

„Właściwości zderzeniowe oraz efekty wielociałowe w ultrazimnych układach. Interferometria kwantowa.”

Streszczenie pracy doktorskiej

Wielocząstkowe stany splątane są wytwarzane w coraz większej liczbie współczesnych doświadczeń. Takie stany wykorzystywane są w atomowej interferometrii kwantowej w celu przekroczenia granicy szumu śrutowego. Granica ta, nakładana na precyzję estymacji nieznanego parametru, obowiązuje dla wszystkich stanów, w których występują tylko klasyczne korelacje pomiędzy cząstkami. Można ją jednak przekroczyć, jeżeli stan układu, wykorzystany w interferometrze, zostanie odpowiednio przygotowany. Istnieje zatem klasa stanów nieklasycznie skorelowanych, które są także użyteczne w metrologii.

Głównym zadaniem tej pracy jest pokazanie, że nierozróżnialność cząstek w układzie bozonów jest zasobem, który można wykorzystać na rzecz ultra-precyzyjnej interferometrii. W tym celu zbadano dwa typy układów i udowodniono, że występują w nich nieklasyczne korelacje. W pierwszym układzie pary identycznych cząstek są rozpraszane z kondensatu Bosego-Einsteina do dwóch rozdzielonych regionów, które następnie mogą zostać utożsamione z ramionami interferometru. W drugim przypadku, stanem wejściowym interferometru są dwa niezależnie przygotowane kondensaty Bosego-Einsteina, w których nieklasyczne korelacje są wynikiem nierozróżnialności cząstek.

Punktem wyjścia do przeprowadzenia analizy tych układów jest fakt, że istnieją stany splątane, które są bardzo podatne na interferometryczne transformacje. Podatność ta jest bezpośrednio związana z rozróżnialnością dwóch rozkładów prawdopodobieństwa, które charakteryzują stany układu. Jeżeli rozważane stany w pewnym sensie leżą blisko siebie, to okazuje się, że wszystkie miary rozróżnialności prawdopodobieństw, które są przedstawione w pracy, opisywane są tylko jednym parametrem. Parametr ten, nazywany klasyczną informacją Fishera, jest wielkością, która charakteryzuje podatność stanu na transformację. Twierdzenie Craméra-Rao, w którym pojawia się informacja Fishera, łączy zagadnienie rozróżnialności stanów z metrologią.

Po przedstawieniu formalizmu matematycznego, udowodniono twierdzenie, które wiąże informację Fishera z występowaniem nieklasycznych korelacji w układzie. Okazuje się więc, że te korelacje są konieczne, aby w estymacji fazy interferometrycznej otrzymana precyzja była większa niż granica szumu śrutowego.

Przed wykorzystaniem stanu w interferometrii należy się upewnić, że stan jest użytecznie splątany. Z punktu widzenia doświadczenia pomocne jest zatem, aby posiadać proste kryterium splątania, które świadczyłoby o potencjalnej użyteczności stanu jeszcze przed skonstruowaniem urządzenia. Takim kryterium jest nierówność Cauchy'ego-Schwarza. W pracy tej udowodniono, że w układach, w których nie ma koherencji pomiędzy stanami z różną całkowitą liczbą cząstek, łamanie tej nierówności świadczy o obecności splątania.

Nierówność ta jest łatwa do zbadania we współczesnych doświadczeniach, a więc może być punktem startowym charakteryzującym nieklasyczość stanu.

Po przedstawieniu badań teoretycznych następuje analiza konkretnych układów doświadczalnych. Najpierw rozważono proces zderzenia dwóch kondensatów Bosego-Einsteina, w którym atomy są rozpraszane we wszystkich kierunkach. Głównym celem tych badań jest produkcja splątanych par atomów. Okazuje się jednak, że rozważany schemat eksperymentalny prowadzi do efektów, które są destrukcyjne dla produkcji splątanych par użytecznych w metrologii. Potrzebny jest zatem inny układ, w którym wspomniane zjawiska nie będą występowały.

W głównej części pracy przedstawiono ogólną teorię, która opisuje rozpraszanie par atomów z kondensatu w dwa oddzielne regiony. Pokazano, że taki układ, w przeciwieństwie do wcześniej rozważanego, jest źródłem splątanych par użytecznych w ultra-precyzyjnej interferometrii. Co więcej, nierówność Cauchy'ego-Schwarza, która jest łamana w tym układzie, może służyć jako proste kryterium wykrywające splątanie. Opracowaną teorię zastosowano do realistycznego układu z tzw. „bliźniaczymi wiązkami atomów”.

W ostatniej części zaprezentowano interferometryczną procedurę, która wykorzystuje dwa niezależnie przygotowane kondensaty Bosego-Einsteina. Wykazano, że splątanie, które występuje w układzie, wynikające z nierozróżnialności cząstek, pozwala na osiągnięcie precyzji większej niż granica szumu śrutowego. W pracy tej przedstawiono warunki, w których zachodzi ten efekt, oraz schemat estymacji, który wykorzystuje splątanie kondensatów. Zaproponowany układ pokonuje trudności spotykane w eksperymentach, związane z przygotowaniem stanu splątanego. Warunkiem wykorzystania dwóch niezależnych kondensatów w metrologii jest posiadanie kontroli nad rozkładem całkowitej liczby cząstek w każdym z kondensatów.

W pracy tej istotną rolę odgrywał związek pomiędzy wysoką podatnością stanów na zmianę a obecnością nieklasycznych korelacji. Podatność ta, mierzona za pomocą informacji Fishera, została tutaj wykorzystana w ultra-precyzyjnej metrologii. Ta sama idea rozróżnialności stanów i podatności na transformacje może znaleźć zastosowanie również w innych dziedzinach fizyki.