

На правах рукописи

Башкеев Алексей Александрович

КОГЕРЕНТНЫЙ И СЖАТЫЙ КОНТРОЛЬ КВАНТОВЫХ
КОРРЕЛЯЦИЙ В ДВУХАТОМНЫХ СИСТЕМАХ

01.04.21 - лазерная физика

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Автор:

Башк



003444983

Москва – 2008

Работа выполнена в Московском инженерно-физическом институте
(государственном университете)

Научный руководитель доктор физико-математических наук,
профессор Эдуард Анатольевич Манькин

Научный консультант кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник
Асхат Масхудович Башаров

Официальные оппоненты доктор физико-математических наук,
профессор Полуэктов Павел Петрович
Институт электронных управляющих машин

доктор физико-математических наук,
профессор Захаров Сергей Михайлович
ФГУП ВНИИ неорганических материалов
имени академика А А Бочвара

Ведущая организация Физический институт имени П Н Лебедева РАН

Защита состоится <<24>> сентября 2008 года в 14⁰⁰ на заседании
диссертационного совета Д 212 130 05 в МИФИ по адресу
115409, Москва, Каширское шоссе, д 31, в конференц-зале корпуса «К»
К-608

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МИФИ

Автореферат разослан <<10>> июля 2008 года

Просим принять участие в работе совета или прислать отзыв в одном
экземпляре, заверенный печатью организации

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212 130 05



И В Евсеев

Общая характеристика работы

Диссертационная работа посвящена теоретическому исследованию квантовых корреляций (так же называемых перепутыванием) в атомных системах, способам их получения и контроля. Проанализировано перепутывание в двухатомных системах, находящихся в поле общего термостата и в одномодовом микрорезонаторе. Исследовано совместное действие нескольких механизмов перепутывания, получены зависимости меры стационарных квантовых корреляций от параметров задачи и начальных условий.

Актуальность темы

Помимо теоретического интереса, неугасающего до сих пор, перепутанные состояния имеют ряд практических применений, изучением которых и занимается квантовая теория информации. Фундаментальные особенности квантовой информации позволяют открыть новые возможности в передаче и обработке информации.

Квантовая криптография. Использование квантовых каналов связи позволяет задействовать алгоритмы «абсолютного шифрования». С помощью подобных алгоритмов можно защитить передаваемую информацию таким образом, что попытка прослушать квантовый канал связи обречена на провал – она лишь разрушит передаваемую информацию, о чем станет известно получателю.

Сверхплотное кодирование. Если между двумя точками помимо классического канала связи установить «идеальный квантовый канал», то пропускную способность классического канала можно увеличить.

Квантовая телепортация. С помощью перепутывания становится возможным перенос квантовых состояний из одной системы в другую. Схемы телепортации фотонных состояний были предложены сравнительно давно. В последние годы вышло несколько работ о телепортации атомных

состояний, для которых, в частности, могут быть использованы результаты данной работы

Квантовая коррекция ошибок Естественно, что не существует каналов связи без потерь и искажений Для квантовых каналов связи уже разработаны методы коррекции ошибок, основанные на фундаментальных свойствах перепутанных состояний

Квантовые вычисления Помимо передачи данных, компьютер в его обыденном понимании должен иметь возможность осуществлять хранение и обработку информации На настоящий момент существует ряд квантовых алгоритмов, качественно более быстрых нежели их классические аналоги Так, некоторые стандартные классические задачи (поиска кратчайшего пути, разложения чисел на простые множители и др), требующие экспоненциального количества шагов, могут быть решены при помощи квантовых алгоритмов за полиномиальное число шагов

Подобные задачи представляют собой практическую ценность и для классической передачи информации Так, существует набор протоколов, основанных на шифровании с помощью открытого ключа В таких случаях для расшифровки информации требуется знание двух типов ключей закрытых (хранящихся в секрете) и открытых (свободно распространяемых) Чтобы на основе открытого ключа вычислить закрытый ключ классическим компьютерам требуется экспоненциально большое число шагов, зависящее от разрядности ключа При создании квантового компьютера такие методы шифрации потеряют свою надежность

Односторонние квантовые вычисления (one-way computer) В последние годы интенсивно развивается исследования систем, в которых вычисления производятся путем процедуры квантового измерения Такого рода системы состоят из перепутанного особым образом набора кубитов Для приготовления таких систем могут использоваться методы квантовой эволюции, в частности, описанные в этой работе

Атомные ансамбли, рассматриваемые в данной работе, могут играть важную роль при создании квантовых вычислений. Они могут выступать в роли хранилищ квантовой информации, какими в классических компьютерах являются жесткие диски. Атомное перепутанное состояние является крайне нестабильным и потому требует специальных условий хранения. Таким образом, важную роль играет поиск таких параметров системы, при которых существуют долговременные квантовые корреляции.

Естественно, в реальных системах всегда существуют факторы, разрушающие стационарное перепутывание. Однако при обращении с перепутанными состояниями достаточным является сохранение перепутывания в системе лишь на некоторое время, необходимое для того, чтобы произвести какое-либо действие над системой (например, измерение) или дождаться окончания экстенсивной эволюции.

Таким образом, одной из актуальных задач физики квантовой информации является исследование моделей, в которых квантовые корреляции сохраняются при временах, превышающих характерное время взаимодействия в системе. Помимо этого для практических целей необходимо иметь эффективные способы контроля меры квантовых корреляций. Наиболее простым способом такого контроля является изменение каких-либо внешних факторов, например интенсивностей электромагнитных полей.

Можно выделить два физически различных типа перепутанных систем: фотонные и атомные. Приготовление перепутанных фотонных состояний, где «перепутанность» является направлением поляризации, можно осуществить путем использования поляризаторов, либо при помощи спонтанного параметрического резонанса. Приготовление перепутанных состояний в атомных системах представляет собой существенно более сложную задачу. Например, приготовить максимально перепутанное атомное состояние можно при помощи процедуры фотодетектирования (квантового измерения).

Для демонстрации этого способа рассмотрим систему из двух первоначально возбужденных атомов и фотодетектора. После щелчка фотодетектора эта система оказывается максимально перепутанной, так невозможно определить, какой из атомов испустил зарегистрированный фотон. Приготовить перепутанное состояние с произвольной степенью перепутывания несколько сложнее.

В настоящей работе предложен новый способ создания состояний с произвольной степенью перепутанности – генерация путем квантовой эволюции. Указанный способ позволяет получить любую величину перепутывания в системе из двух двухуровневых атомов путем изменения внешних воздействий и выбрав соответствующие начальные условия.

Помимо двухуровневых атомов и фотонов, активно исследуются и другие перепутанные системы. Например, существуют работы, где предлагается использовать сверхпроводящие квантовые кубиты на джозефсоновских контактах с низкой емкостью. При этом в качестве квантовых степеней свободы (значения «0» и «1») рассматриваются состояния джозефсоновских контактов, отличающиеся на одну куперовскую пару. С экспериментальной точки зрения манипуляции с такими сверхпроводящими системами имеют ряд преимуществ по сравнению с аналогичными операциями над двухуровневыми атомами. Таким образом, сверхпроводящие кубиты представляют собой перспективные элементы архитектуры квантовых вычислений.

В ряде работ рассматриваются перепутанные состояния, возникающие в системах сверхпроводящих квантовых наноцепочек. Следует отметить, что в таких системах необходимо принимать во внимание релаксационные процессы, что может быть сделано в рамках математической модели, используемой в настоящей работе.

Одной из фундаментальных проблем, стоящей на пути практической реализации квантовых вычислений, является преобразование перепутанных

состояний системы одного вида в перепутанные состояния системы другого вида. В качестве примера такого преобразования можно привести перевод перепутывания атомной подсистемы в перепутывание фотонной подсистемы и наоборот. В классических вычислениях этот процесс эквивалентен считыванию и записи информации. В квантовых системах для этих целей может быть использован сверхпроводящий трехмерный микрорезонатор, с модой которого взаимодействуют ридберговские атомы. Теоретические аспекты преобразования атомных перепутанных состояний в фотонные более подробно рассмотрены в главе 4 настоящей работы.

Целью диссертационной работы являлось

- 1 Исследование механизмов перепутывания между двумя кубитами, находящимися в поле общего и независимых термостатов, с учетом их диполь-дипольного взаимодействия, воздействия классического поля, различных частот атомных переходов, и других параметров задачи
- 2 Исследование системы из двух кубитов находящихся в одномодовом микрорезонаторе на предмет наличия перепутывания в атомной подсистеме
- 3 Поиск способов генерации заданной меры квантовых корреляций в двухатомных системах, путем подбора соответствующей совокупности начальных условий и параметров задачи

Практическая ценность диссертации состоит в возможном использовании полученных результатов в квантовой оптике и квантовой информации

- 1 для реализации квантовых вычислений при создании архитектуры квантового компьютера,
- 2 для долговременного хранения перепутанных состояний с целью их дальнейшего использования в задачах квантовой информации,

- 3 для передачи перепутанных состояний из атомной подсистемы в фотонную,
- 4 при создании механизма контроля перепутанных состояний и получения в системе заданной меры перепутывания для широкого спектра задач квантовой информации

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующих положениях

- 1 Обнаружено перепутывание в атомных системах при воздействии нескольких механизмов перепутывания в случаях, когда каждый механизм в отдельности не приводит систему в перепутанное состояние
- 2 Разработаны способы генерации перепутывания с заданной мерой перепутывания в системах из двух двухуровневых атомов
- 3 Обнаружено качественное сходство в поведении перепутывания в системах, взаимодействующих с полем общего термостата напрямую, и взаимодействующих с полем фотонной моды, которое взаимодействует с полем общего термостата. Величина квантовых корреляций для случая взаимодействия двух двухуровневых атомов с общим термостатом при нулевой температуре непосредственно оказалось существенно большей

На защиту выносятся следующие положения:

- 1 Обнаружены условия возникновения перепутывания в системе двух двухуровневых атомов, находящихся в поле общего термостата и взаимодействующих друг с другом и внешними полями, под действием нескольких механизмов перепутывания – каждый из которых в отсутствие других может не приводить систему к перепутанному состоянию
- 2 Показано, что зависимость стационарного перепутывания между двумя кубитами от симметрии начальных условий качественно совпадает в случае, когда два атома находятся в неидеальном одномодовом

микрорезонаторе при нулевой температуре, и в случае непосредственного взаимодействия атомов с общим термостатом. Наличие начальных возбуждений моды поля в одномодовом резонаторе не влияет на стационарное перепутывание.

3. Найдены способы генерации перепутанных состояний между двумя двухуровневыми атомами с заданной мерой перепутывания методом квантовой эволюции. Подобрав совокупность простых неперепутанных начальных состояний системы и параметров задачи, можно получить заданную величину перепутывания между атомами.

Апробация работы.

Результаты работы прошли апробацию на 11 международных и российских конференциях: *International Optical Congress «Optics XXI Century, International Workshop «Optics in Computing»* (Санкт-Петербург 2002), *The 7th world multiconference on systemics, cybernetics and informatics* (Дубна 2003), *III Всесоюзная конференция памяти Д. Н. Клышко* (Москва 2003), *10th International Conference on Quantum Optics* (Минск, 2004), *13th international laser physics workshop* (Trieste, Italy 2004), *Фундаментальные проблемы оптики* (Санкт-Петербург 2004), *International Conference on Nonlinear Optics/Laser, Application and Technologies* (Санкт-Петербург 2005), *IV Всесоюзная конференция памяти Д. Н. Клышко* (Москва 2005), *The 3rd International Workshop "Quantum Physics and Communication"* (Санкт-Петербург 2005), *научная сессия МИФИ-2008* (Москва 2008).

Публикации

Основные результаты кандидатской диссертации изложены в 6 публикациях. Список публикаций приведен в разделе «По теме диссертации опубликованы следующие работы».

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 78 наименований и 1 приложения, изложена на 89 страницах и содержит 21 рисунок

Основное содержание диссертации

Глава 1. Введение

Целью данной работы является исследование квантовой эволюции перепутывания в системе (нестационарное перепутывание) и его выход на асимптотическое значение (стационарное перепутывание). С теоретической точки зрения более интересным является существование в системе стационарного перепутывания, а также перепутывания при временах больших по сравнению с характерными временами взаимодействия в системе. Возникновение стационарного перепутывания говорит о специфичном распределении атомов системы по энергетическим уровням, в результате чего не устанавливается термодинамическое равновесное состояние, характерное для одноатомной системы.

В теоретических работах, посвященных перепутыванию, выделяется три основных механизма возникновения перепутанных состояний

- 1 непосредственное взаимодействие между подсистемами,
- 2 взаимодействие подсистем с некой общей средой,
- 3 измерение независимых атомных систем в перепутанном базисе

Непосредственное взаимодействие между подсистемами является наиболее простым и очевидным механизмом формирования перепутывания. Теоретический анализ показывает, что наличие только этого механизма, как правило, не приводит к возникновению стационарных перепутанных состояний в системе. Однако как продемонстрировано в настоящей работе, непосредственное взаимодействие между подсистемами в совокупности с

другими механизмами может приводить к возникновению стационарных перепутанных состояний

Иллюстрацией второго случая может служить механизм перепутывания, основанный на взаимодействии атомов с общим термостатом. В таких случаях все пространство состояний системы можно разбить на два подпространства с различным типом симметрии по отношению к перестановкам атомов. Роль общего термостата состоит в том, чтобы обеспечить разную динамику этих подпространств. Состояния одного из подпространств (так называемого decoherence free subspace) эволюционируют унитарным образом, в то время как состояния другого подпространства (так называемые состояния Дике) демонстрируют неунитарную (диссипативную) динамику.

Различная динамика подпространств приводит к тому, что первоначально не перепутанные состояния, которые не принадлежат одному из указанных подпространств целиком, оказываются перепутанными. В теории сверхизлучения состояния, относящиеся к указанным подпространствам, именуется также субрадиантными и суперрадиантными. При этом для возникновения перепутывания унитарная эволюция субрадиантных состояний не является обязательным условием, достаточно чтобы диссипативная динамика субрадиантных и суперрадиантных состояний различалась.

Третий механизм формирования перепутывания – измерение над квантовой системой – связан, как правило, с регистрацией фотонов, излученных атомами. Для демонстрации этого механизма рассмотрим систему, состоящую из двух атомов, находящихся в возбужденном состоянии. Предположим, что при регистрации фотона детектором нельзя указать, какой из атомов излучил фотон. В таком случае после щелчка фотодетектора система окажется в перепутанном состоянии: один атом

(излучивший фотон) находится в основном состоянии, а другой остается в возбужденном состоянии

Отметим, что указанная волновая функция характеризует так называемое апостериорное состояние атомов, а роль измерения сводится к проектированию состояния измеряемой системы на подпространство перепутанных состояний. Неселективность измерения, связанная с неразличимостью квантовых подсистем по отношению к какому-либо общему для них параметру, приводит к перепутыванию атомных состояний. Указанное перепутывание никак не связано с каким-либо коллективным процессом и обусловлено лишь эффективным измерением в перепутанном базисе.

Глава 2. Динамика перепутывания в двухатомных системах.

В данной главе получены уравнения для матрицы плотности системы, состоящей из двух двухуровневых атомов, находящихся в поле общего термостата и взаимодействующих с классическим полем. Были учтены различные частоты у атомов, диполь-дипольное взаимодействие между атомами, наличие у атомов собственных каналов релаксации.

Были найдены параметры, при которых в системе существует перепутывание и исследована зависимость величины перепутывания от эффективных параметров задачи и начальных условий. Большинство результатов было получено с использованием численного моделирования, аналитические выражения были получены для предельных случаев и подтверждают результаты численного счета.

В ходе исследования системы в настоящей главе было установлено, в каких системах и при каких параметрах задачи существуют квантовые корреляции. Так, состояния с максимальной мерой перепутывания имеют место в максимально сжатом термостате, в случае, когда возбуждены оба

атома Результаты численного моделирования показывают, что различные комбинации взаимодействий и начальных условий так же способны приводить систему в перепутанное состояние Так, при отсутствии общего термостата – диполь-дипольное взаимодействие атомов совместно с взаимодействием атомов с собственными каналами релаксации может приводить к наличию перепутывания в системе Взаимодействие с классическим полем совместно с взаимодействием с общим термостатом может приводить к генерации перепутывания (в случае, если возбуждены оба атома) так и к уменьшению его величины (в случае если возбужден один из атомов)

Было установлено, что ненулевая температура термостата при его нулевом сжатии всегда приводит к уменьшению перепутывания, если таковое имело место в системе Сжатие термостата приводит к другой динамике – при максимально сжатом термостате можно получить максимально перепутанные состояния Для случая взаимодействия с отдельными термостатами диполь-дипольное взаимодействие приводит к появлению перепутывания в системе Если такую систему дополнительно подвергнуть воздействию классического поля, то в системе при соответствующих начальных условиях возникают долговременные квантовые корреляции В случае общего термостата диполь-дипольное взаимодействие приводит к характерным осцилляциям и может разрушить перепутывание в системе

Было обнаружено, что принципиальную роль в динамике перепутывания играет симметрия начальных условий В зависимости от различной симметрии начальных условий увеличении одного и того же эффективного параметра может приводить как к увеличению меры перепутывания, так и к ее уменьшению и полному исчезновению В данной главе это показано на примере зависимости перепутывания от набега фазы резонансной волны

Глава 3. Стационарные перепутанные состояния

В настоящей главе стационарное перепутывание было рассмотрено в широком спектре параметров задачи. Получены и проанализированы стационарные матрицы плотности для рассматриваемых систем в зависимости от эффективных параметров взаимодействия. Были определены диапазоны значений таких параметров, при которых в системе существует перепутывание. Так же найдены оптимальные значения параметров, при которых величина перепутывания максимальна.

Нетривиальным результатом предыдущей главы являлся тот факт, что симметрия начальных условий влияет на качественную зависимость стационарного перепутывания от параметров задачи. По результатам этой главы можно утверждать, что имеет место и зависимость стационарного перепутывания от симметрии начальных условий. Это лучше всего видно на примере взаимодействия с термостатом при нулевой температуре – полностью антисимметричное по перестановкам атомов состояние – со временем эволюционирует к неперепутанному состоянию, а чистое неперепутанное состояние под действием квантовой эволюции становится перепутанным. Так в обоих этих случаях в системе находится одно возбуждение, то принципиальная роль симметрии начальных условий очевидна.

Таким образом, можно сделать вывод, что стационарное перепутывание в системах взаимодействующих с термостатом напрямую зависит от симметрии начальных условий, а не от количества возбуждений в системе. Это можно интерпретировать следующим образом: наличие перепутывания в системе зависит от того, совпадает ли симметрия начальных состояний (по перестановке частиц), с симметрией оператора релаксации.

Такая зависимость оператора релаксации от начальных условий находит свое подтверждение во всех рассматриваемых системах. Эта зависимость неоднозначна: два возбужденных атома в термостате при нулевой

температуре не эволюционируют к перепутанному состоянию, а эти же два атома в максимально сжатом термостате перепутываются. Это объясняется различной симметрией операторов взаимодействия с термостатом при нулевой температуре и максимально сжатого термостата.

Полученные результаты позволяют подобрать необходимые условия для создания перепутанных состояний с заданной мерой. Задавая необходимую величину перепутывания, которая должна быть в системе по завершению экстенсивной эволюции, можно подобрать соответствующую совокупность параметров задачи и начальных условий, которая приведет систему в состояние с требуемой мерой перепутывания. Этот способ продемонстрирован на конкретном примере. Таким образом, получен эффективный способ приготовления перепутанных состояний путем квантовой эволюции, который может найти достойное применение в задачах квантовой теории информации.

Глава 4. Перепутывание атомов в одномодовом микрорезонаторе

В настоящей главе была исследована система, состоящая из двух двухуровневых атомов, находящихся в микрорезонаторе, выделенная мода которого взаимодействует с термостатом через потери на зеркалах. В первой части главы была исследована система с сохраняющимся числом возбуждений (без потерь на зеркалах). Было выяснено, что в такой системе нет стационарного перепутывания, а перепутывание колеблется между неперепутанным атомным состоянием и неким максимальным значением перепутывания. Период осцилляций, их вид и амплитуда зависят от начальных условий и параметров задачи.

В предыдущих главах было показано, что стационарное перепутывание в системе возможно только в том случае, если оператор взаимодействия с термостатом имеет симметрию отличную от симметрии начального

состояния атомов в системе В нашем случае ситуация несколько отличается даже если отсутствует взаимодействие моды поля с термостатом, стационарное перепутывание в системе отсутствует При этом взаимодействие с термостатом не всегда обеспечивает перепутывание в системе Стационарное перепутывание в системе будет только в случае наличия одного возбуждения в атомной подсистеме При этом наличие возбуждений моды поля в начальный момент времени не влияет на стационарное перепутывание

Величина квантовых корреляций оказалась меньше величины перепутывания в системе, взаимодействующей с общим термостатом непосредственно Поэтому, когерентный контроль в такой системе не представляет собой особого интереса с практической точки зрения

Основные результаты работы

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертационной работы

- 1 Найдены условия, подходящие для получения стационарного перепутывания заданной величины в системах из двух двухуровневых атомов Максимальная величина квантовых корреляций наблюдается в системе, состоящей из двух двухуровневых атомов, находящихся в поле общего термостата с максимальным сжатием и взаимодействующих с ним непосредственно
- 2 Обнаружены квантовые корреляции при учете отдельных термостатов атомов и при наличии диполь-дипольного взаимодействия под воздействием классического поля. Меньшие величины квантовых корреляций получены и при другой комбинации рассматриваемых параметров
- 3 Предложен способ формирования перепутанных состояний с заданной мерой перепутывания методом квантовой эволюции С помощью задания

соответствующей совокупности неперепутанных начальных условий и параметров задачи можно спустя определенное время получить любую желаемую меру перепутывания между двумя кубитами

- 4 Во всех рассмотренных системах имеет место зависимость величины стационарного перепутывания в системе от симметрии начальных условий по отношению к перестановкам атомов. Указанная симметрия начальных условий так же влияет на качественную зависимость перепутывания от параметров задачи.
- 5 Установлено, что наличие поля фотонной моды одномодового микрорезонатора, взаимодействующего с общим термостатом при нулевой температуре, существенно уменьшает величину квантовых корреляций между двумя двухуровневыми атомами.

По теме диссертации опубликовано 6 работ:

- 1 А М Basharov and А А Bashkeev, *Atomic Entanglement in the Dicke Model*, Laser Phys **13**, pp 1541-1545 (2003)
- 2 А М Basharov and А А Bashkeev, *Quantum Correlations in a System of Two Two-Level Atoms* Proc of SPIE **5402**, pp 291-301 (2004)
- 3 А М Башаров , А А Башкеев, *Квантовые Корреляции в системе двух двухуровневых атомов* Оптика и Спектроскопия, **96** №5, стр 716-723 (2004)
- 4 А М Башаров , А А Башкеев, Маныкин Э А , *Когерентный контроль квантовых корреляций в атомных системах*, ЖЭТФ, **100**, No 3, стр 475–486 (2005)
- 5 А М Башаров, А А Башкеев, *Переопутывание двух двухуровневых атомов в микрорезонаторе* Известия Российской Академии Наук, Серия Физическая, стр 107-110 (2006)
- 6 А М Basharov, А А Bashkeev, Е А Manykin *Entanglement management by optical waves in diatomic systems* ,Proc SPIE **6256**, pp 216-223 (2006)

Подписано в печать 03 07 2008 г
Формат 60 x 90/16 Объем 1 1 п л Тираж 100 экз Заказ № 80704

Оттиражировано на ризографе в ООО «Полиграф-Сервис»
Св о регистрации № 304770000207759 от 09 июня 2004 года
ИНН 770170462581