

Recenzja rozprawy doktorskiej pt.**“Rekonstrukcja i inżynieria stanów kwantowych atomów par pierwiastków
alkalicznych”****autorstwa Marka Kopciucha**

Strona | 1

Przedstawiona praca doktorska opisuje szereg ciekawych eksperymentów z zakresu charakteryzacji i kontroli stanów kwantowych par atomowych, stosując do tego metody metrologii kwantowej oraz optyki kwantowej – od strony zarówno teoretycznej i doświadczalnej.

Zasadnicza część pracy składa się z czterech artykułów opublikowanych w recenzowanych, prestiżowych czasopismach. Ta zasadnicza część poprzedzona jest dwoma rozdziałami wstępu. Następnie, każda publikacja również poprzedzona jest wstępem łączącym dany artykuł z naczelną tematyką pracy.

Pierwszy rozdział wprowadza podstawy teorii oddziaływania kwantowo opisanego atomu z klasycznym światłem – służącym do przygotowania albo sondowania stanu atomów. Wprowadzone są wszystkie najpotrzebniejsze pojęcia, do których można łatwo odnieść się śledząc całą pracę. Wprowadzone są też pewne szczegóły protokołu STIRAP, który jest też tematyką ostatniej pracy wchodzącej w skład doktoratu.

Drugi rozdział odnosi się do konkretnej sytuacji doświadczalnej atomów w komórce z pokryciem antyrelaksacyjnym. Autor rozważa mechanizmy relaksacji i oddziaływania kolektywnych, uśrednionych stanów atomów. Opis jest wprowadzony w sposób dość rygorystyczny, a z konieczności osiąga ona istotne uproszczenia które pozwalają ten *a priori* bardzo skomplikowany system opisywać. Uważam w szczególności, że binary (dwuobszarowy) opis stanów atomów w wiązce oraz poza wiązką laserową jest elegancki i dobrze wprowadzony.

Pierwsze fragmenty rozdziału trzeciego pracy stanowią wstęp do dwóch powiązanych artykułów naukowych. Wstęp do pierwszego z nich stanowi opis podstaw tomografii stanów kwantowych. Sama praca „Optical reconstruction of the collective density matrix of a qutrit” opublikowana w Physical Review A jest opisem teoretycznym oraz symulacją tomografii kwantowej stanu atomu w podprzestrzeni o $f=1$, co szczęśliwie stanowi fizyczną realizację qutritu. Praca w elegancki sposób łączy metody pomiarowe ogólnie związane z sygnałami typu *free-induction decay (FID)* z metodami tomografii kwantowej. Po lekturze pracy narzucają się pewne pytania, które mają też znaczenie w kontekście całego doktoratu:

Q1. W symulacjach został zastosowany szum biały. Czy sytuacja ta jest obserwowana również w eksperymencie w kolejnych pracach, w szczególności czy jest to bardziej szum śrutowy czy techniczny?

W szczególności, szum atomowy (spinowy) w polu magnetycznym może mieć np. charakter spektralnie rezonansowy.

Strona | 2

Q2. Naturalnie w mechanice kwantowej pomiar zaburza też stan, co w tego typu eksperymentach znane jest jako efekt *quantum back-action* (w szczególności szum śrutowy światła wywiera losowy wpływ na stan atomów). Czy autor może wyobrazić sobie uogólnienie zaproponowanej metody na sytuację w której ten efekt ma istotniejsze znaczenie, oraz wyjaśnić jak daleko jesteśmy od tej sytuacji? Prosiłbym też o komentarz odnośnie „klasycznej” dekoherencji wprowadzanej przez wiązkę próbkującą.

Pragnę zaznaczyć że te komentarze stanowią raczej ciekawość recenzenta, a samą zaprezentowaną pracę uważam za ciekawą, wartościową i dobrze napisaną.

W kolejnej publikacji „Optimized optical tomography of quantum states of room-temperature alkali-metal vapour” opublikowanej również w Physical Review A autor przechodzi do eksperymentalnej implementacji wcześniejszych idei. Dodatkową trudnością w eksperymencie tomograficznym jest oczywiście przygotowanie stanu, co autor dyskutuje we wstępie dotyczącym sprytnej metody pompowania optycznego. Sama praca obrazuje bardzo ciekawy eksperyment, gdzie ponadto zastosowano metody preparacji stanów znane z technik NMR oraz zaawansowane metody analizy danych. Doceniam też uważną analizę tzw. *local* i *global scaling factors*, gdyż problemy poprawnej normalizacji sygnału w tego typu eksperymentach są jednocześnie ważne i typowe. Autor poradził sobie z tymi zagadnieniami doskonale oraz zaprezentował świetną pracę, która pokazuje też jego umiejętność współpracy z zespołem teoretycznym. Poniżej załączam parę drobnych pytań/komentarzy.

Q3. Prosiłbym autora o komentarz odnośnie geometrii wiązki laserowej. Czy rozmiar wiązki był dobierany względem jakichś kryteriów optymalizacyjnych, oraz czy używana/rozważana wiązka miała charakter gaussowski czy może o płaskim natężeniu (*top-hat* albo podobne).

Q4. Na stronie 68, wierność osiąga zaskakującą precyzję w kontekście liczby cyfr znaczących, choć jest to zgodne z prezentowaną niepewnością. Czy taka precyzja ma odzwierciedlenie doświadczalne - w szczególności czy dotyczy ona raczej konkretnego zespołu statystycznego realizacji, czy raczej może być idealnie powtarzalna?

W kolejnej pracy autor wprowadza tzw. stany kątomierza kwantowego, optymalne – jak sugeruje nazwa – do pomiarów obrotów stanów kwantowych w metrologii. To bardzo ciekawy koncept i uważam za duży sukces, że udało się pokazać eksperyment stosujący tę elegancką teorię. Publikacja „Perfect quantum protractors” w czasopiśmie Quantum ukazała się we współpracy z zespołem teoretycznym, i zaczyna się wysokopoziomowym i szczegółowym opisem algebraicznym sytuacji. Eksperyment stanowi zwieńczenie pracy. W eksperymencie autor zastosował m.in. metody z

poprzednich rozdziałów takie jak tomografia stanu. Opis samego eksperymentu jest krótki ale wystarczający. Praca nasuwa parę pytań praktycznych i teoretycznych:

Strona | 3

Q5. Omawiane stany są stanami czystymi, natomiast przygotowany stan oczywiście ma skończoną wierność więc jest w ogólności stanem mieszanym. Znane są w metrologii przypadki gdzie nawet małe odstępstwo od stanu czystego powoduje problemy. Czy autor może skomentować „stabilność” opracowanej metody względem skończonej czystości stanu?

Q6. Na stronie 88 autorzy artykułu przedstawiają niepewność powiązaną z kwantową informacją Fishera. Czy ta niepewność i w związku z tym klasyczna informacja Fishera da się porównać bezpośrednio z wynikami doświadczalnymi.

Q7. Przedstawiony obraz stanowi podejście jednoatomowe. W metrologii obrotów kąta używa się np. stanów ściśniętych spinowo albo stanów typu kot Schrödingera, które są stanami wielu atomów. Jak metoda stanów-kątomierzy porównuje się z podejściami wieloatomowymi (oczywiście z zastrzeżeniem że wiadomo że stany ściśnięte są szczególnie wrażliwe w jednej osi)?

Mimo tych uwag uważam że przedstawiona metoda i eksperyment są niezwykle ciekawe i mają potencjał aby pobudzać dalsze badania i dyskusje.

Ostatni fragment doktoratu stanowi teoretyczno-symulacyjna analiza adiabaticznego transferu populacji między podprzestrzeniami z $f=1$ i $f=2$ w atomie Rubidu. Praca, opublikowana w Physical Review A, stanowi ważną analizę w kontekście nietrywialnej praktycznej sytuacji (poszerzenie Dopplera, atom wielopoziomowy). Spodziewam się że wyniki te doczekają się skutecznej realizacji doświadczalnej.

Recenzowana praca doktorska stanowi niewątpliwie rozwiązanie oryginalnego problemu badawczego, a nawet szeregu problemów. Niewątpliwie pokazuje też, że doktorant opanował wszelkie potrzebne metody teoretyczne i doświadczalne, jak również wykazał się skutecznością we współpracy teoretyczno-doświadczalnej. Przedstawione wyniki naukowe są bardzo wysokiej jakości i stanowią podstawy do kolejnych interesujących badania. W związku z powyższymi argumentami, rekomenduję komisji oraz radzie dyscypliny przyznanie stopnia doktora panu Markowi Kopciuchowi.

Elektronicznie
podpisany przez
Michał Parniak-
Niedojadło;
Uniwersytet
Warszawski
Data: 2024.11.25
16:17:19 +01'00'

