



Заместитель
МГУ имени
М.В. Ломоносова
Профессор

УТВЕРЖДАЮ:

физического факультета
МГУ имени
М.В. Ломоносова
Профессор

« 11 » июня 20 15 г.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», физический факультет

Диссертация «Квантовые корреляции и перепутывание в неклассических состояниях света и атомных системах, взаимодействующих с ними» выполнена на кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова. В период подготовки диссертации соискатель Шарапова Полина Родионовна являлась аспирантом Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», физический факультет. В 2012 году закончила физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова по специальности «физика». Удостоверение о сдаче кандидатских экзаменов выдано в 2015 г. Федеральным государственным бюджетным образовательным учреждением высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», физический факультет. Научный руководитель Тихонова Ольга Владимировна, основное место работы: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова», физический факультет, профессор.

По итогам обсуждения принято следующее заключение:

Диссертационная работа Шараповой П.Р. посвящена теоретическому исследованию корреляций, возникающих в неклассических состояниях света, а также перепутыванию между атомной и полевой подсистемами в процессе взаимодействия атомов с неклассическими световыми полями. В диссертации рассмотрены свойства ярких «сжатых» состояний поля, генерируемых в процессе параметрического рассеяния с интенсивной накачкой и фактически являющихся макроскопическими квантовыми состояниями света, а также особенности динамики атомов в таких полях.

Актуальность и новизна проведенных исследований обусловлены, в первую очередь, быстрым прогрессом квантовой оптики и возможностью генерации неклассических

состояний света. В настоящий момент успешно генерируются экспериментально различные типы неклассических полей, такие как бифотонные пары, однофотонные состояния и «сжатые» состояния света. Яркие «сжатые» состояния света, получаемые в процессе параметрической генерации с высокоинтенсивной накачкой, характеризуются большим средним числом фотонов в нелинейном сигнале и фактически являются макроскопическими квантовыми состояниями света. Интерес к этим состояниям очень высок как с фундаментальной точки зрения, так и исходя из целого спектра актуальных и важных приложений касающихся задач квантовой информации, прецизионных квантовых измерений и др. Одним из важных свойств, имеющих принципиальное значение для большинства практических приложений «сжатых» состояний, являются пространственные и частотные корреляции фотонов, которые в случае «яркого сжатого вакуума» имеют место одновременно для большого числа фотонов и на сегодняшний день крайне мало исследованы теоретически. Еще одним важным аспектом является взаимодействие таких неклассических полей с атомно-молекулярными системами, которое характеризуется целым рядом качественно новых эффектов, не имеющих места в случае классических полей или приобретающих новую специфику. В частности, возникает перепутывание между атомной и полевой подсистемами, что открывает новые возможности в задачах метрологии, разработки квантовых стандартов частоты, а также в создании управляемых атомных квантовых «битов», на основе которых ведется построение протоколов хранения и передачи 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 задачей.

В диссертации впервые разработана последовательная аналитическая теория пространственных свойств ярких «сжатых» состояний света, позволяющая описать пространственные корреляции большого числа фотонов друг с другом за рамками теории возмущений на основе введения новых независимых коллективных мод излучения. Следует отметить, что на сегодняшний день не существует законченных теоретических подходов для описания «сжатых» состояний с большим средним числом фотонов, позволяющих получить требуемые корреляционные характеристики, поэтому данный результат диссертации приобретает особое значение. Результаты, полученные в рамках разработанного подхода, находятся в прекрасном согласии с экспериментальными данными и позволяют выявить природу обнаруженных физических эффектов. В рамках разработанной теории впервые проведено описание целого ряда экспериментов и продемонстрирована эволюция пространственных свойств нелинейного сигнала с ростом коэффициента параметрического усиления. Впервые описаны пространственные корреляции в «ярком сжатом вакууме» и обнаружено увеличение ширины корреляций сигнального и холостого пучков фотонов при увеличении коэффициента параметрического усиления. Впервые показана возможность создания пространственно одномодового источника неклассического «сжатого» света в схеме нелинейного усиления в двух кристаллах, разделенных значительным воздушным зазором. Кроме того, впервые исследована динамика ионизации атома при его взаимодействии с неклассическим светом в состоянии «сжатого вакуума» и обнаружен эффект стабилизации, сопровождающийся высокой степенью перепутанности между атомной и полевой подсистемами. Разработаны методы управления стабилизацией атомной подсистемы и создания стабильного состояния с заданной степенью перепутанности.

Основные новые результаты диссертационной работы:

1. Впервые разработана последовательная аналитическая теория для описания пространственных свойств и корреляций в ярких «сжатых» состояниях света, генерируемых в процессе параметрического рассеяния света с интенсивной накачкой или четырехволнового смешения.
2. 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.
3. На основе развитого подхода впервые теоретически разработаны методы создания пространственно одномодового источника неклассического «сжатого» света в схеме нелинейного усиления с двумя кристаллами.
4. Впервые продемонстрировано гигантское усиление нелинейного сигнала, наблюдающееся на определенной частоте в направлении «сноса» и возникающее за счет эффектов анизотропии.
5. 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.
6. При взаимодействии атома с одним полевым фотоном обнаружена возможность управления стабилизацией системы и создание абсолютно стабильного состояния с наперед заданной степенью перепутанности.
7. Предложены экспериментальные методы создания максимальной перепутанности в системе «атом + квантовое поле», а также восстановление полной информации о таком состоянии посредством приложения последующего классического импульса.

Содержание диссертации полностью отражено в 18 публикациях, в том числе, в 7 статьях в высокорейтинговых реферируемых российских и зарубежных журналах и 11 тезисах докладов на международных конференциях.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

Статьи в рецензируемых журналах:

1. П.Р. Шарапова, О.В. Тихонова, "Динамика ионизации и перепутывания в системе "атом + квантовое электромагнитное поле", *Квант. электроника*, **42** (3), 199–207, (2012)
2. P. R. Sharapova and O. V. Tikhonova "Coherent control of interaction and entanglement of a Rydberg atom with few photons", *Laser Physics Letters*, **10**, 075204, (2013)
3. P. R. Sharapova and O. V. Tikhonova "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* **497**, 012017, (2014)
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*, Vol. **39** Issue 8, pp.2403-2406, (2014)
5. P. Sharapova, A. M. Pérez, O. V. Tikhonova and M. V. Chekhova, "Schmidt modes in the angular spectrum of bright squeezed vacuum". *Physical Review A* **91**, 043816, (2015)

6. I V Dyakonov, P R Sharapova, T Sh Iskhakov and G Leuchs, "Direct Schmidt number measurement of high-gain parametric down conversion", *Laser Physics Letters* **12**, 065202, (2015)
7. Angela M. Perez, Kirill Yu. Spasibko, Polina R. Sharapova, Olga V. Tikhonova, Maria V. Chekhova, and Gerd Leuchs, "Giant Narrowband Twin-Beam Generation along the Pump Energy Propagation", *Nature Communication*, **6**, 7707, (2015)

Тезисы докладов на международных конференциях:

1. П.Р.Шарапова. *Динамика модельной атомной системы в сильном неклассическом электромагнитном поле*. Материалы конференции «Ломоносов-2011», Физика, секция «Оптика, доклад 22, (2011)
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), Kazan, Russia, 2010, 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]

Все доклады на международных конференциях и симпозиумах сделаны лично соискателем.

Все изложенные в диссертационной работе теоретические результаты получены лично ее автором.

Все вышеперечисленные опубликованные работы соответствуют теме диссертации и полно отражают её содержание, а сама диссертация соответствует специальности 01.04.05 – оптика.

Достоверность полученных результатов определяется совпадением найденных решений с известными асимптотическими пределами, прекрасным согласием целого ряда полученных результатов с имеющимися экспериментальными данными, а также физической надежностью использованных аналитических подходов и эффективностью методов программной реализации.

Это позволяет считать все полученные результаты полностью обоснованными и достоверными.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы Шараповой П.Р. докладывались и обсуждались на научных семинарах отдела микроэлектроники НИИЯФ МГУ, семинаре лаборатории квантовой информации и квантовой оптики кафедры квантовой электроники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова (руководитель – проф. Кулик С.П.). Основные положения и результаты диссертации были представлены лично соискателем и доложены на **11** международных конференциях и симпозиумах, а именно:

1. XIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов”, Москва, 12-15.04.2010
2. International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, Kazan, Russia, 22-27.08.2010
3. XX International Laser Physics Workshop (LPHYS'11), Sarajevo, Bosnia and Herzegovina (11-15.07.2011).
4. XXI International Laser Physics Workshop (LPHYS'12), 23-27.07.2012, Calgary, Canada,
5. International Conference of the Physics Students (ICPS) 2012, 0409.08.2012, Utrecht, Netherlands
6. International Workshop on Atomic Physics, 26-30, November, 2012, Dresden, Germany
7. International Conference on Coherent and Nonlinear Optics (ICONO 2013), International Conference on Lasers, Applications, and Technologies (LAT 2013), Moscow, Russia (18-22.06.2013).
8. XXII International Laser Physics Workshop, 15-19.07.2013, Prague, Czech Republic
9. International conference on advances in foundations of quantum mechanics and quantum information with atoms and photons, Quantum 2014, 25-30.05.2014, Torino, Italy
10. XXIII International Laser Physics Workshop, 14-18.07.2014, Sofia, Bulgaria
11. SPIE Optics+Optoelectronics Conference, 13-16.04.2015, Prague, Czech Republic,

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 обнаружении 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

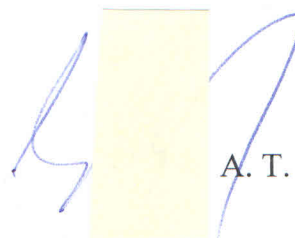
измерения с уровнем шума ниже стандартного квантового предела, квантовую интерферометрию и метрологию, разработку стандартов частоты, а также создание управляемых атомных квантовых «битов» с контролируемой степенью перепутанности.

Диссертация «Квантовые корреляции и перепутывание в неклассических состояниях света и атомных системах, взаимодействующих с ними» Шараповой Полины Родионовны рекомендуется к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – оптика.

Заключение принято на заседании кафедры атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова.

Присутствовало на заседании 14 чел. Результаты голосования: «за» - 14 чел., «против» - 0 чел., «воздержалось» - 0 чел., протокол № 5 от «8» мая 2015 г.

Заведующий кафедрой атомной физики,
физики плазмы и микроэлектроники
профессор



А. Т. Рахимов

Ученый секретарь кафедры атомной физики,
физики плазмы и микроэлектроники
доцент



Е. А. Крылова

Заключение рассмотрено и утверждено на заседании Ученого совета НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына и Отделения ядерной физики физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,

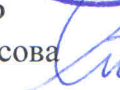
Протокол № 7 от «10» июня 2015 г.

Председатель Ученого совета НИИЯФ и ОЯФ
физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,
Профессор



Панасюк М.И.

Ученый секретарь Ученого совета НИИЯФ и ОЯФ
физического факультета МГУ имени М.В.Ломоносова,
Профессор



Страхова С.И.