

"УТВЕРЖДАЮ"

Директор Самарского филиала  
ФГБУН Физического института  
им. П.Н. Лебедева Российской  
академии наук

А.Л. Петров

“ 9 ” декабря 2015 г.

### **ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ**

Самарского филиала Физического института им. П.Н. Лебедева  
Российской Академии Наук на диссертацию Мастюгина Михаила  
Сергеевича «Когерентная динамика и перепутывание двух кубитов, взаимодей-  
ствующих с квантованными полями в резонаторе»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 01.04.21 - лазерная физика.

#### **Актуальность диссертационной работы**

Диссертационная работа М.С. Мастюгина «Когерентная динамика и перепутывание двух кубитов, взаимодействующих с квантованными полями в резонаторе» направлена на развитие теории взаимодействия квантованных полей с естественными или искусственными атомами (сверхпроводящими джозефсоновскими кубитами, примесными спинами и др.). При этом основное внимание в диссертации уделено теоретическому описанию эффективных схем генерации, контроля и управления перепутанными состояниями атомов, возникающими за счет их взаимодействия с квантовыми полями в резонаторах. Интерес к перепутанным состояниям обусловлен применением их для целей квантовой телепортации, создания квантовых сетей и квантовых телекоммуникаций. Такие состояния необходимы также для реализации физически стойких протоколов квантовой криптографии и физики квантовых вычислений, в частности для создания эффективных алгоритмов решения сложных вычислительных задач с участием многочастичных систем. Перепутывание естественных и искусственных атомов, а также атомов и поля может быть достигнуто различными способами, в частности за счет реализации различных схем взаимодействия атомов с общим полем резонатора. Такие системы в настоящее время исследуются не только теоретически, но и реализованы в многочисленных экспериментах на нейтральных атомах и ионах в резонаторах и ловушках, на примесных спинах, углеродные нанотрубках, сверхпроводящих кольцах с джозефсоновскими переходами, в гибридных и оптомеханических системах. В связи с этим описание особенностей коллективной когерентной динамики систем кубитов в квантовой электродинамике резонаторов является в настоящее время одной из наиболее актуальных задач современной лазерной физики, квантовой оптики и квантовой

информатики.

### **Структура диссертации и общая характеристика**

Диссертация Мастюгина М.С. состоит из введения, пяти глав, заключения, списка цитируемой литературы и двух приложений.

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

В первой главе дан достаточно полный обзор современных научных источников, касающихся изучаемых в диссертационной работе вопросов. Дано краткое описание структуры двухатомной модели Тависса-Каммингса, которая используется для описания взаимодействия двух идентичных кубитов с квантовым полем в идеальном резонаторе. 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.

Во второй главе диссертации изучены особенности перепутывания кубитов, индуцированного тепловым шумом. Рассмотрены три различных двухкубитные модели Тависса-Каммингса с различными типами разрешенных переходов в кубитах при наличии диполь-дипольного взаимодействия и атомной когерентности. Для компьютерного моделирования временной зависимости перепутывания кубитов выбирались значения параметров моделей, соответствующих их физическим реализациям на сверхпроводящих джозефсоновских кубитах, взаимодействующих со сверхпроводящими LC контурами или микроволновыми копланарными резонаторами. Для каждой из рассмотренных моделей показана возможность генерации перепутывания кубитов в случае начального сепарабельного состояния и сохранения перепутанности в процессе эволюции для перепутанного начального состояния кубитов. Показана также возможность управления степенью перепутывания кубитов при изменении параметров моделей и начальных состояний кубитов.

Третья глава посвящена изучению особенностей перепутывания двух ридберговских атомов, последовательно пролетающих с различными скоростями сверхпроводящий резонатор одноатомного мазера с тепловым полем малой интенсивности. Рассмотрение проведено как для случая начального перепутанного, так и когерентного сепарабельного состояния атомов. На основе точного решения уравнения эволюции для полной матрицы плотности системы показана возможность сохранения высокой степени перепутывания атомов, взаимодействующих с тепловым полем резонатора, даже при относительно высоких его температурах в несколько кельвин. Показано также, что начальная атомная когерентность приводит к уменьшению степени атомного перепутывания.

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 анализа точного решения сделан вывод о возможности использования штарковского сдвига для эффективного контроля степени перепутывания атомов.

В пятой главе рассмотрена динамика двухатомного перепутывания для трех моделей, состоящих из двух кубитов с различными типами разрешенных переходов, взаимодействующих с одной или двумя модами поля в идеальном резонаторе при наличии прямого диполь-дипольного взаимодействия кубитов. Рассмотрение проведено для моделей, используемых при реализации квантовых сетей, поэтому в качестве начальных состояний систем выбирались трех- и четырехчастичные атом-полевые перепутанные состояния Вернера и Гринбергера-Хорна-Цайлингера. Для рассмотренных моделей показано, что диполь-дипольное взаимодействие может использоваться для контроля и управления динамикой перепутывания кубитов, взаимодействующих с полем в резонаторе, а также для исчезновения эффекта мгновенной смерти перепутывания.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

### **Научная новизна диссертационной работы**

В диссертационной работе М.С. Мастюгина получен ряд новых результатов для теории и практики применения моделей квантовой электродинамики резонаторов.

1. Впервые на основе точных решений уравнений эволюции рассмотрено совместное влияние диполь-дипольного взаимодействия и начальной атомной когерентности на степень перепутывания кубитов, индуцированного тепловым шумом, для ряда двухкубитных моделей Тависса-Каммингса для случая малых интенсивностей теплового шума.

2. Показана возможность возникновения перепутывания ридберговских атомов, последовательно пролетающих тепловой резонатор.

3. На основе анализа точных решений уравнения эволюции показана возможность использования динамического штарковского сдвига энергетических уровней для управления и контроля перепутыванием кубитов в двухкубитных моделях Тависса-Каммингса с двухфотонными переходами.

4. Развита теория взаимодействия одно- и двухмодового квантованного электромагнитного поля идеального резонатора с двумя сверхпроводящими кубитами при наличии диполь-дипольного взаимодействия между кубитами. Выявлено влияние диполь-дипольного взаимодействия на особенности поведения многочастичных атом-фотонных перепутанных состояний таких систем.

### **Практическая значимость диссертации**

Исследования когерентной динамики систем двух кубитов, взаимодействующих с квантованными полями в резонаторах, проведенные в диссертации

могут быть использованы для оценки влияния теплового шума резонатора на динамику генерации и сохранения перепутывания кубитов и значений параметров систем “кубиты+поле”, обеспечивающих получения заданной меры перепутывания необходимой для реализации требуемых протоколов квантовой информатики. Такие оценки могут быть также использованы при реализации устройств для передачи перепутанных состояний из атомной подсистемы в фотонную и создании квантовых сетей, а также выбора подходящих механизмов управления и контроля степени перепутывания кубитов и кубитов и поля.

### **Рекомендации к использованию результатов работы**

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 квантовой электродинамике резонаторов.

Полученные в диссертации результаты могут быть рекомендованы к использованию в научных исследованиях и прикладных разработках в исследовательских институтах: Физическом институте им. П.Н. Лебедева РАН, Институте лазерной физики СО РАН, Институте спектроскопии РАН, Институте общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Национальном исследовательском центре "Курчатовский институт", Объединенном институте ядерных исследований, Казанском физико-техническом институте им Е.К. Завойского, Российском квантовом центре, а также в вузах, ведущих подготовку по направлениям соответствующего профиля.

### **Достоверность результатов диссертации**

Достоверность полученных результатов 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.

### **Замечания**

По диссертации М.С. Мастюгина имеется ряд замечаний.

1. При описании динамики перепутывания кубитов, взаимодействующих с квантованными полями резонаторов, автором не учитывались диссипативные процессы, которые могут, однако существенно повлиять на эволюцию рассматриваемых систем.
2. В четвертой главе диссертации, посвященной анализу динамики атом-полевых перепутанных состояний не указаны возможные способы экспериментального создания таких перепутанных состояний.
3. Автором всюду использовано приближение вращающейся волны, которое справедливо только для режима слабой связи между кубитами и полем. В тоже

время для некоторых физических реализаций рассматриваемых в диссертации моделей, например для сверхпроводящих кубитов, экспериментально достигнута как режимы сильной, так и ультрасильной связи. В этом случае для адекватного описания динамики систем в гамильтониане используемых моделей необходимо учитывать "антивращающиеся" члены.

4. В главах 1-3 диссертации для количественной оценки степени кубитов использована "отрицательность" или Параметр Переса-Хородецких, а в главе 4 – "согласованность". При этом не приведены аргументы, которыми руководствовался автор при выборе критериев перепутанности кубитов в различных главах диссертации.

5. В разделе 6.1 утверждается, что полученные временные зависимости средних населенностей кубитов и среднего числа фотонов в моде находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными по динамике двух сверхпроводящих кубитов, взаимодействующих с микроволновым полем копланарного резонатора. При этом автор не нанес на полученные теоретические кривые экспериментальные точки, что позволило бы наглядно судить о реальной степени совпадения экспериментальных и теоретических кривых.

Указанные недостатки не снижают общей положительной оценки диссертационной работы, выполненной на высоком научном уровне и представляющей завершённое научное исследование. Основные результаты диссертации отражены в 28 опубликованных научных работах, 15 из которых опубликованы в рецензируемых изданиях, установленных Министерством образования и науки РФ для публикации результатов диссертационных исследований. При этом имеется 10 публикаций в изданиях, индексируемых Web of Science и 11 публикаций, индексируемых в Scopus.

Научное положение, выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации М.С. Мастюгина, представляются научно обоснованными и достоверными. Материал диссертации изложен грамотно и логично, работа хорошо оформлена и по прочтении производит благоприятное впечатление.

#### **Соответствие содержания автореферата содержанию диссертации.**

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

#### **Заключение**

Диссертация М.С. Мастюгина является целостной научно-квалификационной работой, в которой разработаны положения, совокупность которых можно квалифицировать как определенный вклад в лазерную физику. В соответствии с паспортом заявленной специальности 01.04.21 направление исследований диссертации можно отнести к следующим пунктам: "Физика взаимодействия когерентного оптического излучения с веществом"; "Процессы генерации и преобразования когерентного оптического излучения, физические методы управления свойствами и параметрами лазерного излучения, включая разработку источников излучения с неклассическими свойствами".

По характеру исследования и полученным результатам диссертационная работа Мастюгина М.С. соответствует специальности 01.04.21 - "Лазерная физика" и удовлетворяет критериям, прописанным п. 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного Постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 г., а сам автор, Михаил Сергеевич Мастюгин, заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 - "Лазерная физика".

Диссертация М.С. Мастюгина обсуждена и отзыв на нее рассмотрен и одобрен на Ученом совете Самарского филиала Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук 09 декабря 2015 г., протокол № 6.

Отзыв подготовлен

Главный научный сотрудник  
Самарского филиала ФГБУН  
им. П.Н. Лебедева  
Российской академии наук

Волостников В. Г.

Волостников Владимир Геннадьевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник лаборатории моделирования и автоматизации лазерных систем Самарского филиала ФИАН.

Адрес: 443011, Самара, Ново-Садовая, 221

Телефон: +7 846 335 57 31; +7 917 113 01 15

Факс: +7 846 335 56 00; Эл. адрес: [coherent@fian.smr.ru](mailto:coherent@fian.smr.ru)

Самарский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук (СФ ФИАН)

Адрес: 443011, Самара, Ново-Садовая, 221

Телефон: +7 846 334 14 81

Сайт: <http://www.fian.smr.ru/>; Эл. адрес: [laser@fian.smr.ru](mailto:laser@fian.smr.ru)

Диссертационная работа и отзыв были рассмотрены и одобрены на заседании ученого совета Самарского филиала ФГБУН Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (протокол №6 от 09 декабря 2015 года).

Ученый секретарь СФ ФИАН,  
д.т.н.



С.И. Ярьско