

Kwantowa spójność i korelacje w układzie zimnych atomów

Głównym celem tej pracy jest lepsze zrozumienie nieklasycznych korelacji w układach ultra-zimnych atomów. Główną przeszkodą stojącą na drodze do osiągnięcia tego celu stanowi niekonstruktywna definicja kwantowego splątania. Jednym z rozwiązań tego problemu, który został przedstawiony w tej rozprawie, jest zbadanie natury splątania z punktu widzenia jego przydatności dla niektórych zadań, takich jak kwantowa metrologia. Efektywności, z którą zadanie to jest wykonywane, gdy stan kwantowy jest używany jako zasób, może służyć jako miara stopnia splątania.

Atomowa interferometria, rodzaj kwantowej metrologii, wykorzystuje falową naturę materii i splątanie między cząsteczkami aby osiągnąć dokładność pomiaru fazy nieosiągalną przez klasyczne urządzenia. Okazuje się, że układy oparte o ultra-zimne atomy nadają się doskonale do wykonania tego typu zadań.

We współczesnych układach doświadczalnych kondensat Bosego-Einsteina, służący jako sonda wprowadzona do atomowego interferometru, opisuje się jako zbiór kubitów. Ze względu na bozonową naturę tych kubitów, kondensat można równoważnie opisać jako pojedynczą cząstkę z pseudo-spinem równym połowie liczby cząstek N . Stąd wynika, że każda (unitarna) transformacja interferometryczna jest równoważna sekwencji obrotów pseudo-spinu, z tym że jeden z kątów obrotu jest nieznaną fazą. Ponadto, ponieważ każde unitarne przekształcenie pojedynczego kubitu jest równoważne obrotowi, każda spójna transformacja zbioru kubitów (czyli transformacji, która działa na każdy kubit w jednakowy sposób) jest równoważna globalnemu obrotowi całego układu. Co więcej, w tym przypadku kondensatu kubity są nierozróżnialne, a więc adresowanie cząstek indywidualnie jest fizycznie niemożliwe. Oznacza to, że spójne obroty są jedynymi dopuszczalnymi operacjami lokalnymi, tzn. operacjami które nie wprowadzają lub nie niszczą splątania pomiędzy cząstkami.

Efektywność interferometru jest związana z dokładnością oszacowania nieznanej fazy. Według twierdzenia Craméra-Rao, znanego z klasycznej teorii estymacji które zostało uzupełnione o aspekty teorii kwantowej przez Braunsteina i Cavesa, dokładność jest ograniczona przez kwantową informację Fisher (QFI). QFI określa podatność stanu na zmiany wywołane przez zadaną transformację; w tym przypadku jest to sekwencja interferometryczna.

Jeśli transformacja jest spójna, QFI dla stanu niesplątanego nie może przekroczyć wartości zwanej „poziomem szumu śrutowego”. W związku z tym, dla zadanej sekwencji interferometrycznej, QFI może służyć jako kryterium wykrywające splątanie, które jest przydatne dla zwiększenia precyzji danego interferometru. To czy QFI wyryje użyteczne splątanie obecne w stanie zależy także od wyboru transformacji.

Z jednej strony, ta swoboda wyboru transformacji ma zasadnicze znaczenie dla osadzania zagadnienia natury splątania w kontekście rzeczywistych układów doświadczalnych. Z drugiej strony, taka niejednoznaczność może zagmatwać obraz fizyczny i uniemożliwić nam dojrzenie ważnych struktur i związków. Ten problem został rozwiązany poprzez wprowadzenie pojęcia dynamicznej podatności, która jest zdefiniowana jako QFI dla "standardowego" interferometru i zależy już tylko od stanu. Przy pomocy podatności dynamicznej można pokazać, że stany, które są użytecznie splątane dla jednej sekwencji interferometrycznej, są związane ze stanami użytecznymi dla innych interferometrów poprzez spójne transformacje, które zachowują stopień splątania cząstek.

Wykorzystując równoważności między bozonowymi kubitami a cząstką ze spinem, pokazano w jaki sposób nierozróżnialności bozonów można zwiększać ogólny stopień splątania cząstkowego. Podatność na zmiany ze względu na spójne transformacje (mierzona przez dynamiczną podatność) układu o całkowitym spinie $N/2$ jest w ogólności większa od podatności zespołu N spinów $\frac{1}{2}$ (czyli kubitów). Gdyby kubity tworzące układ były rozróżnialne, ich spiny mogły być dodane na wiele sposobów, co prowadzi do zmniejszenia podatności stanu. W przypadku identycznych kubitów jedyną możliwością jest dodanie poszczególnych spinów do maksymalnego całkowitego spinu $N/2$, pozwalając na potencjalnie maksymalny stopień splątania.

Kryteria splątania oparte na QFI, w tym dynamiczna podatność, ukazują bezpośredni związek między splątaniem cząstkowymi i podatnością stanu na obroty. W klasycznej fizyce, taką podatnością jest moment bezwładności układu, który zależy od rozkładu masy w odniesieniu do osi obrotu. Faktycznie, okazuje się, że dynamiczna podatność jest ściśle związane z kwantowym odpowiednikiem klasycznego momentu bezwładności. W przypadku kwantowym, oś obrotu jest zadana przez osi kwantyzacji, a klasyczna masa zostaje zastąpiona składowymi macierzy gęstości rozłożonej w bazie tensorów sferycznych.

Ostatecznym wynikiem pracy jest skonstruowanie klasycznego modelu stanu kwantowego i jego splątania. W tym modelu, stan N bozonowych kubitów jest reprezentowany przez zbiór koncentrycznych sfer o coraz większym promieniu. Kwantowy charakter układu objawia się w postaci dodatkowej reguły, według której masa każdej sfery może się znajdować tylko na równoleżnikach, których odległość od osi obrotu jest skwantowana. Model ten oparty jest na analogii między dynamiczną podatnością i klasycznym momentem bezwładności ciała sztywnego i wiąże stopień korelacji między kubitami z rozkładem fikcyjnej masy na powierzchniach sfer. Najsilniej splątane stany są reprezentowane przez klasyczny układ, którego masa jest w większości zlokalizowana w pobliżu równików największych sfer, tak, że moment bezwładności jest największy.