ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Куприянова Дмитрия Васильевича 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.

Общая характеристика работы: В представленной диссертации рассматривается проблема взаимодействий света с системами холодных атомов в условиях квантового описания состояний обеих подсистем. Соответствующие исследования проводятся во многих научных лабораториях, и текущие достижения широко представлены в огромном количестве публикаций. Интерес к проблеме обусловлен стремительным развитием инновационных квантовых технологий и очевидной важностью глубокого понимания физики происходящих элементарных и коллективных процессов на микроскопическом уровне описания, как света, так и вещества.

Выделим две основные причины, мотивировавшие интерес автора представленной диссертации к изучению «неклассических состояний света и холодных атомов». Во-первых, для расширения радиуса действия информационных каналов, защищенных принципами квантовой физики в распределении секретного ключа, существует и остается нерешенным вопрос создания надежных, воспроизводимых и масштабируемых систем квантовой памяти и квантового интерфейса. Одним из возможных решений является использование вынужденного комбинационного рассеяния света для создания квантовой запутанности «свет-вещество» с целью последующего запутывания состояний спиновых подсистем удаленных атомных ансамблей. Представляется важным проведение определенных теоретических оценок и нахождение оптимальных решений в этом направлении.

Другой мотивацией представляется развиваемая автором идея об использовании гибридной системы, объединяющей внешние контролирующие поля, резонатор и вырожденный атомный газ, как платформу для квантового моделирования процессов фазовых переходов второго рода, обычно представленных достаточно сложными эффективными гамильтонианами спиновых подсистем. Квантовый симулятор позволил бы обойти проблему трудоемких расчетов статистического интеграла вблизи критической точки и смоделировать процесс фазового перехода, изменяя внешние параметры системы.

Эти физически близкие задачи объединены автором в единый формализм и им поэтапно обосновывается выигрышная роль оптического резонатора, усиливающего взаимодействие с квантованной модой, и позволяющего преодолеть трудности, связанные с фундаментальной слабостью электромагнитного взаимодействия. На этом пути автором получены определенные практические рекомендации, к обсуждению которых мы обратимся, двигаясь последовательно по главам диссертации.

Первая глава носит обзорный и вводный характер. Автором приводятся результаты наиболее успешных демонстраций создания квантовой запутанности между светом и холодными атомами на основе протокола DLCZ. Отмечается возможность задействовать резонатор для усиления эффекта перепутывания света и атомов. Технологически это

сделать не так просто, и следует отметить, что идея квантового повторителя до сих пор не реализована в эксперименте. Однако работы в этом направлении, безусловно, следует продолжать и поддерживать.

Другой проблемой, обсуждаемой во вводной главе и, возможно, более перспективной, с точки зрения экспериментальной реализации, представляется идея моделирования поведения сложных и неподконтрольных квантовых систем с помощью управляемых состояний холодных атомов и света. В основе лежит предложенная, и подтвержденная в эксперименте, концепция о «самоорганизации» атомов в пучностях или узлах моды резонатора. При определенных условиях должна сформироваться цепочка атомов, разделенных шагом равным длине волны, а не её половины, что интерпретируется как спонтанное нарушение симметрии эффективного гамильтониана по отношению к трансляции на полуволну с одновременной изменением фазы полевой моды на π.

Хотя это не оговорено в работе, но представляется, что использование конденсата является превентивной мерой для затравочного стимулирования фактором $N\gg 1$ процесса когерентного обмена между управляющими и резонаторной модами и возвратом атома в конденсат, не воздействуя при этом на поступательное движение атомов эффектом отдачи.

Далее, как отдельная задача, автором обсуждается важность и возможность приготовления суперпозиционных состояний в системе непрерывных переменных гармонического осциллятора с большой энергией возбуждения. У научного сообщества имеются определенные надежды, что подобные состояния могут быть приготовлены и масштабированы, и, тем самым, будут востребованы в универсальных квантовых вычислительных протоколах с использованием схем коррекции ошибок.

Вторая глава посвящена схеме перепутывания полевой и спиновой атомной подсистем с поддержкой процесса оптическим резонатором. Главным результатом, по-видимому, следует считать найденный оптимум между длительностью сформированного светового сигнала и временем жизни поля внутри резонатора. Этим обеспечивается минимизация пиковой интенсивности накачки, и снижение негативных последствий от сопутствующих нелинейных эффектов, препятствующих главному процессу параметрического запутывания атомных спинов и сигнального света.

Третья глава рецензенту представляется наиболее ценной и интересной. Здесь рассматривается протокол самоорганизации атомов в пространственную упорядоченную структуру в трёхуровневой конфигурации рабочих уровней. Два нижних энергетических состояния вырождены и моделируют спин $s=1/2$. Как было отмечено выше, приготовление ансамбля в вырожденном состоянии конденсата Бозе-Эйнштейна позволяет, как это видится автору, связать задачу только когерентными каналами рассеяния, построить эффективный гамильтониан, и ограничиться в описании каналом потерь только через выпускное зеркало резонатора. Далее делается допущение о медленной динамике спиновой подсистемы и «быстрая» полевая динамика исключается формальным решением уравнения Гейзенберга в адиабатическом приближении.

Ключевым результатом является сконструированный таким образом эффективный гамильтониан, моделирующий дальнодействующее взаимодействие спинов через

эффективно присутствующую в процессе моду резонатора. Собственно этот управляемый гамильтониан и является основой для предлагаемой архитектуры квантового симулятора.

Далее возможности предлагаемой модели спинового взаимодействия обсуждаются с помощью упрощенного анализа в духе теории Ландау, т. е. введением энергетического функционала Ландау и обобщенного параметра порядка. Демонстрируются существование фазовых переходов и спонтанное нарушение симметрии гамильтониана вблизи критической точки, моделируемой критическими значениями частот Раби управляющих полей. Утверждается, что состояние атомов изначально однородного конденсата трансформируется в упорядоченную структуру, сопровождаемую перестройкой атомного спина в различные фазы ферромагнитного и антиферромагнитного состояния вещества. Автором приводится и анализируется фазовая диаграмма для предполагаемых переходов в зависимости от внешних параметров задачи.

Четвертая глава отделена от содержания предыдущих глав и посвящена возможности создания квантового суперпозиционного состояния гармонического осциллятора, с разделенными областями распределения на фазовой плоскости, и обладающего большой энергией, т.е. содержащего большое число возбуждений в выделенной моде. Проблема, действительно, имеет место, ибо существующие протоколы используют для этой цели слабо сжатый свет и схему вычитания одного фотона из объема когерентности светового потока. В то же время для приложений важно уметь приготавливать многофотонные состояния с распределениями Вигнера, подобными тем, которые изображены на рис.~4.4 и 4.6 диссертации. Как отмечено в диссертации именно в этом случае к ним возникает интерес в схемах квантовых вычислений. В диссертации развивается идея использования гамильтониана с кубической нелинейностью для этой цели.

Замечания по диссертации:

1) По второй главе можно критически заметить, что проблема квантового повторителя существует уже более двадцати лет. Предлагаемые для её решения физические схемы, к сожалению, не дали практического результата. Объединение холодного атомного ансамбля и резонатора очень непросто реализовать технически. Внесение атомного ансамбля в резонатор лазера с помощью оптической дипольной ловушки предполагает наличие дополнительных оптических полей, негативным образом вмешивающихся в схему квантового интерфейса. Также трудно за пределами магнито-оптических ловушек обеспечить высокую оптическую плотность ансамбля. По-видимому, над этими вопросами автору следует задуматься в будущем.
2) Имеются некоторые вопросы по третьей главе. В теории Ландау и в её обобщениях время фазового перехода вблизи критической точки неограниченно возрастает. Это собственно подтверждается утверждением автора на стр. 70. При этом применимость рассматриваемой модели, по-видимому, ограничена длительностью спонтанных процессов, переселяющих атомы на другие подуровни, что не обсуждается в диссертации, и нет необходимой оценки. Нет ли здесь определенного противоречия?
3) Автором предполагается существование зависящего от координаты фазового сдвига параметра порядка конденсата. Известно, что градиент фазы параметра

порядка означает движение конденсата как целого макроскопического объекта. Вместе с тем в работе ищется экстремум функционала Ландау в стационарных условиях. По-видимому, следует прояснить сделанное допущение.

4) Несколько подозрительным выглядит соотношение (3.6). Если оно представлено для операторов Гейзенберга, то почему отсутствует временной аргумент? Также сама операция адиабатического исключения путем прямой подстановки (3.6) в эффективный гамильтониан не выглядит полностью убедительной.
5) По четвертой главе можно заметить, что предлагаемый протокол приготовления сложных суперпозиционных состояний осциллятора принципиально основан на введении гамильтониана с кубической нелинейностью. Какая-либо разумная физическая схема реализации подобного гамильтониана в диссертации не обсуждается.

Сделанные замечания не влияют на общее, безусловно, положительное впечатление от данной диссертации. Автором проделана большая работа, выполненная на высоком научном уровне.

В заключение резюмируем, что диссертация Масалаевой Натальи Игоревны на тему: «Неклассические состояния света и ансамбля холодных атомов: получение и использование для квантовых вычислений и симуляций» 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

д. ф.-м. н.,
Вед. н. с. ЦКТ МГУ им. М.В. Ломоносова Д.В. Куприянов

Дата 16/03/2022