

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Безуглова Николая Николаевича на диссертацию Масалаевой Натальи Игоревны на тему «Неклассические состояния света и ансамбля холодных атомов: получение и использование для квантовых вычислений и симуляций», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Управление атомными состояниями в холодных средах с помощью процессов взаимодействия света и вещества, создание перепутанных состояний между ними на основе внутристационарных технологий представляют собой востребованные области исследований с постоянно расширяющейся сферой применения. Заявленной целью рецензируемой работы является теоретическое описание процессов формирования неклассических состояний света и ансамбля холодных атомов, с обсуждением перспектив их использования для квантовых вычислений и симуляций.

В процессе выполнения указанной цели соискателем проделана интересная и актуальная работа, которая подробно описана и хорошо оформлена в тексте диссертации. Материал диссертации изложен в четырех главах и шести приложениях. К достоинствам работы относится представленный в ней аккуратный анализ (часть которого вынесена в приложения) условий применимости сделанных допущений в используемых теоретических моделях с обсуждением точности, как численных схем, так и аналитических формул, применяемых или получаемых в рамках этих допущений.

В первой вводной главе даётся хорошо структурированный обзор по современному состоянию дел в сопредельных к теме диссертации разделах квантовой оптики с указанием специфических особенностей заявленных в настоящей работе задач. Оригинальные исследования соискателя во **второй и третьей** главах сосредоточены на процессах комбинационного рамановского рассеяния квантов света из управляющих лазерных полей на холодных атомных средах, помещенных в оптический резонатор с выделенной модой. Рассматриваются Л-схемы трехуровневых атомов с двумя компонентами основного состояния и одиночным верхним уровнем. **Вторая глава** посвящена анализу процессов формирования неклассических состояний между светом и веществом. В качестве базовой модели берется высокодобротный одномодовый кольцевой оптический резонатор, в которой помещается пространственно протяженный ансамбль холодных атомов. В рамках используемой Л-схемы возбуждения атомов одним сильным классическим полем, рамановское рассеяние света управляющего лазера приводит к попарной генерации квантов возбуждения коллективного атомного спина и внутристационарного поля, которое затем вытекают наружу через полупропускающее зеркало с возможностью последующего измерения. Одним из важных полученных результатов является предъявленная в аналитической и численной формах связь для степени сжатия и перепутывания коллективного спина атомов и наблюдаемого сигнала, а также числом захваченных резонаторной модой фотонов. Весьма красиво, с помощью привлечения метода согласования импеданса, решена обратная задача по восстановлению оптимального временного профиля управляющего поля при заранее заданной квазигауссовой форме вытекающего поля. Отметим, что все рассмотрение проводится баз

ограничений на степень добротности резонатора. Уход от традиционного в подобных задачах приближения "bad cavity" существенным образом расширяет возможности практического применения полученных результатов. В третьей главе усложнение базовой модели за счет перевода атомов в Бозе – Эйнштейновский конденсат и добавления второго управляющего лазера, работающего дисперсионно в паре с внутрирезонаторным полем, позволяет создавать дальнодействующее межатомное взаимодействие. Переносчиком последнего становится генерированное внутрирезонаторное поле, которое в зависимости от величин и соотношений между частотами Раби управляющих лазеров осуществляет различные типы взаимодействия с изменением или без изменения двух основных состояний атома. Эти состояния интерпретируются как спиновые состояния конденсата. После процедуры адиабатического исключения полевых переменных, различные члены полученного эффективного спинового гамильтонiana, как оказывается, соответствуют богатому набору взаимодействий между атомными плотностями, спинами и их комбинированному взаимодействию. Представленная систематизация численных решений соответствующих уравнений Гейзенберга, дополненная рассмотрением особенностей функционала плотности энергии, позволили описать различные типы пространственной самоорганизации и магнитного порядка конденсата, а также переходы между ними при плавном изменении интенсивностей управляющих полей. В четвертой главе акцент исследований смешен на подробный анализ нового метода по приготовлению важного класса неклассических состояний типа кота Шредингера. Ключевым моментом является использование негауссового ресурсного состояния (вспомогательный осциллятор в состоянии кубической фазы) в сочетании с начальным состоянием основного осциллятора с ограниченной областью распределения в координатном пространстве, например вакуумного или Фоковского. После применения к осцилляторам перепутывающего унитарного преобразования C_z и измерения импульса $p=u_m$ вспомогательного осциллятора, первый из них, в идеале, может оказаться в суперпозиции двух копий своего входного состояния, симметрично разнесенных вдоль импульсной координаты на величины $\pm u_m$. Неидеальность связана с возможными деформациями суперпозиционных копий и наложениями их одна на другую при небольших измеренных значениях u_m . Центральным результатом главы является получение критерия верности для оценки качества полученных состояний типа кота Шредингера. Найдены условия, обеспечивающие работу схемы с высокой точностью, с приведением сопутствующих иллюстраций поведения функций Вигнера выходных состояний на фазовой плоскости для широкого диапазона параметров.

Научная ценность работы и высокий уровень проведенных исследований подтверждается четырьмя публикациями в международных рейтинговых журналах и аprobацией на более чем десяти российских/международных конференциях/семинарах. Оригинальные теоретические подходы, предложенные в работе при моделировании квантовой внутрирезонаторной спектроскопии холодных и конденсированных сред, в сочетании с новыми методами генерации состояний типа кота Шредингера имеют хорошие перспективы для своего дальнейшего развития с выходом на новые возможности по созданию квантовых симуляторов, выполнению квантовых вычислений, проектировке защиты квантовых вычислений от различного рода ошибок и квантовой инженерии в целом.

В качестве небольших замечаний по оформлению диссертации следует отметить следующее. (а) Наблюдается некоторая небрежность в указании ссылок: при цитировании статей [12], [28-30] нет названия журналов; все шесть Приложений в основном тексте именуются как “Приложение 4.4”. (б) Наличие нескольких опечаток: стр. 23 (нумерация страниц приводится для русской версии работы) - в третий строке сверху частота моды резонатора обозначена как ее отстройка от частоты управляющего лазера; стр. 25 – в первой строке после уравнения (1.18) потенциал $V(r)$ именуется как оптическая решетка; стр. 34 – в уравнении (1.30) волновая функция в первой строчке приравнивается оператору; стр. 83 - судя по уравнению (4.18), в ряд Тейлора раскладывается не весь добавочный множитель, а его фаза.

К соискателю имеется также несколько вопросов, касающихся уточнения некоторых технических деталей приведенных в работе математических выкладок. (i) В разделе 2.6 при обсуждении метода согласования импеданса на стр. 53, во второй строке сразу после уравнения (2.64) предполагается, что амплитуда коллективного спина чисто мнимая, хотя при нахождении параметра связи начальное значение этой амплитуды берется вещественным, равным единице (третья строка после уравнения (2.65)). Насколько это является правомерным? (ii). Описание уравнений Гейзенберга (3.12 б) на стр. 67 не содержит формулировку пространственных граничных условий для спиновых полей конденсата. Должны ли они быть пространственно периодическими, и, если “да”, то с каким периодом? (iii) Метод последовательных приближений, изложенный на стр. (69) для численного нахождения средних значений полевых и спиновых амплитуд подразумевает итерационную последовательность решений уравнений (3.12 б) с определенными в процессе итерации амплитудами резонаторного поля. В каком, стационарном или нестационарном варианте, решались спиновые уравнения?

Оценивая работу в целом, можно сделать заключение, что диссертация Масалаевой Натальи Игоревны на тему: «Неклассические состояния света и ансамбля холодных атомов: получение и использование для квантовых вычислений и симуляций» выполнена на высоком научном уровне и соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 19.11.2021 № 11181/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Масалаева Наталья Игоревна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета, доктор физико-математических наук,
снс, профессор Санкт-Петербургского государственного университета

Безуглов Николай Николаевич

Дата 05.03.2022