

Порозова Виктория Михайловна

**Когерентное взаимодействие света с  
одинокими атомами и атомными ансамблями  
в условиях квантового вырождения**

Специальность 01.04.02 –  
«Теоретическая физика»

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Работа выполнена в научной лаборатории "Квантовая оптика и квантовая информатика" Центра перспективных исследований федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

**Научный руководитель:** Куприянов Дмитрий Васильевич

доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ЦКТ  
МГУ им. М. В. Ломоносова, заведующий Научной лабораторией  
"Квантовая оптика и квантовая информатика" ЦПИ,  
Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

**Официальные оппоненты:** Турлапов Андрей Вадимович

доктор физико-математических наук, профессор, член-корреспондент  
РАН, заведующий Лабораторией ультрахолодных квантовых систем,  
Институт прикладной физики Российской академии наук

Соколов Иван Вадимович

доктор физико-математических наук, профессор, Санкт-Петербургский  
государственный университет

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное  
учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук

Защита состоится 17 декабря 2020 г. в 11:00 на заседании диссертационного  
совета Д 34.01.02 при Физико-техническом институте имени А. Ф. Иоффе  
РАН по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 26, Боль-  
шой актовый зал главного здания ФТИ им. А. Ф. Иоффе

# Общая характеристика работы

## Актуальность темы

Представленная диссертация связана с разработкой теории оптических процессов, связанных с когерентным взаимодействием света с системами ультрахолодных атомов. В настоящее время наблюдается заметный прогресс в области экспериментов, проводящихся во многих исследовательских лабораториях, развивающих методы оптического контроля поведением атомов при температурах порядка десятков микро-Кельвин и ниже. В качестве примера укажем на возможность локализации и длительного удержания в пространстве одиночного атома с помощью техники "оптического пинцета", в условиях рамановского охлаждения в трехмерном режиме [1, 2]. Управление пространственной решеткой, сформированной системой подобных локализованных атомов, посредством протокола "дипольной блокады" может рассматриваться как прототип квантового симулятора на нейтральных атомах [3]. Надежность квантово-информационных логических операций, в значительной степени, определяется оптимальностью протокола рамановского охлаждения. Этот протокол, в данный момент рассматривается в качестве наиболее эффективного способа замедления движения атома в микроскопической дипольной ловушке и обеспечения долговременной когерентности (согласованности) в преобразовании сложных квантовых состояний.

Благодаря достижениям в области квантовой оптики, нелинейной и интегральной оптики, а также атомной физики появились новые физические платформы обработки и передачи данных на уровне элементарных объектов материи - фотонов, атомов, в том числе скооперированных и связанных эффектом квантовой запутанности. Ансамбли холодных атомов как находящиеся в условиях вырождения, так и формирующие пространственные решётки являются примером такой платформы. Любая квантовая сеть или процессор использует алгоритм передачи, обработки и хранения информации, в основе которого лежат физические принципы квантовой неопределённости и перепутывания состояний. Естественным образом возникает необходимость разработки способов обмена и контроля квантовыми состояниями для объектов разной физической природы, т.е. создания полноценных систем квантового интерфейса. Системы холодных атомов, спиновое состояние которых слабо взаимодействует с окружением, являются одним

из потенциальных кандидатов для создания систем квантового интерфейса между материальными объектами и квантами света [4, 5].

**Целью** представленной диссертации, в её первой части, является разработка квантового описания рассеяния света атомным ансамблем, находящимся в условиях квантового вырождения. Вырожденность означает, что внутреннее движение атомов заморожено и ансамбль формирует коллективное квантовое состояние, известное как конденсат Бозе-Эйнштейна. В этих условиях даже слабое межатомное взаимодействие становится критически важным с точки зрения описания как стационарного состояния, так и динамики объекта, например, при его фрагментации. Во второй части диссертационной работы мы преследуем целью разработку теории рамановского охлаждения как инструмента замедления и остановки движения атома, захваченного оптическим пинцетом. Нами рассматривается возможность одновременного замедления движения атома по всем трём пространственным направлениям. При этом возникает ряд нетривиальных требований, предъявляемых к геометрии охлаждающих пучков и к параметрам световых импульсов, обеспечивающих процесс комбинационного рассеяния для одновременного охлаждения всех поступательных степеней свободы атома. Для достижения поставленных целей необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Провести расчёт процесса рассеяния одиночного фотона атомным ансамблем в условиях квантового вырождения, основанный на методах квантовой теории рассеяния и инвариантной теории возмущений.
2. Провести анализ спектральных зависимостей параметров рассеяния (коэффициентов прохождения и отражения) при вариации профиля параметра порядка вырожденного атомного газа.
3. Исследовать влияние эффекта нелинейной квантовой интерференции, проявляющегося в условиях фрагментации конденсата Бозе-Эйнштейна, на характеристики рассеяния.
4. Исследовать предъявляемые теорией оптимальные условия рамановского охлаждения, обеспечивающие одновременное замедление движения атома, локализованного в дипольной ловушке, вдоль всех его направлений движения.

5. Проанализировать возможность оптимизации схемы рамановского охлаждения и представить практические рекомендации для эксперимента.

### **Научная новизна**

В диссертации получены следующие результаты:

1. Разработана микроскопическая квантовая теория рассеяния света – одиночного фотона – на системе тождественных атомов в условиях их квантового вырождения. Ключевым результатом теории является построение интегро-дифференциального уравнения рассеяния для функции Грина одночастичного возбуждения поляритонного типа.
2. Построено аналитическое решение этого уравнения и проанализировано распространение одночастичного возбуждения в бесконечно протяженной однородной среде.
3. Показано, что идеальное совпадение двух независимых квантового и классического вычислений указывает на то, что при рассеянии света на ансамбле атомов с равномерным распределением плотности оптический отклик системы нечувствителен к тому, каким образом выполнено статистическое усреднение, предполагающее либо квантовое, либо классическое описание.
4. Исследовано рассеяние света на модуляциях плотности вещества, обусловленной интерференцией материальных волн - фрагментов конденсата Бозе-Эйнштейна. Показано, что данная неоднородная пространственная структура приводит к механизму рассеяния света, аналогичному явлению дифракции Брэгга-Вульфа.
5. Выявлено, что обнаруженный механизм рассеяния имеет определенные аналогии с распространением света в среде с периодической модуляцией диэлектрической проницаемости и обладающей свойствами фотонного кристалла.
6. Теоретически исследована схема рамановского охлаждения в условиях одновременного замедления атома, захваченного оптическим пинцетом, вдоль всех направлений его движения.

7. Сформулированы и проанализированы условия оптимальной схемы рамановского охлаждения, предполагающие симметричную геометрию облучения и определённые соотношения между частотами Раби управляющих полей.

**Теоретическая и практическая значимость** Диссертационная работа посвящена развитию методов квантовой теории рассеяния света на атомных системах в условиях их глубокого охлаждения. Это подразумевает системы тождественных атомов, находящихся в состоянии квантового вырождения, а также разработку оптимальных схем рамановского охлаждения, требующих замедления пространственного движения изолированного атома, пленённого потенциалом микроскопической дипольной ловушки. В ряде экспериментальных работ продемонстрирована возможность образования суперпозиционных квантовых состояний, управление которыми осуществляется посредством внешних когерентных оптических полей, представляющих несомненный интерес с точки зрения разработки систем квантового интерфейса [6]-[11]. Теория рамановского охлаждения атома, захваченного микроскопической дипольной ловушкой - «оптическим пинцетом» - и оптимизация протокола охлаждения и локализации атома имеет важное практическое применение. Еще раз отметим успешные эксперименты в системах типа "оптического пинцета" в трехмерном режиме [1, 2] и возможность относительно простого управления коллективным состоянием атомов с помощью механизма дипольной блокады [3]. Для достижения высокой согласованности квантовых логических операций необходимо осуществить охлаждение захваченного ловушкой атома, понизив его энергию вплоть до основного колебательного состояния.

### **Методология и методы исследования**

Результаты, приведённые в данной диссертации, получены с помощью использования современного аппарата теоретической и математической физики. Взаимодействие света с атомной средой рассматривается на основе квантово-электродинамического подхода, инвариантной теории возмущений и диаграммных методов, обладающих высокой строгостью микроскопического описания физических процессов. В сочетании с методами численного моделирования развиваемые подходы обеспечивают необходимую точность и надежность результатов при описании рассматриваемых явлений. В некоторых случаях теоретические расчёты позволяют провести

упреждающее моделирование планируемых экспериментов.

### **Основные положения, выносимые на защиту**

1. Рассеяние света на пространственных осцилляциях параметра порядка аналогично явлению дифракции Брэгга. Особенностью процесса является возможность сильного когерентного рассеяния даже при низкой плотности атомов в образце.
2. Конденсат Бозе-Эйнштейна в процессе фрагментации образует неоднородную пространственную структуру с периодическими осцилляциями параметра порядка и плотности атомов, что приводит к пространственной модуляции диэлектрической проницаемости конденсата, формируя оптическую среду, подобную фотонному кристаллу.
3. Для эффективного рамановского охлаждения в трёхмерном режиме необходимо обеспечить квантовое перепутывание спиновой и колебательной подсистем атома в дипольной ловушке.
4. Оптимальными условиями рамановского охлаждения в трёхмерном режиме являются максимально симметричная геометрия облучения четырьмя лучами света в направлении биссектрис главных октантов дипольной ловушки, а также согласование интенсивностей и поляризаций оптических мод, управляющих процессом охлаждения.

**Апробация работы** Основные результаты работы докладывались на следующих международных и всероссийских конференциях:

- V.M. Ezhova, L.V. Gerasimov, D.V. Kupriyanov, International Youth Conference on Physics and Astronomy “Physics SPb”, “On a theory of light scattering from a Bose-Einstein condensate”, 26-29 October 2015, St. Petersburg

- V.M. Ezhova, L.V. Gerasimov, and D.V. Kupriyanov, "Coherent light scattering from a quantum degenerate Bose-gas", RQC Summer School, August 22-27, 2016, Moscow, Russia

- V.M. Porozova, L.V. Gerasimov, D.V. Kupriyanov, “Light scattering from an atomic gas under conditions of quantum degeneracy”, D.N.Klyshko Workshop, April 23-26, 2017, Radisson Resort, Zavidovo

- V.M. Porozova, L.V. Gerasimov, D.V. Kupriyanov, "Light scattering from a spatially inhomogeneous system of bosonic atoms under conditions of quantum degeneracy", International conference Physica.SPb/2017, October 24-26, 2017, St. Petersburg, Russia

- V.M. Porozova, L.V. Gerasimov, D.V. Kupriyanov "Light scattering from a quantum degenerate bosonic atomic gas", XV International Conference on Quantum Optics and Quantum Information (ICQOQI'2017), November 20-23, 2017, Minsk, Belarus

- V.M. Porozova, L.V. Gerasimov, D.V. Kupriyanov "On a theory of the Raman sideband cooling in dipole trap", June 6, 2018, Quantum Technology and Quantum Information Labs (MSU), Nonlinear Optics Building

- V.M. Porozova, L.V. Gerasimov, D.V. Kupriyanov, "On a Theory of the Raman Sideband Cooling of a Single Atom in a Dipole Trap", LPHYS'18, July 16-20, 2018, Nottingham, United Kingdom

- В. М. Порозова, Л. В. Герасимов, И. Б. Бобров, С. С. Страупе, С. П. Кулик, Д. В. Куприянов, "Рамановское охлаждение одиночного атома в оптической дипольной ловушке: теоретический оптимум в трёхмерном режиме", Всероссийская научная конференция "Физика ультрахолодных атомов -2019", 16-18 декабря 2019, Новосибирск, Академгородок, ИПФ СО РАН, Россия

В. М. Порозова неоднократно выступала с докладами на городском межинститутском семинаре по квантовой оптике, организуемым кафедрой Теоретической физики и астрономии РПГУ им. А.И. Герцена, а также на семинарах Лаборатории квантовой оптики и квантовой информатики ЦПИ СПбПУ, и на оптическом семинаре ЦКТ физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

**Личный вклад** Основные результаты, представленные в работе были получены автором лично. Выбор темы, общего направления исследования, обсуждение и постановка рассматриваемых задач осуществлялись совместно с руководителем.

**Публикации** Основные результаты диссертации изложены в следующих четырёх печатных изданиях, в том числе из квартиля Q1, входящих в базы данных SCOPUS, WOS и РИНЦ.

V. M. Ezhova, L. V. Gerasimov, D. V. Kupriyanov, "On a theory of light scattering from a Bose-Einstein condensate" // J. Phys.: Conf. Ser. — 2016. — Vol. 769, no. 012045.

V.M. Porozova, L.V. Gerasimov, M.D. Havey, D.V. Kupriyanov, "Light scattering from an atomic gas under conditions of quantum degeneracy" // Phys. Rev. A. — 2018. — Vol. 97, no. 053805.

В.М. Порозова, В.А. Пивоваров, Л.В. Герасимов, Д.В. Куприянов, "Дифракция Брэгга в атомных системах в условиях квантового вырождения" // Письма в ЖЭТФ. — 2018. — Т. 108, No 10. — С. 726–735.

V.M. Porozova, L.V. Gerasimov, I.B. Bobrov, S.S. Straupe, S.P. Kulik, and D.V. Kupriyanov, "Raman sideband cooling of a single atom in an optical dipole trap: Towards theoretical optimum in a three-dimensional regime" // Phys. Rev. A. — 2019. — Vol. 99, no. 043406.

## Основное содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность проведенных в диссертации исследований, обосновывается научная новизна, теоретическая и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** является обзорной, в которой существующие направления физики квантовой информации связываются с задачами представленной диссертационной работы. В частности, обсуждаются последние достижения в схемах управления одиночными атомами, локализованными в пространстве с помощью техники оптического пинцета, и приготовление с помощью этой техники пространственно упорядоченных атомных структур. Архитектура подобных атомных массивов, допускающая индивидуальную адресацию и управление отдельными атомами решетки, открывает хорошие перспективы для квантового моделирования и проведения квантовых

вычислений [12]. В ряде недавно проведенных экспериментов была продемонстрирована возможность управления одиночным нейтральным атомом, захваченным оптическим пинцетом [2], а также коллективным вырожденным квантовым состоянием в фазе конденсата Бозе-Эйнштейна [13, 14].

В данной главе проведена классификация основных однокубитовых и двухкубитовых унитарных преобразований, имеющих принципиальное значение для квантовых алгоритмов, а также введены основные понятия квантовой информатики. Показывается, что повышение качества квантовых логических вентилях на основе нейтральных атомов, требует исключения остаточного движения атомов в микроскопической дипольной ловушке. Одним из возможных методов решения этой проблемы представляется техника рамановского охлаждения (Raman Sideband Cooling).

Нами также прослеживается связь ансамблей ультрахолодных атомов со схемами оптомеханики [9, 15]. В подобных схемах ключевым свойством атомной среды является возможность перехода в устойчивое к фоновым возбуждениям сверхтекучее состояние. По этой причине в расчетах необходим учет неидеальности конденсата Бозе-Эйнштейна, обеспечивающее важный эффект сверхтекучести. Для этого вводится параметр порядка  $\Xi(\mathbf{r}, t)$ , динамика которого описывается уравнением Гросса-Питаевского. Строгое описание оптических свойств атомных систем в состоянии квантового вырождения должно быть проведено в рамках последовательной квантовой теории рассеяния с использованием формализма вторичного квантования для описания атомной подсистемы и оптических взаимодействий, чему посвящены дальнейшие главы диссертации.

**Вторая глава** посвящена применению методов квантовой теории рассеяния к описанию рассеяния света (одиночного фотона) на системе тождественных атомов в условиях их квантового вырождения. Основываясь на инвариантной теории возмущений, разложении оператора эволюции и суммировании рядов теории возмущений диаграммным методом Фейнмана, нами построена система графических уравнений, в структуру которых входит ключевой элемент задачи рассеяния – одночастичная функция Грина, определяющая амплитуду рассеяния и описывающей распространение одиночного оптического возбуждения в конденсате. Посредством исключения вспомогательных уравнений, и в приближении слабой пространственной неоднородности среды, построено замкнутое интегрально-дифференциальное уравнение непосредственно для одночастичной функ-

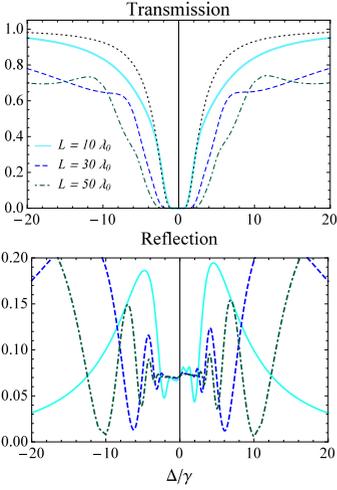
ции Грина.

В приближении бесконечной однородной среды это уравнение может быть решено аналитически, что приводит к наглядной интерпретации распространения возбуждения в вырожденном атомном газе как суперпозиционного состояния вещества и фотона – поляритона или светоэкситона. Решение уравнения рассеяния в общем случае описывает преобразование состояния этой квазичастицы, обусловленное изменением макроскопического состояния конденсата в процессе его внутренней эволюции. Поляритонная мода, рождающаяся на краях образца, и вдали от атомного резонанса обладающая законом дисперсии близким к фотонному ( $\omega \sim c|\mathbf{k}|$ ), вследствие внутренней динамики и изменения параметра порядка, может приобретать разные направления распространения, что создает возможность сильного когерентного рассеяния света конденсатом, обсуждаемого далее.

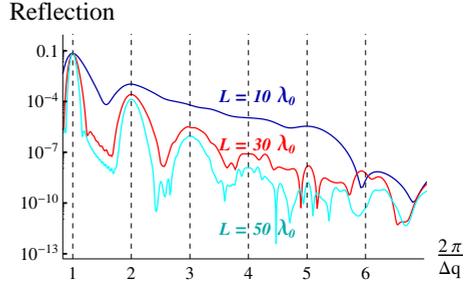
Изложенные во второй главе результаты опубликованы в работах автора [16, 17].

**Третья глава** посвящена исследованию задачи рассеяния света (одиночного фотона) на системе тождественных атомов в условиях их квантового вырождения в одномерном приближении. Особенностью процесса является формирование атомами квантового состояния вещества в фазе конденсации Бозе-Эйнштейна, описываемой материальными волнами плотности, а также интерференция двух материальных волн, соответствующих фрагментам конденсата, распространяющихся навстречу друг другу. В случае однородного распределения плотности атомов в вырожденной фазе наблюдалось идеальное совпадение двух независимых расчетов - 1) решение квантового уравнения рассеяния и 2) решение уравнений Максвелла с вычисленной диэлектрической постоянной конденсата. Данный факт указывает на то, что при рассеянии света на ансамбле атомов с равномерным распределением плотности оптический отклик системы нечувствителен к тому, каким образом выполнено статистическое усреднение, предполагающее либо квантовое, либо классическое описание.

Внутреннее движение перекрывающихся фрагментов конденсата кардинально меняет картину рассеяния света. Ключевой особенностью процесса является создание режима квантовой интерференции состояния вещества, описываемого перекрыванием материальных волн параметра порядка. Интерферируя, данные волны формируют неоднородную периодическую пространственную структуру. В спектральной области вблизи



а)



б)

Рис. 1. а) Зависимость коэффициентов прохождения и отражения от отстройки пробного излучения  $\Delta = \omega - \omega_0$  для неоднородного распределения плотности атомов в конденсате, где  $\omega_0$  — резонансная частота атомного перехода. Пунктиром изображена реперная зависимость для коэффициента прохождения света через оптически плотный слой невырожденного газа той же плотности, что и рассматриваемый конденсат. б) Зависимость коэффициента отражения, описываемого тем же параметром порядка, в точке резонанса  $\omega = \omega_0$ , как функция  $2\pi/\Delta q$  (в единицах резонансной длины волны  $\lambda_0$ ) для образцов различных длины  $L$ .

атомного резонанса данная структура приводит к специфическому механизму рассеяния света аналогичному явлению дифракции Брэгга-Вульфа при рассеянии света на периодических пространственных неоднородностях (Рис.1 б).

Однако в отличие от одномерных систем с классическим распределением плотности в данном случае сильная пространственная модуляция, определяемая относительной скоростью движения фрагментов, может наблюдаться и при низкой средней плотности образца. В классической аналогии, невозможно представить разреженный бальмановский газ, обладающий необходимыми пространственными осцилляциями плотности. Эффект

сильного когерентного рассеяния, со спектральными биениями коэффициента отражения в крыле атомного резонанса (т. е. в области прозрачности для бальцовановского газа той же плотности) показан на рисунке 1 а). Этот эффект, по-видимому, и наблюдался в экспериментах с рассеянием света на конденсате Бозе-Эйнштейна [13].

Этот важный, по мнению автора, результат может быть интерпретирован как рассеяние света материальной средой, с диэлектрической постоянной близкой к единице, но содержащей, вместе с тем, сильно осциллирующую малую поправку к её среднему, фактически, вакуумному значению. Для протяженной среды это приводит к проявлению свойств фотонного кристалла и формированию зонной структуры вблизи резонансной частоты атома. Уже при относительно небольших отстройках, но в типичных условиях прозрачности (отстройка существенно превосходит скорость спонтанного распада атома), в крыле резонанса формируется периодическая дисперсионная зависимость частоты поляритона от волнового числа, что в свою очередь приводит к возбуждению падающей волной двух поляритонных мод, распространяющихся в противоположных направлениях и, как следствие, к эффекту сильного когерентного отражения света.

Изложенные в третьей главе результаты опубликованы в работах автора [17]-[19].

В четвертой главе проведен теоретический анализ протокола оптического охлаждения одиночного атома методом комбинационного рассеяния ("рамановское охлаждение" = Raman sideband cooling = RSC). Протокол RSC используется тогда, когда движение атома жестко ограничено по всем пространственным направлениям потенциалом оптического пинцета, и соответствующие частоты колебаний достаточно велики, так что задействованные оптические переходы между базовым  $|b\rangle$  и конечным  $|d\rangle$  спиновыми колебательными состояниями можно надежно разрешить в системе зеемановских подуровней основного состояния атома щелочного металла. Протокол позволяет постепенно подавить колебательное движение атома вдоль каждой из главных координатных осей удерживающего потенциала. Нами рассмотрен принцип рамановского охлаждения, и построено общее преобразование матрицы плотности атома в дипольной ловушке с учетом последовательно примененных циклов комбинационных переходов и оптической накачки. Последняя возвращает спиновую подсистему обратно в базовое состояние  $|b\rangle$ , но с уже уменьшенным значением одного из колебательных

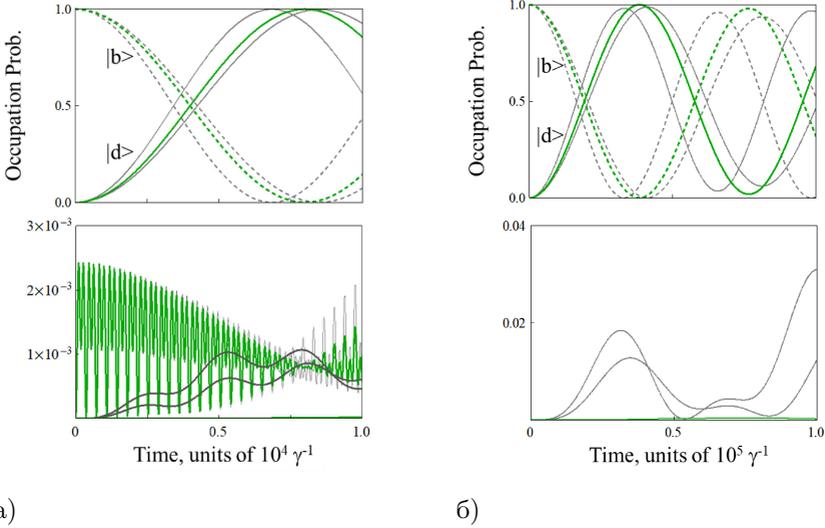


Рис. 2. а) *Верхний график:* Временная зависимости вероятностей заселения базового состояния  $|b\rangle$  (пунктирные кривые) и конечного состояния  $|d\rangle$  (сплошные кривые), приведенные для отстройки от оптического резонанса  $\Delta = -1000\gamma$ . *Нижний график:* Несовершенство переселения и утечка из основного канала рассеяния, пояснения см. текст. б) Те же зависимости для отстройки  $\Delta = -5000\gamma$ .

квантовых чисел. Показано, что для оптимизации протокола в трехмерном режиме охлаждения необходимо обеспечить квантовое перепутывание спиновой и колебательных подсистем атома в процессе когерентного рамановского перехода.

Условия оптимизации предполагают, что волновые векторы управляющих полей  $\mathbf{k}_0, \mathbf{k}_1, \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_3$  должны быть ориентированы вдоль биссектрис основного и трех смежных октантов главных координат ловушки –  $x, y, z$ . В этом случае атом возбуждается модой  $\omega_0, \mathbf{k}_0$ , а три других луча  $\omega_1, \mathbf{k}_1, \omega_2, \mathbf{k}_2, \omega_3, \mathbf{k}_3$  обеспечивают независимую друг от друга передачу импульса в направлениях главных координат. При этом эти три управляющих луча должны быть линейно поляризованы в трёх взаимно ортогональных направлениях. Анализ показал, что для оптимизации протокола требуется также условие согласования интенсивностей:  $\Omega^{(1)}\eta_{\perp}\sqrt{v_x} = \Omega^{(2)}\eta_{\perp}\sqrt{v_y} = \Omega^{(3)}\eta_{\parallel}\sqrt{v_z}$ , где  $\Omega^{(j)}$  – частоты Раби  $j$ -й моды, определенной через соответ-

ствующий переходу приведенный дипольный матричный элемент;  $\eta_{\perp}$  и  $\eta_{\parallel}$  – параметры Лэмба-Дике в поперечном и продольном направлениях координат ловушки;  $v_x$ ,  $v_y$ ,  $v_z$  – значения колебательных квантов. Если оба условия выполнены, динамика атома на комбинационном переходе описывается унитарным и периодическим по времени процессом обмена населенностями между двумя выделенными спиново-колебательными состояниями  $|b\rangle$  и  $|d\rangle$ , аналогично картине переходов в двухуровневой системе. Вследствие малости параметра Лэмба-Дике процесс когерентной рамановской конверсии атома из базового состояния  $|b\rangle$  в конечное состояние  $|d\rangle$  сопровождается нерезонансной утечкой атома в другие спиновые состояния с сохранением его колебательного состояния, а вследствие несовершенства протокола и частичным резонансным переселением в другие базовые состояния также с сохранением колебательного состояния. Однако при достаточно глубоком исходном уровне охлаждения атома и в оптимальных условиях эти негативные эффекты не оказывают существенного влияния на динамику всего процесса.

На Рис.2 а) приведены результаты численного расчёта, выполненного для атома  $^{85}\text{Rb}$ , заселяющего верхний зеемановский подуровень "часового" перехода, характеризуемого спиновым моментом и его проекцией  $|F_+, M_+\rangle = |3, 0\rangle$ . Приведены временные зависимости вероятностей заселения базового состояния  $|b\rangle$  (пунктирные кривые) и конечного состояния  $|d\rangle$  (сплошные кривые). Результаты соответствуют отстройке возбуждающей моды  $\omega_0$  от нижнего сверхтонкого подуровня состояния  $^2P_{1/2}$   $\Delta = -1000\gamma$ , где  $\gamma$  – скорость спонтанного распада этого состояния. Зелёные кривые соответствуют рамановскому циклу для средних значений колебательных чисел  $v_x = v_y = \bar{v}_{\perp}$  и  $v_z = \bar{v}_{\parallel}$  при температуре  $T \sim 50 \mu\text{K}$ , а затененные кривые показывают амплитуду его изменений в пределах одного стандартного отклонения колебательных чисел от их средних значений. Реперная точка, соответствующая опустошению основного состояния, определяет необходимую длительность импульса  $\tau$  при которой происходит рамановский переход. Несовершенство [паразитный канал рассеяния в соседние с базовым  $|b'\rangle$  зеемановские подуровни с  $M_+ \neq 0$ . Заселение таких состояний не исключается в общей динамике развивающегося процесса и происходит, если нарушено условие оптимизации см. ур. (4.25) в диссертации, поэтому в окончательных графиках важно отследить, какой вклад такое несовершенство вносит] переселения определяемая заселением состояний состояний

$|b'\rangle$  с сохранением колебательного кванта, отображенное нижней кривой на графике и в оптимальном случае, вносит лишь незначительный вклад, неразрешимый в масштабе графика. Канал утечки [нерезонансный канал, соответствующий в рамановском рассеянии переходу атома в те же спиновые состояния, но с сохранением колебательного числа] на нерезонансном переходе также вносит незначительный вклад и демонстрирует осциллирующее поведение с амплитудой осцилляций менее одного процента. На рис. 2 б), те же зависимости приведены для отстройки  $\Delta = -5000\gamma$ . В оптимальном режиме несовершенство переселения вносит поправку в пределах нескольких процентов вероятности и лишь для случая отклонения колебательных чисел от приоритетных средних значений. Утечка вследствие нерезонансного рамановского перехода (нижний график) незначительна и соответствующие зависимости практически неразрешимы в масштабе графика.

Изложенные в третьей главе результаты опубликованы в работе автора [20].

В **заключение** к диссертации сформулированы основные результаты работы, которые мы в сокращенной форме воспроизводим ниже:

1. Методами квантовой теории рассеяния построено интегро-дифференциальное уравнение для функции Грина одночастичного оптического возбуждения (поляритона), распространяющегося в атомном газе в условиях квантового вырождения. Найдено аналитическое решение этого уравнения в бесконечно протяженной однородной среде и проанализированы основные параметры распространения одночастичного возбуждения в отсутствие пространственных неоднородностей.
2. Рассмотрена задача рассеяния одиночного фотона на осцилляциях плотности (параметра порядка), возникающих в условиях фрагментации квантового состояния конденсата Бозе-Эйнштейна. Интерференция материальных волн, сопровождающая процесс фрагментации, приводит к специфическому механизму рассеяния света аналогичному дифракции Брэгга-Вульфа при рассеянии света на периодических неоднородностях. Решение уравнения рассеяния в одномерной геометрии показало, что возникает эффект сильного когерентного рассеяния в условиях низкой плотности и вдали от атомного резонанса, что было бы невозможно для классического газа той же плотности.

Обнаруженный механизм рассеяния также имеет аналогию с распространением света в среде с периодической пространственной модуляцией диэлектрической проницаемости и обладающей свойствами фотонного кристалла.

3. Проведен теоретический анализ схемы рамановского охлаждения одиночного атома, захваченного микроскопической дипольной ловушкой. Показано, что для оптимизации протокола охлаждения необходимо обеспечить квантовое перепутывание спиновой и колебательных подсистем атома в процессе когерентного комбинационного перехода. С учетом полной векторной картины процесса была проведена теоретическая оптимизация режима охлаждения одиночного атома в ловушке, аппроксимированной гармоническим потенциалом. Условия оптимальной схемы рамановского охлаждения предполагают симметричную геометрию облучения и определённые соотношения между частотами Раби управляющих полей.

# Литература

- [1] Kaufman, A. M. Cooling a Single Atom in an Optical Tweezer to Its Quantum Ground State / A. M. Kaufman, B. J. Lester, C. A. Regal // Phys. Rev. X. — 2012. — Т. 2, вып. 4. — С. 041014.
- [2] Zeeman-insensitive cooling of a single atom to its two-dimensional motional ground state in tightly focused optical tweezers / P. Sompet [и др.] // Phys. Rev. A. — 2017. — Т. 95, вып. 3. — С. 031403.
- [3] Dipole Blockade and Quantum Information Processing in Mesoscopic Atomic Ensembles / M. D. Lukin [et al.] // Physical Review Letters. — 2001. — Vol. 87, no. 037901.
- [4] Hammerer, K. Quantum interface between light and atomic ensembles / K. Hammerer, A. Sorensen, P. E. // Rev. Mod. Phys. — 2010. — Vol. 82, no. 1041.
- [5] Quantum Memories. A Review based on the European Integrated Project “Qubit Applications / C. Simon [et al.] // Eur. Phys. J. — 2010. — Vol. 58, no. 1.
- [6] Quantized Rotation of Atoms from Photons with Orbital Angular Momentum / M. F. Andersen [et al.] // Physical Review Letters. — 2006. — Vol. 97, no. 170406.
- [7] Kapale, K. T. Vortex Phase Qubit: Generating Arbitrary, Counterrotating, Coherent Superpositions in Bose-Einstein Condensates via Optical Angular Momentum Beams / K. T. Kapale, J. P. Dowling // Physical Review Letters. — 2005. — Vol. 95, no. 173601.

- [8] Entanglement of the orbital angular momentum states of photons / A. Mair, A. Vaziri, G. Weihs, A. Zeilinger // *Nature*. — 2001. — Vol. 412. — P. 313—316.
- [9] Observation of Persistent Flow of a Bose-Einstein Condensate in a Toroidal Trap / C. Ryu [et al.] // *Physical Review Letters*. — 2007. — Vol. 99, no. 260401.
- [10] Kagan, Y. Supercurrent stability in a quasi-one-dimensional weakly interacting Bose gas / Y. Kagan, N. V. Prokof'ev, B. V. Svistunov // *Physical Review A*. — 2000. — Vol. 61, no. 045601.
- [11] Anderson, B. P. Atomic-phase interference devices based on ring-shaped Bose-Einstein condensates: Two-ring case / B. P. Anderson, K. Dholakia, E. M. Wright // *Physical Review A*. — 2003. — Vol. 67, no. 033601.
- [12] Randomized Benchmarking of Single-Qubit Gates in a 2D Array of NeutralAtom Qubits / T. Xia [и др.] // *Phys. Rev. Lett.* — 2015. — Т. 114, вып. 10. — С. 100503.
- [13] The onset of matter-wave amplification in a superradiant Bose-Einstein condensate / D. Schneble [et al.] // *Science*. — 2003. — No. 300.
- [14] Creation of a Bose-condensed gas of  $^{87}\text{Rb}$  by laser cooling / J. Hu [и др.] // *Science*. — 2017. — Т. 358, № 6366. — С. 1078—1080.
- [15] Inducing vortices in a Bose-Einstein condensate using holographically produced light beams / J. F. S. Brachmann [et al.] // *OSA*. — 2011. — Vol. 19, no. 14.
- [16] Ezhova, V. M. On a theory of light scattering from a Bose-Einstein condensate / V. M. Ezhova, L. V. Gerasimov, D. V. Kupriyanov // *J. Phys.: Conf. Ser.* — 2016. — Vol. 769, no. 012045.
- [17] Light Scattering From an Atomic Gas Under Conditions of Quantum Degeneracy / V. M. Porozova [et al.] // *Phys. Rev. A*. — 2018. — Vol. 97, no. 053805.
- [18] Дифракция Брэгга в атомных системах в условиях квантового вырождения / В. Порозова [и др.] // *Письма в ЖЭТФ*. — 2018. — Т. 108, № 10. — С. 726—735.

- [19] Light Scattering From an Atomic Array Trapped Near a One-Dimensional Nanoscale Waveguide: a Microscopic Approach / V. A. Pivovarov [et al.] // Phys. Rev. A. — 2018. — Vol. 97, no. 023827.
- [20] Raman sideband cooling of a single atom in an optical dipole trap: Towards theoretical optimum in a three-dimensional regime / V. M. Porozova [et al.] // Phys. Rev. A. — 2019. — Vol. 99, no. 043406.