konsekwencji pozwala na zapis i odczyt informacji z pamięci kwantowej. W publikacji z Physical Review Applied z 2019 r. pokazano zastosowanie przestrzennego modulatora fal spinowych jako układu korygującego fazę, w szczególności mogącego służyć do korekcji wiązki zdeformowanej przez złożony układ optyczny. Otwiera to szerokie pole do potencjalnych zastosowań w optyce kwantowej. W pracy z Optica z 2020 zademonstrowano po raz pierwszy metodę wysokorozdzielczego obrazowania w polu dalekim dla układów atomowych mogących stanowić pamięć kwantową. Osiągnięto też poziom szumów umożliwiający zastosowania do operowania w reżimie pojedynczych fotonów. W odróżnieniu od wcześniejszych rozwiązań wymagało to uzyskania znacznie wyższej rozdzielczości widma dla wąskiego pasma, co udało się osiągnąć, korzystając z rozwiniętej w ramach doktoratu metody przestrzennej modulacji fal spinowych.

