

На правах рукописи

МАСТЮГИН МИХАИЛ СЕРГЕЕВИЧ

**КОГЕРЕНТНАЯ ДИНАМИКА И ПЕРЕПУТЫВАНИЕ ДВУХ
КУБИТОВ, ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ С КВАНТОВАННЫМИ
ПОЛЯМИ В РЕЗОНАТОРЕ**

01.04.21 - лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Саратов 2015

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Самарский государственный университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Башкиров Евгений Константинович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор, профессор кафедры математики и моделирования ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»
Паршков Олег Михайлович

доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры общей и теоретической физики ФГБОУ ВПО «Тольяттинский государственный университет»
Решетов Владимир Александрович

Ведущая организация: Самарский филиал Физического института им. П.Н. Лебедева Российской Академии Наук.

Защита состоится 28 декабря 2015 г. в 15:30 на заседании Диссертационного совета Д 212.243.05 на базе ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» по адресу: 410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке имени В.А. Артисевич ФГБОУ ВПО «Саратовский государственный университет имени Н.Г. Чернышевского» и на сайте: <http://www.sgu.ru/research/dissertation-council/>

Автореферат разослан « _____ » _____ 2015 г

Ученый секретарь диссертационного совета
Доктор физико-математических наук, профессор



В.Л. Дербов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

В настоящее время исследование когерентной динамики систем естественных (нейтральные атомы и ионы) и искусственных атомов (сверхпроводящие джозефсоновские кубиты, примесные спины и др.), взаимодействующих с квантовыми полями (электромагнитными, фононными, плазмонными и др.) является одной из наиболее актуальных задач лазерной физики и квантовой оптики. При этом особое внимание уделяется разработке наиболее эффективных схем генерации, контроля и управления перепутанными состояниями таких систем. Перепутанные состояния могут быть использованы для квантовой телепортации, для реализации физически стойких протоколов квантовой криптографии, для квантовых вычислений и т.д. На данный момент активно изучаются различные типы перепутанных состояний: фотонные, атом-фотонные и атом-атомные. Фотонные перепутанные состояния можно получить "перепутывая" фотоны с различными направлениями поляризации, например с помощью спонтанного параметрического резонанса. Генерация атом-фотонных и атом-атомных перепутанных состояний представляет собой более сложную задачу. Такие перепутанные состояния могут возникать за счет взаимодействия между подсистемами, взаимодействия подсистем с неким окружением, измерения независимых систем в перепутанном базисе.

В качестве одного из механизмов возникновения перепутывания естественных и искусственных атомов может выступать их взаимодействие с квантовым полем. Для обмена информацией между кубитами и для создания между ними квантовых корреляций можно использовать, например их взаимодействие с общим полем резонатора. В других ситуациях, например, в экспериментах с одноатомными мазерами и лазерами, атомы последовательно пролетают резонатор, поочередно взаимодействуя с полем, в результате между атомами могут также возникнуть квантовые корреляции (перепутывание). Степень перепутывания атомов, возникающая за счет взаимодействия с полем резонатора, зависит от особенностей структуры атома, резонатора и характера и силы их связи, а также от большого числа других факторов, в частности от наличия в системе различных каналов диссипации энергии, фазы и т.д.

В настоящее время имеется большое число работ, в которых динамика низкоразмерных двухкубитных и многокубитных систем, взаимодействующих с квантовыми полями в резонаторах, изучена не только теоретически на примере разнообразных моделей лазерной физики и квантовой оптики, но и экспериментально. Такие системы реализованы в большом количестве устройств. При этом роль кубитов (естественных или искусственных атомов), взаимодействующих с квантовыми полями в резонаторах могут играть нейтральные атомы и ионы в резонаторах и ловушках, примесные спины, углеродные нанотрубки, сверхпроводящие кольца с джозефсоновскими переходами, гибридные и оптомеханические системы. В качестве переносчика

информации между кубитами в таких устройствах используется электромагнитное излучение с длиной волны от оптического до микроволнового диапазона, фононные, плазмонные и другие поля.

В реальных условиях невозможно исключить взаимодействие квантовых объектов с окружением. Такое взаимодействие обычно приводит к декогеренции и потере особых квантовых корреляций (перепутывания) между частями системы. Это означает, что основная проблема, возникающая при создании, контроле и хранении атомных перепутанных состояний заключается в том, чтобы предотвратить, минимизировать или использовать влияние шума. Было высказано большое количество предложений по защите, минимизированию или использованию влияния окружения для создания и сохранения максимально перепутанных состояний, например стратегия кольцевого контроля, коррекция квантовых ошибок, использование избыточного кодирования и др. Однако указанные способы успешно решают проблему только при малой скорости генерации ошибок в исследуемой системе. Более экономичный подход состоит в использовании так называемых свободных от декогеренции пространств, которые полностью нечувствительны к специфическим типам шумов. Такой подход, однако, также требует использования дополнительных источников и эффективен только для определенного весьма специфического окружения.

Недавно в большом количестве работ было показано, что, в некоторых случаях диссипация и шум могут, напротив, являться источником перепутывания. В частности было показано, что взаимодействие кубитов с одномодовым тепловым шумом в идеальном резонаторе может приводить к перепутыванию этих кубитов [1]. В том числе, было показано, что при двухфотонном взаимодействии атомов с полем, степень перепутывания их состояний [2,3] может значительно превосходить соответствующую величину для однофотонного взаимодействия. Наличие диполь-дипольного взаимодействия и начальной когерентности атомов может также привести к значительному увеличению степени перепутывания атомов, взаимодействующих с модой теплового поля в идеальном резонаторе [4,5]. Важно отметить, что для искусственных атомов, например сверхпроводящих джозефсоновских кубитов, эффективная константа диполь-дипольного взаимодействия может быть значительно больше, чем для обычных атомов и ионов [6]. Наведение начальной когерентности для кубитов различной физической природы также может быть реализовано различными способами. Таким образом, рассмотрение новых двухкубитных моделей квантовой электродинамики резонаторов, в которых возможна генерация перепутанных состояний за счет взаимодействия кубитов с тепловым шумом, представляет собой актуальную задачу квантовой информатики и лазерной физики.

Однако даже в отсутствии диссипации перепутывание квантовых подсистем является нестабильным. Причиной нестабильности перепутанных состояний кубитов, взаимодействующих с полем в резонаторах, являются осцилляции Раби. Такая нестабильность может сопровождаться явлением мгновенной смерти перепутывания, т.е. исчезновением квантовых корреляций

на временах меньших времени релаксации системы. В связи с вышесказанным, актуальной и важной проблемой, как с точки зрения общей теории, так и для практических приложений в квантовой оптике и лазерной физике является изучение различных механизмов приводящих к стабилизации перепутывания, таких как диполь-дипольное взаимодействие или штарковский сдвиг энергетических уровней.

Для целей квантовой информатики наиболее интересными являются многокубитные перепутанные системы. В то время как поведение двухкубитных систем хорошо изучено как с теоретической, так и с экспериментальной точки зрения, многие аспекты квантового поведения многокубитных систем изучены недостаточно полно. Поэтому изучение перепутанных состояний в многокубитных системах является приоритетной задачей квантовой информатики и лазерной физики в связи с практическими потребностями физики квантовых вычислений, создания квантовых сетей и устройств для хранения и передачи информации и др.

В настоящее время в физике квантовой информации большое внимание уделяется исследованию не только атом-атомных, но и атом-полевых перепутанных состояний. Такие состояния необходимы, например, для передачи информации в квантовых сетях от одних кубитов к другим посредством поля. Прекрасными кандидатами для реализации квантовых сетей являются, например, твердотельные кубиты (сверхпроводящие джозефсоновские кольца и примесные спины), взаимодействующие с микроволновыми полями, а также ионы [6]. Поэтому изучение особенностей динамики атом-полевых перепутанных состояний для кубитов, взаимодействующих с квантованными полями в резонаторах, также является весьма актуальной задачей квантовой оптики и лазерной физики. В связи со всем вышесказанным определим цель настоящей диссертационной работы.

Цель и основные задачи диссертационного исследования

Целью диссертационной работы является исследование квантовой динамики систем двух кубитов различной физической природы, взаимодействующих с одной- или двумя выделенными модами квантованного поля в идеальных резонаторах для различных типов переходов, исследование механизмов генерации и стабилизации перепутывания кубитов с учетом диполь-дипольного взаимодействия, штарковского сдвига, начальной атомной когерентности для различных начальных состояний кубитов и поля.

Для реализации поставленной цели решаются следующие *основные задачи*:

1. Найти точное решение динамической задачи о взаимодействии ряда двухкубитных систем с различными типами разрешенных переходов, взаимодействующих с тепловым полем в идеальном резонаторе. Исследовать влияние начальной атомной когерентности и диполь-дипольного взаимодействия на степень перепутывания кубитов.

2. Выявить путем аналитического решения уравнений эволюции зависимость степени перепутывания двух атомов, последовательно пролетающих резонатор с вакуумным или тепловым полем, от начального состояния атомов.

3. Изучить возможность использования динамического штарковского сдвига энергетических уровней двухуровневых атомов, взаимодействующих с полем в резонаторе, для стабилизации перепутывания и исчезновения эффекта мгновенной смерти перепутывания в случае различных начальных состояний.

4. Исследовать аналитически влияние диполь-дипольного взаимодействия на динамику трех- и четырехкубитных атом-полевых перепутанных состояний для систем двух кубитов, взаимодействующих с одной или двумя модами идеального резонатора.

Решению каждой из поставленных задач посвящена отдельная глава в диссертации.

Научная новизна

диссертационной работы заключается в следующих положениях:

- Получено аналитическое решение задачи о динамике двух дипольно связанных кубитов, взаимодействующих с одномодовым тепловым полем в идеальном резонаторе для однофотонной модели с одним атомом в резонаторе и двухфотонной модели с вырожденными двухфотонными переходами. Впервые рассмотрено совместное влияние диполь-дипольного взаимодействия и начальной атомной когерентности на степень перепутывания кубитов в указанных моделях для случая малых интенсивностей теплового шума.
- Найдено аналитическое выражение для параметра перепутывания Переса-Хородецких двух двухуровневых атомов, движущихся с различными скоростями и последовательно пролетающих резонатор с электромагнитным полем в фоковском или тепловом состоянии, для атомов, приготовленных в белловских перепутанных начальных состояниях. Проведена оценка времен пролета атомами резонатора, для которых их конечное состояние снова оказывается максимально перепутанным.
- Получено точное решение динамической задачи для модели двух двухуровневых кубитов с двухфотонными переходами, взаимодействующих с модой квантованного поля в резонаторе, при наличии штарковского сдвига энергетических уровней. На основе анализа точных решений показана возможность использования динамического штарковского сдвига энергетических уровней для управления и контроля перепутыванием кубитов.
- Развита теория взаимодействия одно- и двухмодового квантованного электромагнитного поля идеального резонатора с двумя кубитами при наличии диполь-дипольного взаимодействия между кубитами. На основе развитого формализма исследована временная динамика средних населенностей кубитов и среднего числа фотонов в моде для модели с

однофотонными переходами. Аналитические результаты позволяют интерпретировать данные экспериментов по динамике сверхпроводящих джозефсоновских кубитов, взаимодействующих с микроволновым полем компланарного резонатора. 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 выборе наиболее эффективных схем реализации протоколов физики квантовых вычислений, при реализации устройств для передачи перепутанных состояний из атомной подсистемы в фотонную и создании квантовых сетей; при выборе механизмов контроля за степенью перепутывания различных состояний и получения в системе заданной меры перепутывания. Полученные в работе результаты по описанию динамики атом-атомного и атом-полевого перепутывания могут быть использованы для определения оптимальных режимов приготовления атомов и поля и проведения экспериментов в одно- и двухатомных мазерах и лазерах и других устройствах в квантовой электродинамике резонаторов.

Полученные в диссертации результаты используются в учебном процессе в Самарском государственном университете при подготовке курсовых работ и выпускных работ бакалавров и магистерских диссертаций.

Результаты и положения, выносимые на защиту:

1. Предсказана возможность генерации перепутывания двух дипольно связанных кубитов, один из которых заперт в резонаторе или ловушке и взаимодействует с тепловым одномодовым полем, а второй находится вне резонатора.
2. Наличие начальной атомной когерентности в случае двухкубитной модели с одним атомом, запертым в резонаторе с тепловым одномодовым полем, приводит к увеличению степени атомного перепутывания, а для модели сверхпроводящих потоковых кубитов с вырожденными двухфотонными переходами – к уменьшению степени перепутывания в случае малых интенсивностей теплового шума. Увеличение интенсивности диполь-

дипольного взаимодействия для обеих моделей ведет к увеличению степени перепутывания кубитов.

3. Для модели двух дипольно связанных атомов, один из которых заперт в резонаторе и взаимодействует с модой теплового поля, показана возможность перепутывания первоначально возбужденных кубитов.

4. Учет динамического штарковского сдвига энергетических уровней для модели двух кубитов с вырожденными двухфотонными переходами ведет к увеличению степени атомного перепутывания для начальных когерентных неперепутанных состояний кубитов и стабилизации перепутывания для начальных атом-атомных и атом-полевых перепутанных состояний системы.

5. Диполь-дипольное взаимодействие приводит к исчезновению эффекта мгновенной смерти атомного перепутывания для системы двух кубитов, взаимодействующих с одно- или двухмодовым полем резонатора, для некоторых начальных атом-полевых перепутанных состояний W -типа (состояния Вернера).

Апробация работы

Работа выполнена на базовой кафедре общей и теоретической физики Самарского государственного университета. Материалы по теме диссертации докладывались на конференциях:

- Asia-Pacific Conference on Fundamental Problems of Opto- and microelectronics (APCOM), Moscow-Samara, Russia (2011).
- XI Международные чтения по квантовой оптике, Волгоград (2011).
- 15-й, 16-й, 17-й, 18-й и 19-й международной школе для студентов и молодых ученых по оптике, лазерной физике и биофизике «Saratov Fall Meeting», Саратов, Россия (2011 г., 2012 г., 2013 г., 2014 г., 2015 г.).
- X-ом и XI-ом Всероссийском молодежном Самарском конкурс-конференция научных работ по оптике и лазерной физике, Самара (2012 г., 2013 г.).
- XIII Всероссийской школе-семинаре «Волновые явления в неоднородных средах», Москва (2013).
- 3-ей и 4-ой Международная конференции «Математическая физика и ее приложения», Самара (2012, 2014).
- XII International Workshop on Quantum Optics, Moscow, Troitsk (2015).
- Национальной молодежной научной школе для молодых ученых, аспирантов и студентов по современным методам исследований наносистем и материалов «Синхротронные и нейтронные исследования», Москва (2015), а также на научных конференциях и семинарах Самарского государственного университета

Публикации

По теме диссертационной работы опубликовано 28 печатных работ, в том числе 15 статей в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК, 10 публикаций в изданиях, индексируемых Web of Science и 11 публикаций, индексируемых в Scopus.

Личный вклад автора

Все результаты, составившие основу диссертации, получены лично автором или при его определяющем участии.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и двух приложений. Диссертация изложена на 151 странице текста. Список использованных источников содержит 191 наименование.

Краткое содержание работы

Во **Введении** кратко обоснована актуальность выбранной темы, определены цели диссертационной работы, изложены основные защищаемые положения, отмечена новизна полученных результатов и приведены ее структура и краткое содержание.

В **первой главе** дан обзор литературы, касающейся изучаемых в диссертационной работе вопросов. Дано краткое описание структуры модели Тависа-Каммингса, которая используется для описания взаимодействия нескольких идентичных двухуровневых атомов с квантовым полем в идеальном резонаторе и отмечены квантовые эффекты, которые возникают в результате взаимодействия атомов с квантованным полем и могут быть описаны в рамках данной модели. Детально обсуждаются результаты экспериментальных исследований квантовой динамики естественных и искусственных атомов в квантовой электродинамике резонаторов. Приведены значения параметров физических реализаций двухкубитных моделей, изучаемых в последующих главах диссертации. Обсуждаются эксперименты по взаимодействию квантованных полей с ридберговскими атомами, ионами, примесными спинами и сверхпроводящими кольцами с джозефсоновскими переходами. При этом основное внимание уделено работам, посвященным измерению количественной степени перепутывания кубитов различной физической природы, возникающего за счет их взаимодействия с квантовыми полями в резонаторах. В последующих главах диссертации проведено сравнение некоторых теоретических выводов, полученных в представленной работе, с экспериментальными данными, приведенными в цитируемых статьях.

Вторая глава диссертации посвящена изучению особенностей перепутывания кубитов, индуцированного тепловым шумом. В ней на основе

точных решений уравнений эволюции исследована динамика перепутывания для трех различных двухкубитных моделей Тависа-Каммингса, описывающих взаимодействие одномодового теплового поля с двумя естественными или искусственными двухуровневыми атомами в идеальном резонаторе при наличии прямого диполь-дипольного взаимодействия атомов и начальной атомной когерентности.

В первой части главы рассмотрена модель, в которой один из атомов находится в резонаторе и взаимодействует с тепловым шумом, а второй находится вне резонатора. В этом случае взаимодействие между атомами реализовано не за счёт общего поля излучения резонатора, а благодаря прямому диполь-дипольному взаимодействию кубитов. Физически такая модель может быть реализована на сверхпроводящих джозефсоновских кубитах, один из которых взаимодействует со сверхпроводящим LC контуром или микроволновым копланарным резонатором. В первом случае кубиты взаимодействуют с колебаниями электронной плотности сверхпроводящего колебательного контура (плазмонами), во втором – с реальными микроволновыми фотонами 1D-резонатора. Эффективное диполь-дипольное взаимодействие таких кубитов, как уже отмечалось выше, может на несколько порядков превосходить дипольное взаимодействие естественных атомов. Для указанной модели найдено точное решение квантового уравнения Лиувилля для матрицы плотности полной системы. Путем усреднения по переменным поля полной матрицы плотности найдена редуцированная атомная матрица, а затем – частично транспонированная по переменным одного кубита атомная матрица плотности. Это позволило найти аналитическое выражение для параметра Переса-Хородецких перепутывания кубитов или ”отрицательности”, которая определяется стандартным образом как

$$\varepsilon = -2 \sum_i \mu_i^-, \quad (1)$$

где μ_i^- – отрицательные собственные значения транспонированной по переменным одного кубита атомной матрицы плотности. Для неперепутанных состояний полагают $\varepsilon = 0$. Для перепутанных состояний $0 < \varepsilon \leq 1$. Максимальной степени перепутывания соответствует значение $\varepsilon = 1$.

Временная зависимость параметра перепутывания была изучена для малых интенсивностей теплового поля. Было показано, что при наличии диполь-дипольного взаимодействия в такой системе возникает перепутывание для любых начальных состояний кубитов. При этом перепутывание возникает даже для возбужденных состояний обоих кубитов. На рисунке 1 показано временное поведение параметра перепутывания (1) двух кубитов, приготовленных первоначально в возбужденных состояниях, здесь и далее g – параметр взаимодействия атома с полем резонатора и J – параметр эффективного диполь-дипольного взаимодействия кубитов. Заметим, что ранее для моделей, в которых оба кубита одновременно заперты в резонаторе и взаимодействуют с общим полем, такое начальное состояние не порождает перепутанности кубитов для любых типов разрешенных переходов в атомах [1-5].

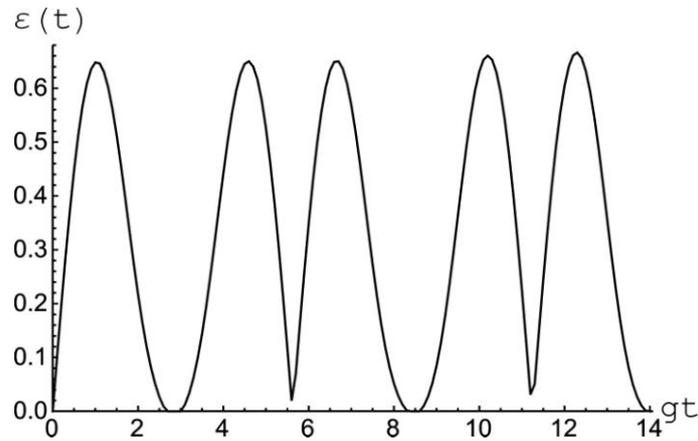


Рисунок 1. – Временная зависимость параметра перепутывания для модели со средним числом тепловых фотонов резонатора $\bar{n} = 0,1$ и параметром $J = 0,5g$ и первоначально возбужденных атомов.

Показано также, что для рассматриваемой модели в случае малых интенсивностей поля начальная атомная когерентность приводит к увеличению степени перепутывания кубитов. При увеличении интенсивности теплового шума максимальная степень перепутывания убывает быстрее, чем для моделей, в которых кубиты одновременно взаимодействуют с общим полем резонатора [1-4]. Увеличение интенсивности диполь-дипольного взаимодействия приводит, как и в случае двух атомов в резонаторе, к увеличению степени перепутывания.

Во второй части главы рассмотрена модель, в которой два двухуровневых атома одновременно заперты в резонаторе и взаимодействуют посредством однофотонных переходов с модой теплового поля. Динамика перепутывания кубитов в рамках такой модели рассматривалась ранее для случая высоких температур резонатора в работе [5], где была показана возможность существенного увеличения степени перепутывания при наличии атомной когерентности. Анализ динамики перепутывания кубитов на основе точного решения уравнения движения для матрицы плотности, найденного по схеме, рассмотренной в предыдущем разделе, показал, что для случая низких температур начальная атомная когерентность приводит к уменьшению степени перепутывания кубитов. Для рассматриваемой модели была изучена также динамика коллективных осцилляций Раби населенности основного состояния двух кубитов. Это позволило провести сравнение теоретических предсказаний с экспериментальными данными по коллективным осцилляциям Раби населенности основного состояния двух ионов $^{40}\text{Ca}^+$ в магнитной ловушке Пауля, взаимодействующих с четырьмя типами колебательных фононных мод в тепловом состоянии [7], из которых одна (аксиальная) заселена намного сильнее, чем другие. Между теоретическим и экспериментальным графиками имеется хорошее качественное согласие. Наличие количественных различий может быть объяснено учетом в модели только одной тепловой моды.

Наконец, в третьей части рассмотрена динамика перепутывания для модели двух кубитов, взаимодействующих с общим одномодовым тепловым

полем резонатора посредством вырожденных двухфотонных переходов, при наличии диполь-дипольного взаимодействия. В случае обычных двухуровневых атомов при многофотонных переходах прямое диполь-дипольное взаимодействие отсутствует в силу правил запрета для атомных переходов. Однако обычные правила отбора могут нарушаться для потоковых сверхпроводящих контуров с джозефсоновскими переходами. Такие сверхпроводящие кутриты являются трехуровневыми атомами Δ -типа, в которых одновременно разрешены как одно, так и двухфотонные процессы. При адиабатическом исключении промежуточного уровня такие кутриты, при определенных условиях, можно описывать эффективной двухуровневой моделью с вырожденными двухфотонными переходами. С использованием точного решения для оператора эволюции нами найдена аналитическая формула для параметра перепутывания Переса-Хородецких рассматриваемой системы с учетом диполь-дипольного взаимодействия кубитов. Увеличение интенсивности диполь-дипольного взаимодействия для модели с двухфотонными переходами, как и для однофотонных моделей ведет к увеличению степени перепутывания кубитов. Однако наличие начальной атомной когерентности в случае малых интенсивностей теплового поля приводит к уменьшению степени перепутывания кубитов.

В третьей главе изучены особенности поведения поведения перепутывания двух ридберговских атомов, последовательно пролетающих с различными скоростями сверхпроводящий резонатор одноатомного мазера с тепловым полем малой интенсивности. Рассмотрение ведется для случая, когда перед пролетом первого атома через резонатор, атомы приготовлены в перепутанном белловском состоянии вида

$$|\Psi(0)\rangle_A = \cos \theta |+, +\rangle + \sin \theta |-, -\rangle, \quad (2)$$

где θ - параметр когерентности и $|+\rangle$ и $|-\rangle$ - возбужденное и основное состояние ридберговского атома.

На основе точного решения уравнения эволюции для полной матрицы плотности системы, найдена зависимость параметра перепутывания Переса-Хородецких от времен пролета атомами резонатора. Численные расчеты параметра перепутывания проведены для случая, когда скорость второго атома в два раза меньше, чем скорость первого и атомы влетают в резонатор сразу один за другим (для такого соотношения скоростей атомов выполнен эксперимент С. Ароша с соавторами по перепутыванию атомов, последовательно пролетающих вакуумный резонатор [8]). Зависимость параметра перепутывания двух ридберговских атомов от времени пролета резонатора вторым атомом для различных температур резонатора показана на рисунке 2.

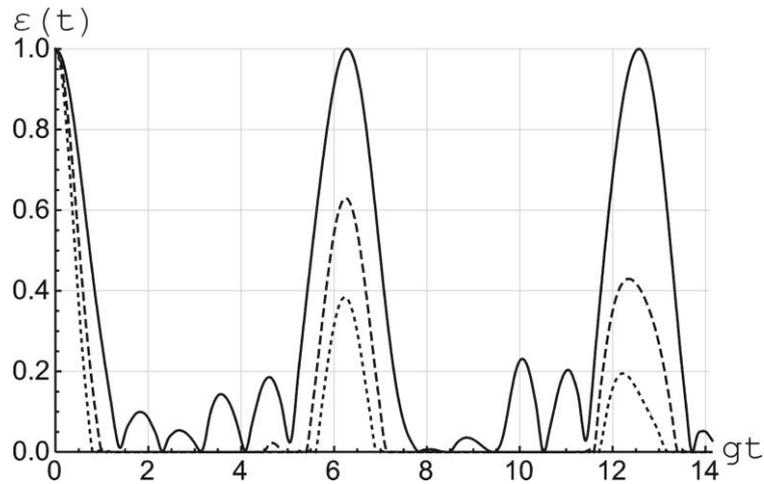


Рисунок 2. – Зависимость параметра перепутывания от времени пролета второго атома через резонатор для начального состояния атомов (2) и теплового состояния поля. Среднее число тепловых фотонов в моде (температура резонатора) равны: $\bar{n} = 0$ ($T = 0$) (сплошная линия), $\bar{n} = 0,5$ ($T = 2,4$ К) (штриховая линия) и $\bar{n} = 1$ ($T = 3,8$ К) (точечная линия). Параметр когерентности $\theta = \pi/4$

Из рисунка видно, что в случае вакуумного состояния для времен пролета вторым атомом резонатора $t_k = 2\pi k$, $k=1,2, \dots$ имеет место восстановление начального максимального атомного перепутывания. При этом тепловое поле разрушает начальные квантовые корреляции атомов только для определенных значений времен пролета атомами резонатора. Это означает, что в экспериментах по перепутыванию ридберговских атомов, последовательно пролетающих резонатор в одноатомном лазере, квантовые корреляции атомов могут наблюдаться даже для относительно высоких температур резонатора в несколько кельвин. При использовании схемы расчета, реализованной для начального белловского состояния атомов (2), для сепарабельного начального состояния, в котором первый из атомов возбужден, а второй девозбужден, и вакуумного состояния поля резонатора, получено, что на временах $gt_k = \pi/2 + 2\pi k$ ($k = 0,1,2, \dots$) атомная система оказывается в максимально перепутанном ЭПР состоянии, что согласуется с теоретическими предсказаниями работы [8].

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.

В первой части рассматривалась динамика перепутывания для начальных перепутанных состояний кубитов и фоковских состояний поля, а также для трехчастичных атом-полевых перепутанных состояний системы W - типа (состояния Вернера) и ГХЦ-типа (состояния Гринбергера-Хорна-Цайлингера). На основе точных решений уравнений эволюции было показано, что штарковский сдвиг энергетических уровней может приводить к увеличению

степени перепутывания кубитов и стабилизации перепутывания для белловских перепутанных состояний атомов и фоковского состояния поля, а также для атом-полевых перепутанных состояний W -типа. Для атом-полевых перепутанных состояний ГХЦ-типа учет штарковского сдвига приводит к существенному уменьшению степени атомного перепутывания. Для некоторых W -состояний наличие штарковского сдвига ведет к полному исчезновению эффекта мгновенной смерти перепутывания.

Во второй части рассмотрена динамика атомного перепутывания для начальных когерентных сепарабельных состояний атомов и фоковского состояния поля. Расчеты показывают, что при наличии штарковского сдвига начальная атомная когерентность приводит как к существенному изменению характера временного поведения параметра перепутывания, так и к увеличению его максимального значения. При этом увеличение параметров динамического штарковского сдвига уровней также приводит к существенному увеличению степени перепутывания атомов. Таким образом, может быть сделан вывод о возможности использования штарковского сдвига для контроля за степенью перепутывания атомов.

В пятой главе рассмотрены особенности поведения трех- и четырехчастичных атом-полевых перепутанных состояний системы, состоящей из двух кубитов, взаимодействующих с одной или двумя модами поля в идеальном резонаторе при наличии прямого диполь-дипольного взаимодействия кубитов.

В трех разделах пятой главы исследована динамика атом-полевого перепутывания для трех двухкубитных моделей квантовой электродинамики резонаторов: модели с однофотонными переходами, модели с вырожденными двухфотонными переходами и модели с невырожденными двухфотонными переходами. Первая модель может быть использована для описания взаимодействия одномодового поля резонатора с различными естественными или искусственными двухуровневыми атомами. Вторая и третья модели могут применяться при описаниях динамики двух индуктивно связанных потоковых сверхпроводящих кубитов с джозефсоновскими переходами вдали от центра симметрии, взаимодействующих посредством двухфотонных переходов с одним или двумя различными LC или копланарными микроволновыми резонаторами.

Для каждой из трех двухкубитных моделей получены точные выражения для элементов редуцированной атомной матрицы плотности. С ее помощью найдены временные зависимости согласованности кубитов $C(\rho_A)$ для различных начальных трех- и четырехчастичных атом-полевых состояний W - и ГХЦ-типа системы "кубиты+фотоны". Согласованность вычислялась стандартным образом.

Для модели с однофотонными переходами получено также временное поведение населенностей кубитов и среднего числа фотонов в моде как в случае идеального резонатора, так и резонатора с потерями. Предсказываемое поведение населенностей кубитов и среднего числа фотонов в моде находится в хорошем согласии с результатами недавних экспериментов по исследованию

динамики двух сверхпроводящих джозефсоновских кубитов, взаимодействующих с модой микроволнового поля копланарного резонатора [9,10], что свидетельствует о работоспособности модели при описании эффектов квантовой электродинамики сверхпроводящих джозефсоновских кубитов. При исследовании временного поведения согласованности показано, что для ГХЦ-состояний включение диполь-дипольного взаимодействия приводит к уменьшению степени перепутывания кубитов, а для W -состояний – к увеличению степени перепутывания. Для W -состояний диполь-дипольное взаимодействие приводит к стабилизации перепутывания, а для некоторых типов таких перепутанных состояний – к исчезновению эффекта мгновенной смерти перепутывания. На рисунке 3 показано временное поведение согласованности для модели с вырожденными двухфотонными переходами в случае начального перепутанного состояния W -типа

$$|\Psi(0)\rangle = 1/\sqrt{3}(|+,+,0\rangle + |+,-,2\rangle + |-,+,2\rangle), \quad (3)$$

где вектором $|\alpha, \beta, n\rangle$ обозначено сепарабельное состояние, в котором первый кубит находится в состоянии α , второй кубит в состоянии β , а поле содержит n фотонов ($\alpha, \beta = +, -$, а $n = 0, 1, 2, \dots$).

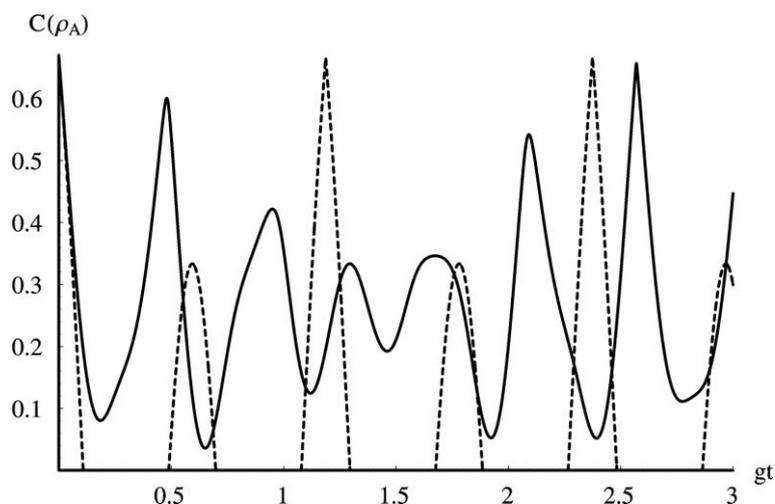


Рисунок 3. – Временная зависимость согласованности для начального атом – полевого перепутанного состояния (3) в случае двухкубитной модели с двухфотонными переходами. Параметр диполь – дипольного взаимодействия $J = 0$ (штриховая линия) и $J = 4g$ (сплошная линия).

Способы получения различных атом-полевых перепутанных состояний для сверхпроводящих кубитов с джозефсоновскими переходами, взаимодействующими с микроволновыми полями копланарных резонаторов описаны в большом количестве экспериментальных работ (смотреть [9,10]).

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

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы:

- На основе точных уравнений эволюции для матрицы плотности в диссертационной работе найдены аналитические выражения для временной зависимости параметра Переса-Хородецких трех двухатомных моделей Тависа-Каммингса с различными типами взаимодействия атомов с одномодовым тепловым полем в идеальном резонаторе, при учете диполь-дипольного взаимодействия и начальной атомной когерентности. Для всех рассмотренных моделей показана возможность возникновения перепутывания кубитов, индуцированного тепловым полем. Установлена возможность увеличения степени перепутывания при наличии начальной атомной когерентности и диполь-дипольного взаимодействия для модели с одним атомом в резонаторе в случае малых интенсивностей теплового поля. Для указанной модели показана также возможность перепутывания кубитов в случае начального возбужденного состояния атомов, что невозможно для обычной двухатомной модели Тависа-Каммингса в случае теплового состояния поля.
- В работе найдена общая формула для параметра перепутывания Переса-Хородецких двух двухуровневых атомов, движущихся с различными скоростями и последовательно пролетающих резонатор с электромагнитным полем в фоковском или тепловом состоянии, при этом, атомы приготовлены в белловских перепутанных начальных состояниях. Проведена оценка времен пролета атомами резонатора, для которых в случае вакуумного состояния, атомы возвращаются в исходное белловское состояние, а для теплового поля достигается максимально возможная степень восстановления перепутывания. Показано, что даже для достаточно высоких температур резонатора (в несколько кельвин) для указанных времен возможно восстановление перепутывания атомов.
- Получено точное выражение для параметра перепутывания системы двух кубитов, взаимодействующих с модой квантового электромагнитного резонатора посредством вырожденных двухфотонных переходов, при наличии штарковского сдвига энергетических уровней. Исследовано временное поведение перепутывания для различных атом-атомных и атом-полевых начальных перепутанных состояний, а также когерентных сепарабельных состояний атомов и фоковского состояния поля. Показана возможность стабилизации степени перепутывания кубитов и исчезновения эффекта мгновенной смерти перепутывания при учете штарковского сдвига.
- На основе точного решения динамической задачи для модели двух кубитов с однофотонными- переходами, взаимодействующих с модой поля резонатора, найдена временная зависимость населенностей кубитов и среднего числа фотонов в моде как в случае идеального резонатора, так и резонатора с потерями. Предсказываемое поведение наблюдаемых находится в хорошем согласии с результатами недавних экспериментов по исследованию динамики двух сверхпроводящих джозефсоновских кубитов, взаимодействующих с модой микроволнового поля копланарного резонатора.

- Показано, что диполь-дипольное взаимодействие может использоваться для контроля и управления динамикой трех- и четырехчастичных перепутанных состояний в системах, состоящих из двух кубитов, взаимодействующих с одной или двумя модами поля идеального резонатора. Установлена возможность исчезновения эффекта мгновенной смерти перепутывания в таких системах.

Список цитируемой литературы

1. Kim M.S., et. al. Entanglement induced by a single-mode heat environment // *Phys.Rev. A*. - 2002. – V.65. – P.040101.
2. Zhou L., et. al. Entanglement induced by a single-mode thermal field and criteria for entanglement // *J. Opt.B*. - 2002. – V.4. – P.425 - 429.
3. Bashkirov E.K. Entanglement induced by the two-mode thermal noise // *Laser Physics Letters*. - 2006. – V.3, №3. – P.145-150.
4. Aguiar L.S., et. al. The entanglement of two dipole-dipole coupled in a cavity interacting with a thermal field // *J. Opt.B*. - 2005. – V.7. – P.S769-S771.
5. Hu Y.-H., et. al. Coherence - enhanced entanglement between two atoms at high temperature // *Chin. Phys.* - 2008. - V.17. - P.1784-1790.
6. Buluta I., et. al. Neutral and artificial atoms for quantum computation // *Rep.Prog.Phys.* - 2011. - V.74. – P.104401.
7. Xiang Z.-L., et. al. Hybrid quantum circuits: Superconducting circuits interacting with other quantum systems // *Rev. Mod. Phys.* - 2013. - V.85. - P.623-653.
8. Hagley H., et. al. Generation of Einstein-Podolsky-Rose pairs of atoms // *Phys. Rev. Lett.* – 1997. – V. 79, №1. – P. 1-5.
9. Mlynek J. A., et. al. Demonstrating *W*-type entanglement of Dicke states in resonant cavity quantum electrodynamics // *Phys.Rev.A*. - 2012. - V.86. - P.053838.
10. Altomare F., et. al. Tripartite interactions between two phase qubits and a resonant cavity // *Nature Physics*. - 2010. - V.6. - P.777-781.

Основные публикации по теме диссертации

I. Научные статьи в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, утвержденных ВАК РФ

A1. Башкиров Е.К., Евдокимова, А.М., Мастюгин М.С. Влияние диполь-дипольного взаимодействия на мгновенную смерть перепутывания состояний двух атомов с вырожденными двухфотонными переходами // *Вестник Самарского государственного университета*. - 2011. - № 2 (83). - С.164-170.

A2. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Влияние диполь-дипольного взаимодействия на перепутывание в многофотонной модели Тависа-Каммингса // *Вестник Самарского государственного университета*. - 2011. - № 8 (89). - С.153-156.

A3. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Перепутывание двух дипольно-связанных атомов, взаимодействующих с двухмодовым тепловым полем в

резонаторе с высокой температурой // Вестник Самарского государственного университета. - 2012. - № 9 (100). - С.151-158.

A4. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Перепутывание в невырожденной двухфотонной модели Тависа-Каммингса // Вестник Самарского государственного университета. - 2011. - № 5 (86). - С.109-114.

A5. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Перепутывание двух сверхпроводящих кубитов, взаимодействующих с двухмодовым тепловым полем // Компьютерная оптика. - 2013. - Т.37, № 3. - С.278-285.

A6. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Влияние диполь-дипольного взаимодействия на динамику перепутанных сверхпроводящих потоковых кубитов, взаимодействующих с тепловым полем // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2013. - Т.16, № 2. - С.19-24.

A7. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Динамика перепутанных атомов с двухфотонными переходами при наличии штарковского сдвига энергетических уровней // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2014. - Т.17, № 1. - С.7-12.

A8. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Перепутывание сверхпроводящих потоковых кубитов с вырожденными двухфотонными переходами, индуцированное тепловым шумом // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - 2014. - Т.16, № 6-1. - С.43-49.

A9. Bashkirov E.K., Mastuygin M.S. The dynamics of entanglement in two-atom Tavis-Cummings model with non-degenerate two-photon transitions for four-qubits initial atom-field entangled states // Opt. Commun. - 2014. - V.313. - P.170-174.

A10. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Влияние диполь-дипольного взаимодействия и атомной когерентности на перепутывание двух атомов с вырожденными двухфотонными переходами // Оптика и спектроскопия. - 2014. - Т.116, № 4. - С.678-683.

A11. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Влияние атомной когерентности на перепутывание атомов с двухфотонными переходами с учетом динамического штарковского сдвига // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2014. - Т.17, № 2. - С.7-12.

A12. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Перепутывание двух кубитов, взаимодействующих с одномодовым квантовым полем // Вестн. Сам. гос. техн. ун-та. Сер. физ.-мат. науки. - 2015. - Т. 19, № 2. - С.205-220.

A13. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Перепутывание в двухкубитной системе, индуцированное одномодовым тепловым шумом, при наличии атомной когерентности // Физика волновых процессов и радиотехнические системы. - 2015. - Т.18, № 2. - С.6-13.

A14. Bashkirov E.K., Mastuygin M.S. The influence of atomic coherence and dipole - dipole interaction on entanglement of two qubits with nondegenerate two-photon transitions // Pramana-J.Phys. - 2015. - V.84 (1). - P.127-135.

A15. Bashkirov E.K., Mastuygin M.S. Influence of Stark shift on entanglement of two atoms with degenerate two-photon transitions for entangled and disentangled initial states // Optik. - 2015. - V.126. - P.1787-1791.

II. Статьи в прочих изданиях:

A16. Bashkirov E.K., Mastuygin M.S. Entanglement in nondegenerate two-photon Tavis-Cummings model with atomic coherence // Proc. SPIE. - 2013. - V. 8699. - P.-86990W.

A17. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Динамика перепутывания сверхпроводящих кубитов в резонаторах // Теоретическая физика. - 2013. - № 14. - С.61-76.

A18. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Перепутывание атомов, взаимодействующих с тепловым полем в идеальном резонаторе, при наличии атомной когерентности // Ученые записки физического факультета Московского университета. - 2013. - № 1 (3). - С. 5-8.

A19. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С., Соловьева А.С. Динамика перепутанных атомов, взаимодействующих с двухмодовым тепловым полем // Вестник молодых ученых и специалистов Самарского государственного университета. - 2013. - № 2. - С.86-91.

A20. Bashkirov E.K., Mastuygin M.S. Dynamics of atomic entanglement induced by field // Proc. SPIE. - 2014. - V. 9031. - P.903110.

A21. Bashkirov E.K., Mastuygin M.S. Entanglement of two flux qubits interacting with thermal field // Proc. SPIE. - 2014. - V.9031. - P.903111 (1-10).

A22. Bashkirov E.K., Mastuygin M.S. Influence of Stark shift and atomic coherence on entanglement of two qubits // Proc. SPIE. - 2015. - V.9448. - P.944826.

A23. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Динамика двухуровневых атомов, взаимодействующих с тепловым полем, для перепутанных начальных состояний атомов // Вестник Самарского государственного университета. - 2015. - № 6 (128). - С.149-158.

III. Тезисы докладов.

A24. Мастюгин М.С. Динамика перепутанных атомов с многофотонными переходами // Сборник тезисов докладов IV Международной конференции «Математическая физика и ее приложения». – 2014. - Самара. - С. 243-244.

A25. Башкиров Е.К., Мастюгин М.С. Перепутывание двух кубитов, взаимодействующих с квантованным полем // Сборник тезисов докладов IV Международной конференции «Математическая физика и ее приложения». – 2014. - Самара. - С. 79-80.

A26. Мастюгин М.С., Башкиров Е.К. Перепутывание в двухкубитной системе, индуцированное тепловым шумом // Сборник аннотаций докладов Национальной молодежной научной школы для молодых ученых, аспирантов и студентов по современным методам исследований наносистем и материалов «Синхротронные и нейтронные исследования». – 2015. - Москва. - С. 81-82.

A27. Bashkirov E.K., Mastuygin M.S. Influence of Stark Shift on Entanglement of Two Qubits in the Two-Photon Tavis-Cummings Model // XII International Workshop on Quantum Optics. – 2015. – Moscow, Troitsk, Russia. - EPJ Web of Conferences. - 2015. - V. 103. - P. 03007(1-2).

A28. Bashkirov E.K., Mastuygin M.S. Entanglement Between Qubits Interacting with Thermal Field // XII International Workshop on Quantum Optics. – 2015. - Moscow, Troitsk, Russia. - EPJ Web of Conferences. - 2015. - V. 103. - P. 03002(1-2).

Подписано в печать 28.09.2015 г. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Гарнитура "Times". Печать оперативная.
Усл. печ. л. 1,25. Тираж 100 экз. Заказ 2665

Отпечатано в УОП СамГУ
443011, г. Самара, ул. Академика Павлова, д. 1