

Abstract

Many-body Correlations as a Resource for Quantum Metrology

by Artur NIEZGODA

Quantum metrology is a field of physics that exploits quantum phenomena in order to increase precision of measurements. In atom interferometry, a branch of metrology, such measurements are bounded by the shot-noise limit whenever the system is classically correlated. It has been shown that states exhibiting quantum correlations – such as entanglement – enhance the sensitivity of quantum sensors, allowing for precision beyond the standard quantum limit. For these reasons, entanglement is a useful resource for quantum metrology. However, the strongest entangled states exhibit a phenomenon known as nonlocality that has been the object of intensive research for several decades. Nonlocally correlated states are also of scientific interest from the perspective of quantum metrology.

We begin by showing that the interference pattern formed by two overlapping Bose-Einstein condensates can be used to detect Bell correlations in the system. In our analysis we include various noise sources present in typical experiments.

In the next step, we explore systems of Bose-Einstein condensates in two-mode and three-mode configurations, in which the entangled states useful for quantum metrology are generated through the dynamics governed by the given Hamiltonians. We show a scheme allowing for ultra-precise measurements that saturate the quantum Cramér-Rao bound.

We then derive a correlator that detects many-body correlations from the single element of the density matrix. Moreover, we show that such an object, properly analyzed, provides information about the extent of many-body entanglement and nonlocality. We illustrate our findings with experimentally accessible interacting spin chains.

In the last part of this dissertation we derive a lower bound for quantum Fisher information using the previously constructed correlators, and we affirm that many-body nonlocality is a resource for quantum metrology.

Streszczenie

Korelacje wielociałowe jako zasób dla metrologii kwantowej

Artur NIEZGODA

Metrologia kwantowa to dziedzina fizyki, która wykorzystuje zjawiska kwantowe w celu zwiększenia precyzji pomiarów. W interferometrii atomowej, technice metrologii wykorzystującej atomy, granica szumu śrutowego zadaje maksymalną dokładność pomiaru przy użyciu układów klasycznie skorelowanych. Wykazano, że stany wykazujące korelacje kwantowe – takie jak splątanie – zwiększają dokładność czujników kwantowych umożliwiając precyzję wykraczającą poza standardową granicę kwantową. Z tych powodów splątanie jest użytecznym zasobem dla metrologii kwantowej. Wśród układów najsilniej splątanych występuje zjawisko zwane nielokalnością, które jest przedmiotem intensywnych badań od kilkudziesięciu lat. Stany nielokalnie skorelowane są również przedmiotem zainteresowania naukowego z perspektywy metrologii kwantowej.

Zaczynamy od pokazania tego, że prążki interferencyjne będące wynikiem interferencji dwóch kondensatów Bosego-Einsteina można wykorzystać do wykrycia korelacji Bella w układach kwantowych. W naszej analizie uwzględniamy różne źródła szumu występujące w typowych eksperymentach.

W kolejnym kroku badamy układy kondensatów Bosego-Einsteina w konfiguracjach dwu- i trój-modowych, w których stany splątane przydatne w metrologii kwantowej są generowane poprzez dynamikę zadaną Hamiltonianem. Prezentujemy schemat pozwalający na ultra-precyzyjne pomiary, które nasycają kwantową granicę Craméra-Rao.

Następnie wyprowadzamy korelator, który wykrywa korelacje wielociałowe z pojedynczego elementu macierzy gęstości. Ponadto pokazujemy, że taki obiekt, odpowiednio przeanalizowany, dostarcza informacji o stopniu wielociałowego splątania i nielokalności. Nasze odkrycia ilustrujemy dostępnymi eksperymentalnie oddziałującymi łańcuchami spinowymi.

W ostatniej części niniejszej rozprawy, przy użyciu wcześniej skonstruowanych korelatorów, wyprowadzamy dolną granicę dla kwantowej informacji Fishera i stwierdzamy, że wielociałowa nielokalność jest zasobem metrologii kwantowej.