

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета на диссертацию Мехова Игоря Борисовича на тему:
«Квантовая оптика ультрахолодных квантовых газов: открытые системы за рамками
диссиляции»,

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по
специальности 1.3.6. – Оптика

Управление атомными состояниями в холодных газовых средах с помощью процессов взаимодействия света и вещества, основанное на широком использовании лазерных технологий, является быстро развивающейся областью исследований с широкой и постоянно расширяющейся сферой применения. Однако при охлаждение атомов в магнито-оптических ловушках с последующей их загрузкой в узлы оптических потенциалов используются сильные световые поля без учета квантовой природы света. Заявленная цель рецензируемой работы состоит в разработки теории новых явлений, в которых квантовая природа дебройлевских волн вещества и световых волн одинакова важна.

Для реализации поставленной цели, соискателем проделана интересная и большая работа, которая подробно и хорошо представлена в тексте диссертации. Материал диссертации четко структурирован с последовательным рассмотрением в пяти главах исследуемых явлений в порядке нарастания их многообразия и сложности. Каждая из глав, в свою очередь, разбита на набор подразделов где дается аргументированная постановка решаемых проблем, описание способов моделирования исследуемых процессов с ожидаемой реализацией на их основе новых явлений. К несомненным достоинствам работы относится многоуровневый подход к решению задач с привлечением различных теоретических методов (квантовые траектории, уравнения Гейзенберга–Ланжеvена, стохастическое уравнение Шредингера) в сочетании с дальнейшим обсуждением физических причин полученных результатов и ссылками на существующие аналоги в смежных разделах физики. Все это позволяет в ряде случаев прибегать к разумным и физически оправданным приближениям, которые сводят математическое описание сложных явлений к аналитически решаемым уравнениям.

В качестве базовой модели берется система ультрахолодного вещества, захваченного в потенциале оптической решетки и заключенного внутри оптического резонатора. Диагностика квантовых свойств вещества осуществляется с помощью рассеяния на нем зондирующего излучения в одну или несколько специально настроенных резонаторных мод, имеющих регулируемую угловую ориентацию относительно зондирующего пучка. Принципиально квантовый характер процесса рассеяния на квантованной пространственной структуре вещества фиксируется с помощью квантовых неразрушающих измерений различных характеристик (статистические моменты интенсивности, квадратуры амплитуд, число) детектированных фотонов

Сразу стоит отметить чрезвычайную гибкость представленной теоретической модели для изучения новых квантовых свойств вырожденного состояния вещества. Освещение зондирующими излучением различного набора узлов решетки или межузловых

промежутков позволяет организовывать рассеяние света на локальных плотностях в узлах или на межузловой атомной плотности, отражающей интерференцию полей материи. Другой тип измерений обусловлен варьированием фазы брэгговской дифракции на узлах с помощью подбора пространственной ориентации волновых векторов зондирующего и рассеянного в резонаторе света. Измерения вне брэгговских дифракционных максимумов свободны от сильной классической части и, таким образом, непосредственно отражают флуктуации плотности вещества.

Разработанная оригинальная математическая модель для описания динамики вещества совместно с процессами измерений оперирует с обобщенным гамильтонианом Бозе–Хаббарда и непосредственно устанавливает связь между характеристиками рассеянного света и характеристиками атомной системы многих тел, что демонстрируется в Главе 1 на примере определения флуктуаций и многоточечных пространственных корреляций плотности для многочастичных состояний вещества (бозонного или фермионного типа) в виде изолятора Мотта, сверхтекущего состояния и его когерентного приближения для многих узлов.

Впечатляющее достижение работы связано с доказательством (Глава 2) утверждения о том, что рассеяние света на атомных решетках представляет собой квантовое измерение с контролируемой формой обратного действия измерения. Непрерывные измерения выступают в качестве физического механизма, управляющего через свет динамикой фазовой когерентности, что дает совершенно новую возможность влиять и манипулировать атомными состояниями многих тел, таких как субпуассоновские (сжатые по числу атомов) состояния и макроскопические суперпозиционные состояния типа Котов Шредингера. При этом класс возникающих многочастичных состояний, структурированных в виде мод вещества, совместно с их характеристиками (например, степенью вырождения или числом Котов) может быть выбран с помощью оптической геометрии и частот света.

Более того, обратное действие квантовых измерений представляет собой новый источник конкуренции в системах многих тел, способный эффективно влиять на внутреннюю динамику атомной системы в дополнение к стандартному туннелированию и взаимодействию атомов на коротких расстояниях. В Главе 3 демонстрируется применение подобной конкуренции для генерации множества новых нетривиальных динамических эффектов, связанных с крупномасштабными многомодовыми колебаниями, дальним перепутыванием и коррелированным туннелированием, а также избирательным подавлением и усилением динамических процессов за рамками понятия квантового эффекта Зенона.

Раскрытию новых и плодотворных возможностей концепции измерений как динамического фактора посвящена Глава 4, где результаты измерений встраиваются в обратную связь для управления временной эволюцией квантовых систем (например, за счет сигнального изменения глубины оптического потенциала). В подразделах главы показано, что добавление обратной связи на основе измерений может индуцировать фазовые переходы с возможностью управлять квантовыми свойствами перехода путем настройки его критического показателя и, следовательно, класса универсальности. В частности теоретически (с помощью численных экспериментов и аналитических решений)

продемонстрированы возможности создания разнообразных квантовых симуляторов квантовых резервуаров, моделирующих явления, аналогичные задачам спинов в резервуарах, а также получения новых временных кристаллов Флоке с перестраиваемыми дальнодействующими взаимодействиями.

В последней, 5-ой Главе, акцент исследований смешен на рассмотрение систем, в которых сам потенциал захвата решетки является квантовым, например оптическая решетка создается одной или несколькими модами резонатора. Численное моделирование и анализ полученных уравнений показывают, что подобные квантовые решетки предлагают новый инструмент для конструирования нелокальных взаимодействий многих тел, используя пространственные структуры света. Свет и вещество перепутываются, образуя нетривиальные коррелированные состояния света и вещества. В главе предлагается способ генерации не только многомодовых структур плотности и сверхтвердых состояний, но и нелокальных структур когерентностей (атомных связей) вещества, в частности делокализованных сверхтекущих и сверхтвёрдых димеров.

Научная ценность работы и высокий уровень проведенных исследований подтверждается 29 публикациями, включая одну обзорную статью, в ведущих международных журналах и аprobацией более чем на 50 международных конференциях, на четырнадцати из которых соискатель выступал как приглашенный докладчик. Диссертация имеет практическую значимость для решения широкого круга фундаментальных и прикладных проблем в квантовой оптике, информатики, метрологии, физике открытых систем и квантовой инженерии. Инновационные методы и подходы, развитые в работе при моделировании квантовой внутрирезонаторной спектроскопии конденсированных сред, может существенно расширить и стимулировать данное направление исследований, открывая возможность создания квантовых симуляторов, недостижимых в системах с классическим светом, и разработки новых когерентных образований, выходящих за рамки аналогов, известных в физике конденсированного состояния вещества.

В качестве небольших замечаний можно отметить следующее. (а) Иногда затрудняет осмысление формул значок i , который, с одной стороны, используется как мнимая единица, а, с другой стороны, участвует в индексации узлов оптической решетки. (б) Наличие нескольких опечаток: на стр. 37 в двух последних строчках не закрыта круглая скобка (нумерация страниц приводится для русской версии работы); в уравнении (1.9) (стр. 43) для эрмитово-сопряженного оператора $D_{\{10\}}$ использовано комплексное сопряжение; в уравнении (3.111) (стр. 240) в первом члене в квадратной скобке справа от первого символа матрицы плотности должен стоять гамильтониан h .

К соискателю имеется также три вопроса. (а) В случае неглубоких оптических потенциальных ям можно ли провести аналогию между атомными модами, формируемыми обратным действием непрерывных глобальных измерений, и фононами в классических кристаллических решетках? Существуют ли эффекты, аналогичные эффекту Мессбауэра? (б) Существует ли схожесть между явлениям образования Куперовских пар и эффектом дальнего коррелированного туннелирования, вызванным глобальным измерением и приводящими к необходимости парного туннелирования атомов, как это представлено на Рис. 3.5, стр. 198. (с) В квантовой оптике поляритоны представляют темное состояние системы «фотон плюс метастабильный атом», параметры которого

(например групповую скорость) можно менять за счет изменения интенсивности зондирующего (управляющего) света. Можно ли построить образование типа поляритона для темных состояний оператора туннелирования, которые упоминаются на стр. 253, 254?

Оценивая работу в целом, следует сделать однозначное заключение о том, что диссертация Мехова Игоря Борисовича на тему: «Квантовая оптика ультрахолодных квантовых газов: открытые системы за рамками диссиляции» 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 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, доктор физико-математических наук,
снс, профессор Санкт-Петербургского государственного университета

Безуглов Николай Николаевич

Дата 23.11.2021



Личную подпись
Безуглова Н.Н.
заверил
Д. начальника отдела кадров №2
Константинова
23.11.2021