

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Мехова Игоря Борисовича на тему: «Квантовая оптика ультрахолодных квантовых газов: открытые системы за рамками диссипации», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6. – оптика

Общая характеристика работы: Представленная диссертация рассматривает проблему оптических взаимодействий света и атомов в условиях, когда атомный ансамбль присутствует как вырожденный квантовый газ. Всего несколько десятилетий назад подобные системы могли рассматриваться лишь умозрительно, но сейчас они являются доступными для эксперимента объектами. Автор диссертации – Мехов Игорь Борисович – является одним из участников проводимых в этом направлении работ, обеспечивая их теоретическую поддержку, и в диссертации проведен обзор выполненных им расчетов и разработанных теоретических моделей. В основе развиваемого подхода заложены методы квантовой теории поля, адаптированные к задачам статистической физике, и формализм вторичного квантования, используемый автором для последовательного описания полевой и атомной подсистем.

Главной особенностью работы является отслеживаемая возможность воздействия светом на макроскопическое квантовое состояние атомов, которое может трансформироваться к сжатым «гауссовым» состояниям, либо к более сложным, коррелированным по числам заполнения атомов, состояниям, либо к макроскопическим суперпозициям квантовых состояний, характеризующихся «негауссовой» структурой квазивероятностных распределений. Всё это представляет несомненный интерес в свете динамично развивающейся области квантовых технологий и разработки систем связи нового поколения, опирающихся на квантовые регистры памяти и каналы обработки информации с квантовым кодированием.

Как представляется рецензенту, представленная диссертационная работа, в достойном сочетании с работами других авторов, закладывает основы нового научного направления – *Объединенной квантовой оптики световых и материальных волн*.

Оценка полученных результатов (выборочно по главам диссертации):

Первая глава является вводной описывающей теоретическую основу подхода, далее развиваемого в диссертации. Гамильтониан Бозе-Хабарда расширен оптическим каналом взаимодействия. Автора интересует насколько традиционные для линейной оптики процессы, включающие когерентные и некогерентные каналы рассеяния, явление дифракции и т.п., чувствительны к условиям квантового вырождения. Как этого и можно было ожидать, отличия в основном связаны со статистикой и взаимными корреляциями состояний поля и вещества. Отдельно отметим идею использования, так называемых, «неразрушающих измерений» для фиксации результата взаимодействия по измерению состояния света в заданных каналах рассеяния. Провести детектирование рассеянного света относительно просто, и это, по положительному опыту предшествующих работ, проведенных с «теплыми» и «холодными» атомами, может рассматриваться как способ управления квантовым состоянием вещества также и в условиях квантового вырождения.

Во второй главе эта концепция развивается и автором проводится детальный анализ того, как взаимодействие световой подсистемы с вырожденным и пространственно структурированным атомным газом. Моделирование процесса взаимодействия проводится отслеживанием «квантовых скачков» в эволюции состояния атомной подсистемы и построении квантовой траектории процесса. Показывается, что различные проекционные измерения света подверженного дифракционному рассеянию конвертирует состояние конденсата, приводя либо к квадратурному сжатию параметра порядка, либо к образованию макроскопического суперпозиционного состояния. Интересной особенностью является обнаруженный автором «коллапс конечного состояния в многочастичное состояние Фока». В целом, как следует из диссертации, использование материальных волн позволяет готовить более широкий набор различных [в том числе негауссовых] квантовых состояний, чем это допускает нелинейная оптика световых волн. При этом, в отличие от света, материальные волны локализованы и в пределах времени когерентности доступны для дальнейших преобразований.

В третьей главе автором рассматриваются системы с внутренним взаимодействием. Внимание автора обращено к открытым системам, неэрмитовым гамильтонианам, нарушению \mathcal{PT} -симметрии и квантовому парадоксу Зенона. Обычные представления об открытых системах приводят к необратимости эволюции в направлении равновесного состояния, определяемого стационарным решением уравнения Больцмана-Линдблада. Однако, если в диссипативный канал «вмешаться» определенной байесовской стратегией измерений, то можно предотвратить распад и сохранить систему в чистом состоянии. Если процессы диссипации связать с контролируемыми каналами рассеяния, то, как показывается в диссертации, модель Бозе-Хабарда приводит к формированию определенных квантовых суперпозиционных состояний атомов по их числам заполнения узлов решетки.

Четвертая глава посвящена системам с обратной связью. Результаты измерения могут использоваться как способ коррекции параметров оптической решетки. Сложность решения задачи повышается и для описания обратной связи автором используется метод квантового стохастического уравнения. Расцепление случайных процессов осуществляется введением стохастической меры Ито. Построение квантовых траекторий приводит к наблюдению определенных конфигурационных изменений в распределении атомов, что интерпретируется как автором как управляемые во времени фазовые переходы и проводится аналогия с системами «временных кристаллов» и «решеток во времени».

Последняя пятая глава несет, по-видимому, перспективный посыл. Автором подчеркивается экспериментальная возможность связывать атом с резонатором посредством нескольких фотонов. Представленный материал как интересен, так и сложен. Если довериться ожиданиям и оценкам автора, то предлагаемый макроскопический квантовый объект – квантованное поле во всех модах и вырожденный атомный газ – суть квантовый симулятор с гибридной [атомно-полевой] архитектурой. Можно пожелать успеха в дальнейшем продвижении этого чрезвычайно сложного направления исследований.

По диссертации имеются следующие замечания

- 1) Использование модели Хаббарда, для упрощения оператора кинетической энергии, затрудняет описание конденсата Бозе-Эйнштейна в терминах параметра порядка, эволюционирующего в соответствии с уравнением Гросса-Питаевского. Известно, что обусловленная движением внутренняя интерференция фрагментов конденсата также может приводить к пространственным неоднородностям и эффектам дифракционного рассеяния Брэгга-Вульфа. Соответствующие экспериментальные работы групп MIT (D. Pritchard and W. Ketterle) и NBI (J. Muller and E. Polzik) и их теоретическое обсуждение, никак не отражены в диссертации.
- 2) Результаты работы в значительной степени опираются на гамильтониан (1.7). Принципиальным является то обстоятельство, что рассеяние в сигнальную моду усилено резонатором, что, по-видимому, предполагает значительный «параметр кооперативности» $C = g^2/2\kappa\gamma \gg 1$. Рассеянием в свободное пространство пренебрегается. Здесь были бы уместны оценки на основе имеющихся экспериментальных возможностей.

Сделанные замечания носят непринципиальный характер и не влияют на общее, безусловно, положительное впечатление от работы. Оценивая в целом:

Диссертация Мехова Игоря Борисовича на тему: «Квантовая оптика ультрахолодных квантовых газов: открытые системы за рамками диссипации» соответствует основным требованиям, установленным Приказом от 01.09.2016 № 6821/1 «О порядке присуждения ученых степеней в Санкт-Петербургском государственном университете», соискатель Мехов Игорь Борисович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6. – оптика. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушен.

Член диссертационного совета

д.ф.-м.н.,
вед. н. с. ЦКТ физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова



Д.В. Куприянов

Дата

15/11/2021