

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

W recenzowanej rozprawie autor przedstawia wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych nad parami atomowymi Rubidu-87. W układach tych możliwe jest, wskutek oddziaływania ze światłem laserowym, generowanie nietrywialnych stanów kwantowych o określonym momencie pędu, np. $f = 1$. Stany te są w większości przypadków dobrze opisywane jednocząstkową macierzą gęstości, gdzie efekty wielociałowe są zanedbywane. Wobec ograniczonego oddziaływania ze ściankami naczynia oraz oddziaływania atomów między sobą, możliwe jest utrzymanie stanu kwantowego atomów przez czas wystarczająco długi, aby zaobserwować kwantowe koherencje oraz ich ewolucję, wyznaczoną m.in. przez częstość Larmora w zewnętrznym polu magnetycznym. Pozwala to m.in. na przetestowanie technik tomografii stanu kwantowego.

Rozprawa liczy 102 strony, podzielona jest na trzy rozdziały i dodatki. Ma ona formę zbioru prac opatrzonego komentarzem, a prace naukowe stanowią znaczną część jej objętości. Pierwszy rozdział stanowi krótkie wprowadzenie do fizyki atomów metali alkalicznych oraz ich oddziaływania ze światłem. Drugi rozdział zawiera wstęp do opisu par atomowych w języku fizyki kwantowej oraz ich modelowania w komórkach z parafinowym pokryciem antyrelaksacyjnym. Trzeci rozdział zawiera prace autora, za każdym razem opatrzone ich opisem. Po nich mamy podsumowanie pracy i spis literatury.

Rozprawa powstała na podstawie czterech prac, z których dwie mają charakter czysto teoretyczny a dwie teoretyczno-doświadczalny. Prace [A] oraz [C], w których doktorant jest pierwszym autorem, stanowią trzon rozprawy. Zostały one opublikowane w Physical Review A. Pierwsza z prac jest teoretyczna a druga zawiera wyniki doświadczalne jak i teoretyczne. Praca [A] przedstawia ideę tomografii stanu kwantowego o spinie 1, która polega na obserwacji zmiennego w czasie skręcenia polaryzacji światła próbkującego. Jak pokazano, pozwala to na pomiar trzech niezależnych parametrów opisujących macierz gęstości. W połączeniu z zastosowaniem impulsów zapewniających unitarną transformację stanu kwantowego umożliwia to całkowitą rekonstrukcję stanu. W pracy [C] przedstawiono eksperymentalną realizację tego protokołu, co pozwoliło na tomografię stanów kwantowych z bardzo dobrą wiernością rzędu 99%.

W pozostałych dwóch pracach mgr. Kopciuch jest drugim autorem. Praca [B] jest pracą teoretyczną i dotyczy metody transferu populacji atomów bazującej na protokole STIRAP, uogólnionej na przypadek linii D_1 atomów rubidu-87. Jak pokazano, mimo skomplikowanej struktury poziomów możliwe jest zastosowanie

podobnej metody dla większości parametrów układu. Jest to możliwe ze względu na reguły wyboru pozwalające na separację stanów na niezależne trzy- i czteropoziomowe zbiory. Jedynie w przypadku specyficznych wartości odstrojeń efektywność transferu znacząco spada. W pracy [D] przedstawiono tzw. stany „idealnego kątomierza kwantowego” których własnością jest możliwość optymalnego wyznaczania kątów obrotu stanu kwantowego względem trzech ortogonalnych do siebie osi. W pracy tej doktorant był odpowiedzialny za doświadczalną realizację.

Tematyka rozprawy wpisuje się w nurt kwantowej teorii pomiaru, i co najważniejsze, w zgrabny sposób łączy teorię z doświadczeniem. Moim zdaniem dużym osiągnięciem doktoranta jest to, że potrafił połączyć interesujące z punktu widzenia fizyki kwantowej wyniki teoretyczne z realizacją doświadczalną. Świadczy to o jego wszechstronności i dociekliwości naukowej. W mojej ocenie uzyskane wyniki są bardzo interesujące i oryginalne, i stanowią istotny wkład w rozwój dziedziny. Prace [A] i [C] są ze sobą ściśle związane i pokazują drogę od pomysłu teoretycznego do eksperymentu, w pełni potwierdzając opracowaną teorię. Zarówno obliczenia teoretyczne jak i eksperymenty były złożone, wymagały rozległej wiedzy i nabycia odpowiednich umiejętności. Wyniki są na tyle oryginalne, że mogą być podstawą do opracowania metod tomografii kwantowej w innych układach, np. o innej wartości spinu, lub mogą zainspirować badania w innych układach, np. rezonansu magnetycznego NMR.

Po omówieniu głównych wyników przejdę do bardziej szczegółowych uwag. W mojej ocenie komentarz do prac naukowych nie jest napisany na tyle klarownie, że mógłby stanowić wprowadzenie dla osoby niezwiązanej z badaniami par atomowych. W moim przypadku bardziej pomocne było przeczytanie samych prac naukowych niż komentarzy do nich. W wielu miejscach pojawiają się niezdefiniowane pojęcia, lub parametry. Wydaje się, że doktorant nie przemyślał do końca koncepcji, lub nie poświęcił wystarczająco czasu żeby napisać spójny tekst. Przypuszczam, że może on być zrozumiały jedynie dla specjalistów w tej dziedzinie.

Jeśli chodzi o bardziej szczegółowe uwagi, to moim zdaniem wzór (1.1) nie jest sformułowany zbyt szczęśliwie. Wynika z niego że oddziaływanie subtelne zależy tylko od odległości elektronu od jądra, co nie jest prawdą. Jak sam autor pisze "źródłem tego oddziaływania jest pole magnetyczne wytwarzane przez jądro atomowe w układzie spoczynkowym elektronu". Lepsze byłoby jawne podanie czynnika ζ i wyjaśnienie jego postaci w przypadku metali alkalicznych. Ponadto nazwanie wielkości zależnej od parametru stałą jest niewłaściwe. W sekcji 1.2 autor pisze o "oddziaływaniu w reżymie klasycznym" podczas gdy podany niżej opis odpowiada tak naprawdę reżimowi półklasycznemu. W sekcji 2.3 autor pisze "W komórkach z pokryciem parafinowym średni czas życia atomu T_w jest w granicach 10 ms do 1 s". Nie jestem pewien co autor ma na myśli przez czas życia atomu, czy ulegają one rozpadowi? Po co wprowadzać parametr T_w skoro nie jest on nigdzie wspomniany? Po raz kolejny wydaje się, że autor przepisał zadanie z podręcznika bez większej refleksji. Nie jest to jedyny taki przypadek. W wielu miejscach podane są bez specjalnego uzasadnienia/definicji parametrów wzory, co moim zdaniem mija się z celem.

Ostatnia moja uwaga dotyczy pracy [D], w której analizowane są stany kątomierza kwantowego. Pozwalają one na optymalny pomiar obrotu stanu wokół trzech osi, w sytuacji gdy z góry nie wiadomo wokół której z trzech osi nastąpi obrót. Postawienie takiego warunku wydaje mi się dość sztuczne i nie jestem pewien na ile przydatne. W praktyce najczęściej zależy nam na pomiarze kąta obrotu wokół jednej osi, lub gdy oś nie jest określona, o określenie zarówno kąta jak i jego kierunku. Przypuszczam jednak, że ten problem został już rozwiązany w literaturze dotyczącej estymacji kwantowej. Jeśli tak jest, to pojawia się pytanie o zasadność rozważania stanów PQP. Czy nie jest to jedynie pewne ćwiczenie matematyczne? Przyznam jednak że nie jest to do końca zarzut do doktoranta, ponieważ był on odpowiedzialny w tej pracy za część doświadczalną.

Powyższe szczegółowe uwagi nie obniżają w sposób znaczący wartości naukowej pracy. Pod względem edytorskim i płynności wywodu praca prezentuje się bardzo dobrze. Podsumowując, rozprawa doktorska mgr. Kopciucha stanowi, moim zdaniem, istotny wkład w rozwój dziedziny i świadczy o jego wysokich umiejętnościach badawczych. W mojej ocenie spełnia ona formalne i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim, wnoszę więc o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Ze względu na wysoki poziom naukowy, stawiam również wniosek o wyróżnienie tej pracy. Wniosek uzasadniam wysokim poziomem naukowym, pomysłowością i oryginalnością wyników, dużym stopniem samodzielności i wszechstronności doktoranta, oraz świetnym połączeniem teorii i doświadczenia. Praca ta stanowi w mojej ocenie ważny przyczynek w dziedzinie tomografii stanów kwantowych gazów atomowych.



Michał Matuszewski