MAX PLANCK INSTITUTE
FOR THE SCIENCE OF LIGHT

MPI for the Science of Light, Staudtstr. 2, 91058 Erlangen, DE

Maria Chekhova
Head of Chekhova Research Group
Tel +49 (0)9131 7133 – 611
E-Mail: maria.chekhova@mpl.mpg.de
www.mpl.mpg.de

ОТЗЫВ

члена диссертационного совета Чеховой Марии Владимировны 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.

Диссертация Н. И. Масалаевой «Неклассические состояния света и ансамбля холодных атомов: получение и использование для квантовых вычислений и симуляций» посвящена актуальной теме квантовых эффектов, возникающих при взаимодействии излучения с веществом. Этот раздел квантовой оптики чрезвычайно важен для разработки квантовых компьютеров и квантовой пямяти, а также квантовых коммуникаций. В диссертационной работе в качестве вещества выступает бозе-конденсат; в качестве поля – когерентное состояние света в резонаторе. В последней главе рассматриваются более экзотические состояния света: фоковские состояния, собственные состояния оператора импульса, а также состояния типа «кота Шредингера», возникающие в результате сложных операций, о которых речь ниже.

Диссертация включает обзорную главу 1, три оригинальных главы 2-4, введение, заключение, список литературы и шесть приложений.

Во введении обосновывается выбор темы работы, показывается ее актуальность, ставятся цели и формулируются задачи. Сформулированы также защищаемые положения, научная новизна, научная и практическая значимость работы. Подробно описана апробация работы; приводится впечатляющий список конференций и журнальных публикаций.

В первой главе приводится краткий обзор литературы по темам, охваченным оригинальными главами: о рамановских переходах и их использовании для реализации квантовой памяти, квантовых повторителей и квантовых симуляторов; о самоорганизации атомов бозе-конденсата при их рамановском взаимодействии с полем в резонаторе; о различных методах приготовления и применениях негауссовских квантовых состояний, известных как «состояния кота Шредингера». Обзор достаточно полный, хотя можно

отметить, что раздел о самоорганизации атомов (1.2.4) написан заметно более кратко, чем другие разделы этой главы, что создает некоторую неоднородность изложения.

Глава 2 посвящена исследованию состояния системы, образуемой Бозе-конденсатом в резонаторе и оптическим полем, взаимодействующим с ним путем рамановских переходов. Важно, что рассмотрен общий случай, включающий импульсный режим взаимодействия с произвольной длительностью импульсов светового поля. Ранее в литературе рассматривался лишь режим «низкой добротности» резонатора (‘bad cavity’), когда время жизни поля в резонаторе значительно короче длительности импульса. В работе же анализируется более интересный случай, когда поле в резонаторе живет долго, и время взаимодействия, а следовательно, и эффективность, увеличивается. В разделе 2.5 показано, что взаимодействие приводит к перепутыванию между спиновыми переменными атомов и квадратурными переменными поля на выходе из резонатора. В соответствии с преобразованиями Блоха-Мессии, это означает, что при правильном выборе мод возможно наблюдение сжатия как для спиновых переменных атомов, так и для полевых квадратур. В следующих разделах исследованы параметры оптических импульсов, для которых сжатие и перепутывание оказываются максимальными при заданной пиковой интенсивности поля.

Третья глава содержит чрезвычайно интересное исследование магнитных эффектов, которые возникают при взаимодействии поля с бозе-конденсатом, в котором некоторые атомы находятся в состоянии со спином «вверх», а другие в состоянии со спином «вниз». Тогда самоорганизация для этих двух состояний атомов происходит по-разному, и управляя ими независимо при помощи двух различных полей, можно создавать структуру бозе-конденсата в состояниях с разной намагниченностью. Тут возникает интересная аналогия с ферро- и антиферромагнетиками, причем состояние оказывается разным по отношению к разным направлениям спина атомов в пространстве (X,Y,Z). Как и в случае магнитных состояний вещества, в данном случае реализуется конфигурация, соответствующая минимуму энергии. Эта аналогия мне представляется очень интересной, как и любые аналогии между различными разделами физики. Кроме того, важное свойство рассматриваемой системы заключается в том, что она позволяет симулировать поведение так называемой t-J-V-W спиновой модели, описывающей полярные молекулы в оптических решетках.

Последняя, четвертая глава посвящена решению совсем другой задачи, так что она в контексте данной работы стоит особняком и практически не связана с двумя предыдущими главами. Здесь исследуется метод приготовления состояний «котов Шредингера», идея которого была предложена в недавней

статье И. В. Соколова. Отмечу, хотя это и не относится к результатам соискательницы, что метод требует использования достаточно труднодоступного ресурса, а именно, негауссовского состояния, получаемого с помощью так называемой «операции кубичной фазы» (qubic phase gate). Но зато результат оказывается очень впечатляющим: при вакуумном состоянии на входе, на выходе получается состояние «кота Шредингера» с большим средним числом фотонов («взрослый кот»), в отличие от «котят», получаемых «дешевыми» методами, например, «вычитанием фотона» из состояния слабо сжатого вакуума. Более того, при наличии на входе другого состояния (в работе рассмотрены фоковские) на выходе получается суперпозиция двух этих состояний, симметрично смещенных по оси импульсов. В разделах 4.2 и 4.3 проанализировано качество приготовления этих состояний, а также найдены их функции Вигнера.

В Заключении сформулированы основные результаты, а приложения содержат необходимую техническую информацию.

Результаты диссертации, безусловно, интересны, обладают новизной, и представляют несомненный интерес для квантовой оптики и квантовой информации. По теме диссертации соискательницей опубликовано четыре работы в рецензируемых журналах с высоким импакт-фактором. Работа написана прекрасным литературным языком, с четкой логикой и хорошо выполненными рисунками.

Тем не менее, к работе имеются следующие замечания.

1. В главе 2 не проводится сравнение полученных результатов с реальными системами бозе-конденсатов в резонаторе. Не обьяснен также механизм считывания спинового состояния атомов. Поэтому остается непонятным, можно ли вообще наблюдать предсказываемое спиновое сжатие и перепутывание в эксперименте.
2. Хотя подробно объясняются некоторые понятния, известные в квантовой оптике и квантовой информатике – верность (fidelity), собственные состояния операторов координаты и импульса, - в то же время в главе 3 совсем не вводятся понятия ферромагнетизма и антиферромагнетизма. Специалистам в квантовой оптике, которым адресована эта работа, было бы полезно об этом напомнить. Кроме того, в той же главе упоминается t-J-V-W спиновая модель, но ни в основном тексте, ни в специально добавленном приложении не упомянута конкретная физическая система, которую она описывает.
3. Глава 4, как уже упоминалась, практически не связана с остальными главами. Кроме того, к этой главе имеется и другое замечание: хотя получение вспомогательного негауссовского состояния подробно

описано теоретически, ничего не говорится о возможности его приготовить в эксперименте.

4. Некоторые термины, используемые в работе, представляются мне неудачными. Например:
   (1) противопоставление «малофотонного» и «непрерывного» режимов (стр. 6, 8) не совсем корректно: непрерывные переменные используются, скажем, и для однофотонного состояния;
   (2) «размен фотона накачки на стоксовский или антистоксовский фотон» (стр. 13) - при таком «размене» остается «сдача» в первом случае и «долг» во втором, в виде фонона;
   (3) «параметрическая люминесценция» (стр. 44) на самом деле называется параметрическим рассеянием;
   (4) «двухкомпонентным конденсатом» в гл. 3 называется конденсат из одинаковых атомов, но в разном состоянии, в то время как в литературе, по крайней мере часто, этот термин обозначает конденсат из атомов двух разных сортов;
   (5) «функции Айри» (стр. 78) по-русски следует называть функциями Эйри.

Эти замечания не меняют основного вывода: 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., профессор,
руководитель научной группы
в Институте Физики Света им. Макса Планка

Чехова Мария Владимировна

28.03.2022