



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

DZIEKANAT WYDZIAŁU FIZYKI
WPŁYNĘŁO

2019 -01- 29 *MB.*

Szymon Pustelny

Zakład Fotoniki

Instytut Fizyki

Uniwersytet Jagielloński

Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków

Tel: +48 12 663 4691

E-mail: pustelny@uj.edu.pl

Kraków, 23 stycznia 2019

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana Michała Dąbrowskiego zatytułowanej „Paradoks EPR w ciepło- i zimnoatomowych pamięciach kwantowych”

Otrzymana przeze mnie do recenzji rozprawa doktorska Pana Michała Dąbrowskiego zatytułowana „Paradoks EPR w ciepło- i zimnoatomowych pamięciach kwantowych” już na pierwszy rzut oka sugerowała, że będzie to praca inna niż wszystkie, z którymi miałem do tej pory do czynienia. Zgrabny książkowy format, estetyczna okładka oraz przejrzysty tekst z elegancko przygotowanymi rysunkami sugerował, że lektura rozprawy stanowić będzie bardzo przyjemne zajęcie. Zwłaszcza, że same badania prowadzone były w grupie prof. Wojciecha Wasilewskiego, który jest światowym liderem badań nad optyką kwantową.

Praca Pana Dąbrowskiego zorganizowana jest w sposób przejrzysty i zgrabny. Już na początku Autor opisuje strukturę pracy, pokrótce streszczając materiał przedstawiony w kolejnych rozdziałach. Często takie streszczenie może okazać się nieocenione przy pisaniu recenzji, gdyż zmniejsza wysiłek recenzenta. Nie tym razem jednak. Ja postanowiłem pracę przestudiować bardzo dokładnie. Dlatego też dla mnie ważniejszy we wstępie był fragment, w którym Autor opisywał swój wkład w prowadzone eksperymenty. W badaniach realizowanych przez wiele osób często bardzo trudno jest określić wkład autorski określonych osób. Pan Dąbrowski zrobił to jednak wzorowo. Bardzo skrupulatnie określił zarówno swój wkład, jak i wkład innych osób zaangażowanych w badania.

Za wartościowe należy również uznać osadzenie opisywanych badań w szerszej perspektywie. We wstępnej części pracy Autor porusza kluczowe aspekty badań, które mają w przyszłości prowadzić do stworzenia procesora kwantowego. Są nimi pamięć kwantowa i źródło pojedynczych fotonów generowanych na żądanie, ale także, istotny z punktu widzenia tych zastosowań, efekt splątania kwantowego i paradoks Einsteina-Podolskyego-Rosena. W swoim krótkim przeglądzie Doktorant starał się przedstawić opisywane zagadnienie szeroko wspominając nie tylko o „swoich” badaniach, ale również o innych pracach realizowanych w tej dziedzinie. Choć sam rozdział jest mocno skompresowany, to jednak czytelnik nie pozostaje pozostawiony samemu sobie, gdyż Autor okrasza przykłady poszczególnych badań reprezentacyjny przykładami literaturowymi.

Podczas lektury tego fragmentu mój sprzeciw wzbudziło jednak stwierdzenie Autora, że „Odkąd naukowcy potrafią wytwarzać skomplikowane struktury fotoniczne przy użyciu technologii druku femtosekundowego [55], prawdopodobnie ostatnia *fundamentalna przeszkoda budowy procesora kwantowego została usunięta*” (fragment kursywą został sparafrazowany). Szczerze należy przyznać, że dużo bardziej prawdopodobnej jest wykorzystanie do tego celu nie technik



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

optycznych a litografii czy implementacji jonowej (będą optykiem przyznając to z pewnym smutkiem). Techniki optyczne nie będą do tego celu wykorzystywane ze względu na istniejące ograniczenia dyfrakcyjne i związaną z nimi niemożliwością spełnienia wymagań precyzji wytwarzania takich struktur.

Kluczowym z punktu widzenia pracy jest kolejny rozdział poświęcony splątaniu kwantowemu i paradoksowi Einsteina, Podolskiego i Rosena (EPR). Autor opisuje w nim pojęcia splątania kwantowego, sterowalności i nielokalności Bella oraz określa kryteria istnienia układów w tych stanach. W tym celu wprowadza dwa rodzaje kryteriów pozwalających na realizację tego celu: kryterium wariacyjne i kryterium entropowe. Prezentując oba kryteria Autor dyskutuje różnice między nimi oraz zwraca uwagę na większą uniwersalność kryterium entropowego. Z punktu widzenia recenzenta, w tym rozdziale Autor staje się nieco ofiarą własnego sukcesu. Czytając bowiem powyższy fragment zapomina się o tym, że to rozprawa doktorska, a nie eleganckim podręcznikiem do kwantowej teorii informacji. Dlatego też nierzadko pozostaje wrażenie niedosytu, z uwagi na przeskoki myślowe, pomijające szereg kroków pośrednich, które ułatwiłyby zrozumienie prezentowanego materiału. Takie wrażenie można mieć np. czytając fragment dotyczący wyższości kryterium entropowego nad wariacyjnym czy podczas przywoływania różnic warunków istnienia wariacyjnego i entropowego świadka splątania dla stanów nieseparowalnych i sterowalnych. Rzecz jasna nie jest to jednak zarzut do pracy, która nie ma na celu przekazania podręcznikowej wiedzy w tej materii.

Na koniec warto zwrócić uwagę na fakt, że choć sam rozdział poświęca nielokalność mechaniki kwantowej, nie sposób uniknąć odczucia o osadzeniu treści w lokalnej rzeczywistości. Bo jak inaczej zinterpretować przywołanie przez Autora postaci Bogdana i Czesława jako osób, które obok Alicji zaangażowane są w transmisję informacji kwantowej (choć czasem cechuje ich nieufność).

Ostatni teoretyczny fragment pracy poświęcony jest opisowi procesów generowania pojedynczych fotonów oraz fal spinowych w ośrodku. Rzeczą, która nie jest zupełnie oczywista dla czytelnika jest pytanie na ile stworzony formalizm dotyczący kolektywnych sprzężeń spinowych, wykorzystujących operatory wzbudzeń kolektywnych b jest autorskim dziełem Pana Dąbrowskiego, a na ile jest to formalizm powszechnie znany. Co prawda Autor, jeszcze na początku pracy pisze, że „Rozdział ten zawiera informacje zwarte w rozprawie doktorskiej R. Chrapkiewicza...”, ale w tym akurat przypadku nie precyzuje co to dokładnie znaczy. Było mi trudno samemu znaleźć odpowiedź na to pytanie, gdyż praca dr. Chrapkiewicza jest treściwa rozprawą, z którą zapoznać się nie miałem czasu. Jeśli jednak sam pomysł jest autorskim pomysłem Pana Dąbrowskiego (lub grupy) to chciałbym bardzo podkreślić (pochwalić) elegancję zaprezentowanego podejścia.

Podczas czytania tego fragmentu narzuciło mi się pytanie, które również powróciło w dalszej części lektury, tj. na ile wytworzenie w ośrodku szeregu fal spinowych jest niezależne. Czy nie prowadzi



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

ono do interferencji fal, a w konsekwencji nie ma wpływu na proces rozpraszania fotonów przy odczycie czy na same własności rozpraszanych fotonów.

Po części pracy poświęconej teoretycznemu opisowi badań prowadzonych w ramach doktoratu, Autor przechodzi do zasadniczego tematu pracy jakim są badania eksperymentalne. Opis ten podzielony jest na dwie zasadnicze części dotyczące eksperymentów ciepłatomowych i zimnoatomowych. W tym pierwszym kontekście Pan Dąbrowski pracował z parami ^{87}Rb umieszczonymi w szklanych komórkach spektroskopowych w obecności 1 Tr Kr będącego gazem buforowym.

W rozdziale zatytułowanym „Pamięć kwantowa w ciepłych parach atomowych” Autor opisuje wstępne eksperymenty, które pozwalają na rejestrację stoksowskich i antystokesowskich fotonów generowanych w parach atomowych w procesie Ramana podczas zapisu i odczytu światła. We fragmencie tym prezentuje on m.in. wyniki korelacji kątowych pomiędzy rozproszonymi fotonami dyskutując zarówno zalety, jak i ograniczenia takiego procesu. Prezentowane wyniki wskazują, że na obserwowane korelacje składają się zarówno procesy związane z zapisem i odczytem fotonów, jak również przypadkowe szumy tła. To właśnie te przypadkowe korelacje były podstawowym problemem, który w dalszej perspektywie skłonił grupę prof. Wasilewskiego do zmiany ośrodka atomowego na ultrazimne gazy.

Z punktu widzenia eksperymentatora zarówno ten, jak i późniejsze rozdziały pozostawiają pewien niedosyt. Wiąże się on z dość lapidarnym potraktowaniem niezmiernie istotnego dla prac doświadczalnych, a złożonego w przypadku opisywanych badań, układu eksperymentalnego. Choć Autor wspomina o kluczowych elementach swoich układów, robiąc to zarówno w głównej części pracy, jak i w dodatkach, to jednak wiele ważnych elementów układu pozostaje tajemnicą. Szkoda. Uważam, że rozprawa doktorska jest tym właśnie miejscem, w którym powinny znaleźć się bardzo dokładne opisy eksperymentu, na które w publikacjach czy podczas seminariów zazwyczaj nie ma miejsca. Jednocześnie rozumiem zamysł Autora, który nie chciał „męczyć” czytelnika zbyt dużą ilością szczegółów.

Jedną z rzeczy, których zabrakło mi w tej części pracy była informacja o wykładniczo rosnącej liczbie rozpraszanych fotonów, co Autor tłumaczy „procesem rozpraszania bozonowego”. Ponieważ nie rozumiem co ma na myśli, chciałbym prosić go o wyjaśnienie na czym ów proces polega i jak dochodzi do wykładniczego wzrostu liczby rozpraszanych fotonów w funkcji natężenia wiązki pompującej.

Prowadząc swoje rozważania Pan Dąbrowski opisuje badane układu jako pamięć kwantową. Choć nie ulega wątpliwości, że w układzie zapisywany jest pojedynczy foton, to jednak nie mam 100% przekonania, że już na tym etapie można nazwać ten układ pełnoprawną pamięcią kwantową. Z mojej perspektywy byłoby to możliwe, gdyby rzeczywiście rejestrowana i odtwarzana była jednofotonowa wiązka zapisująca. Gdyby powiódł się taki właśnie eksperyment, wtedy nazwa pamięć kwantowa byłaby w pełni uprawniona. Nie ulega jednak wątpliwości, że prezentowany



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny

Zakład Fotoniki

Instytut Fizyki

Uniwersytet Jagielloński

Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków

Tel: +48 12 663 4691

E-mail: pustelny@uj.edu.pl

układ może być traktowany jako bardzo efektywny generator fotonów „na żądanie”. Umiejętność generowania takich fotonów jest kluczowa z punktu widzenia kwantowych protokołów kryptograficznych czy kwantowej teorii informacji. Choć na pierwszy rzut oka w tego typu zastosowaniach problematyczna mógłby się wydawać przypadkowy rozrzut kierunków rozpraszanych fotonów, Pan Dąbrowski opisuje eksperyment, w którym kierunek ten mógł być w pewnym stopniu kontrolowany (przez regulację kierunku wiązki odczytującej). Otwiera to możliwość dynamicznej kontroli kierunku emitowanych fotonów i kierowania ich zawsze w to samo miejsce (np. do włókna światłowodowego), a przez daje szansę na szereg zastosowań proponowanego schematu.

Z punktu widzenia protokołów kwantowego przetwarzania informacji i komunikacji kwantowej kluczowa jest możliwość generowania splątania fotonów, w tym m.in. takich, które cechuje takie splątanie w zmiennych ciągłych. To właśnie badaniu splątania oddał się Autor na ostatnim etapie prac z gazami w temperaturze pokojowej. Badania te opierały się o analizę koincydencji przestrzennych fotonów rozpraszanych z wiązki, a obserwowanych w polu bliskim i dalekim (w i poza ogniskiem soczewki). Taki sposób detekcji pozwala na dostęp do informacji o położeniu, i pędzie rejestrowanych fotonów, a przez to na badanie korelacji pomiędzy stanem hybrydowym foton antystokowski-fala spinowa. Zademonstrowane przez Autora istnienie korelacji pomiędzy położeniami oraz antykorelacji pomiędzy pędami rozpraszanych fotonów pozwoliło na zbadanie sterowalności tworzonego stanu hybrydowego. W oparciu o stworzone mapy położenia x - X i y - Y oraz pędów p_x - P_x i p_y - P_y , gdzie małe litery odpowiadają fotonowi stokesowskiemu zaś duże antystokesowskiemu, określono iloczyn wariacji tych rozkładów. Pozwoliło to na obliczenie wariacyjnego świadka splątania, a w konsekwencji na określenie czy rozpraszane fotony, a przez to układ hybrydowy foton-fala spinowa spełnia kryterium nieseparowalności i sterowalności. Dodatkowo, opóźniając procesu generacji fali spinowej oraz odczytu możliwe było analiza procesów zaniku istniejących korelacji. Przedstawione przez Autora wyniki pomiarowe dowodzą, że układ hybrydowy „spełnia” paradoks EPR w czasach do ok. 5 μ s opóźnienia pomiędzy zapisem i odczytem. Nawet jednak dla czasów dłuższych układ wciąż pozostaje nieseparowalny, choć iloczyn wariacji liniowo wzrasta z czasem. Zgodnie z twierdzeniem Autora, proces ten jest skutkiem dyfuzji atomów w komórce.

Podczas swojej analizy koincydencji Autor ucieka się do dwóch zabiegów. Pierwszym z nich jest odjęcie tła pochodzącego od koincydencji przypadkowych, drugim całkowanie wzdłuż kierunków ortogonalnych celem graficznego przedstawienia pomiarów. Choć rozumiem potrzeby przeprowadzenia tego drugiego procesu (prezentacja danych pomiarowych), to czy istnieje jednak dowód, że proces taki nie prowadzi do deformacji obserwowanych rozkładów. Sugestia, że problem taki może się pojawić tkwi w danych przedstawionych w Tabeli 6.1. Zaskakuje mnie bowiem, że wariancja w jednej ze składowych przestrzennych (kierunek x) jest wyższe niż wariancja na wektorach? Chciałbym prosić Autora o ustosunkowanie się do tego faktu.



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny
Zakład Fotoniki
Instytut Fizyki
Uniwersytet Jagielloński
Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków
Tel: +48 12 663 4691
E-mail: pustelny@uj.edu.pl

Z uwagi na problemy pojawiające się w pomiarach z ciepłymi atomami oraz ograniczenia wynikające z ruchu termicznego atomów, grupa prof. Wasilewskiego, i sam Pan Dąbrowski podjęli decyzję o rozpoczęciu badań z atomami chłodzonymi do ultraniskich temperatur przy pomocy pułapek magneto optycznych. Stworzony układ eksperymentalny przypominał, pod wieloma względami, wcześniejsze doświadczenia. Podstawowa różnica wiązała się z układem chłodzenia i przygotowania (pompowania optycznego) atomów. Inna różnica, która być może jednak jest tylko edytorską pomyłką, to pojawiające się w opisie eksperyment stwierdzenie, że rozpraszanie antystokesowskie było rezonansowe. Wydaje się, że takie rozwiązanie byłoby generatorem problemów, więc jest to prawdopodobnie lapsus językowy.

Zmiany w układzie eksperymentalnym miały olbrzymie znaczenie dla jakości uzyskiwanych wyników w tym przede wszystkim na poprawę stosunku sygnału do szumu. Szczerze powiedziawszy jednak muszę przyznać, że nie jest dla mnie do końca jasne czy poprawa ta wynikała ze zmniejszenia fluorescencji z termicznych atomów czy ze zmiany warunkach doświadczalnych (osłabienie wiązek), tzn. ze zdecydowanego zmniejszenia natężeń wiązek zapisujących i odczytujących. Dlatego też prosiłbym Doktoranta o krótkie ustosunkowanie się do tego.

Niezależnie jednak od tego jakie było źródło poprawy stosunku sygnału do szumu, okazało się, że umożliwiło ono rejestrację map koincydencyjnych wprost, tj. bez konieczności odejmowania tła. Należy w tym miejscu zaznaczyć, że możliwość taka została zademonstrowana po raz pierwszy. Między innymi tak wysoki stosunek sygnału do szumu sprawił, że bardzo precyzyjnie określone mogły zostać wariacje obserwowanych sygnałów (na poziomie pojedynczych procent). Pozwoliło to na określenie funkcji korelacji drugiego rzędu z dużą względną dokładnością, a w konsekwencji na weryfikację nieklasyczności uzyskiwanych stanów. Podczas prowadzonych przez Doktoranta analiz okazało się jednak, że wariacyjny świadek splątania nie dowodził nieklasyczności obserwowanego stanu. Prawdopodobnym powodem tego problemu była niesymetryczność rozkładu niepewności pomiarowych, o czym Autor wspominał w rozważaniach teoretycznych. Pozwoliło to na obliczenie różnych estymatorów entropii Shannona, która dała odpowiedź na pytanie o nieklasyczność badanego stanu. I tak wykorzystując tzw. estymator naiwny, estymatory bayesowskie (Dirichleta oraz Pitmana-Yora) oraz symetryczny świadek entropowy. Choć każdy z nich dawał nieco inne wyniki, to każdy dowodził również sterowalności i nieseparowalności dla czasów przechowywania fotonów powyżej 5 μ s. Wynik ten jest bardzo ważny, ponieważ otwiera dalsze pole do badań w tej dziedzinie. Tak przynajmniej wynika z danych przedstawionych na Rys. 8.4. Z drugiej jednak strony odniosłem wrażenie, że Autor zdawał się sugerować, że czasy te powinny zachowywać nieklasyczność korelacji do 50 μ s (str. 80). Skąd zatem tak duże rozbieżności pomiędzy jednym i drugim?

Zbliżając się do końca recenzji, chciałem jeszcze zwrócić uwagę na jakość przygotowania samej pracy. Jest to praca pod tym względem wybitna. Estetyka rysunków, przejrzystość języka, jasność wypowiedzi tłumaczących często skomplikowane zagadnienia stoi na najwyższym poziomie. Nie



UNIwersytet Jagielloński
w Krakowie

Szymon Pustelny

Zakład Fotoniki

Instytut Fizyki

Uniwersytet Jagielloński

Łojasiewicza 11, 30-348 Kraków

Tel: +48 12 663 4691

E-mail: pustelny@uj.edu.pl

oznacza to jednak, że jest ona zupełnie wolna od błędów edytorskich, które teraz, z wrodzoną sobie złośliwością, wytknę Autorowi, by dowieść mojej niezmiernie skrupulatnej lektury jego tekstu:

- Oś pionowa na rysunku 4.7 jest błędnie podpisana.
- Błędne odniesienie na stronie 59 do Rys. 6.1(d) podczas gdy powinno być 6.1(c).
- Na str. 34 pojawia się „stan Foka”.
- Na str. 68 mowa jest o „wykorywaniu”
- Na str. Autor błędnie odwołuje się do Rys. 8.2(a).
- Znak dziesiętny w języku polski oznacza się przecinkiem a nie kropką (choć akurat w tym miejscu podejrzewam, że był to świadomy wybór Autora).
- W pracy pojawia się duża ilość tzw. sierot, tzn. pojedynczych znaków ustawionych na końcu linii oraz rozdzielania wartości od jednostek pomiędzy kolejnymi liniami, a nawet stronami.

Muszę jednak szczerze przyznać, że znalezienie tych niedoróbek sprawiło mi dużą trudność.

Na koniec chciałem jeszcze zwrócić uwagę na dorobek naukowy Pana Dąbrowskiego. Jest On współautorem 10 prac naukowych opublikowanych w najbardziej prestiżowych czasopismach naukowych, w tym m.in. Nature Communications and Physical Review Letters. Jest to bardzo dobry wynik, zwłaszcza, że doktorat realizował on przez 4 lat. Sama rozprawa doktorska jest pracą wyśmienitą, znacząco wybiegającą poza przyjęte normy i standardy. Opisuje ona w sposób szalenie przejrzysty i czytelny bardzo zaawansowanego badania prowadzone od lat w grupie prof. Wasilewskiego. Badania te bez dwóch zdań stoją na najwyższym światowym poziomie. Lektura pracy była prawdziwą przyjemnością i bez fałszywej skromności stwierdzić mogę, że wiele się z niej dowiedziałem.

Podsumowując. Z prawdziwą przyjemnością stwierdzam, że praca spełnia (z nawiązką) wszystkie wymagania formalne i zwyczajowe stawiane przed pracami doktorskimi i wnioskuję o dopuszczenie Pana Michała Dąbrowskiego do kolejnych etapów przewodu doktorskiego. W przypadku jej pozytywnego zakończenia (w co nie wątpię) mam również przyjemność wnioskować o przyznanie Panu Dąbrowskiemu wyróżnienia za jego rozprawę doktorską.

dr hab. Szymon Pustelny