

Ocena rozprawy doktorskiej magistra Adama Leszczyńskiego
„Przestrzenna modulacja fazy jako nastawny mechanizm transferu informacji między
światłem a pamięcią kwantową”

Rozprawa doktorska magistra Adama Leszczyńskiego wpisuje się w ramy dynamicznie rozwijających się i uprawianych w wielu ośrodkach naukowych na świecie badań nad informacją kwantową. Waga i atrakcyjność badań w tej dziedzinie motywowana jest z jednej strony ich fundamentalnym znaczeniem poznawczym, a z drugiej fascynującymi, już nie tylko potencjalnymi, perspektywami aplikacyjnymi. Praktyczna konstrukcja układów, w których możliwa jest efektywna i wydajna realizacja teoretycznych schematów i protokołów informatyki kwantowej opartych o wykorzystanie subtelnych idei kwantowomechanicznych jest współcześnie ważnym i trudnym wyzwaniem. Kluczowym elementem kwantowego przetwarzania informacji jest pamięć kwantowa. Pośród różnych implementacji pamięci kwantowych ważne miejsce zajmuje pamięć wykorzystująca układ zimnych atomów rubidu. Informacja zakodowana w stanie pola świetlnego zapisywana i przechowywana jest w chmurze atomów w postaci kolektywnych wzbudzeń atomowych, fal spinowych, powstających w procesie rozpraszania Ramana oddziaływania atomów z fotonami z wykorzystaniem konfiguracji lambda, kiedy to generowana jest przestrzennie zmienna spójność atomowa pomiędzy dolnymi stanami układu. Tak zapisaną informację można odzyskać konwertując ją ponownie na światło. Badania opisane w rozprawie doktorskiej magistra Adama Leszczyńskiego dotyczą nowych, wykorzystujących przestrzenną modulację fazy, narzędzi subtelnego i precyzyjnego sterowania funkcjami tak zbudowanej wielomodowej pamięci.

W tym jednym zdaniu zawarta jest zapowiedź omówionego w rozprawie rozległego, wymagającego i systematycznie zrealizowanego programu badawczego, którego wyniki trudno przecenić. Przedstawia on ideę wykorzystania dynamicznego (ac) efektu Starka do modulacji przestrzennej fazy fal spinowych i jej realizację w różnych konfiguracjach eksperymentalnych pokazując nowe, wieloaspektowe możliwości sterowania przetwarzaniem i konwersją informacji oraz otwiera perspektywy ich dalszego wykorzystania. Uważam, że jest to program bardzo aktualny i wartościowy, został zrealizowany z sukcesem, a prezentowana rozprawa zawiera ciekawą, systematyczną jego prezentację i dyskusję. O wysokiej randze naukowej rozprawy świadczy też fakt, że znaczna część przedstawionych w niej wyników była podstawą trzech wieloautorskich artykułów w renomowanych czasopismach: *Optics Letters*, *Physical Review Applied* i *Optica* opublikowanych w latach 2018-2020. W jednym z nich Autor rozprawy był pierwszym, a w dwóch drugim autorem.

W siedmiu numerowanych rozdziałach rozprawy omówione są kolejne elementy realizacji tego programu.

Rozdział pierwszy wprowadza w tematykę i anonsuje zawartość rozprawy. Wartościowym pomysłem redakcyjnym jest wyodrębnienie części, w których zwięźle wyliczone są motywacje oraz koncepcje pracy. Ich lektura pozwala od razu rzeczowo widzieć tło podjętej problematyki oraz zagadnienia, które należało rozwiązać realizując założony cel badawczy. Bardzo korzystne wrażenie sprawia końcowy fragment rozdziału, gdzie pan Adam Leszczyński precyzyjnie wskazuje i opisuje swój udział w uzyskaniu rezultatów, na podstawie których powstała rozprawa. Rezultaty te są wynikiem pracy zespołowej, co jest dziś wręcz konieczne dla skutecznego prowadzenia zaawansowanych i złożonych badań doświadczalnych na światowym poziomie. Bardzo dobrze świadczy o Doktorancie zarówno wykorzystanie z sukcesem możliwości, jakie stwarzała praca w zespole Laboratorium

Pamięci Kwantowych pod kierunkiem profesora Wojciecha Wasilewskiego, gdzie takie właśnie badania są prowadzone, jak też umiejętność oceny własnego w nie wkładu.

Rozdział drugi to przegląd elementów teoretycznego opisu mechanizmów leżących u podstaw realizacji wielomodowej pamięci kwantowej w zespole atomów oddziałujących z fotonami w konfiguracji lambda. Zwięźle, ale wystarczająco omówione są w nim zagadnienia istotne z punktu widzenia efektywności zapisu i odczytu sygnału optycznego do i z przestrzennie zmiennej spójności atomowej.

Kolejne cztery rozdziały prezentują oryginalne wyniki badawcze uzyskane podczas pracy nad rozprawą. Już w tym miejscu powiem, że realizacja programu wymagała wielkiej pracy koncepcyjnej, a także zaplanowania i zrealizowania bardzo złożonych, wyrafinowanych eksperymentów oraz opracowania wyników. Rozprawa omawia ich idee, podstawy fizyczne, szczegóły konstrukcyjne i opisy przeprowadzenia. Jest to z natury rzeczy obszerny, wielowątkowy i zawierający wiele szczegółowych informacji materiał, którego zreferowanie w recenzji muszę ograniczyć do ledwie skrótowego zasygnalizowania wybranych wyników, co zilustruje bogactwo problemów, które rozprawa dyskutuje.

Rozdział trzeci to dyskusja idei leżącej u podstaw realizacji interfejsu omówionych w dalszych częściach rozprawy. Jest nią modulacja fazy spójności atomowej z rozdzielczością przestrzenną z wykorzystaniem przesunięcia ac-Starka oraz doświadczalna jej realizacja. Pokazano, kiedy oddziaływanie atomów próbki ze znacznie odstrojoną wiązką światła laserowego może być interpretowane i wizualizowane jako oddziaływanie momentu magnetycznego układu atomowego z fikcyjnym polem magnetycznym, którego wielkość zależy od natężenia wiązki świetlnej. Oświetlenie układu atomów wiązką Starkowską o niejednorodnym rozkładzie natężenia przekłada się w tym obrazie na niejednorodności pola magnetycznego, w którym precesują spiny atomowe. Poprzez użycie układu kształtującego przestrzenny rozkład natężenia wiązki z wykorzystaniem przestrzennego modulatora światła (SLM) można korygować te niejednorodności wpływając na ewolucję układu spinów. Rysunek 3.2 stanowi wymowną ilustrację skuteczności takiego postępowania: dzięki „ujednorodnieniu” natężenia wiązki Starkowskiej czas zaniku sygnału precesji spinu w układzie zimnych atomów rubidu jest kilkakrotnie dłuższy niż bez takiej korekcji. Względna łatwość manipulacji rozkładem natężenia wiązki Starkowskiej stanowi o praktycznych walorach tej metody dla prowadzenia subtelnych operacji nad fazami spinów w poszczególnych fragmentach chmury atomów, czego przykład też został zademonstrowany poprzez wywołanie sekwencji zaniku i odrodzenia sygnału precesji. Te efektowne, eleganckie i istotne wyniki zaowocowały pracą w *Optics Letters*, której Doktorant jest pierwszym autorem. Stały się one punktem wyjścia dla realizacji operacji fazowych w pamięci kwantowej opartych na wykorzystaniu efektu ac-Starka. Zasygnalizuję tu uwagę dotyczącą zauważonej pewnej niekonsystencji w redakcji fragmentu tej części. Fikcyjne pole magnetyczne zdefiniowane na podstawie przeprowadzonej dyskusji i wzoru (3.3) miałoby kierunek z . Kierunek ten – w przypadku wiązki biegnącej wzdłuż z – jest tożsamy z kierunkiem wiązki. Tymczasem w rozprawie w następującym bezpośrednio potem wzorze (3.4) pojawia się „wersor wskazujący kierunek propagacji światła”, ale według schematu układu doświadczalnego z Rys. 3.1. byłby to kierunek osi x . Czy więc wzór (3.4) wiążący w rozprawie kierunek wektora fikcyjnego pola magnetycznego z kierunkiem wiązki światła nie byłby wart bardziej precyzyjnego komentarza nawet za cenę pewnego rozbudowania tekstu?

Rozdział czwarty przedstawia wykorzystanie przestrzennie zmiennego dynamicznego efektu Starka do skonstruowania przestrzennego modulatora fazy fal spinowych w układzie zimnych atomów ^{87}Rb . Dobitną demonstrację skuteczności i możliwości, jakie taka modulacja otwiera, pokazuje już pierwszy, pomysłowy i oryginalny eksperyment, który, poprzez użycie odpowiednio przygotowanej wiązki Starkowskiej prowadzące do kontrolowanej modyfikacji fazy przestrzennej fali spinowej, realizuje kompensację zniekształceń aberracyjnych sygnału odczytu z pamięci. Modulator wprowadza tu dodatkowy profil fazowy do fali spinowej, co w

znaczący sposób koryguje zniekształcenie obrazu wywołane ustawieniem na drodze sygnału soczewki cylindrycznej. W spektakularny sposób pokazują to obrazy sygnału odczytu rejestrowane w dalekim polu (rysunki 4.2 i 4.3), a także wydajność i wierność takiej kompensacji szacowane odpowiednio na 80 i 96 procent. Spośród innych zbadanych charakterystyk i możliwości tej metody modulacji fazy spójności atomowej wspomnę jeszcze o demonstracji subtelnego efektu sekwencyjnego odczytu z dodatkową modulacją pomiędzy kolejnymi odczytami z pamięci. Wyniki te były opublikowane w artykule w *Physical Review Applied*.

W rozdziale piątym zaproponowano i zrealizowano ideę konstrukcji spektrometru poprzez połączenie przestrzennej podłużnej modulacji Starkowskiej fal spinowych z pamięcią gradientową GEM, w której zmienne liniowo wzdłuż chmury atomów pole magnetyczne powoduje zależną od położenia zmianę rozszczepienia Zeemanowskiego w układzie λ . Zapis różnych składowych spektralnych sygnału zachodzi więc jedynie w ograniczonym przez spełnienie warunków dwufotonowego rezonansu segmencie chmury atomowej, a więc różne składowe spektralne są odwzorowywane w zależne od położenia spójności atomowe. Poprzez odpowiednią modulację częstości wiązki sprzęgającej oraz zastosowanie modulatora fali spinowej zapisanej w pamięci układ pamięci działa jak układ dwóch soczewek czasowych, pomiędzy którymi odbywa się swobodna „propagacja” czasowa. Pozwala to zrealizować spektrometr umożliwiający bardzo wysoką w tego typu pomiarach rozdzielczość (około 20 kHz) przy ultra wąskich pasmach (rzędu MHz) i pozwalający na pomiary sygnałów na poziomie pojedynczych fotonów. Jest to bardzo istotne osiągnięcie, co dobrze ilustruje rysunek 5.1 pokazujący jego usytuowanie na tle charakterystyk innych metod obrazowania w domenie czasowej. Opublikowanie tych wyników w renomowanym czasopiśmie *Optica* świadczy o ich wadze. Jako czytelnik całości rozprawy żałuję tylko, że Autor nie powiedział wprost w tekście, dlaczego w realizacjach doświadczeń opisanych w rozdziałach 4 i 5 do budowy pamięci wykorzystano układy λ skonstruowane na innych stanach atomowych. Rozdział szósty przedstawia oraz drobiazgowo analizuje ciekawą propozycję teoretyczną selektywnej konwersji na ciągi fotonów fal spinowych z różnych modów przestrzennych pamięci opartą na połączeniu pamięci GEM z pierścieniową wnęką rezonansową, wewnątrz której znajduje się chmura atomów. Dzięki odpowiedniej geometrii ustawienia eksperymentu wyemitowany foton odczytu jest sprzężony z modem wnęki, która jednocześnie jest sprzężona z jednomodowym światłowodem, do którego trafia foton. Realizowane w taki sposób wydajne sprzężenie ciągu fotonów ze światłowodem może mieć niebagatelne znaczenie dla przesyłu informacji kwantowej. W rozdziale tym opisany jest schemat działania konwertera oraz pokazane wyniki symulacji odczytu fali spinowej.

Ostatni, krótki rozdział siódmy podsumowuje zbiorczo otrzymane rezultaty, a rozprawę zamyka bardzo obszerna, licząca 135 pozycji bibliografia. Daty publikacji zdecydowanej większości z nich są nieodległe, co wskazuje, jak aktywnie uprawiana jest tematyka, w której sytuuje się rozprawa pana Adama Leszczyńskiego.

Jak już zapowiedziałem we wcześniejszej części recenzji, przedstawione wyżej omówienie zawartości rozprawy mogło być zaledwie skrótowym, niejako ilustracyjnym zasygnalizowaniem przeprowadzonych i badań i osiągniętych wyników. Stoi za nimi ogrom oryginalnej pracy koncepcyjnej oraz bardzo zaawansowane i wymagające realizacji doświadczenia. Przeprowadzenie z sukcesem tych badań wymagało opanowania najbardziej nowoczesnego warsztatu i metodologii eksperymentalnej współczesnej optyki i fizyki atomowej oraz odpowiedniej wiedzy teoretycznej. Przekonuje to o wysokich kompetencjach i wiedzy Doktoranta w uprawianej dziedzinie.

Konstrukcja rozprawy jest przejrzysta, z czytelnym podziałem na rozdziały i podrozdziały, co ułatwia orientację w tekście. Jest to tym bardziej ważne i pomocne, że znaczące jego

fragmenty referują, co zrozumiałe, szczegółowe elementy procedur doświadczalnych. Tekst mimo edytorskiej staranności nie jest wolny od drobnych uchybień; dla ilustracji ich rodzaju wymienię kilka zauważonych. Nazwisko Lindblad napisane jest błędnie (str. 15 i 17), pojawiają się odwołania w podpisach niektórych rysunków do kolorów linii, które są widoczne jedynie w wersji elektronicznej tekstu, niezbyt zręczne czy nazbyt żargonowe sformułowania, jak „diagram modułu kwadrat” (podpis rys. 5.2), „komponenty spektralne są mapowane na komponenty przestrzenne” (str. 60) czy „oddziaływanie z przejściem” (str. 21), brak na rys. 4.1 oznaczenia kierunków osi, do których odwołuje się tekst na str. 42, pomyłka w indeksie we wzorze (3.2) czy pewna liczba literówek i niedokładności interpunkcyjnych. Tego typu usterki nie powodują jednak kłopotów z percepcją tekstu i nie mają znaczenia dla oceny całości rozprawy.

Przedstawione omówienie rozprawy doktorskiej magistra Adama Leszczyńskiego pokazuje, iż rozprawę tę oceniam zdecydowanie pozytywnie. Stawia ona i z sukcesem rozwiązuje oryginalny, interesujący i ważny problem z bardzo aktualnej dziedziny badań nad pamięciami kwantowymi. Wymagało to od Doktoranta szerokiego i głębokiego przygotowania teoretycznego oraz opanowania bardzo trudnego warsztatu pracy eksperymentalnej na najwyższym poziomie, a także umiejętności pracy w zespole. Dodam, iż miałem niedawno możliwość wysłuchania referatu i dodatkowych wyjaśnień na temat rozprawy, co dodatkowo potwierdziło wysoką ocenę dojrzałości i samodzielności naukowej Kandydata. Nie mam wątpliwości, że rozprawa doktorska magistra Adama Leszczyńskiego spełnia wszystkie wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Uważam również, iż ranga osiągnięcia naukowego przedstawionego w rozprawie uzasadnia wystąpienie o uznanie jej za wyróżniającą. Zaproponowana, opisana i zademonstrowana została nowa metoda umożliwiająca subtelne operacje fazowe dotyczące transferu i przetwarzania informacji kwantowej i z jej wykorzystaniem zrealizowane zostały układy pozwalające na kontrolowaną przestrzenną modulację fazy fal spinowych przechowujących tę informację. Między innymi pokazano i drobiazgowo zbadano możliwości przestrzennego modulatora fali spinowej dla kompensacji aberracji w układzie optycznym oraz jego wykorzystania do konstrukcji spektrometru o rozdzielczości rzędu kilkudziesięciu kiloherców dla pasma rzędu megaherców, a także zaproponowano konstrukcję konwertera fal spinowych z różnych modów przestrzennych na ciągi fotonów sprzęganych do światłowodu jednomodowego. Są to spektakularne, pionierskie i ważne w perspektywie dalszych badań i zastosowań osiągnięcia w dziedzinie prac nad wielomodowymi pamięciami kwantowymi zbudowanymi na układzie zimnych atomów. O naukowej randze i uznaniu dla tych rezultatów świadczą publikacje w czasopiśmie o bardzo wysokiej renomie.

W podsumowaniu wnoszę o dopuszczenie magistra Adama Leszczyńskiego do publicznej obrony rozprawy doktorskiej oraz wnioskuje o wyróżnienie rozprawy.



Toruń, 13 grudnia 2021