

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу
Мастюгина Михаила Сергеевича «Когерентная динамика и перепутывание
двух кубитов, взаимодействующих с квантованными полями в резонаторе»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-
математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика

В последние годы в лазерной физике и квантовой оптике наряду с традиционными исследованиями когерентных эффектов в нелинейных макроскопических средах на первый план начинает выдвигаться экспериментальное и теоретическое изучение когерентных явлений, обусловленных взаимодействием квантованных полей (электромагнитного, фононного, плазменного и др.) с системами естественных и искусственных атомов (сверхпроводящими кубитами, квантовыми точками, примесными спинами и др.). Для систем, состоящих из нескольких излучателей и выделенных мод поля удалось наблюдать все квантовые кооперативные эффекты взаимодействия излучения с веществом, предсказанные ранее теоретически: коллективные осцилляции Раби, сверх- и субизлучательные состояния, атом-атомное перепутывание и атом-полевое перепутывание др. При этом особое внимание в последнее время уделяется исследованию особенностей возникновения и эволюции перепутанных состояний в таких системах, что обусловлено широкими возможными применениями таких состояний для создания квантовых сетей и квантовых телекоммуникаций, квантовой телепортации, для реализации физически стойких протоколов квантовой криптографии и квантовых вычислений. При этом одним из наиболее эффективных способов создания перепутанных состояний кубитов является их взаимодействие с квантованными полями в резонаторах. Особенности когерентной динамики систем естественных и искусственных атомов, взаимодействующих с электромагнитными и другими бозонными полями в резонаторах, удастся детально проанализировать только в рамках квантовых моделей взаимодействия излучения с веществом. Поэтому разработка квантовых подходов описания динамики перепутывания кубитов и кубитов и поля в низкоразмерных системах естественных и искусственных атомов, взаимодействующих с квантованными полями в резонаторах, которые были бы свободны от ограничений, связанных с теорией возмущений по константе связи «атом+поле», является одной из наиболее важных и актуальных проблем современной лазерной физики и квантовой информатики. Целью кандидатской диссертации М. С. Мастюгина является исследование квантовой динамики систем двух кубитов различной физической природы, взаимодействующих с одной или двумя выделенными модами квантованного поля в идеальных резонаторах и изучение механизмов генерации, контроля и стабилизации перепутывания кубитов в таких системах. Такое исследование, безусловно, является актуальным и практически значимым.

Диссертация М. С. Мастюгина состоит из введения, пяти глав, заключения и списка цитированной литературы.

Во введении показана актуальность исследования, сформулирована цель и задачи работы, выбор объекта и методов исследования, а также отмечены наиболее важные результаты, полученные в диссертации.

В первой главе сделан краткий обзор теоретических работ, посвященных изучению свойств двухатомной модели Тависса-Каммингса, а также детальный обзор экспериментальных работ, в которых исследовались различные физические реализации такой модели. При этом основное внимание уделено экспериментам, в которых представлены количественные измерения степени перепутывания кубитов.

Во второй главе на основе точных решений уравнений для матрицы плотности показана возможность возникновения перепутывания кубитов за счет их взаимодействия с одномодовым тепловым полем идеального резонатора для трех двухкубитных моделей квантовой оптики. В качестве критерия перепутанности использован параметр Переса-Хородецких или “отрицательность”. Для каждой из рассматриваемых моделей исследовано влияние интенсивности теплового поля, начальной атомной когерентности и прямого диполь-дипольного взаимодействия на временное поведение параметра “отрицательности” кубитов.

В третьей главе показана возможность перепутывания ридберговских атомов, последовательно пролетающих резонатор с тепловым полем. При этом исследовано поведение атомов, приготовленных первоначально как в перепутанных, так и в сепарабельных когерентных состояниях. Для каждого из выбранных начальных состояний кубитов найдена зависимость максимальной степени “отрицательности” от параметров модели.

В четвертой главе проведено теоретическое исследование влияния динамического штарковского сдвига на перепутывание двухкубитных систем, взаимодействующих с одномодовым полем в идеальном резонаторе посредством вырожденных двухфотонных переходов. На основе точного решения уравнения эволюции для различных начальных состояний модели показана возможность использования штарковского сдвига для контроля степени перепутывания атомов.

В пятой главе исследовано влияние прямого диполь-дипольного взаимодействия на временную динамику перепутывания двух кубитов с различными типами переходов, взаимодействующих с одно- и двухмодовым полем резонатора. Показана возможность стабилизации атомного перепутывания при включении диполь-дипольного взаимодействия для начальных трех- и четырехчастичных атом-полевых перепутанных состояний системы. Исследована также возможность исчезновения эффекта мгновенной смерти перепутывания. В качестве физических реализаций предложенных моделей рассмотрена система двух сверхпроводящих кубитов, взаимодействующих с одной или двумя модами микроволнового поля копланарных резонаторов.

В результате для всех рассмотренных моделей показано, что диполь-дипольное взаимодействие может использоваться для контроля и управления динамикой перепутывания кубитов, взаимодействующих с полем резонатора.

В заключении приведены основные результаты, полученные в диссертации.

В работе получен ряд новых научных результатов.

1. Впервые рассмотрено совместное влияние диполь-дипольного взаимодействия и начальной атомной когерентности на степень перепутывания кубитов, индуцированного одномодовым тепловым полем, для ряда двухкубитных моделей с различными типами переходов.
2. Найдено точное временное поведение параметра перепутывания двух ридберговских атомов, движущихся с различными скоростями и последовательно пролетающих резонатор одноатомного лазера с электромагнитным полем в тепловом состоянии, для атомов, приготовленных как в перепутанных начальных состояниях, так и когерентных сепарабельных состояниях. Исследовано влияние параметров модели на степень перепутывания атомов.
3. На основе анализа точного решения уравнения эволюции двухкубитной модели с вырожденными двухфотонными переходами показана возможность увеличения степени перепутывания при учете динамического штарковского сдвига энергетических уровней.
4. Развита теория взаимодействия одно- и двухмодового квантованного электромагнитного поля идеального резонатора с двумя кубитами при наличии диполь-дипольного взаимодействия между ними. Выяснено влияние диполь-дипольного взаимодействия на особенности поведения согласованности двух кубитов с одно- и двухфотонными вырожденными и невырожденными переходами для начальных трех- и четырехчастичных атом-полевых перепутанных состояний системы “кубиты+поле”.

Достоверность результатов диссертации обеспечивается использованием строгих математических методов; детальным анализом общих физических принципов, лежащих в их основе; тестированием общих алгоритмов по результатам, полученных в других работах для частных случаев; сравнением ряда теоретических предсказаний с экспериментальными данными, а также совпадением результатов, полученных разными методами.

Научная и практическая значимость работы состоит в возможном использовании полученных в диссертации результатов в лазерной физике, квантовой оптике и квантовой информатике при создании квантовых сетей и передачи перепутанных состояний из атомной подсистемы в фотонную; при выборе механизмов контроля степени перепутывания и достижения заданной меры перепутывания. Полученные в работе результаты могут быть использованы при планировании экспериментов в одноатомных лазерах и лазерах и других устройствах в квантовой электродинамике резонаторов. Эти

результаты представляют интерес для сотрудников ФИАН им. П.Н. Лебедева, Института лазерной физики СО РАН, Института спектроскопии РАН, Института общей физики им. А.М. Прохорова РАН, НИЦ "Курчатовский институт", Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского, Российского квантового центра, а также в вузах, ведущих подготовку по направлениям соответствующего профиля.

По диссертации М.С. Мастюгина имеется ряд замечаний.

1. При описании динамики перепутывания для всех рассмотренных моделей квантовой электродинамики резонаторов автор не учитывал спонтанное излучение кубитов, потери фотонов из резонатора и другие диссипативные эффекты. Вместе с тем хорошо известно, что такие процессы могут приводить как к декогеренции, так и к увеличению степени перепутывания кубитов. Процессы диссипации учтены в работе лишь в разделе 5.1 при описании динамики населенности сверхпроводящих кубитов (и среднего числа фотонов), взаимодействующих с модой микроволнового поля копланарного резонатора с потерями. Однако в работе не приведен вывод решения управляющего уравнения для матрицы плотности.
2. В разделах 2.1 и 2.2 автором использован подход, позволяющий найти матрицу плотности атом-полевой системы с использованием "одетых" состояний полного гамильтониана. Однако матрица плотности может быть найдена и другими способами, например с использованием оператора эволюции. В диссертации следовало бы сопоставить различные подходы, используемые для нахождения точного решения квантового уравнения Лиувилля для матрицы плотности, и более детально обосновать преимущества использованного представления.
3. В конце каждой главы можно было бы сформулировать краткие выводы, что облегчило бы чтение диссертационной работы, содержащей большое количество результатов.
4. Во введении диссертации было бы желательным более четко и явно указать на место результатов работы автора в кругу ранее полученных теоретических результатов другими авторами.
5. Для оценки степени перепутывания кубитов в разных главах диссертации использованы разные критерии перепутывания. При этом автором не приводится никакого обоснования при выборе того или иного критерия перепутывания.

Указанные недостатки не снижают ценности и научной значимости результатов диссертационной работы.

Основные результаты и выводы диссертационной работы достаточно полно опубликованы. По материалам диссертации автором опубликовано 28 научных работы, в том числе 15 в рецензируемых изданиях, рекомендованных Министерством образования и науки РФ для публикации результатов

