

КВАНТОВАЯ МЕТРОЛОГИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТРЁХМОДОВЫХ СОСТОЯНИЙ ЗАПУТАННЫХ СОЛИТОНОВ

Осипов С.В. (Университет ИТМО), Царёв Д.В. (Университет ИТМО)

Научный руководитель – профессор, доктор физ.-мат. наук, Алджанц А.П. (Университет ИТМО)

Введение. Квантовая метрология – это наука, занимающаяся измерением физических величин с максимально возможной точностью на уровне фундаментальных квантовых ограничений. Традиционные подходы к метрологии с использованием когерентных состояний лазерного источника ограничены по точности стандартным квантовым пределом (СКП) $\Delta\varphi=1/N^{1/2}$, где N – число частиц, участвующих в измерении. Использование неклассических, например запутанных или сжатых квантовых состояний, позволяет преодолеть СКП и приблизиться к т.н. пределу Гейзенберга (ПГ) $\Delta\varphi=1/N$. Отдельно следует выделить максимально запутанные по пространству $N00N$ состояния, которые позволяют достичь предел Гейзенберга на любом двумодовом устройстве [1]. Однако, $N00N$ состояния трудно приготовить с большим числом частиц, и они очень чувствительны к потерям, неизбежным в реальном эксперименте. Ранее было показано, что мезоскопические запутанные светлые солитоны, известные как солитонные джозефсоновские контакты (СДК) позволяют приготовить $N00N$ -подобные состояния с числом частиц $N\sim 10^3$ устойчивых к потерям и декогеренции [2]. Данная работа посвящена развитию модели СДК на случай трёх мод, что находится в русле современных исследований, посвященных одновременному измерению нескольких параметров и квантовой метрологии с использованием сетевых структур.

Модель ТМСДК. Рассматриваемая модель трёхмодовых солитонных джозефсоновских контактов (ТМСДК) представляет собой три светлых материально-волновых солитона атомного Бозе-конденсата (БЭК), помещенного в три сильно вытянутые сигарообразные ловушки. Ловушки расположены на близком расстоянии таким образом, что перекрытие волновых функций солитонов в поперечном направлении обеспечивает туннельную (джозефсоновскую) связь по схеме каждый с каждым. Такая модель отличается универсальностью, она не привязана к конкретной физической системе и помимо атомных БЭК может быть реализована с помощью оптических солитонов в нелинейных волноводах, а также на основе экситон-поляритонных БЭК в полупроводниковых микрорезонаторах.

В рамках подхода среднего поля были получены шесть уравнений динамики на основные параметры ТМСДК – амплитуды и фазы солитонов. Исследование стационарных состояний такой системы показало возможность формирования трёхмодового $N00N$ состояния, позволяющего измерять фазовые параметры с точностью на уровне ПГ. Более того, было показано, что трёхмодовое $N00N$ состояние ТМСДК обладает собственным фазовым сдвигом, нелинейно зависящим от параметров среды, что открывает возможности для нелинейной квантовой метрологии с точностью $\sim N^{-3}$, превышающей предел Гейзенберга на два порядка по числу частиц.

Далее в рамках квантовой задачи была разработана квантовая модель ТМСДК. Был исследован энергетический спектр модели ТМСДК, показан квантовый фазовый переход системы из атомно-когерентного состояния в $N00N$ состояние. Важно отметить, что такой фазовый переход имеет строго квантовую природу и не может быть исследован полуклассически в рамках теории среднего поля.

Наконец, было исследовано влияние небольших потерь частиц на основное состояние системы ТМСДК и точность квантовой метрологии. Учет потерь частиц моделировался методом фиктивных светоделителей, см. [3]. Показано, что вблизи фазового перехода состояние ТМСДК оказывается более устойчивым к потерям частиц, чем трёхмодовое $N00N$ состояние, за счёт наличия небольших сателлитных фоковских мод.

Выводы. Разработана квантовая модель ТМСДК; показано формирование трёхмодового $N00N$ состояния системы; исследована точность квантовой метрологии системы вблизи фазового перехода и вдали от него в пределе $N00N$ состояния; показано достижение и преодоление предела Гейзенберга в рамках линейной и нелинейной квантовой метрологии, соответственно, в том числе в присутствии небольших потерь частиц.

Список использованных источников:

1. Dowling, Jonathan P. "Quantum optical metrology—the lowdown on high- $N00N$ states." Contemporary physics 49.2 (2008): 125-143.
2. Alodjants, Alexander, Dmitriy Tsarev, and Ray-Kuang Lee. "Enhanced nonlinear quantum metrology with weakly coupled solitons in the presence of particle losses." Physical Review A 105.1 (2022): 012606.
3. Dorner U. et al. Optimal quantum phase estimation //Physical review letters. – 2009. – Т. 102. – №. 4. – С. 040403.