

Rekonstrukcja i inżynieria stanów kwantowych atomów par pierwiastków alkalicznych

Marek Kopciuch

Niniejsza rozprawa podejmuje problem wykorzystania par atomowych pierwiastków metali alkalicznych, w szczególności zaś par rubidu-87, umieszczonych w temperaturze zbliżonej do temperatury pokojowej wewnątrz komórek szklanych z parafinowym pokryciem ścian, do badań z zakresu informacji i metrologii kwantowej. Celem pracy jest rozwój metod manipulacji i rekonstrukcji stanów kwantowych w takich ośrodkach, co otwiera pole dla wielu ciekawych zastosowań. Jedno z takich zastosowań metrologicznych zostało przedstawione w pracy.

Na treść pracy składa się kilka niezależnych, jednak powiązanych ze sobą części. Pierwsza z nich jest teoretyczny opis oraz eksperymentalna weryfikacja, opracowanego przez doktoranta, algorytmu rekonstrukcji stanów kwantowych atomów. Przedstawiona metoda opiera się o pomiary skreślenia płaszczyzny polaryzacji światła przechodzącego przez ośrodek, którego stan kwantowych chcemy zidentyfikować. W porównaniu do znanych wcześniej metod tomograficznych, metoda ta cechuje się możliwością badań w reżimie bliskich odstrojeń światła, co pozwala na badanie efektów, które nie mogły być wcześniej analizowane. Przeprowadzone w ramach pracy analizy teoretyczne pozwoliły na wyprowadzenie związku pomiędzy poszczególnymi elementami macierzy gęstości opisującymi stany kwantowe atomów stanowiących ośrodek, a określonymi składowymi spektralnymi rejestrowanych sygnałów skreślenia płaszczyzny polaryzacji światła, przechodzącego przez ośrodek umieszczony w zewnętrznym polu magnetycznym. Dzięki temu możliwe stała się rekonstrukcja całego stanu kwantowego układu.

Opracowana teoretycznie technika została następnie zweryfikowana doświadczalnie. W ramach badań eksperymentalnych, zademonstrowano możliwość rekonstrukcji stanu podstawowego o całkowitym momencie pędu $f = 1$ demonstrując wysoka wierność przeprowadzonej rekonstrukcji. Prace doświadczalne pozwoliły również zademonstrować bardzo wysoką odporność tej techniki na zaburzenia zewnętrzne, w tym szum pomiaru oraz niedokładności pola magnetycznego. Ten ostatni element jest niezmiernie istotny z punktu widzenia praktycznych implementacji tej metody.

Niezależnym elementem prac nad tomografią stanu kwantowego było opracowanie nowej metody przygotowania stanu kwantowego. Metoda ta pozwoliła na całkowite wypompowanie atomów z jednego ze poziomów nadsubtelnych stanu podstawowego atomów, przy jednoczesnym zapewnieniu, że żadna część populacji nie została spulapkowana w stanie ciemnym. Rozwiązanie to pozwoliło m.in. na optymalizację procesu manipulacji stanem kwantowym, w znaczący sposób zwiększając wierność prowadzonych operacji, co jest kluczowe z punktu widzenia informacji kwantowej.

Kolejna część niniejszej pracy stanowi badania doświadczalne nowo wyróżnionej klasy stanów kwantowych zwanej stanami idealnego katomierza kwantowego. Jest to klasa stanów, które optymalizują pomiary obrotów kwantowo-mechanicznych. W ramach doktoratu zaimplementowany został stan katomierza dla układu o spinie 1. Zostało to zrealizowane przy użyciu struktury energetycznej stanu podstawowego $f = 1$ rubidu-87. Implementacja doświadczalna została następnie zweryfikowana w oparciu o opisaną powyżej metodę tomografii kwantowej. Dalsze badania doświadczalne, pozwoliły m.in. zweryfikować, że parametry wytwarzanych stanów rzeczywiście optymalizują precyzję pomiaru obrotów kwantowo-mechanicznych.

Ostatnia część pracy stanowi badania nad wykorzystaniem metody transferu adiabaticznego stanu kwantowego pomiędzy poziomami nadsubtelnymi rubidu-87. Teoretyczne analizy tego zagadnienia prowadzone były w rzeczywistej strukturze energetycznej ww. atomu, która zawiera szereg podpoziomów magnetycznych każdego z poziomów. Zrealizowane badania wykazały, że układ taki da się rozseparować na szereg trój- i czteropoziomowych podukładów, przy czym obecność dodatkowego - czwartego - poziomu energetycznego w stanie wzbudzonym może w sposób dramatyczny zmienić dynamikę transferu. W szczególności, jego obecność może spowodować załamanie się warunku adiabaticzności procesu, czego skutkiem jest brak transferu jakiegokolwiek populacji atomów między stanami kwantowymi. W ten sposób można m.in. kontrolować efektywność procesu transferu czy generować superpozycje stanów pomiędzy poziomami, które nie są bezpośrednio sprzęgane za pomocą światła. Odkrycie to otwiera zatem szereg bardzo ciekawych możliwości inżynierii stanów kwantowych, które nie były dotąd analizowane.

Opisane części, składają się na spójną całość pracy, która przedstawia badania autora prowadzone podczas jego doktoratu.