

dr hab. Rafał Demkowicz-Dobrzański, prof. UW
Instytut Fizyki Teoretycznej
Wydział Fizyki UW
ul. Pasteura 5, 02-093 Warszawa
demko@fuw.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgra Dariusza Kajtocha p.t. „Quantum Interferometry with Spinor Condensates”

Rozprawa doktorska mgra Dariusza Kajtocha dotyczy zagadnienia wykorzystania spinorowych kondensatów Bosego-Einsteina w metrologii kwantowej. Autor skupia swoją uwagę na interferometrii atomowej wykorzystującej kondensaty spinorowe o trzech wewnętrznych poziomach (spin $F=1$). Tym samym, wychodzi poza typowo rozważany w literaturze przypadek interferometrii dwu-poziomowej tj. interferometria Ramseya.

Wyniki

Praca zawiera jasne wprowadzenie do dziedziny interferometrii atomowej, motywację do podjęcia tego typu badań, oraz dwa rozdziały 3 i 4 zawierające oryginalne wyniki autora.

W skrócie, praca odpowiada na dwa pytania: (i) jaka jest maksymalna możliwa do uzyskania czułość interferometrii wykorzystującej stan podstawowy/termiczny kondensatu spinorowego umieszczonego w zewnętrznym polu magnetycznym oraz (ii) w sytuacji braku zewnętrznego pola magnetycznego, jaki jest potencjał generowania użytecznie metrologicznych stanów ściśniętych w tym układzie, dzięki obecności długozasięgowych oddziaływań dipolowych pomiędzy atomami.

(i) Autor rozpoczyna od charakteryzacji metrologicznej użyteczności stanów podstawowych układu w przybliżeniu jednego modu przestrzennego, w zależności od siły kwadratowego efektu Zeemana i magnetyzacji układu (różnicy obsadzeni stanów spinowych $+1$ i -1). Miarą metrologicznej użyteczności układu jest największa wartość własna macierzy Fishera, skonstruowana tu jako macierz 8×8 pozwalająca ilościowo scharakteryzować czułość stanu na zmianę spowodowaną działaniem ewolucji unitarnej generowanej przez dowolną kombinację generatorów algebry $su(3)$.

Autor dyskutuje czułość metrologiczną tych stanów w kontekście odpowiadających im faz układu (polarna, ferromagnetyczna, antyferromagnetyczna, o złamanej symetrii), obserwując zmianę optymalnych generatorów ewolucji (zapewniających maksymalną czułość interferometrii) przy przechodzeniu przez punkty krytyczne. Stwierdzono, że, z wyjątkiem fazy polarnej, uzyskane czułości charakteryzując się skalowaniem Heisenberga, gdzie informacja Fishera rośnie kwadratowo z liczbą cząstek. Pokazano też względną odporność tak zdefiniowanej czułości na skończoną temperaturę układu oraz fluktuację wartości parametru magnetyzacji.

(ii) Druga część rozprawy dotyczy zagadnienia tworzenia stanów ściśniętych z początkowych stanów spinowych koherentnych dzięki obecności długozasięgowych oddziaływań dipolowych. Autor pokazuje, że efektywny hamiltonian jest kombinacją tak zwanego jedno i dwu-osowego ściskania, których względne wagi można zmieniać zmieniając geometrię pułapki. Stosując podejście ścisłe jak i metody przybliżone, pozwalające intuicyjnie zrozumieć proces ściskania w obrazie klasycznej

przestrzeni fazowej, autor pokazuje, że możliwe jest uzyskanie parametrów ściskania takich jak w idealnych modelach jedno i dwu-osowego ściskania co w tym drugim przypadku oznacza możliwość osiągnięcia skalowania Heisenberga.

Ocena i uwagi krytyczne

Oryginalne wyniki przedstawione w pracy pozwalają na dogłębne zrozumienie własności stanów kwantowych kondensatów spinorowych o spinie 1 z punktu widzenia i potencjału interferometrycznego. Praca jest napisana bardzo jasno, omówione jest wiele szczegółów technicznych i czytający ma pełną jasność co do toku rozumowania którym podążał autor.

1. Moją pierwszą najistotniejszą uwagą krytyczną, jest fakt że autor skupia się wyłącznie na aspekcie „potencjału interferometrycznego” danych stanów kwantowych. Protokoły metrologii kwantowej w dużym uproszczeniu składają się z 3 etapów: przygotowania stanu, ewolucji układu, podczas której stan zmienia się w zależności od wartości estymowanego parametru, oraz pomiaru. W pracy, autor w zasadzie skupia się wyłącznie na części pierwszej tego zagadnienia, tak w części (i), gdzie przygotowanie polega na oczekiwaniu aż układ znajdzie się w odpowiednim stanie podstawowym /termicznym lub (ii) ewolucji stanu spinowego-koherentnego pod wpływem Hamiltonianu generującego ściskanie. Etap drugi jest potraktowany w pracy jako „idealne pudełko” gdzie następuje unitarne nakręcenie parametru, a układ fizyczny w pewnym sensie traci na ten czas całą swoją oryginalną dynamikę i strukturę. Obawiam się, że takie podejście powoduje, że nie jest oczywiste na ile z uzyskanych wyników można bezpośrednio wyciągnąć wnioski odnośnie praktycznych zastosowań metrologicznych tego typu układów. W szczególności, w pracy brakuje pokazania konkretnego fizycznego protokołu gdzie uzyskane wyniki przełożyłyby się na bezpośrednią receptę dla przeprowadzenia interesującego eksperymentu. Przykładowo myśląc o podejściu (i) jakiego rodzaju parametr mielibyśmy estymować? Czy może pole magnetyczne? Ale ono jest de facto jest używane na etapie przygotowanie stanu, czyli zadaje nam stan podstawowy układu. Czy mamy myśleć, że to pole przez jakiś czas jest stałe i w tym czasie układ termalizuje a następnie dopiero umieszczamy układ w polu nieznanym i próbujemy je mierzyć. Jeśli tak to jednak powinniśmy również na tym etapie uwzględnić dynamikę kondensatu, a nie liczyć jedynie informację Fishera odpowiadającą działaniu pewnego generatora $su(3)$. Podobnie w podejściu (ii) brakuje zupełnie dyskusji przebiegu procesu nakręcania parametru i czy na tym etapie dynamika kondensatu miałaby być zignorowana czy też zmodyfikowana w jakiś sposób aby nie zakłócać procesu „nakręcania parametru”.

2. W nawiązaniu do podejścia (i) i dyskusji powyżej, bardzo brakuje w pracy odniesienia do alternatywnego podejścia do metrologii kwantowej, gdzie badamy czułość na zmianę parametru poprzez badanie zmiany stanu podstawowego zmieniającego się Hamiltonianu. W związku z tym, że autor skupia się właśnie na zmienności stanów podstawowych kondensatu w zależności od np. siły pola magnetycznego taka dyskusja wydaje się naturalna i mogłaby rzucić nowe światło na relację pomiędzy metrologią rozumianą jako dynamiczne nakręcanie parametru a adiabatycznymi zmianami stanu podstawowego wraz ze zmianami Hamiltonianu, tak jak to zostało zaprezentowane np. w pracy: <https://arxiv.org/abs/1702.05660>. Autor w pewnym sensie stoi nieco rozkrokiem pomiędzy tymi podejściami, gdyż z jednej strony bada właśnie zmienność stanów podstawowych wraz ze zmianą Hamiltonianu, ale jednak w dalszym ciągu jako ostateczny „figure of merit” stosuje informację Fishera

liczoną w sensie dynamicznego nakręcenia parametru. Widzę, to bardzo duży potencjał do dalszych badań.

3. W części (i), autor rozważa pełną macierz Fishera 8×8 , związaną z wszystkimi 8-ma generatorami grupy $SU(3)$. Następnie jako miarę interferometrycznego potencjału stanu bierze największą wartość własną tej macierzy. Implicite jest tu przyjęte założenie, że dowolna kolektywna operacja $SU(3)$ jest równie łatwa do wykonania i dlatego zawsze możliwe jest przekształcenie danego generatora z którym nakręca się parametr w dowolny inny. Możliwe, że jest to prawda w rozważanym układzie, ale brak w pracy jasnej informacji w jaki sposób w praktyce tego typu ogólne operacje są wykonywane eksperymentalnie.

W tym kontekście, chciałem zwrócić uwagę na pewną niedbałość stosowanej przez autora notacji gdy dyskutuje to podejście. W równaniu (2.8) wprowadza generatory grupy $SU(3)$ jako macierze 3×3 a następnie kombinacji tych generatorów używa we wzorze (2.12) w roli operatorów działających na macierze gęstości opisujące stany atomów. Brakuje tu zupełnie kroku, w którym odwołujemy się do reprezentacji grupy $SU(3)$ nad rozważaną przestrzenią Hilberta poprzez np. pokazanie jak generatory reprezentują się poprzez operatory kreacji, anihilacji – czyli odwołanie się do reprezentacji Jordana-Schwingera. Oczywiście w dalszym ciągu pracy autor poprawnie przeprowadza wszystkie rachunki, stosując powyższą reprezentację, nie mniej nigdzie w pracy nie jest to jawnie powiedziane.

4. Dość poważną chwilę zwątpienia w swoje zdolności umysłowe przeżywał recenzent w rozdziale 3, gdzie autor stosując metodę przybliżenia pola średniego, gdzie de facto rozważane są stany produktowe pokazywał jak dla różnych faz układu możliwe jest uzyskanie skalowania Heisenberga. Na stronie 33 autor tłumaczy się z tego pisząc, że faktycznie czytelnik może się dziwić tym faktem, i tłumaczy ten pozorny paradoks tym, że wartości uzyskiwane w ramach teorii pola średniego są wstawiane do wzorów, które zostały wyprowadzona dla stanów czystych o ustalonej wartości magnetyzacji, podczas gdy w stanach produktowych rozważanych w ramach pola średniego mamy superpozycję stanów o różnych wartościach magnetyzacji. Faktycznie, to wyjaśnienie pozwala zrozumieć, że nie ma tu matematycznej sprzeczności, ale w żadnym razie nie wyjaśnia dlaczego „tego typu sztuczka” w ogóle ma sens fizyczny? Dla czytelnika sprawia to wrażenie albo przypadkowej zbieżności wyników, albo istnienia głębszych powodów które za tym stoją, a o których autor nie pisze.

5. Korzystając z faktu że rozważany układ jest 3-poziomowy, autor czyni analogię z trójramiennym interferometrem (Rys. 2.4), gdzie w szczególności wprowadza dwie względne fazy pomiędzy różnymi parami ramion sugerując, że mamy tu do czynienia z zagadnieniem estymacji wieloparametrowej. Faktycznie można taki problem rozważać, ale w pracy nigdzie więcej estymacja wieloparametrowa jako taka się nie pojawia, a tym samym rysunek ten może wprowadzać jedynie zamęt u czytelnika. W całej pracy stosowane jest podejście: estymujemy jeden parametr związany z generatorem dającym największą czułość – dopiero w podsumowaniu pojawia się komentarz na temat jednoczesnego estymowania wielu parametrów.

Podsumowanie.

Mimo powyższych uwag krytycznych moja ocena pracy jest bardzo pozytywna. Widać w niej ogromną pracę włożoną przez autora w szczegółowe zrozumienie własności stanów spinorowych kondensatów w kontekście zastosowań metrologicznych. Widać też szerokie spektrum narzędzi stosowanych przez autora począwszy od metod numerycznych po metody analityczne ścisłe i przybliżone. Bibliografia jest bardzo bogata i pokazuje szerokie horyzonty autora i dobrą orientację w literaturze (szkoda jedynie, że stosowany jest format bibliografii najbardziej nieprzyjazny czytelnikowi – pozycje z odwołaniami numerycznymi, numerowane według kolejności alfabetycznej...). Praca pozostawia jednak sporo niedosytu przez brak bezpośredniego przełożenia na praktyczne protokoły metrologiczne z jednej strony, jak również brak bardziej ogólnych wniosków mających znaczenie dla całej dziedziny interferometrii opartej na zimnych atomach. Są to jednak oczekiwania, które zważywszy na złożoność tematyki, można uznać za nieco zbyt wygórowane w odniesieniu do pracy doktorskiej. Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że praca spełnia zwyczajowe i ustawowe wymogi stawiane pracom doktorskim i rekomenduje dopuszczenie mgra Dariusza Kajtocha do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Rolir Olszowski-Dobna