



Порозова Виктория Михайловна

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

Направление подготовки 03.06.01 —
«Физика и Астрономия»
Направленность 03.06.01_2 —
«Теоретическая физика»

НАУЧНЫЙ ДОКЛАД
об основных результатах научно-квалификационной работы
(диссертации)

Автор работы: Порозова В. М.

Научный руководитель:
доктор физ.-мат. наук
Куприянов Д. В.

Санкт-Петербург — 2019

Работа выполнена в Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого».

- Научный руководитель: доктор физ.-мат. наук
Куприянов Д. В.
- Рецензент: **Трошин А. С.,**
доктор физ.-мат. наук, доцент,
профессор кафедры Теоретической Физики и
Астрономии
ФГБОУ ВО "Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена"
- Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена"

С научным докладом можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» и на сайте Электронной библиотеки СПбПУ по адресу: <http://elib.spbstu.ru>

Общая характеристика работы

Актуальность темы.

Представленная научная квалификационная работа является научным отчётом автора по проведённой им работе, которая связана с разработкой теории когерентного взаимодействия света как с атомными ансамблями в условиях квантового вырождения, так и с одиночными атомами. Мотивация данной работы в значительной степени обусловлена стремительным прогрессом как в технике, так и в результатах оптических экспериментов, проводящихся с ансамблями ультрахолодных атомов (в основном щелочных металлов) во многих исследовательских лабораториях. Так, существует впечатляющий экспериментальный прогресс в реализации рамановского протокола для охлаждения атома в системах типа пинцета в трехмерном режиме [7; 8] и когерентного управления дипольной блокадой ридберговских атомов лазерным светом, что делает их перспективным кандидатом для практической реализации квантового компьютера [9]. Однако высокая степень надежности квантово-информационных операций все еще не была достигнута. Для этого необходимо выполнить протокол рамановского охлаждения атома до основного состояния, поэтому разработка данного метода охлаждения одиночных нейтральных атомов в микроскопической дипольной ловушке до основного состояния удерживающего потенциала имеет решающее значение.

Количество работ в этом направлении в настоящее время неуклонно возрастает, чему имеются важные причины. Последние достижения в области квантовой оптики позволяют ожидать создания, в определенной перспективе, новых, опирающихся на принципы квантовой теории, физических устройств и каналов обработки и передачи информации, возможности которых могут существенно превзойти все существующие классические аналоги.

Любая разрабатываемая квантовая сеть или процессор в своей основе требуют создания особых алгоритмов передачи, обработки и хранения информации, в основе которых лежат физические принципы квантовой неопределённости и перепутывания состояний. Это естественным образом приводит исследователей к необходимости разработки способов обмена и контроля квантовыми состояниями для объектов разной физической природы, т.е. создания полноценных систем квантового интерфейса. Системы холодных атомов, находящихся в свободном состоянии либо связанных с оптическими ловушками, являются одним из потенциальных и выигрышных кандидатов для разработки подобных систем [10; 11].

В научно-квалификационной работе мы рассмотрим с теоретических позиций ряд оптических процессов, в основном, ориентированных на проблемы квантовой информатики и принципиально связанных с системами

ультрахолодных атомов. Мы надеемся, что представленная научно-квалификационная работа внесёт определённый вклад в это актуальное направление перспективных исследований, сформировавшиеся на стыке атомной физики, квантовой оптики и квантовой физики в целом.

Целью представленной научно-квалификационной работы является разработка последовательного теоретического описания процессов рассеяния когерентного взаимодействия света атомными ансамблями, находящимися в условиях квантового вырождения, при этом возможность учета наличия слабого межатомного взаимодействия в конденсате становится стратегически важной с точки зрения возможных дальнейших оптомеханических квантово-информационных приложений.

Также необходимо построить теорию эффективного рамановского протокола как последовательного, так и одновременного подавления всех степеней свободы атома, плененного потенциалом дипольной ловушки. Принципиальной трудностью является ряд нетривиальных требований к геометрии охлаждающих пучков и к внешним параметрам, связанным с импульсами света, обеспечивающими процесс комбинационного рассеяния для одновременного подавления всех осцилляторных мод.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. Разработать методику теоретического расчёта процессов взаимодействия оптического излучения с атомным ансамблем в условиях квантового вырождения, базирующуюся на микроскопических методах расчёта с использованием вакуумной диаграммной техники Фейнмана.
2. Исследовать полученные управляющие уравнения в рамках различных приближений для выявления механизмов сильного когерентного рассеяния света конденсатом Бозе-Эйнштейна в области прозрачности невырожденного атомного газа.
3. Вычислить необходимые спектральные характеристики процессов рассеяния света вырожденным атомным газом.
4. Разработать теорию эффективного рамановского протокола как последовательного, так и одновременного подавления всех степеней свободы атома, плененного потенциалом дипольной ловушки.
5. Исследовать и сформулировать условия оптимизации рамановского протокола охлаждения одиночного атома.
6. Разработать эффективную конфигурацию облучения лазерными пучками и сформулировать требования для согласования интенсивностей и поляризаций оптических мод, управляющих процессом охлаждения.

Научная новизна:

В работе получены следующие результаты:

1. Впервые была разработана с помощью последовательного квантово-механического формализма теория рассеяния света (одиночного фотона) на системе тождественных атомов в условиях их квантового вырождения, ключевым результатом которой являлось построение управляющего интегро-дифференциального уравнения для поляритонной функции Грина.
2. Было выполнено оригинальное исследование динамики поведения образующегося суперпозиционного одночастичного возбуждения, распространяющегося в атомной среде, находящейся в условиях квантового вырождения. Данное исследование было проведено с помощью решения полученного ранее управляющего уравнения для функции Грина в приближении бесконечной однородной среды.
3. Впервые был осуществлен анализ процесса сильного когерентного рассеяния света на неоднородной пространственной структуре интерферирующих материальных волн ВЕС. Было показано, как данная неоднородная пространственная структура в резонансной атомной области приводит к механизму рассеяния света, аналогичному дифракции Брэгга.
4. Впервые был выяснен механизм образования сильно осциллирующего поведения коэффициента отражения в области глубоких отстройек, что способствует сильному когерентному рассеянию от ВЕС в области прозрачности невырожденного атомного газа. Обнаружено, что данный механизм заключается в формировании диэлектрической среды, обладающей свойствами фотонного кристалла.
5. Впервые был разработан эффективный рамановский протокол как последовательного, так и одновременного подавления всех степеней свободы атома, плененного потенциалом дипольной ловушки.
6. Было выполнено оригинальное исследование, в котором были получены условия оптимизации рамановского протокола, заключающиеся в необходимости обеспечения квантового перепутывания спиновой и колебательной степеней подсистем атома в дипольной ловушке.
7. Также впервые была построена оптимальная максимально симметричная геометрия облучения лазерными пучками и сформулированы требования для согласования интенсивностей и поляризаций оптических мод, управляющих процессом охлаждения.

Практическая значимость

Научно-квалификационная работа посвящена построению с помощью последовательного квантово-механического формализма теории рассеяния света (одиночного фотона) на системе тождественных атомов в условиях

их квантового вырождения, а также разработке эффективного рамановского протокола как последовательного, так и одновременного подавления всех степеней свободы атома, плененного потенциалом дипольной ловушки.

Квантовый интерфейс между полевой и атомной подсистемой, находящейся в вырожденном квантовом состоянии, представляет собой как фундаментальный интерес, так и практический, выраженный в квантово-информационных приложениях. Так, в работе [12] авторы продемонстрировали когерентный обмен между полевой и атомной подсистемой, находящейся в фазе конденсации. Как демонстрируется авторами, данный процесс связан с образованием суперпозиций различных вихревых состояний, где относительная фаза между состояниями определяется относительными фазами оптических полей. Область применения таких суперпозиционных состояний варьируется от создания сверхтекучего движения и суперпозиции макроскопических состояний (кот Шредингера) в парах атомов до квантовой информации [13], например, в квантовых повторителях, где так называемые "летающие кубиты" являются фотонами с ОАМ [14]. Также явление образования квантовой вихревой нити в конденсате [15] интересно и с фундаментальной точки зрения изучения взаимоотношений между двумя фазами: конденсации и сверхтекучести, – в особенности в 1D и 2D системах. Так, в работе [16] сильно взаимодействующий 1D газ проявляет свойства сверхтекучести, хотя такая система не переходит в фазу ВЕС. Сверхтекучесть в кольцевой геометрии открывает новые возможности, например, с добавлением квантового эффекта туннелирования, как в эффекте переходов Джозефсона, можно реализовать прибор с аналогичным сверхпроводящим квантовым интерфейсом для газа атомов [17]. Перечисленные примеры указывают на необходимость наличия последовательной теории изучения процессов рассеяния света на конденсате Бозе-Эйнштейна, поэтому построенная теория когерентного взаимодействия света с атомным ансамблем в условиях квантового вырождения несомненно имеет теоретическую и практическую значимость.

Разработанная теория рамановского охлаждения атома, захваченного «оптическим пинцетом», и выявленные оптимальные условия экстремального охлаждения и локализации имеют важную практическую значимость. Так, существует впечатляющий экспериментальный прогресс в реализации рамановского протокола для охлаждения атома в системах типа пинцета в трехмерном режиме [7; 8] и когерентного управления дипольной блокадой ридберговских атомов лазерным светом, что делает их перспективным кандидатом для практической реализации квантового компьютера [9]. Для достижения высокой степени надежности квантово-информационных операций необходимо выполнить протокол рамановского охлаждения атома до основного состояния, поэтому разработка данного метода охлаждения одиночных нейтральных атомов в микроскопической

дипольной ловушке до основного состояния удерживающего потенциала имеет решающее значение.

Методология и методы исследования.

Результаты, приведенные в данной научно-квалификационной работе, получены с помощью использования современного аппарата теоретической и математической физики. Рассмотрение взаимодействий света с атомной средой проведено на основе квантово-электродинамического подхода, вакуумной диаграммной техники Фейнмана, обладающего высокой надёжностью, в сочетании с численным моделированием в полном соответствии с представлениями и требованиями современной квантовой оптики. Подобный теоретический подход позволяет провести упреждающее моделирование физического процесса, близкое к его экспериментальной реализации.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Была разработана с помощью последовательного квантовомеханического формализма теория рассеяния света (одиночного фотона) на системе тождественных атомов в условиях их квантового вырождения. Ключевым результатом является построение управляющего интегро-дифференциального уравнения, которое было впоследствии решено в приближении бесконечной однородной среды и привело к наглядному описанию распространения возбуждения в вырожденном состоянии атомного ансамбля как суперпозиционного состояния атома и фотона – поляритона.
2. С помощью решения управляющего интегро-дифференциального уравнения в 1D приближении проанализирован процесс, особенностью которого являлось формирование атомами когерентного состояния вещества, описываемой материальными волнами плотности атомов в фазе ВЕС. Было показано, что неоднородная пространственная структура интерферирующих материальных волн в резонансной атомному переходу области приводит к специфическому механизму рассеяния света, аналогичному дифракции Брэгга. Также был выяснен механизм образования сильно осциллирующего поведения коэффициента отражения. Далеко от атомного резонанса интерференция макроскопических материальных волн, наблюдаемая в экспериментах с конденсатом Бозе-Эйнштейна, в области оптической прозрачности образца формирует диэлектрическую среду, обладающую свойствами фотонного кристалла.
3. Впервые был разработан эффективный рамановский протокол как последовательного, так и одновременного подавления всех степеней свободы атома, плененного потенциалом дипольной ловушки.
4. Были получены условия оптимизации протокола RSC, заключающиеся в необходимости обеспечения квантового перепутывания

спиновой и колебательной степеней подсистем атома в дипольной ловушке. Также была построена оптимальная максимально симметричная геометрия облучения лазерными пучками и сформулированы требования для согласования интенсивностей и поляризацій оптических мод, управляющих процессом охлаждения.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались на следующих международных 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. Ezhova , L.V. Gerasimov , and D.V. Kupriyanov, "Coherent light scattering from a quantum degenerate Bose-gas", EMN Meeting on QCQI, August 23-26, 2016, Berlin, Germany

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

Автор работы неоднократно выступал с докладами на городском межинститутском семинаре по квантовой оптике при РПГУ им. Герцена, а также на семинарах кафедры Теоретической физики и Лаборатории квантовой оптики и квантовой информатики ЦПИ СПбГПУ

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

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 печатных изданиях [1–6], рекомендованных ВАК.

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. A. Pivovarov, A. S. Sheremet, L. V. Gerasimov, V. M. Porozova, N. V. Corzo, J. Laurat, D. V. Kupriyanov, "Light scattering from an atomic array trapped near a one-dimensional nanoscale waveguide: A microscopic approach"// Phys. Rev. A. — 2018. — Vol. 97, no. 023827.

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, V.A. Pivovarov, L.V. Gerasimov, D.V. Kupriyanov, "Bragg diffraction in atomic systems under conditions of quantum degeneracy"// JETP Letters. — 2018. — Vol. 108, no. 10. — P. 714–721.

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.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной научно-квалификационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна, теоретическая и практическая значимость представляемой работы.

В **первой главе** приводится обзор научной литературы по изучаемой проблеме.

Вторая глава посвящена разработке с помощью последовательного квантовомеханического формализма теории рассеяния света (одиночного фотона) на системе тождественных атомов в условиях их квантового вырождения (ВЕС). С использованием диаграммного метода Фейнмана [18] была построена система графических уравнений

$$\begin{array}{c}
 \text{---} \leftarrow \text{---} = \text{---} \leftarrow \text{---} + \text{---} \leftarrow \text{---} \begin{array}{c} \downarrow \\ \text{---} \\ \uparrow \end{array} \text{---} \leftarrow \text{---} \\
 \hspace{15em} (1)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 \text{---} \leftarrow \text{---} = \text{---} \leftarrow \text{---} + \text{---} \leftarrow \text{---} \begin{array}{c} \text{---} \\ \text{---} \\ \text{---} \end{array} \text{---} \leftarrow \text{---} \\
 \hspace{15em} (2)
 \end{array}$$

$$\begin{array}{c}
 \text{---} \leftarrow \text{---} = \text{---} \leftarrow \text{---} + \text{---} \leftarrow \text{---} \begin{array}{c} \uparrow \\ \text{---} \\ \downarrow \end{array} \text{---} \leftarrow \text{---} \\
 \hspace{15em} (3)
 \end{array}$$

для вычисления ключевого элемента задачи рассеяния – одночастичной функции Грина, удовлетворяющей третьему уравнению (3), определяющей амплитуду рассеяния и описывающей распространение одиночного оптического возбуждения в конденсате. С помощью решения замкнутой системы первых двух графических уравнений (1-2) был получен важный вывод о том, что оптическое возбуждение, рожденное в конденсате, может привести к спонтанному излучению, и данный процесс аналогичен процессу некогерентного рассеяния в неупорядоченном газе той же плотности. Ключевым результатом главы является решение системы (1-3) и построение управляющего интегрально-дифференциального уравнения (4).

$$\begin{aligned}
 & \left[E + \frac{\hbar^2}{2m_A} \Delta - E_n + \frac{4\pi}{3} n_0(\mathbf{r}) d_0^2 + \frac{i\hbar}{2} \sqrt{\epsilon(\mathbf{r}, \omega_E) \gamma} \right] G_{nn'}(\mathbf{r}, \mathbf{r}'; E) \\
 & - \sum_{n''} \int d^3 r'' \Sigma_{nn''}^{(c)}(\mathbf{r}, \mathbf{r}''; E) G_{n''n'}(\mathbf{r}'', \mathbf{r}'; E) = \hbar \delta_{nn'} \delta(\mathbf{r} - \mathbf{r}').
 \end{aligned} \tag{4}$$

Данное уравнение было решено аналитически в приближении бесконечной однородной среды и привело нас к наглядному описанию

распространения возбуждения в вырожденном состоянии атомного ансамбля как суперпозиционного состояния атома и фотона – поляритона. Решение уравнения рассеяния (??) в общем случае может наглядно интерпретироваться как преобразование состояния этой квазичастицы, обусловленное пространственной неоднородностью конденсата, формирующейся в процессе его внутренней эволюции. Эта поляритонная мода, формируемая на краях образца вдали от атомного резонанса с условием $\omega \sim c|\mathbf{k}|$, ответственна за эффекты сильного когерентного рассеяния, происходящих как на краях образца, так и вследствие возможной его внутренней неоднородности.

Изложенные во второй главе результаты опубликованы в [1; 3].

Третья глава посвящена исследованию задачи рассеяния света (одиночного фотона) на системе тождественных атомов в условиях их квантового вырождения в одномерном приближении.

Распределение плотности в образце, для различных пространственных профилей параметра порядка, приведены на Рис.1 для трех возможных конфигураций: однородное распределение БЭК с постоянной плотностью Рис.??(a)

$$\Xi = \sqrt{n_0} = \text{const}_z, \quad (5)$$

где n_0 плотность атомов, неоднородное распределение, параметризованное параметром порядка с тригонометрическим профилем [Рис.1 (b)]:

$$\Xi(z) = \sqrt{n_0} \cos(\pi z/L), \quad (6)$$

а также интерференция двух материальных волн, соответствующих фрагментам конденсата, распространяющихся навстречу друг другу Рис.1(c)

$$\Xi(z) = \sqrt{\frac{n_0}{2}} \cos\left(\frac{\pi z}{2L}\right) e^{i\Delta q z} + \sqrt{\frac{n_0}{2}} \cos\left(\frac{\pi z}{2L}\right) e^{-i\Delta q z}. \quad (7)$$

Внутреннее движение перекрывающихся фрагментов конденсата, выраженное (7) кардинально изменяет картину рассеяния света. В данном случае особенностью процесса являлось формирование атомами когерентного состояния вещества, описываемой материальными волнами плотности атомов в фазе ВЕС. Интерферируя, данные волны формируют неоднородную пространственно периодическую структуру. Было показано, что данная структура в резонансной атомному переходу области приводит к специфическому механизму рассеяния света аналогичному дифракции Брэгга.

Были проанализированы как общие черты, так и принципиальные различия в рассеянии света на атомных системах, рассматриваемых в условиях квантового вырождения, с рассеянием на одномерных атомных

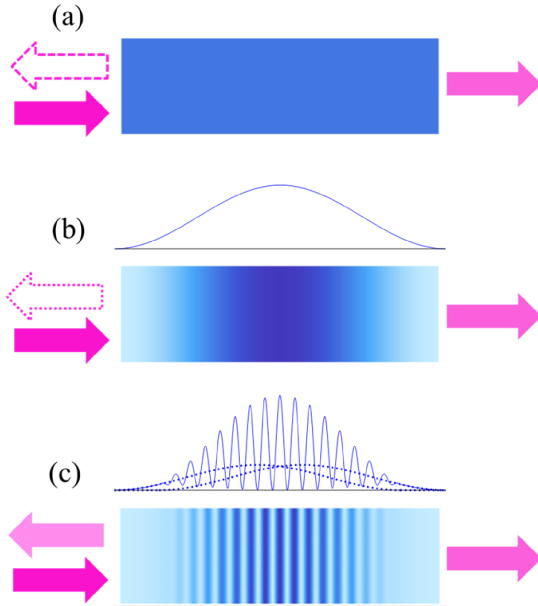


Рис. 1 — Распределение плотности атомов вырожденного газа для различных пространственных профилей параметра порядка: (a) однородное распределение БЭК с постоянной плотностью в геометрии слоя толщиной L с параметром порядка (5); (b) неоднородное распределение, параметризованное параметром порядка с тригонометрическим профилем (6); (c) интерференция двух материальных волн для двух фрагментов БЭК, распространяющихся навстречу друг другу, см. (7)

решетках, в которых положение атомов описывается классической статистикой.

Также был выяснен механизм образования сильно осциллирующего поведения коэффициента отражения: далеко от резонанса интерференция макроскопических материальных волн, наблюдаемая в экспериментах с конденсатом Бозе-Эйнштейна, в области оптической прозрачности образца формирует диэлектрическую среду, обладающую свойствами фотонного кристалла [4; 5].

Изложенные в третьей главе результаты опубликованы в [2—5].

В **четвертой главе** был разработан протокол оптического охлаждения одиночного атома методом стимулированного рамановского рассеяния. Атом, захваченный дипольной ловушкой с помощью оптического пинцета, в расширенной интерпретации рассматривается как элемент оптической решётки, состоящей из коллектива подобных атомов(Рис.).

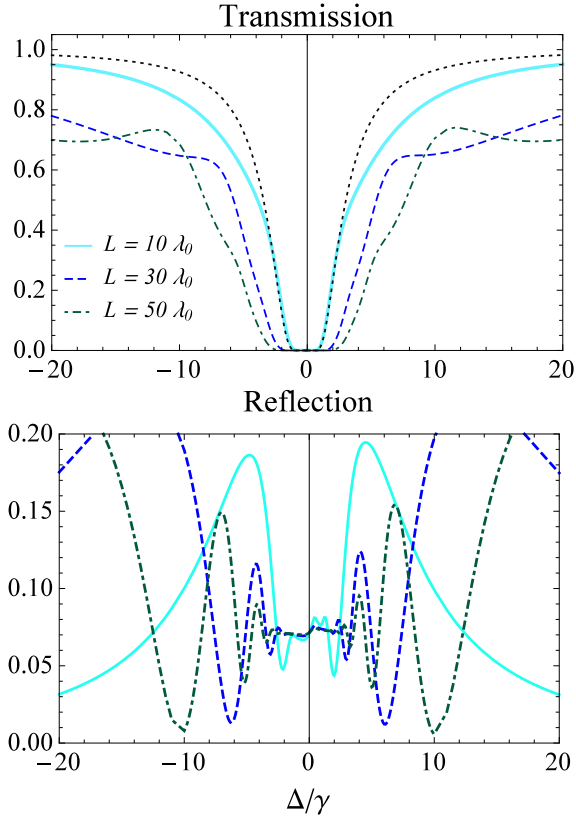
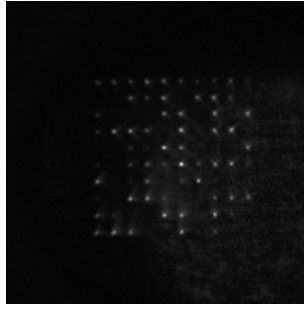
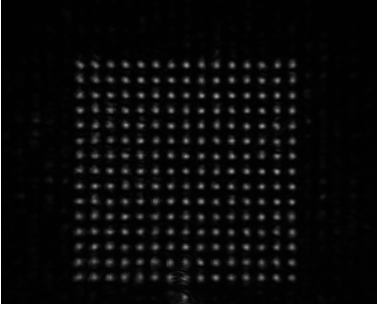


Рис. 2 — Зависимость коэффициентов прохождения (верхний график) и отражения (нижний график) от отстройки пробного излучения $\Delta = \omega - \omega_0$ для неоднородного распределения плотности атомов в конденсате, определяемого параметром порядка (7) с $\Delta q = k_0 = \omega_0/c$, где ω_0 — резонансная частота атомного перехода. Геометрия возбуждения соответствует Рис.1(с). Пунктиром изображена реперная зависимость для коэффициента прохождения света через оптически плотный слой невырожденного газа той же плотности, что и рассматриваемый конденсат.



а) б)
 Рис. 3 — Здесь предоставлены на а) оптическая решётка из 225 узлов; б) атомный массив из 50 атомов. Фотография предоставлена нашими экспериментальными партнерами Центра квантовых технологий МГУ имени М. В. Ломоносова. Данный рисунок приведен в обзорной первой главе

Пленённый атом в этом случае является элементом квантового регистра, сконструированного в виде атомного массива, и преследует целью сохранение и обработку данных в квантовом информационном канале. Целью протокола RSC является стабилизация поступательного движения атома в потенциале дипольной ловушки и его локализация в основном состоянии потенциальной ямы.

Будем рассматривать атом, захваченный оптической дипольной ловушкой, как элемент равновесного канонического ансамбля с температурой $T \equiv \beta^{-1}$.

Предположим, что атом посредством механизма оптической накачки переселяется в определённое спиновое состояние (зеemanовский подуровень сверхтонкой структуры), которое мы обозначим $|s\rangle$ и в дальнейшем мы будем рассматривать данное состояние как исходное расположение атома в каждом цикле охлаждения. В этом случае матрица плотности всей системы представляется в виде произведения колебательного состояния (заданного термодинамическим равновесием) и внутреннего спинового (чистого) состояния

$$\hat{\rho} = \sum_{v_x, v_y, v_z} \exp \{ \beta [F(\beta) - \epsilon_{v_x v_y v_z}] \} |v_x, v_y, v_z\rangle \langle v_x, v_y, v_z| \times |s\rangle \langle s|, \quad (8)$$

где $F = F(T) \equiv F(\beta)$ свободная энергия и $\epsilon_{v_x v_y v_z}$ энергия собственного состояния гармонического осциллятора, параметризованная колебательными квантовыми числами $v_x, v_y, v_z = 0, 1, 2, \dots$, соответствующих колебаниям вдоль главных осей ловушки x, y, z . Аппроксимируем потенциал ловушки моделью аксиально-симметричного гармонического

осциллятора, имеющим продольную и радиальную частоты колебаний Ω_{\parallel} и Ω_{\perp} соответственно. Требование симметричности ловушки не является принципиальным, и наше обсуждение может быть обобщено на случай анизотропного потенциала.

Идея протокола рамановского охлаждения (RSC) состоит в том, чтобы обеспечить последовательность стимулированных циклов комбинационного рассеяния, которые переводят атом в состояние с пониженным значением квантового числа в каждой моде. При этом в разложении матрицы плотности (8) мы можем выделить состояние

$$|s\rangle \times |0,0,0\rangle \equiv |\text{Dark}\rangle, \quad (9)$$

которое не подвержено влиянию рамановского процесса и обычно называется «темным» состоянием. Небольшая начальная заселенность этого состояния постепенно увеличивается за счет повторения процесса, состоящего из последовательных циклов рамановских переходов и оптической накачки, возвращающих спиновую подсистему обратно в исходное состояние $|s\rangle$. В идеальном сценарии ожидается, что атом в конечном итоге перейдет в темное состояние с вероятностью 100% и, следовательно, будет находиться в основном колебательном состоянии потенциала ловушки.

Поясним эту идею, отслеживая преобразование состояния системы на каждом шаге протокола. Идеальный рамановский переход может быть выражен как однократный перенос начального базового состояния $|b\rangle = |s\rangle |v_x v_y v_z\rangle$, селективного в исходной матрице плотности (8), в определенное конечное состояние $|d\rangle$ в соответствии с со следующим правилом

$$\begin{aligned} |b\rangle &\equiv |s\rangle |v_x, v_y, v_z\rangle \xrightarrow{\text{Raman}} \\ &= \sum_{\mu=x,y,z} C_{\mu}^{(v_x v_y v_z)} |t_{\mu}\rangle | \dots, v_{\mu}-1, \dots \rangle \equiv |d\rangle \end{aligned} \quad (10)$$

Если одна из колебательных мод уже достигла основного состояния, то соответствующий коэффициент разложения, формирующий сумму в правой части (10), должен быть обнулен. Спиновые состояния $|t_x\rangle$, $|t_y\rangle$ и $|t_z\rangle$, присутствующие в разложении (10), являются определенными целевыми состояниями для выбранной схемы перехода и энергетической структуры и зависят от параметров рамановского импульса, обеспечивающего предполагаемое идеальное преобразование. Построенная суперпозиция (10) описывает атомный волновой пакет, рассматриваемый в момент его приготовления. На следующем этапе протокола с помощью резонансного импульса оптической накачки атом переселяется обратно в исходное спиновое состояние $|s\rangle$. В данном процессе, являющимся кинетическим и не связанным с унитарным преобразованием полного состояния атома, преобразование спиновой матрицы плотности происходит независимо от

поступательного движения атома. Данное требование может быть обеспечено малостью кинематического параметра Лэмба-Дике, благодаря чему вибрационные моды не возбуждаются под действием слабого резонансного импульса оптической накачки, состоящего всего из нескольких фотонов. В результате цикла оптической накачки предполагается вернуть систему к расщепленной факторизованной структуре матрицы плотности, похожей на исходное состояние (8), но с изменённой компонентой, отвечающей колебательным степеням свободы. Чтобы обосновать это, сделаем определенное упрощение и предположим, что перепутанное состояние (10) является декомпозицией Шмидта, так что целевые состояния $|t_x\rangle$, $|t_y\rangle$ и $|t_z\rangle$ взаимно ортогональны. В этом оптимальном случае после цикла оптической накачки состояние системы, действительно, воспроизводится в виде произведения (8), но теперь с увеличенной вероятностью заселения тёмного состояния.

После n шагов последовательно применённых циклов комбинационного рассеяния и оптической накачки матрица плотности системы преобразуется следующим образом:

$$\hat{\rho}^{(n)} = \exp\{\beta F(\beta)\} Z^{(n)}(\beta) \times |0,0,0\rangle\langle 0,0,0| \times |s\rangle\langle s| + \dots \quad (11)$$

где $Z^{(n)}$ обозначает "обрезанную" статистическую сумму, содержащую n возбуждений осцилляторных мод

$$Z^{(n)}(\beta) = \sum_{\substack{v_x, v_y, v_z \\ v_x + v_y + v_z = n}} \exp[-\beta \epsilon_{v_x v_y v_z}] = \sum_{\epsilon \leq \epsilon_n} g_\epsilon \exp[-\beta \epsilon].$$

Здесь g_ϵ является кратностью вырождения состояний системы $|v_x, v_y, v_z\rangle$ с равными энергиями $\epsilon = \epsilon_{v_x v_y v_z}$, отвечающим различным наборам колебательных чисел, ϵ_n верхняя граница энергии отвечающая $n = \max\{v_x + v_y + v_z\}$ возбуждениям колебательных мод. Переходя к пределу $n \rightarrow \infty$ имеем $\lim_{n \rightarrow \infty} Z^{(n)}(\beta) = \exp\{-\beta F(\beta)\}$

и как следствие

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \hat{\rho}^{(n)} = |0,0,0\rangle\langle 0,0,0| \times |s\rangle\langle s| \quad (12)$$

Вклад, обозначенный многоточием в (11), соответствует остаточной заселенности состояний отличных от темного состояния и в пределе $n \rightarrow \infty$ исчезает. Это свидетельствует о внутренней сходимости процесса рамановской схемы охлаждения с полным подавлением колебательного движения.

Таким образом, были получены условия оптимизации протокола RSC, заключающиеся в необходимости обеспечения квантового перепутывания спиновой и колебательной степеней подсистем атома в дипольной ловушке.

Было показано, как осуществить подавление поступательного движения атома посредством механизма стимулированного рамановского рассеяния, необходимого для обеспечения фазовой согласованности в предполагаемых когерентных преобразованиях состояний света и атомов. Были получены условия оптимизации протокола RSC, заключающиеся также в построении оптимальной максимально симметричной геометрии облучения лазерными пучками. В трёхмерной геометрии мы обеспечиваем возможность управления движением атома и передачи импульса одновременно в каждую колебательную степень свободы. Из Рис.4 следует, что одновременный и независимый контроль может быть осуществлен, если волновые векторы управляющих лучей \mathbf{k}_1 , \mathbf{k}_2 , и \mathbf{k}_3 образуют равнобедренные треугольники с волновым вектором возбуждающего луча \mathbf{k}_0 . В такой геометрии возбуждения углы $\angle(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_1, \mathbf{k}_0) = \angle(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_2, \mathbf{k}_0) = \angle(\mathbf{k}_0 - \mathbf{k}_3, \mathbf{k}_0) = \arccos(1/\sqrt{3}) = 54.7^\circ$ и три волновых вектора отдачи $\mathbf{k}_1 - \mathbf{k}_0$, $\mathbf{k}_2 - \mathbf{k}_0$, и $\mathbf{k}_3 - \mathbf{k}_0$ являются взаимно ортогональными и могут быть ориентированы вдоль главных осей дипольной ловушки. На Рис. 4, передаваемые импульсы показаны розовыми пунктирными стрелками. В этом случае векторы \mathbf{k}_0 , \mathbf{k}_1 , \mathbf{k}_2 , \mathbf{k}_3 соответственно направлены вдоль биссектрис основного и трех соседних октантов главных координат ловушки. Ось квантования, совпадающая с направлением внешнего магнитного поля, может быть ориентирована вдоль \mathbf{k}_0 (если возбуждающий луч циркулярно поляризован) либо вдоль направления поляризации возбуждающего луча (если он линейно поляризован). Мы далее выбираем первый вариант, поскольку полная связь между базовым и конечным состояниями представляется наиболее эффективной именно для этого случая.

Предполагаемому рамановскому процессу соответствует диаграмма переходов, изображенная на Рис.5. Для определённости в дальнейшем мы выберем в качестве исходного состояния верхнее зеемановское состояние на так называемом "часовом" переходе в сверхтонкой структуре основного состояния атома щелочного металла: $|s\rangle \equiv |F_+, 0\rangle$. Здесь и далее мы будем обозначать два возможных значения полного спинового момента атома $F_0 = F_+, F_-$ с $F_\pm = I \pm 1/2$, где I - спин ядра, и мы будем различать зеемановские состояния $M_0 = M_\pm$ для верхнего/нижнего сверхтонких подуровней. Каждый из управляющих лучей открывает три допустимых поляризационных канала, так что для возбуждающего луча в σ_+ -поляризации целевые спиновые состояния $|t_x\rangle$, $|t_y\rangle$, и $|t_z\rangle$, в общем случае должны быть выражены линейными комбинациями $|F_-, 0\rangle$, $|F_-, 1\rangle$, и $|F_-, 2\rangle$.

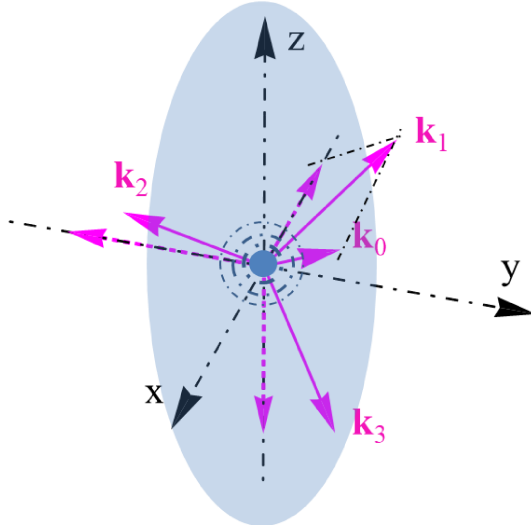


Рис. 4 — Геометрия световых лучей, обеспечивающих одновременное подавление колебательного движения в трёх измерениях. Четыре световых луча направлены вдоль биссектрис основного и трех прилегающих октантов координат ловушки. Возбуждающий луч, которому соответствует волновой вектор \mathbf{k}_0 , в комбинации с каждым отдельным управляющим лучом \mathbf{k}_1 , \mathbf{k}_2 , и \mathbf{k}_3 формирует импульс отдачи, передаваемый атому в направлении каждой из главных осей ловушки. Это наглядно показано на примере векторного параллелограмма, построенного на волновых векторах \mathbf{k}_0 и \mathbf{k}_1 .

В соответствии с рассматриваемой геометрией возбуждения, см. Рис.4, каждый j -й управляющий луч с $j = 1,2,3$ обеспечивает подавление колебательного движения вдоль направления μ -й главной оси ловушки с $\mu = x,y,z$. Отдельно выделенный рамановский канал, связанный с каким-либо управляющим лучом, обеспечивает переход на подпространство состояний $|m\rangle = |F_-, M_-, \dots, v_\mu - 1, \dots\rangle$, однако, для полного перехода задействована суперпозиция всех состояний с $\mu = x,y,z$. Как будет показано далее, поляризации управляющих лучей следует выбрать взаимно ортогональными, и при идеальном сценарии ожидается, что построенные спиновые состояния будут слабо перекрываться. В этом случае состояние назначения $|d\rangle$ будет близко к состоянию максимально перепутывающему спиновые и колебательные степени свободы, как это предполагалось в разложении (10) при определении оптимальной стратегии.

Процесс стимулированного рамановской конверсии атома из базового состояния $|b\rangle$ в конечное состояние $|d\rangle$ ослаблен малым значением параметра Лэмба-Дике $\eta_\mu = k_0 \sqrt{\hbar/2m\Omega_\mu} \ll 1$. Если система развивается полностью динамически, так что спонтанные потери пренебрежимо малы,

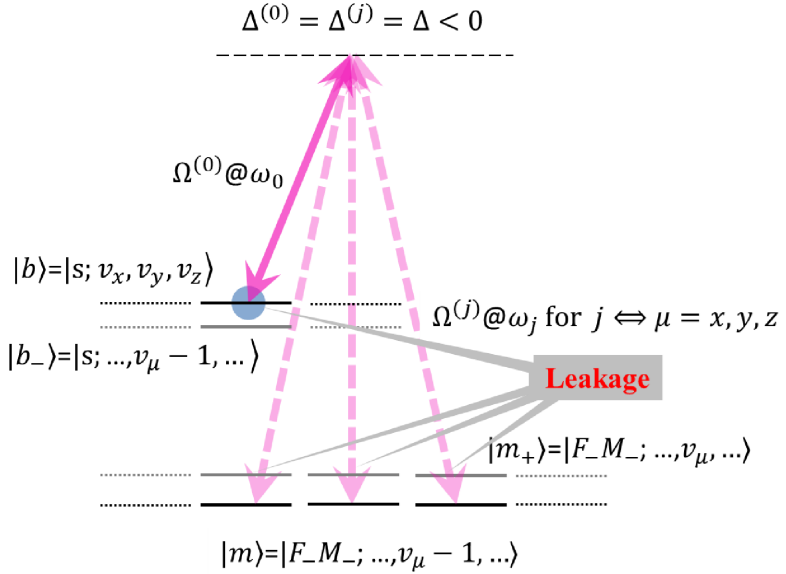


Рис. 5 — Схема переходов, отвечающая геометрии возбуждения, изображенной на Рис. 4. Для отдельного j -го управляющего луча рамановский процесс переводит атом на нижний сверхтонкий подуровень основного состояния с уменьшенным на единицу соответствующему этому каналу колебательного числа v_μ . Каждая управляющая мода связана с одной соответствующей ей колебательной модой, так что $j = j(\mu)$. Главный канал рассеяния конкурирует с нерезонансной утечкой в рамановском рассеянии, соответствующей переходу атома в те же спиновые состояния, но с сохранением колебательного числа. основной канал рассеяния будет конкурировать с утечкой, обусловленной слабым нерезонансным рассеянием в те же спиновые состояния, но с сохранением колебательного числа. Утечка, показанная на Рис. 5 как переход в группу состояний $|m_+\rangle$ подавлена из-за нерезонансности, но она не сопровождается передачей импульса и, тем самым, присутствует в уравнениях уже в нулевом порядке по параметру Лэмба-Дике. Таким образом, оптимальный протокол охлаждения должен обеспечить минимальную утечку в каждом цикле рамановского перехода атома из состояния $|b\rangle$ в состояние $|d\rangle$.

Вернёмся к обсуждению геометрии лучей, изображённой на Рис.4, и выясним оптимальный выбор поляризаций лучей управляющих мод. В соответствии с базовой стратегией протокола рамановского охлаждения оптимальным представляется максимально приблизить рамановский процесс

эффективным двухуровневым переходом между базовым $|b\rangle$ и конечным состояниями $|d\rangle$, заданным суперпозицией целевых спиновых и колебательных состояний, в соответствии с требованием разложения (10). Анализ показывает, что изоляции перехода между состояниями $|b\rangle$ и $|d\rangle$ можно добиться при выполнении двух условий. Во-первых, требуется, чтобы

$$\Omega^{(1)}\eta_{\perp}\sqrt{v_x} = \Omega^{(2)}\eta_{\perp}\sqrt{v_y} = \Omega^{(3)}\eta_{\parallel}\sqrt{v_z} \quad (13)$$

где $\Omega^{(j)}$ обозначает приведенный матричный элемент для частоты Раби j -й моды. Во-вторых, требуется взаимная ортогональность векторов поляризации управляющих мод. Если оба эти условия выполнены, динамика атома описывается унитарным и периодическим по времени процессом обмена населенностями состояний $|b\rangle$ и $|d\rangle$, попеременно становящимся базовым и основным друг для друга.

В **заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. В Главе 2 основным результатом является построенная нами с помощью последовательного квантовомеханического формализма теория рассеяния света (одиночного фотона) на системе тождественных атомов в условиях их квантового вырождения (ВЕС). С использованием диаграммного метода Фейнмана [18] была построена система графических уравнений (1-3) для вычисления ключевого элемента задачи рассеяния – одночастичной функции Грина, определяющей амплитуду рассеяния и описывающей распространение одиночного оптического возбуждения в конденсате. С помощью решения замкнутой системы двух графических уравнений (1), (2) был получен важный вывод о том, что оптическое возбуждение, рожденное в конденсате, может привести к спонтанному излучению, и данный процесс аналогичен процессу некогерентного рассеяния в неупорядоченном газе той же плотности. Ключевым результатом главы является решение системы (1)-(3) и построение управляющего интегрально-дифференциального уравнения (4). Данное уравнение было решено аналитически в приближении бесконечной однородной среды и привело нас к наглядному описанию распространения возбуждения в вырожденном состоянии атомного ансамбля как суперпозиционного состояния атома и фотона – поляритона. Решение уравнения рассеяния (4) в общем случае может наглядно интерпретироваться как преобразование состояния этой квазичастицы, обусловленное пространственной неоднородностью конденсата, формирующейся в процессе его внутренней эволюции. Эта поляритонная мода, формируемая на краях образца вдали от атомного резонанса

с условием $\omega \sim c|\mathbf{k}|$, ответственна за эффекты сильного когерентного рассеяния, происходящих как на краях образца, так и вследствие возможной его внутренней неоднородности.

2. В Главе 3 нами была рассмотрена задача рассеяния света (одиночного фотона) на системе тождественных атомов в условиях их квантового вырождения. Особенностью процесса являлось формирование атомами когерентного состояния вещества, описываемой материальными волнами плотности атомов в фазе ВЕС. Интерferируя, данные волны формируют неоднородную пространственную структуру. Было показано, что данная структура в резонансной атомному переходу области приводит к специфическому механизму рассеяния света аналогичному дифракции Брэгга. Были проанализированы как общие черты, так и принципиальные различия в рассеянии света на атомных системах, рассматриваемых в условиях квантового вырождения, с рассеянием на одномерных атомных решетках, в которых положение атомов описывается классической статистикой.

Также был выяснен механизм образования сильно осциллирующего поведения коэффициента отражения: далеко от резонанса интерференция макроскопических материальных волн, наблюдаемая в экспериментах с конденсатом Бозе-Эйнштейна, в области оптической прозрачности образца формирует диэлектрическую среду, обладающую свойствами фотонного кристалла.

3. В Главе 4 был разработан протокол оптического охлаждения одиночного атома методом стимулированного рамановского рассеяния. Атом, захваченный дипольной ловушкой с помощью оптического пинцета, в расширенной интерпретации рассматривается как элемент оптической решётки, состоящей из коллектива подобных атомов. Пленённый атом в этом случае является элементом квантового регистра, сконструированного в виде атомного массива, и преследует целью сохранение и обработку данных в квантовом информационном канале. Целью протокола RSC является стабилизация поступательного движения атома в потенциале дипольной ловушки и его локализация в основном состоянии потенциальной ямы. Было показано, как осуществить подавление поступательного движения атома посредством механизма стимулированного рамановского рассеяния, необходимого для обеспечения фазовой согласованности в предполагаемых когерентных преобразованиях состояний света и атомов. Были разработаны протоколы охлаждения одиночного атома в наиболее общем случае трёхмерной конфигурации и выяснены условия его оптимизации.

Публикации автора по теме диссертации

1. *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.
2. 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.
3. Light Scattering From an Atomic Gas Under Conditions of Quantum Degeneracy / V. M. Porozova [et al.] // Phys. Rev. A. — 2018. — Vol. 97, no. 053805.
4. Дифракция Брэгга в атомных системах в условиях квантового вырождения / В. Порозова [и др.] // Письма в ЖЭТФ. — 2018. — Т. 108, № 10. — С. 726–735.
5. Bragg diffraction in atomic systems under conditions of quantum degeneracy / V. Porozova [et al.] // JETP Letters. — 2018. — Vol. 108, no. 10. — P. 714–721.
6. 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.

Список литературы

7. *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.
8. 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.
9. Dipole Blockade and Quantum Information Processing in Mesoscopic Atomic Ensembles / M. D. Lukin [et al.] // Physical Review Letters. — 2001. — Vol. 87, no. 037901.
10. *Hammerer, K.* Quantum interface between light and atomic ensembles / K. Hammerer, A. Sorensen, P. E. // Rev. Mod. Phys. — 2010. — Vol. 82, no. 1041.
11. Quantum Memories. A Review based on the European Integrated Project “Qubit Applications / C. Simon [et al.] // Eur. Phys. J. — 2010. — Vol. 58, no. 1.
12. Quantized Rotation of Atoms from Photons with Orbital Angular Momentum / M. F. Andersen [et al.] // Physical Review Letters. — 2006. — Vol. 97, no. 170406.

13. *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.
14. Entanglement of the orbital angular momentum states of photons / A. Mair [et al.] // Nature. — 2001. — Vol. 412. — P. 313–316.
15. 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.
16. *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.
17. *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.
18. Light scattering from an atomic gas under conditions of quantum degeneracy / V. Porozova [et al.] // Phys. Rev. A. — 2018. — Vol. 97, no. 053805.