



NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ

Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

Toruń, 10 listopada 2024

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. Marka Kopciucha
pt. "Rekonstrukcja i inżynieria stanów kwantowych
atomów par pierwiastków alkalicznych"**

Przedłożona rozprawa doktorska mgr. Marka Kopciucha została przygotowana na Uniwersytecie Jagiellońskim pod kierunkiem prof. Szymona Pustelnego. Jej głównym celem jest rozwój metod koherentnej kontroli i pomiaru stanu kwantowego ciepłych par rubidu z wykorzystaniem impulsów pola magnetycznego i pola laserowego, a także zastosowanie metrologiczne opracowanych metod do przygotowania tzw. Stanów kątomierza kwantowego.

Praca ma formę zbioru czterech powiązanych tematycznie publikacji naukowych, opatrzonych wprowadzeniem. Na wprowadzenie składają się wstęp i dwa rozdziały merytoryczne, rozdział trzeci zawiera komplet artykułów, z których każdy opatrzone komentarzem. Rozprawę kończy krótkie podsumowanie. Całość liczy 102 strony, wprowadzenie i komentarz zawierają odwołania do 56 pozycji bibliograficznych.

Autor rozprawy, pan mgr Marek Kopciuch, jest współautorem pięciu artykułów naukowych w uznanych międzynarodowych czasopismach naukowych, z których cztery wchodzi w skład rozprawy. W dwóch spośród tych publikacji doktorant występuje jako pierwszy autor, natomiast w pozostałych zajmuje pozycję drugiego autora. Wkład pana Kopciucha w każdy z przedstawionych artykułów został precyzyjnie określony i obejmuje zarówno zagadnienia teoretyczne, jak i aspekty eksperymentalne. Warto podkreślić, że takie połączenie kompetencji jest rzadko spotykane i wyróżnia wyjątkowo dobrych naukowców.

Rozdział pierwszy stanowi wprowadzenie w podstawy teoretyczne zagadnienia oddziaływania atomu z wiązką laserową, modelowaną jako klasyczne pole elektromagnetyczne. Należy zauważyć, że zagadnienie to jest bardzo szerokie, a doktorant starannie wybrał do omówienia aspekty o bezpośrednim znaczeniu dla zagadnień, zjawisk i zastosowań omówionych we właściwej części rozprawy. Rozdział zawiera więc analizę struktury energetycznej pierwiastków metali alkalicznych, z naciskiem na strukturę subtelną i nadsubtelną wraz z omówieniem efektu rozszczepienia



Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl



zeemanowskiego w polu magnetycznym. Dalej dyskutowane są reguły wyboru dla oddziaływania elektrycznego dipolowego, i wprowadzone są pojęcia częstości Rabiego stanowiącej miarę siły oddziaływania światła z materią oraz przydatne do budowania intuicji pojęcia parametrów nasycenia. Wyprowadzone są równania Liouville'a ewolucji atomów w polu i sprzężone z nimi równania ewolucji pola. Mam tu uwagę i pytania:

1. **Proszę doktoranta o skomentowanie przy okazji obrony mechanizmu fizycznego relaksacji izotropowej i omówienie jego matematycznego opisu.** Jeśli rzeczywiście operator opisujący to zjawisko ma postać macierzy jednostkowej, odpowiadający mu człon wydaje się znikać w równaniach Liouville'a.
2. Równania ewolucji pola (1.30-1.33) okazują się być równaniami różniczkowymi pierwszego rzędu. Taką formę zwykle otrzymuje się w przybliżeniu wolnozmiennej obwiedni (ang. *slowly varying envelope approximation*). **Chciałabym dopytać doktoranta czy podobne założenie zostało poczynione przy wyprowadzaniu równań (1.30-1.33).**

Ostatni fragment rozdziału opisuje wybrane zjawiska zachodzące w przypadku gdy atom oddziałuje z parą wiązek laserowych, w szczególności zjawisko stymulowanego adiabaticznego przejścia Ramana (STIRAP), które pozwala na koherentne przeniesienie populacji między poziomami atomu. Przy lekturze nasuwa się kolejne pytanie:

3. Na stronie 11 autor stwierdza że odstrojenie dwufotonowe “z punktu widzenia optymalizacji transferu powinno w zdecydowanej większości przypadków wynosić 0”. **Proszę o rozwinięcie tej myśli przy okazji obrony - jakie przypadki stanowią wyjątki od tej reguły?**

Rozdział drugi poświęcono wprowadzeniu czytelnika w problemy oddziaływania światła z zespołami atomów tworzących ciepłe pary atomowe. Wprowadzono pojęcie kolektywnej macierzy gęstości. Omówiono metody uwzględniania poszerzenia dopplerowskiego wynikającego z ruchu atomów w równaniach opisujących ich oddziaływanie ze światłem. Wymieniono dodatkowe mechanizmy relaksacji w zespołach atomów związane ze zderzeniami między atomami z wymianą stanu spinowego oraz ze ściankami naczynia. Szczegółowe omówienie zakresów temperatur i gęstości w których mechanizmy te stają się istotne stanowi przydatny z praktycznego punktu widzenia zbiór wskazówek. Zaciekał mnie pomysł modelowania oddziaływania światła z zespołem atomów z podziałem na dwa obszary: obszar oddziaływania z wiązką i obszar bez wiązki laserowej, między którymi zachodzi ciągła wymiana atomów. W literaturze przedmiotu często nie robi się takiego rozgraniczenia, a wszystkie efekty, w szczególności zarówno oddziaływanie z





NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ

Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

wiązką jak i zderzenia ze ściankami naczynia, opisuje się w ramach jednego zespołu czy obszaru.

4. Jestem ciekawa czy doktorant miał okazję **porównać wyniki otrzymane z uwzględnieniem i bez uwzględnienia takiego podziału oraz scharakteryzować różnice**. Jeśli takie obliczenia nie zostały przeprowadzone, istotne byłoby usłyszenie, jakie są jego oczekiwania względem możliwych różnic i wpływu tego podejścia na wyniki. Proszę o komentarz na ten temat na obronie.

W końcowej części rozdziału omówiono wyzwania towarzyszące modelowaniu efektów dynamicznych w oparciu o metodę Monte Carlo. Autor zaproponował dodatkowo szereg technicznych wskazówek, mających na celu usprawnienie tych wymagających obliczeń

Obszerny rozdział trzeci to główna część rozprawy, zawierająca cykl czterech artykułów naukowych wraz z komentarzem opisanych w nich wyników. Omówiono opracowaną i przetestowaną przez autora metodę tomografii stanów kwantowych qutritów, a także jej zastosowanie do charakteryzacji stanów kątomierza kwantowego wprowadzonych w jednym z artykułów cyklu. W ramach prac wykorzystano technikę inżynierii stanów kwantowych opartą o procedurę STIRAP, realizowaną w układach efektywnie czteropoziomowych. Jeden z artykułów cyklu poświęcony jest w całości temu problemowi.

Pierwszy z artykułów cyklu pt. "Optical reconstruction of the collective density matrix of a qutrit" zawiera opis autorskiej techniki tomografii stanów kwantowych qutritu proponowanej przez doktoranta. Był on odpowiedzialny za opracowanie teorii, propozycję scenariusza eksperymentalnego oraz wykonanie i analizę wyników symulacji numerycznych. Elegancka technika opiera się na zjawisku modulacji polaryzacji wiązki świetlnej, w tym jej orientacji i stopnia eliptyczności, podczas propagacji tej wiązki przez ośrodek atomowy w polu magnetycznym. W artykule wykazano, że poszczególne kombinacje elementów macierzy gęstości qutritu odpowiedzialne są za niezależne przyczynki do skręcenia płaszczyzny polaryzacji światła w funkcji czasu. Zatem, pomiar tego sygnału pozwala wyznaczyć wybrane elementy macierzy gęstości. Zaproponowano też schemat eksperymentalny manipulacji stanem ośrodka tak by poprzez obrót atomów uzyskać sekwencyjnie dostęp do kolejnych zespołów elementów macierzy gęstości, co pozwala w końcu zrekonstruować całą macierz. Zaproponowany schemat przetestowano numerycznie na modelowych zaszumionych danych uzyskując bardzo dobrą zgodność macierzy zrekonstruowanych i oryginalnych (fidelity powyżej 0.95).



Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl



Drugi z artykułów opisuje demonstrację zastosowania proponowanej w poprzedniej pracy techniki tomografii stanu qutritu kodowanego w wybranym poziomie nadsubtelnym w ciepłych parach rubidu. Autor rozprawy był główną osobą odpowiedzialną za przygotowanie i przeprowadzenie eksperymentu oraz analizę jego wyników. Oprócz szczegółowego opisu metody doświadczalnej, artykuł zawiera omówienie metod rekonstrukcji stanu w oparciu o dane pomiarowe oraz przykładowe wyniki. Zgodność zrekonstruowanych stanów z symulowanymi jest imponująca, charakteryzuje się wiernością (fidelity) na poziomie powyżej 97%. Należy zwrócić uwagę że chociaż proponowaną metodę testowano na wybranych stanach atomów rubidu, jej ogólność wykracza poza tę platformę fizyczną. Autor wspomina jednak pewne ograniczenia.

5. Autor proponuje różne metody rekonstrukcji stanu na podstawie otrzymanych wyników, w tym inwersję liniową i metodę największej wiarygodności. Jestem ciekawa **jak bardzo wybór metody wpływa na zrekonstruowaną macierz**.
6. Rzadko zdarza się że wyniki doświadczalne są bliższe ideału niż przewidywania teoretyczne. Jednak w artykułach [A] i [C] cyklu otrzymano odpowiednio wierność na podobnym poziomie: 95 i 97% odpowiednio dla porównania teorii z symulacjami oraz symulacji z doświadczeniem. **Proszę autora o skomentowanie tego wyniku**.

Trzeci z artykułów w ramach cyklu wprowadza nową klasę stanów kwantowych, zwanych stanami kątomierza (ang. *quantum protractors*), które pod wpływem obrotu przekształcają się na stany bazowe przestrzeni Hilberta o właściwościach ważnych dla zastosowań metrologicznych. Dyskutowane są podklasy takich stanów i ich cechy, a także warunki ich istnienia i przykłady w przestrzeniach o różnych wymiarach. Wreszcie, zastosowania metrologiczne omówiono w kontekście eksperymentu, za którego projekt, przygotowanie i analizę uzyskanych danych odpowiedzialny był pan mgr Kopciuch. W eksperymencie stan idealnego kątomierza kwantowego zrealizowano w ośrodku atomów rubidu za pomocą sekwencji wiązek pompujących i pól magnetycznych. Wykonano następnie rekonstrukcję tomograficzną tego stanu z wysoką wiernością. Zademonstrowano też porównywalną rozdzielczość w pomiarach obrotów tego stanu wokół trzech ortogonalnych osi - cechę charakterystyczną stanów idealnego kątomierza.

7. **Chciałabym poprosić doktoranta o szerszy komentarz dotyczący możliwości zastosowania proponowanych technik tomograficznych do układów o większej liczbie stopni swobody**, np. rekonstrukcji stanów ośrodka atomów rubidu o liczbie kwantowej $F=2$, a w szczególności do realizacji stanów kątomierza o innych wymiarach.





Ostatni artykuł z cyklu stanowi analizę teoretyczną zjawiska stymulowanego adiabaticznego ramanowskiego transferu populacji (STIRAP) w układach atomowych, w których istotną rolę odgrywa obecność dodatkowego, czwartego poziomu energii. W takim układzie pojawiają się dodatkowe efekty, które przypisano w przekonujący sposób łamaniu warunku adiabaticzności. Doktorant jest odpowiedzialny za teoretyczne wytłumaczenie zjawiska, brał także udział w przygotowaniu i analizie symulacji numerycznych. Spodobała mi się szczególnie koncepcja wykorzystania przewidywanych efektów do wybiórczego pompowania populacji w nowych scenariuszach optycznej kontroli stanu.

8. Ośmielona imponującą zgodnością wyników teoretycznych i doświadczalnych uzyskanych przez autora w poprzednich artykułach cyklu, chciałabym dopytać o **perspektywy weryfikacji eksperymentalnej efektów przewidzianych w pracy [B]**.

Zanim przejdę do podsumowania, wypełnię obowiązki recenzenta wypunktowując kilka usterek typograficznych, które, choć nie mają wpływu na prawidłowość prezentowanych wyników, warto odnotować:

- W równaniach (1.22) i (1.23) jednostka urojona powinna mnożyć również ostatni człon po prawej stronie.
- Równanie (1.37) prezentuje oczywiście stany, a nie wartości własne, jak napisano.
- W definicji szybkości atomów pod wzorem (2.4) zabrakło kwadratu, a po prawej stronie wzoru (2.22) - wartości oczekiwanej.
- Ostatni akapit na stronie 49 powtarza treść poprzedniego. Na stronie 50 zdarzyło się kilka błędów edytorskich w tekście.
- W równaniach (B2) w pracy [C] wydaje się brakować kwadratów w mianowniku.

Ponadto wspomnę że czytanie doktoratu może utrudniać niedobra praktyka wprowadzania niewyjaśnionych symboli i skrótów, których znaczenia czytelnik zmuszony jest się domyślać, stosowana zarówno w treści opublikowanych artykułów, jak i komentarzy. Przykłady stanowią elementy macierzy gęstości z górnym indeksem w formie okrągłej strzałki $\circ$ w artykule [A] str. 4, kąt $\phi_{\downarrow}$ w artykule [D] str. 4, skrót FID na str. 45 rozprawy. Prawdopodobnie są to oznaczenia zwyczajowe, które jednak nie muszą być znane czytelnikowi spoza wąskiej grupy specjalistów. Na tak zaawansowanym etapie drogi naukowej jak końcówka doktoratu uchybienie takie nie powinno się zdarzać. Te drobne usterki nie wpływają na moją bardzo wysoką ocenę wartości merytorycznej rozprawy.





NICOLAUS COPERNICUS
UNIVERSITY
IN TORUŃ

Faculty of Physics, Astronomy
and Informatics

Podsumowując, w swojej rozprawie doktorskiej pan mgr Kopciuch zaproponował nową metodę tomograficznej rekonstrukcji stanów kwantowych, którą szczegółowo opisał i przetestował przy użyciu metod numerycznych i doświadczalnych dla qutritów zakodowanych w określonych stanach ośrodka atomów rubidu. Pan Kopciuch zaprojektował i przeprowadził odpowiedni eksperyment, a także przeanalizował szczegółowo jego wyniki, co pozwoliło mu dokonać z sukcesem rekonstrukcji różnych klas stanów ośrodka. W rozprawie zostały również opisane strategie inżynierii nowych klas stanów kwantowych w takich ośrodkach oraz ich charakterystyka przy zastosowaniu technik rekonstrukcyjnych, które opracował doktorant. Na szczególną uwagę zasługuje wszechstronność kandydata, przejawiająca się w znakomitym opanowaniu zarówno aspektów teoretycznych, jak i praktycznym projektowaniu, wykonywaniu oraz analizie wyników eksperymentów. Eloquentny i klarowny wywód rozprawy, wzbogacony starannie dobranymi komentarzami, dostarcza czytelnikowi szerszego kontekstu i ułatwia zrozumienie znaczenia oraz wpływu przedstawionych badań na rozwój technik inżynierii i charakteryzacji stanów układów atomowych. Nie mam wątpliwości odnośnie **wiodącego wkładu pana mgr. Kopciucha w powstanie rozprawy doktorskiej i wyników w niej opisanych**. Stwierdzam więc, że praca doktorska mgr. Marka Kopciucha pt. "Rekonstrukcja i inżynieria stanów kwantowych atomów par pierwiastków alkalicznych" **spełnia wszelkie wymagania zwyczajowe i formalne stawiane kandydatom w Ustawie - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce** (t.j. Dz. U. z 2020 r. Poz. 85 z późn. zm.) i **wnoszę o dopuszczenie autora do dalszych etapów przewodu doktorskiego**. Ponadto, ze względu na prostotę implementacji i potencjał zastosowań opracowanych przez doktoranta technik, **wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej pana mgr. Marka Kopciucha**.

Karoline Stojak



Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu
Instytut Fizyki
ul. Grudziądzka 5/7, 87-100 Toruń
tel.: +48 56 611 33 10, fax: +48 56 622 53 97
www.ifiz.umk.pl, ifiz@fizyka.umk.pl