

**ШАРАПОВА Полина Родионовна**

**Квантовые корреляции и перепутывание в  
неклассических состояниях света и атомных  
системах, взаимодействующих с ними**

**01.04.05 – Оптика**

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Работа выполнена на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
профессор  
Тихонова Ольга Владимировна

Официальные оппоненты: Федоров Михаил Владимирович,  
доктор физико-математических наук, профессор  
(Институт общей физики имени А.М.Прохорова  
Российской Академии Наук), г. Москва,  
заведующий лабораторией

Калачев Алексей Алексеевич,  
доктор физико-математических наук, доцент  
(Казанский физико-технический институт имени  
Е.К.Завойского Казанского научного центра  
Российской Академии Наук), г. Казань,  
вр.и.о. директора

Ведущая организация: Физико-технологический институт Российской  
Академии Наук (ФТИАН), г. Москва

Защита состоится «16» декабря 2015 года в 16 часов 30 минут на заседании совета по защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук Д 501.001.45 на базе Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова по адресу: 119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр.5 (19-й корпус НИИЯФ имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова), аудитория 2-15.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке МГУ имени М. В. Ломоносова, а также на сайтах

[http://istina.msu.ru/media/dissertations/dissertation/b18/588/10922470/Sharapova\\_dissertatsiya.pdf](http://istina.msu.ru/media/dissertations/dissertation/b18/588/10922470/Sharapova_dissertatsiya.pdf)

<http://www.sinp.msu.ru/ru/dissertation/24342>

Автореферат разослан «10» ноября 2015 года.

Ученый секретарь

совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 501.001.45

кандидат физико-математических наук

Вохник О. М.

## Общая характеристика работы

### Актуальность работы

Стремительное развитие квантовой оптики привело к возможности экспериментальной генерации различных неклассических состояний света, таких как бифотонные пары [1-4], однофотонные состояния [5-8], “сжатые” состояния света [9-12] и т. д., возможности удержания отдельных атомов и ионов в ловушках [7,8] и увеличению эффективности взаимодействия единичного атома с единичным фотоном [13,14], а также возможности использования перепутанных состояний различной природы в процессах передачи и хранения квантовой информации [15-17]. Обозначенные аспекты способствовали возникновению и быстрому развитию таких областей современной науки, как квантовая логика и криптография, квантовая телепортация, квантовая томография, квантовые стандарты частоты и т. д. Яркими представителями перепутанных состояний, используемых в вышеперечисленных областях науки, являются бифотонные пары и “сжатые состояния” света, получаемые в процессе параметрического рассеяния света на кристалле с квадратичной нелинейностью в случае низкого и высокого коэффициента параметрического усиления соответственно. Такие неклассические поля обнаруживают высокую степень скоррелированности входящих в них фотонов [18] и, как следствие, являются весьма перспективными объектами для различных приложений квантовой оптики и квантовой информации.

Существенным отличием поля в состоянии сжатого вакуума от бифотонных пар является его высокое среднее число фотонов на моду, позволяющее определить такое поле, фактически, как макроскопическое квантовое состояние света с подавленной дисперсией одной из квадратурных компонент, что имеет большое значение для различных метрологических приложений [19-22]. При этом поле в состоянии сжатого вакуума сохраняет свои существенно неклассические свойства даже при крайне высоком среднем числе фотонов на моду в режиме генерации, так называемых, ярких сжатых состояний света [23]. Как следствие, яркие сжатые состояния характеризуются макроскопической перепутанностью между подсистемами сигнальных и холостых пучков фотонов, которая, в свою очередь, представляется более богатой по сравнению с корреляциями в бифотонных парах. Поэтому изучение и теоретическое описание таких множественных корреляций является весьма перспективной и актуальной на сегодняшний день проблемой. В отличие от случая бифотонных пар методы, основанные на теории возмущений, оказываются не применимы для описания сжатых и тем более ярких сжатых (с крайне высоким числом фотонов на моду) состояний света. Поэтому возникает необходимость разработки новых непertурбативных методов и подходов, позволяющих описывать различные свойства и корреляционные характеристики таких неклассических полей, а также предсказывать новые физические эффекты, связанные с ними. В настоящий момент имеется ряд теоретических работ по описанию свойств и корреляций в сжатых состояниях света [24-27]. Однако многие из них посвящены анализу частотных характеристик, в то время как пространственные корреляции остаются за рамками рассмотрения. Более того, большая часть имеющихся на сегодняшний день теоретических подходов базируется на численном решении интегро-дифференциальных уравнений для операторов рождения и уничтожения фотонов с использованием целого ряда приближений, что не представляет собой полного теоретического описания и не позволяет проанализировать природу возникающих

физических эффектов. При этом в настоящее время существует несколько экспериментальных групп мирового уровня, успешно выполняющих эксперименты по генерации ярких «сжатых» состояний света, а также по измерению их корреляционных свойств [23,27]. Однако результаты указанных экспериментов до сих пор не имеют полного теоретического описания и требуют подробного теоретического анализа. Таким образом, разработка последовательного теоретического подхода для описания пространственных свойств и угловых корреляций в ярких «сжатых» состояниях света является важной и малоисследованной задачей.

Еще одним важным направлением исследований является взаимодействие неклассических полей, включая «сжатые» и фоковские состояния, с атомно-молекулярными системами [28,29]. В этом случае составная система «атом+поле» характеризуется не только атомной, но и полевой степенью свободы, что приводит к перепутанности указанных подсистем. Более того, взаимодействие атомов с неклассическими полями может характеризоваться новыми эффектами, которые не имеют места в случае классических полей или приобретают новую специфику в случае квантового поля. В частности, возникает вопрос о возможности явления стабилизации атома относительно его ионизации в случае взаимодействия с квантовым полем. В случае воздействия классических полей эффект стабилизации, заключающийся в подавлении вероятности ионизации атомно-молекулярных систем при увеличении интенсивности внешнего лазерного поля, был предсказан в [30,31]. В свою очередь, получение стабильных перепутанных атомно-полевых состояний имеет большое практическое значение, поскольку ведет к образованию управляемых атомно-полевых квантовых «битов» - основы протоколов передачи и хранения квантовой информации.

Таким образом, анализ и теоретическое описание корреляций и перепутывания, возникающих в неклассических состояниях света и атомных системах, взаимодействующих с ними, является крайне актуальной, перспективной и малоисследованной на сегодняшний день задачей.

## **Цель диссертационной работы**

**Целью данной работы** является теоретическое исследование пространственных корреляций в ярких «сжатых» состояниях света, а также анализ динамики атомных систем и перепутанности между атомной и полевой подсистемами в процессе взаимодействия атома с неклассическим светом. Такие исследования включают разработку последовательной аналитической теории пространственных свойств ярких «сжатых» состояний света, позволяющую описывать пространственные корреляции большого числа фотонов друг с другом за рамками теории возмущений на основе введения новых независимых коллективных мод; описание на основе разработанной теории целого ряда экспериментов по корреляционным свойствам «сжатых» состояний и выявление возникающих новых физических эффектов; исследование динамики ионизации модельного ридберговского атома при его взаимодействии с неклассическим светом, анализ возможности режима стабилизации и достижения высокой степени перепутанности между атомной и полевой подсистемами, а также разработку методов создания стабильных и сильно перепутанных состояний.

## **Научная новизна**

- Впервые разработана последовательная аналитическая теория для описания пространственных свойств и корреляций в ярких «сжатых» состояниях света, генерируемых в процессе параметрического рассеяния света или четырехволнового смешения с интенсивной накачкой.
- На основе разработанной теории впервые продемонстрировано изменение корреляционных свойств «сжатого вакуума» с ростом коэффициента параметрического усиления и получено объяснение наблюдаемых эффектов в терминах новых введенных независимых пространственных мод.
- На основе разработанного теоретического подхода проведено описание ряда экспериментов, демонстрирующее хорошее согласие с экспериментальными данными, и обнаружены новые физические эффекты: впервые теоретически разработаны методы создания пространственно одномодового источника неклассического «сжатого» света в схеме нелинейного усиления с двумя кристаллами; впервые предсказано и объяснено гигантское усиление нелинейного сигнала на определенной частоте в направлении «сноса» за счет эффектов анизотропии.
- Впервые исследована динамика ионизации атома при его взаимодействии с неклассическим светом в состоянии «сжатого вакуума» и обнаружен эффект стабилизации, а также высокая степень перепутанности между атомной и полевой подсистемами.
- При взаимодействии атома с одним полевым фотоном впервые обнаружен режим стабилизации атомной системы и продемонстрирована возможность управления стабильностью системы в процессе ее динамики.
- Впервые разработаны методы создания максимальной перепутанности в системе «атом + квантовое поле», а также управления такими запутанными системами.

## **Практическая значимость**

Полученные результаты имеют фундаментальную научную значимость с точки зрения разработки новых теоретических подходов к проблеме корреляций и перепутывания в составных квантовых системах, выявления новых свойств неклассических сжатых состояний, а также обнаружения новых эффектов, возникающих в процессе их взаимодействия с атомно-молекулярными системами. Полученные результаты имеют большое значение для целого ряда важных практических приложений, включая задачи передачи и хранения квантовой информации, прецизионные квантовые измерения с уровнем шума ниже стандартного квантового предела, квантовую интерферометрию и метрологию, разработку стандартов частоты, а также создание управляемых атомных квантовых «битов» с контролируемой степенью перепутанности.

На защиту выносятся следующие **основные результаты и положения**:

1. Разработанная за рамками теории возмущений аналитическая теория для описания пространственных свойств и корреляций в ярких «сжатых» состояниях света, генерируемых в процессе параметрического рассеяния света или четырехволнового смешения с интенсивной накачкой.
2. Увеличение ширины пространственных корреляций между пучками сигнальных и холостых фотонов в ярком «сжатом вакууме» с ростом коэффициента параметрического усиления и физическое объяснение наблюдаемого эффекта в терминах независимых пространственных мод.
3. Методы создания пространственно одномодового источника неклассического «сжатого» света в схеме нелинейного усиления с двумя кристаллами, а также теоретическое описание свойств такого излучения.
4. Методы получения гигантского усиления нелинейного сигнала параметрического рассеяния, наблюдающегося на определенной частоте в направлении «сноса» за счет эффектов анизотропии.
5. Обнаруженный эффект стабилизации, а также высокая степень перепутанности между атомной и полевой подсистемами при взаимодействии ридберговского атома с неклассическим полем в состоянии «сжатого вакуума».
6. Методы управления стабилизацией атомной системы и создание абсолютно стабильного атомного состояния с высокой степенью перепутанности при взаимодействии неклассического света с малым числом фотонов с ридберговским атомом.
7. Методы создания максимальной перепутанности в системе «ридберговский атом + квантовое поле», а также восстановление полной информации о смешанном атомном состоянии посредством приложения последующего классического импульса.

### **Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на семинарах отдела микроэлектроники НИИЯФ МГУ, а также на семинарах лаборатории квантовой информации и квантовых оптических технологий кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ и были представлены на 12 международных конференциях и симпозиумах:

1. П.Р.Шарапова. Динамика модельной атомной системы в сильном неклассическом электромагнитном поле. Материалы конференции «Ломоносов-2010», Физика, секция «Оптика, доклад 22, (2010)
2. P.R.Sharapova, O.V.Tikhonova Dynamics and ionization suppression of a model atomic system in quantized electromagnetic field. Abstracts of the International conference on coherent and nonlinear optics (ICONO), 23-27.08.2010, Kazan, Russia, report ITUP1.

3. P.R.Sharapova, O.V.Tikhonova Interaction of an atom with a strong non-classical field. XX Laser Phys. Workshop, 11-15.07.2011, Sarajevo, Seminar 2, talk 70
4. P.R.Sharapova, O.V.Tikhonova Stabilization and entanglement of a model Rydberg atom in non-classical electromagnetic field. XXI Laser Phys. Workshop, 23-27.07.2012, Calgary, Canada, Seminar 2, talk 2.15.4
5. P.R.Sharapova Entangled states of quantum composite systems. ICPS 2012, 04-09.08.2012, Utrecht, Netherlands p.26
6. P.R.Sharapova, O.V.Tikhonova Stabilization and entanglement of a model Rydberg atom in non-classical electromagnetic field. International Workshop on Atomic Physics, 26-30, November, 2012, Dresden, Germany, p.39.
7. P.R.Sharapova, O.V.Tikhonova. Interference stabilization and entanglement of a model Rydberg atom in a quantum electromagnetic field. Abstracts of the International conference on coherent and nonlinear optics (ICONO), Moscow, Russia, 2013, talk IFH2
8. P.R.Sharapova, O.V.Tikhonova. Behaviour of a model Rydberg atom in classical and quantum electromagnetic fields alternating each other. XXII Laser Phys. Workshop, 15-19.07.2013, Prague, Czech Republic, Seminar 2, talk 2.13.4
9. P.R. Sharapova, O.V. Tikhonova, A.M.Perez , M.V.Chekhova, G. Leuchs. Theoretical description of spatial correlation in bright squeezed vacuum using Bloch-Messiah reduction. Quantum 2014, 25-30.05.2014, Torino, Italy, talk P72
10. P.R. Sharapova, O.V. Tikhonova, A.M.Perez , M.V.Chekhova, G. Leuchs. Theoretical description of spatial correlations arising in bright squeezed vacuum by means of Bloch-Messiah reduction and Schmidt modes formalism. XXIII Laser Phys. Workshop, 14-18.07.2014, Sofia, Bulgaria, Seminar 7, talk 7.2.1
11. Polina R. Sharapova, O. V. Tikhonova, Angela Marcela Perez Castaneda, Maria V. Chekhova, Gerd Leuchs. Theoretical description of spatial multiphoton correlations in bright squeezed vacuum states of light. SPIE, 13-16.04.2015, Prague, Czech Republic, [9505-33]
12. Polina Sharapova, Olga Tikhonova, Angela Perez, Maria Chekhova and Gerd Leuchs, The anisotropy effect and spatial walk-off in the bright squeezed vacuum states of light in terms of Schmidt modes. 14 International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations, ICSSUR 2015, 29.06-03.07.2015, Gdansk, Poland

### **Публикации**

По материалам диссертации опубликовано 19 печатных работ, в том числе 7 статей в высокорейтинговых реферируемых российских и зарубежных журналах [A1 – A7] и 12 тезисов докладов на международных конференциях [A8 - A19].

### **Личный вклад автора**

Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим при разработке теоретических моделей, аналитического и численного анализа, реализации численного решения и интерпретации полученных результатов. Все изложенные в диссертационной работе результаты получены лично автором.

## Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения. В первой главе представлен обзор литературы, описывающий современное состояние исследований по теме диссертации, и обосновывается актуальность диссертационной работы. Вторая глава посвящена теоретическому исследованию пространственных свойств и корреляций в ярких сжатых состояниях света, генерируемых в процессе параметрического рассеяния света или четырехволнового смешения с высокоинтенсивной накачкой. В данной главе представлен разработанный теоретический подход, позволяющий описывать пространственные корреляции в ярком сжатом вакууме за рамками теории возмущений, рассмотрены случаи цилиндрической и декартовой системы координат. На основе представленной теории проведено исследование пространственных корреляций между сигнальным и холостым пучками фотонов в ярком сжатом вакууме, произведен анализ различных корреляционных характеристик, таких как вариация разности, корреляционная функция второго порядка по интенсивности, ковариация, параметр Шмидта и исследованы их зависимости от различных параметров, в том числе от коэффициента параметрического усиления. Также рассматривается возможность создания пространственно одномодового источника яркого сжатого вакуума в схеме с двумя нелинейными кристаллами, разделенными воздушным промежутком, и анализируется пространственная структура, модовый состав нелинейного сигнала при различном удалении кристаллов друг от друга. Кроме того, во второй главе описывается процесс генерации высокоинтенсивных пучков-близнецов вдоль направления вектора Умова-Пойнтинга накачки в нелинейном кристалле (а также в симметричном ему направлении согласно условию фазового синхронизма), возникающий за счет эффекта пространственного сноса в анизотропном кристалле. В третьей главе исследуется взаимодействие неклассических полей в состоянии сжатого вакуума, а также поля, содержащего малое число фотонов, с модельными ридберговскими атомными системами с учетом процесса ионизации атома. Исследуются эффекты стабилизации атома и степень перепутанности атомной и полевой подсистем в случае наличия или отсутствия нижележащего атомного уровня, демонстрируется возможность создания стабильного атомного состояния с высокой степенью перепутанности. Также разрабатываются методы восстановления информации о состоянии атомной системы, возникающем в процессе взаимодействия атома с одиночным фотоном, посредством приложения последующего классического поля. Основные результаты и выводы работы представлены в Заключении.

## Содержание работы

Во **Введении** сформулирована цель диссертационной работы, обоснованы ее актуальность, научная и практическая значимость, а также описана структура работы.

**Первая глава** представляет собой обзор литературы, посвященный современным исследованиям по теме диссертации: рассматривается актуальное состояние развитых на данный момент теоретических подходов и методов описания пространственно-частотных корреляций сжатых состояний света, обсуждаются неклассические состояния поля, генерация которых возможна в эксперименте, а также особенности взаимодействия таких полей с атомными системами по сравнению с уже известными эффектами, возникающими в случае воздействия на атом классического поля.

Во **второй** главе исследуются пространственные свойства и корреляции в ярких сжатых состояниях света. В данной главе разработан теоретический подход для описания пространственных корреляций в ярком «сжатом вакууме», на основе которого представлено описание ряда эффектов, наблюдаемых в экспериментах по генерации таких сжатых неклассических состояний. Проведено сравнение теоретических результатов с данными экспериментов, проведенных в группе проф. Чеховой М.В. (Институт М. Планка, г. Эрланген, Германия) по анализу пространственных корреляционных свойств ярких сжатых состояний света, которое демонстрирует прекрасное согласие разработанной теории и эксперимента. Вторая глава состоит из пяти разделов.

В разделе 2.1. описывается разработанный теоретический подход, основанный на разложении Шмидта амплитуды бифотона, введении интегральных операторов рождения/уничтожения фотонов в модах Шмидта и последующей диагонализации исходного гамильтониана параметрического взаимодействия в терминах введенных независимых фотонных операторов в новых пространственных модах. Разработанный подход позволяет рассмотреть эволюцию новых введенных фотонных операторов в представлении Гайзенберга и получить конечные аналитические выражения как для операторов в модах Шмидта, так и для плосковолновых операторов, на основе которых могут быть вычислены различные характеристики «сжатого вакуума». Аналитическое решение произведено в цилиндрической системе координат и справедливо для задач, характеризующихся аксиальной симметрией, а также в декартовой системе координат в приближении двух факторизованных гауссов (Double-Gauss) в выражении для амплитуды бифотона, последнее справедливо в приближении широкой накачки и малого расстояния между кристаллами.

В разделе 2.2. на основе предлагаемой теоретической модели проведено описание углового распределения интенсивности, а также углового распределения пространственных корреляций (рисунок 1) посредством вычисления вариации разности чисел фотонов в сигнальном и холостом пучках для компенсационной конфигурации двух кристаллов; показано, что максимально скоррелированные к выбранному углу вылета фотоны излучаются в том же (автокорреляции) и симметричном (кросскорреляции) направлениях, произведено сравнение с экспериментальными данными.

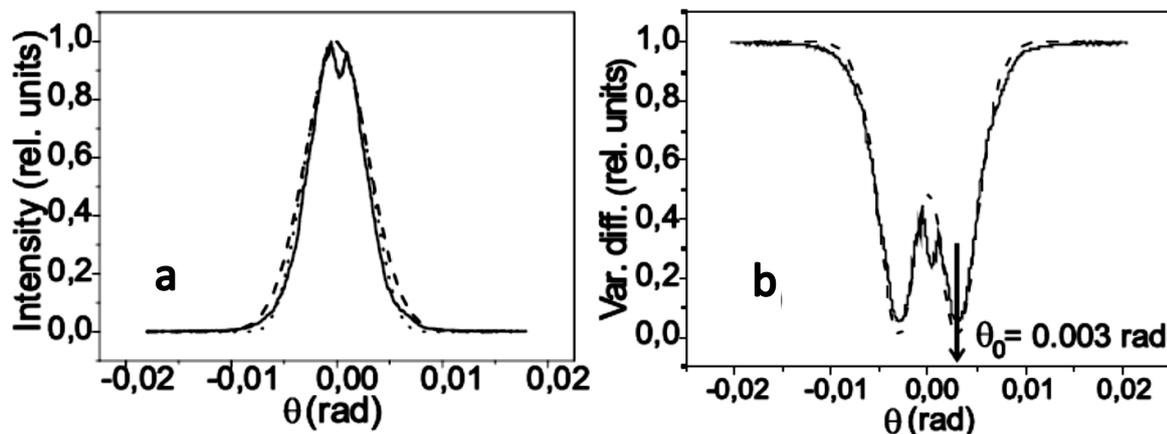


Рисунок 1. Нормированные угловые теоретические (пунктирная кривая) и экспериментальные (сплошная кривая) а) распределения интенсивности, б) распределения дисперсии разности сигналов сигнального и холостого фотонов для фиксированного угла вылета холостого фотона 0.003 рад.

Также в данном разделе рассматривается структура излучения с точки зрения мод Шмидта и зависимость характеристик яркого сжатого вакуума от коэффициента параметрического усиления. Показано, что пространственное распределение интенсивности представляет собой некогерентную суперпозицию мод Шмидта с весами, зависящими от параметрического коэффициента усиления; продемонстрировано сужение углового спектра и исчезновение его интерференционной структуры с ростом интенсивности накачки, а также уменьшение числа эффективных мод (редукция параметра Шмидта) и увеличение угловой ширины корреляций фотонов с последующим выходом ее на постоянную величину, равную ширине первой моды Шмидта, с ростом коэффициента параметрического усиления. Произведено сравнение теоретических расчетов с экспериментальными данными, демонстрирующее хорошее их согласие.

В разделе 2.3. на основе представленного подхода рассмотрена фильтрация пространственного излучения при помощи диафрагмы, получены аналитические выражения для автокорреляционной  $g_{ss}^{(2)}$  и кросскорреляционной  $g_{is}^{(2)}$  функций второго порядка по интенсивности в зависимости от размера фильтруемой области, а также их интегральные величины. Продемонстрировано увеличение автокорреляционной функции при уменьшении размера диафрагмы, а также при увеличении интенсивности накачки, что свидетельствует о выделении одной пространственной моды при использовании бесконечно малого размера диафрагмы. Проведено сравнение с экспериментальными данными.

В разделе 2.4. рассмотрено выделение одной пространственной моды при помощи увеличения расстояния между двумя пространственно разделенными нелинейными кристаллами. Проанализирован модовый состав излучения в точках конструктивной и деструктивной интерференции; показано, что интегральный сигнал, а также корреляционная функция проявляют характерные осцилляции по мере увеличения расстояния между кристаллами с периодом в 35 мм, что связано с разными набегам фазы накачки и параметрического излучения в воздухе (рисунок 2).

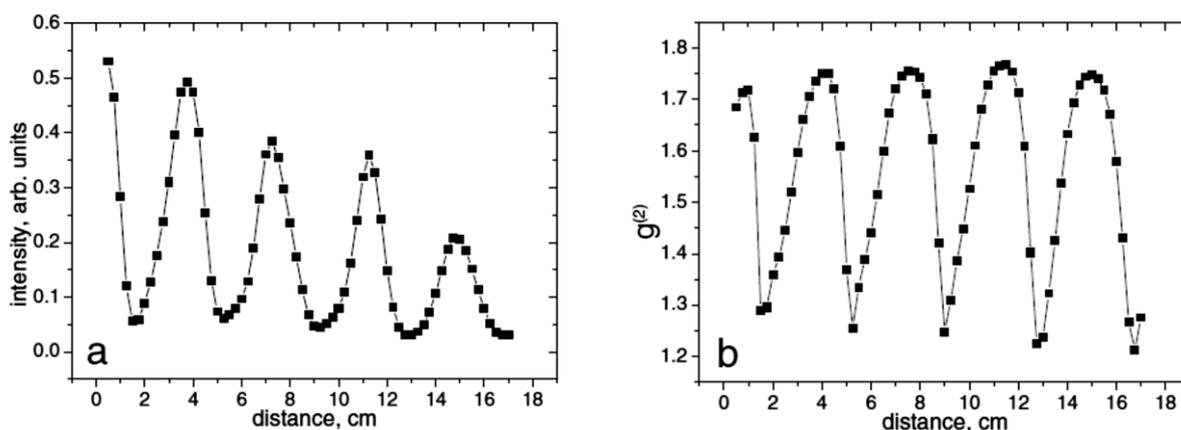


Рисунок 2. а) Интегральная интенсивность и б) автокорреляционная функция второго порядка по интенсивности в зависимости от расстояния между кристаллами.

Продемонстрировано увеличение корреляционной функции при увеличении расстояния между кристаллами, то есть уменьшение количества эффективных мод излучения, проанализированы режимы получения максимального значения корреляционной функции для рассматриваемой экспериментальной конфигурации, показана возможность выделения одной пространственной моды с высоким числом фотонов и сохранением всех свойств сжатых состояний в компенсационной конфигурации двух кристаллов посредством увеличения воздушного зазора между ними.

В разделе 2.5. рассмотрено проявление эффекта пространственного сноса в нелинейном кристалле, а также его влияние на свойства сжатого вакуума в схемах скомпенсированной и нескомпенсированной анизотропии. Продемонстрировано принципиальное отличие структуры спектра в случае высокого и низкого значений коэффициента параметрического усиления, в частности, при высокой интенсивности накачки в случае нескомпенсированной анизотропии наблюдаются два пространственно разделенных пика даже в режиме коллинеарного синхронизма. Также продемонстрирована возможность генерации высокоинтенсивных скоррелированных пучков близнецов посредством поворота кристалла: для фиксированной длины волны максимальная интенсивность наблюдается у излучения, идущего под углом сноса (в направлении вектора Умова – Пойнтинга накачки), а также в соответствующем ему направлении согласно условию фазового синхронизма. Также было показано вырождение кольца параметрического излучения в два симметричных относительно коллинеарного направления вылета фотонов пика в режиме высокого коэффициента параметрического усиления при генерации излучения максимальной интенсивности.

**Глава 3** посвящена исследованию динамики модельного ридберговского атома, представляющего собой несколько дискретных уровней и континуум, в различных неклассических полях. Третья глава состоит из трех разделов.

В разделе 3.1. исследуется динамика модельного ридберговского атома в поле в состоянии сжатого вакуума, а также в когерентном поле при различных значениях среднего числа фотонов. Анализируется возможность и условия возникновения интерференционной стабилизации и перепутывания между атомной и полевой подсистемами, а также динамика обнаруженных корреляций во времени. Задача рассмотрена с точки зрения квазиэнергий и квазиэнергетических волновых функций, продемонстрирована стабилизация атомной системы при взаимодействии со сжатыми состояниями уже при невысоком числе фотонов за счет не распадающегося нулевого фоковского состояния, а также отличной от нуля заселенности фоковских состояний с высокими номерами в силу специфики распределения. При помощи параметра Шмидта был произведен анализ корреляций, возникающих между атомной и полевой подсистемами, обнаружена высокая степень перепутанности, сохраняющаяся даже на больших временах (рисунок 3).

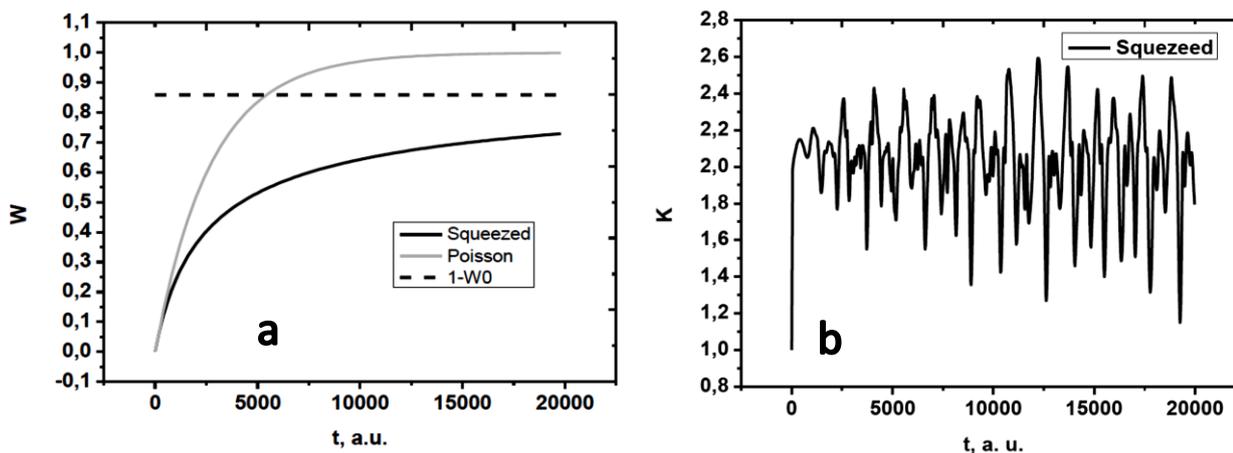


Рисунок 3. а) Зависимость вероятности ионизации от времени, б) зависимость параметра Шмидта от времени для  $V$  – схемы в случае среднего числа фотонов  $\langle N \rangle = 50$  и начальной разности фаз заселения ридберговских атомных уровней  $\phi = 0$  для когерентного состояния (Poisson) – серая кривая и для поля в состоянии сжатого вакуума (Squeezed) – черная кривая. Горизонтальная прямая – уровень  $(1 - W_0)$ , где  $W_0$  – заселенность вакуумного состояния для поля в состоянии сжатого вакуума, время указано в атомных единицах.

В разделе 3.2. рассмотрено взаимодействие модельного ридберговского атома с однофотонным состоянием поля, проанализированы условия возникновения интерференционной стабилизации и перепутывания между атомной и полевой подсистемами, обсуждаются методы создания максимально перепутанных состояний, а также предлагаются методы управления и квантового контроля ридберговского  $q$ -бита посредством однофотонного полевого состояния. Задача рассмотрена с точки зрения квазиэнергий и квазиэнергетических волновых функций, которые в данном случае могут быть вычислены аналитически, при этом одна из квазиэнергий является абсолютно стабильной и не распадается с течением времени. Разработаны методы эффективного заселения данного стабильного состояния одновременно с достижением высокой степени перепутанности между атомной и полевой подсистемами.

В разделе 3.3. рассматривается динамика в классическом лазерном поле модельного ридберговского атома, включающего несколько дискретных уровней и континуум и приготовленного изначально в смешанном состоянии посредством взаимодействия с квантовым полем. Анализируются возможные режимы интерференционной стабилизации и влияние недиагональных элементов начальной матрицы плотности на последующую динамику системы; показано наведение когерентности и увеличение степени “чистоты” изначально смешанного атомного состояния посредством приложения к нему классического поля. Также рассматривается возможность извлечения информации о начальной смешанной атомной матрице плотности посредством измерения вероятности ионизации и вероятности остаточной атомной заселенности в последующем классическом лазерном поле.

## Список публикаций

- A.1. Шарاپова П.Р., Тихонова О.В. Динамика ионизации и перепутывания в системе "атом + квантовое электромагнитное поле // Квантовая электроника – 2012 – Выпуск 42, №3, с. 199-207.
- A.2. Sharapova P.R., Tikhonova O.V. Coherent control of interaction and entanglement of a Rydberg atom with few photons // *Las. Phys. Lett.* – 2013 – Volume 10, №7, p. 075204.
- A.3. Sharapova P.R., Tikhonova O.V. Interaction of a classical laser field with a model Rydberg atom in a mixed state prepared by entanglement with few-photon quantum light // *Journal of Physics: Conference Series* – 2014 – Volume 497, p. 012017.
- A.4. Pérez A.M., Iskhakov T.Sh., Sharapova P., Lemieux, S., Tikhonova O.V., Chekhova M.V., Leuchs G. Bright squeezed-vacuum source with 1.1 spatial mode // *Optics Letters* – 2014 – Volume 39, №8, pp. 2403-2406.
- A.5. Sharapova P., Pérez A.M., Tikhonova O.V., Chekhova M.V. Schmidt modes in the angular spectrum of bright squeezed vacuum // *Phys. Rev. A* – 2015 – Volume 91, №4, p. 043816.
- A.6. Dyakonov I.V., Sharapova P.R., Iskhakov T.Sh., Leuchs G. Direct Schmidt number measurement of high-gain parametric down conversion // *Las. Phys. Lett.* – 2015 – Volume 12, №6, p. 065202.
- A.7. Pérez A.M., Spasibko K.Yu., Sharapova P.R., Tikhonova O.V., Chekhova M.V., Leuchs G. Giant Narrowband Twin-Beam Generation along the Pump Energy Propagation // *Nature Communications* – 2015 – Volume 6, p. 7707.
- A.8. Шарاپова П.Р. Динамика модельной атомной системы в сильном неклассическом электромагнитном поле // Материалы докладов Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов 2010», Физика, секция «Оптика», доклад №22, Москва, Россия, 2010.
- A.9. Sharapova P.R., Tikhonova O.V. Dynamics and ionization suppression of a model atomic system in quantized electromagnetic field // *Abstracts of the International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, ICONO 2010, 23-27 August, 2010, Kazan, Russia, report ITUP1.*
- A.10. Sharapova P.R., Tikhonova O.V. Interaction of an atom with a strong non-classical field // *Book of abstracts XX International Laser Physics Workshop, LPHYS'11, 11-15 July, 2011, Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, Seminar 2, report 2.70.*
- A.11. Sharapova P.R., Tikhonova O.V. Stabilization and entanglement of a model Rydberg atom in non-classical electromagnetic field // *Book of abstracts XXI International Laser Physics Workshop, LPHYS'12, 23-27 July, 2012, Calgary, Canada, Seminar 2, talk 2.15.4.*
- A.12. Sharapova P.R. Entangled states of quantum composite systems // *Abstracts of the International Conference of Physics Students, ICPS 2012, 04-09 August, 2012, Utrecht, Netherlands, p.26.*
- A.13. Sharapova P.R., Tikhonova O.V. Stabilization and entanglement of a model Rydberg atom in non-classical electromagnetic field // *Abstracts of the International Workshop on Atomic Physics, 26-30 November, 2012, Dresden, Germany, p.39.*
- A.14. Sharapova P.R., Tikhonova O.V. Interference stabilization and entanglement of a model Rydberg atom in a quantum electromagnetic field // *Abstracts of the International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, ICONO 2013, 18-22 June, 2013, Moscow, Russia, talk IFH2.*

A.15.Sharapova P.R., Tikhonova O.V. Behaviour of a model Rydberg atom in classical and quantum electromagnetic fields alternating each other // Book of abstracts XXII International Laser Physics Workshop, LPHYS'13, 15-19 July, 2013, Prague, Czech Republic, Seminar 2, talk 2.13.4.

A.16.Sharapova P.R., Tikhonova O.V., Pérez A.M., Chekhova M.V., Leuchs G. Theoretical description of spatial correlation in bright squeezed vacuum using Bloch-Messiah reduction // Advances in Foundations of Quantum Mechanics and Quantum Information with atoms and photons, Quantum 2014, 25-30 May, 2014, Torino, Italy, report P72.

A.17.Sharapova P.R., Tikhonova O.V., Pérez A.M., Chekhova M.V., Leuchs G. Theoretical description of spatial correlations arising in bright squeezed vacuum by means of Bloch-Messiah reduction and Schmidt modes formalism // Book of abstracts XXIII International Laser Physics Workshop, LPHYS'14, 14-18 July, 2014, Sofia, Bulgaria, Seminar 7, talk 7.2.1.

A.18.Sharapova P.R., Tikhonova O.V., Pérez A.M., Chekhova M.V., Leuchs G. Theoretical description of spatial multiphoton correlations in bright squeezed vacuum states of light // SPIE Optics + Optoelectronics 2015, 13-16 April, 2015, Prague, Czech Republic, report 9505-33.

A.19.Sharapova P.R., Tikhonova O.V., Pérez A.M., Chekhova M.V., Leuchs G. The anisotropy effect and spatial walk-off in the bright squeezed vacuum states of light in terms of Schmidt modes // Abstracts of the 14<sup>th</sup> International Conference on Squeezed States and Uncertainty Relations, ICSSUR 2015, 29 June - 03 July, 2015 Gdansk, Poland, section C, p. 8.

## Цитированная литература

1. Bogdanov Yu.I., Moreva E.V., Maslennikov G.A., Galeev R.F., Straupe S.S., Kulik S.P. Polarization states of four-dimensional systems based on biphotons // Phys. Rev. A – 2006 – Volume 73, №6, p. 063810.
2. Кулик С.П., Молотков С.Н., Страупе С.С. О телепортации в системе тождественных частиц // Письма в ЖЭТФ – 2010 – Том 92, вып. 3, с. 212-215.
3. Клышко Д.Н. Когерентный распад фотонов в нелинейной среде // Письма в ЖЭТФ – 1967 – Volume 6, №1, pp. 490-492.
4. Giallorenzi T.G., Tang C.L. Quantum Theory of Spontaneous Parametric Scattering of Intense Light // Phys. Rev. – 1968 – Volume 166, №2, pp. 225-233.
5. Ekimov A., Efros A. L., Onushchenko A. Quantum size effect in semiconductor microcrystals // Solid State Communications – 1985 - Volume 56, № 11, pp. 921–924.
6. Lounis B., Bechtel H., Gerion D., Alivisatos P., and Moerner W. Photon antibunching in single CdSe/ZnS quantum dot fluorescence // Chemical Physics Letters – 2000 - Volume 329, №5, pp. 399–404.
7. J. McKeever, A. Boca, A. D. Boozer, R. Miller, J. R. Buck, A. Kuzmich, H. J. Kimble Deterministic Generation of Single Photons from One Atom Trapped in a Cavity // Science – 2004 - Volume 303, p. 1992.
8. P. Maunz, D. L. Moehring, S. Olmschenk, K. C. Younge, D. N. Matsurevich and C. Monroe Quantum interference of photon pairs from two remote trapped atomic ions // Nature Phys. – 2007 - Volume 3, p. 538.
9. Slusher R. E., Hollberg L. W., Yurke B., Mertz J. C., and Valley J. F. Observation of Squeezed States Generated by Four-Wave Mixing in an Optical Cavity // Phys.Rev.Lett. – 1985 – Volume 55, №, pp. 2409-2412.
10. Kasivishwanathan S. Highly Amplitude-Squeezed States of the Radiation Field // Phys.Rev.Lett. – 1995 - Volume 75, p. 2116.

11. Быков В.П. Основные особенности сжатого света // УФН – 1991 - Том 161, №10, с.145-173.
12. T.Iskhakov, M.V.Chekhova and G.Leuchs Generation and Direct Detection of Broadband Mesoscopic Polarization-Squeezed Vacuum // Phys. Rev. Lett. – 2009 - Volume 102, p. 183602.
13. M.Sondermann, R.Maiwald, H.Konermann N. Lindlein, U. Peschel, and G. Leuchs Design of a mode converter for efficient light-atom coupling in free space // Appl. Phys. B - 2007 – Volume 89, p. 489.
14. M.K.Tey, Z.Chen, S.Aljunid et. al. Strong interaction between light and a single trapped atom without the need for a cavity // Nature Phys. – 2008 - Volume 4, pp. 924-927.
15. Law C.K., Eberly J.H. Analysis and Interpretation of High Transverse Entanglement in Optical Parametric Down Conversion // Phys. Rev. Lett. – 2004 – Volume 92, №12, p. 127903.
16. C. Monroe, D. M. Meekhof, B. E. King, W. M. Itano, and D. J. Wineland Demonstration of a Fundamental Quantum Logic Gate // Phys. Rev. Lett. – 1995 – Volume 75, №25, pp. 4714-4717.
17. I. Cirac, P. Zoller, H. J. Kimble and H. Mabuchi Quantum State Transfer and Entanglement Distribution among Distant Nodes in a Quantum Network // Phys. Rev. Lett. – 1997 – Volume 78, №16, pp. 3221-3224.
18. T. Sh. Iskhakov, I. N. Agafonov, M.V. Chekhova, and G. Leuchs Polarization-Entangled Light Pulses of 105 Photons // Phys. Rev. Lett. - -2012 – Volume 109, p. 150502.
19. G. Brida, I. P. Degiovanni, M. Genovese, M. L. Rastello, and I. Ruo Berchera Detection of multimode spatial correlation in PDC and application to the absolute calibration of a CCD camera // Opt. Express – 2010 - Volume 18, pp. 20572-20584.
20. F. Hudelist, J. Kong, C. Liu, J. Jing, Z. Y. Ou, and W. Zhang Quantum metrology with parametric amplifier-based photon correlation interferometers //Nat. Commun. – 2014 - Volume 5, p. 3049.
21. F. Khalili, S. Danilishin, H. Miao, H. Muller-Ebhardt, H. Yang, and Y. Chen Preparing a Mechanical Oscillator in Non-Gaussian Quantum States // Phys. Rev. Lett. – 2010 - Volume 105, p. 070403.
22. Jedrkiewicz O., Blanchet J.L., Gatti A., Brambilla E., Di Trapani P. High visibility pump reconstruction via ultra broadband sum frequency mixing of intense phase-conjugated twin beams // Opt. Express – 2011 - Volume 19, p. 12903.
23. I. N. Agafonov, M. V. Chekhova, and G. Leuchs Two-color bright squeezed vacuum // Phys. Rev. A – 2010 - Volume 82, p. 011801.
24. E. Brambilla, A. Gatti, M. Bache, and L. A. Lugiato Simultaneous near-field and far-field spatial quantum correlations in the high-gain regime of parametric down-conversion // Phys. Rev.A – 2004 - Volume 69, p. 023802.
25. W. Wasilewski, A. I. Lvovsky, K. Banaszek, and Czesław Radzewicz Pulsed squeezed light: Simultaneous squeezing of multiple modes // Phys. Rev. A – 2006 - Volume 73, p. 063819.
26. Dayan B. Theory of two-photon interactions with broadband down-converted light and entangled photons // Phys. Rev. A – 2007 - Volume 76, p. 043813.
27. Christ A., Brecht B., Mauerer W. and Silberhorn C., Quantum Theory of Spontaneous Parametric Scattering of Intense Light // New J. Phys. – 2013 - Volume 15, p. 053038.
28. Blinov B.B., Moehring D.L., Duan L.M., Monroe C. Observation of entanglement between a single trapped atom and a single photon // Nature – 2004 – Volume 428, №6979, pp. 153-157.
29. Volz J., Weber M., Schlenk D., Rosenfeld W., Vrana J., Saucke K., Kurtsiefer C., Weinfurter H. Observation of Entanglement of a Single Photon with a Trapped Atom // Phys. Rev. Lett. – 2006 – Volume 96, №3, p. 030404.
30. M.V.Fedorov Atomic and Free Electrons in a Strong Light Field - World Scientific, 1997, Singapore.
31. M.V.Fedorov, N.P.Poluektov  $\Lambda$ -and V-Type Transitions and Their Role in the Interference Stabilization of Rydberg Atoms // Laser.Phys. – 1997 - Volume 7, p. 299.

Подписано к печати 08. 10. 2015 г.  
Тираж 100 экз. Заказ № 93  
Отпечатано в отделе оперативной печати  
Физического факультета МГУ