

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Голубевой Татьяны Юрьевны
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 научной специальности 1.3.6. Оптика.

Диссертация является результатом многолетней работы соискателя на пересечении квантовой оптики и физики ультрахолодных квантовых газов в оптических решетках. Автор ставит перед собой задачу объединить эти две области и разработать теорию новых явлений, в которых квантовая природа как атомных волн вещества, так и световых волн одинаково важна. Основной системой, рассматриваемой в данной работе, является квантовый газ в оптической решетке, тем не менее, также получены результаты, которые могут быть применимы в гораздо более широком контексте.

Актуальность и значимость работы определяются быстрым экспериментальным прогрессом в данном новом направлении. Самые недавние эксперименты ставят перед теоретиками задачу построить модели, которые до настоящего времени не рассматривались и которые можно будет проверить в ближайшем будущем. Таким образом, разработка новых теорий актуальна и имеет решающее значение для этой области. Кроме того, и квантовая оптика, и физика квантовых газов составляют основу квантовой информации и квантовых технологий, которые именно в наши дни вступают в индустриальную фазу своего развития.

В работе использованы теоретические подходы как из квантовой оптики, так и из физики многих тел (первоначально – физики конденсированного состояния вещества). Квантово-оптические методы включают уравнения Гейзенберга–Ланжевена, основное уравнение, стохастическое основное уравнение, стохастические уравнения в форме Ито и Стратоновича, моделирование волновой функции квантовым методом Монте-Карло. Многочастичные методы включают приближение среднего поля, задачи многомерной оптимизации и моделирование методом ренормализационной группы матрицы плотности (DMRG).

Большое внимание в работе уделяется проблеме измерений. Автор обсуждает различные типы квантовых измерений (квантовые неразрушающие измерения, непрерывные измерения с обратным влиянием результатов измерений, сильные и слабые измерения) и изменение эволюции квантовой системы при различных измерениях. Можно сказать, что изменение квантовых состояний путем измерений – это вопрос, проходящий красной нитью через всю диссертацию, а сама диссертация – отличный путеводитель по разным нетривиальным типам измерений.

Результаты работы были опубликованы в 29 статьях в журналах, индексируемых в Web of Science и Scopus, а также докладывались на многочисленных международных конференциях.

Работа состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы.

В Главе 1 сначала разрабатывается теоретическая модель взаимодействия между ультрахолодными атомами в оптической решетке и квантованными световыми модами резонатора. Переменные, связанные со светом и веществом, записаны как квантовые поля. Эта модель в различных приближениях далее используется во всех главах диссертации. Затем автор выявляет связь различных измеряемых статистических параметров света (средняя интенсивность и квадратура, число фотонов и флуктуации квадратур) со статистическими переменными ультрахолодного газа (флуктуации плотности и пространственные корреляции). Показано, что полные функции распределения различных многочастичных переменных могут быть отображены на спектрах пропускания резонатора. Продемонстрировано, что свет чувствителен не только к переменным, связанным с числом атомов в узлах решетки, но и к межузловой когерентности волн материи. Автор получает, что по рассеянию света можно отличить разные многочастичные атомные фазы, например, стекло Бозе, изолятор Мотта и сверхтекучее состояние. Показано, что при определенных условиях детектирование света представляет собой квантовое неразрушающее измерение (КНИ). Результаты применены к бозонным и фермионным многочастичным атомным системам, а также к молекулярным комплексам, состоящим из нескольких тел.

В Главе 2 рассмотрена проблема измерения с другой точки зрения: вместо повторяющихся измерений и усреднения рассматривается динамика системы во время

непрерывного детектирования света (описываемого одиночной квантовой траекторией). Во время взаимодействия свет и вещество перепутываются, так что измерение одной из квантовых подсистем (света) влияет на другую квантовую подсистему (атомы). Это пример фундаментального обратного действия квантового измерения, которое учтено в этой главе. Показывается, что рассеяние света на атомных периодических структурах представляет собой квантовое измерение с контролируемой формой обратного действия. Таким образом, измерение используется как активный инструмент для приготовления многочастичных атомных состояний, таких как состояние со сжатием по числу частиц и макроскопические суперпозиционные состояния. Более того, класс возникающих многочастичных состояний можно выбирать посредством изменения оптической геометрии и частоты света. Предлагаемый автором подход весьма интересен с прикладной точки зрения для создания квантовых состояний с требуемыми свойствами.

В Главе 3 рассматривается поведение квантовых систем в условиях, когда скорость квантовых измерений сравнима со скоростью туннелирования атомов (чего не было в предыдущей главе, где туннелирование практически не учитывалось). Доказано, что обратное действие квантовых измерений представляет собой новый источник конкуренции в атомных многочастичных системах в дополнение к стандартным туннелированию и ближнему взаимодействию атомов. Интересно, что измерение не должно являться квантовым неразрушающим измерением, чтобы иметь возможность конкурировать с другими процессами, и, таким образом, совершен выход за рамки концепции КНИ. Как часто бывает в физике, новый источник конкуренции может привести к новым эффектам. Продемонстрированы такие новые явления как генерация и макроскопические колебания мод материи со свойствами динамического сверхтвёрдого состояния, дальне-коррелированное туннелирование и истинное многочастичное перепутывание мод вещества, возможность защиты или разрушения фермионных пар путем измерения, а также возникновение антиферромагнитного порядка, вызванного измерением. Доказано, что даже глобальные, но пространственно структурированные, измерения могут конкурировать с короткодействующими процессами, такими как туннелирование и атомное взаимодействие. Предсказан новый необычный тип квантовой динамики Зенона вследствие переходов, похожих на комбинационные (рамановские), через виртуальные состояния вне подпространства Зенона.

В Главе 4 в систему добавлено управление внешней цепью обратной связи, которое может либо усиливать, либо уравнивать эффект обратного действия квантового измерения. Расширено понятие управления обратной связью от управления квантовым состоянием (известного в квантовой метрологии) до управления фазовыми переходами в квантовых системах. Показано, что квантовые слабые измерения и обратная связь могут вызывать фазовые переходы, выходящие за рамки понятия диссипативных переходов. Кроме того, обратная связь позволяет управлять существенно квантовыми свойствами фазовых переходов, такими как критические показатели. Таким образом, продемонстрировано перестраивание класса универсальности фазового перехода в заданной системе. Показано, что такой подход позволит создавать новые квантовые симуляторы квантовых резервуаров, моделировать эффекты, появляющиеся в задачах о взаимодействии спинов с резервуарами, и создавать новые временные кристаллы Флоке с изменяемым дальнедействующим взаимодействием (то есть, с долгой памятью).

В Главе 5 рассмотрен предельный режим, в котором исключительно важно квантование даже самого оптического потенциала. Продemonстрировано, что квантовая и динамическая природа оптических потенциалов приводит к появлению новых квантовых фаз ультрахолодных атомов, нереализуемых в сравнимых заданных классических оптических решетках. Продemonстрированы не только порядки атомной плотности, такие как сверхтвердое состояние на решетке и волны плотности, но и порядки амплитуд (связей) волн вещества, такие как сверхтекучие и сверхтвердые димеры. Показано, что системы многих тел накладывают отпечаток на свойства рассеянного света, в частности, на его сжатие. Сформулирована концепция квантовых симуляторов на основе коллективного взаимодействия света и вещества с перестраиваемой эффективной длиной взаимодействия. Такой подход объединяет физику короткодействующих и дальнедействующих взаимодействий и позволяет моделировать системы с изменяемым взаимодействием, чего чрезвычайно трудно достичь в других физических системах.

В ходе прочтения работы у меня возникли следующие замечания:

1. В работе обсуждается влияние внутрирезонаторного распределения атомов на квантовое резонаторное поле. Именно это поле является измеряемым и дает возможность следить за квантовым состоянием атомной системы. Изменение распределения атомов внутри резонатора приводит к изменению его модовой

структуры (моды пустого резонатора не являются собственными). Однако, в работе влияние распределения атомов на поле учитывается только в амплитуде мод, но не в модовой структуре.

2. Предлагаемый автором подход весьма интересен с прикладной точки зрения для создания квантовых состояний с требуемыми свойствами. Однако в этой связи требует прояснения вопрос какие ограничения накладываются предлагаемым методом на возможные генерируемые состояния.

В частности: какой максимальной степени сжатия можно достичь (в децибелах)? Какие амплитуды состояний котов Шредингера достижимы? Какие параметры нелинейности достижимы? Хотелось бы увидеть конкретные оценки.

3. В изложении Главы 1 присутствует некоторая путаница с обсуждением внутрирезонаторных полей и полей в свободном пространстве.

Судя по (1.4), операторы a_l с различными индексами (в частности, a_0 и a_1) имеют одинаковую размерность, в то время как по постановке задачи – одно поле в резонаторе, а другое – в свободном пространстве, т.е. амплитуды имеют разные размерности.

На стр. 51 автор пишет, что числа фотонов могут быть легко измерены. В то же время речь идет о внутрирезонаторных полях. На стр. 274 – обсуждается спектр мощности измеряемого фототока, но опять же идет отсылка к $\langle a_1^\dagger a_1 \rangle(t)$, т.е. среднему числу фотонов внутрирезонаторного поля. Данное замечание можно расширить, отметив, что автором выбран очень неудобный для чтения способ изложения материала, где одновременно рассматривается много моделей и разных случаев и трудно проследить за выкладками.

4. Раздел 2.5 посвящен описанию приготовления состояний типа котов Шредингера в процессе измерения пропускания резонатора. Утверждения формулируются в формализме Гейзенберга. В то же время известно, что этот формализм дает сбой при описании процедуры измерения для существенно негауссовых состояний [I.V. Sokolov. Physics Letters A 384 (2020) 126762]. В частности, из (2.44) видно, что переменная Δz может принимать нефизические значения.

5. В разделах 5.2 и 5.3 приводятся только выводы и результаты, но нет никакого теоретического базиса, позволяющего проследить данные результаты (полностью отсутствует математическое описание модели). Это особенно обидно, поскольку речь идет о решении самосогласованной задачи, математическая формулировка которой не представлена.

Указанные замечания не влияют на высокую оценку представленной диссертации.

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 научной специальности 1.3.6. Оптика. Пункты 9 и 11 указанного Порядка диссертантом не нарушены.

Член диссертационного совета,
доктор физико-математических наук,
профессор кафедры общей физики I
Санкт-Петербургского государственного
университета

18 ноября 2021 г.



Голубева Татьяна Юрьевна