

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного  
бюджетного учреждения науки Институт  
спектроскопии Российской академии наук  
(ИСАН)

Доктор физ.-мат. наук, профессор

В.Н. Задков

«01» декабря 2020 г.



## ОТЗЫВ

ведущей организации – федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт спектроскопии Российской академии наук» – на диссертацию **Порозовой Виктории Михайловны на тему: «Когерентное взаимодействие света с одиночными атомами и атомными ансамблями в условиях квантового вырождения»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – «Теоретическая физика»

### Актуальность работы

Тема диссертационной работы связана с разработкой теоретических подходов для описания оптических процессов, связанных с когерентным взаимодействием света с системами ультрахолодных атомов. Автор использует для проведения своего исследования современный аппарат теоретической и математической физики, основанный на применении квантово-электродинамического подхода, инвариантной теории возмущений и диаграммных методов, обладающих высокой строгостью микроскопического описания физических процессов и зарекомендовавших себя как эффективный инструмент для исследования подобных явлений. Однако их применение к рассматриваемым в работе объектам является далеко не тривиальным вопросом, что, несомненно, требует проведения дополнительных и весьма обширных исследований в данной области физики.

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. Так, с помощью техники оптического пинцета в условиях рамановского охлаждения в трехмерной ловушке удастся локализовать и обеспечить длительное удержание одиночного атома. Механизм дипольной блокады позволяет управлять пространственной решеткой подобных локализованных атомов, что рассматривается как прототип квантового симулятора на нейтральных атомах. Надежность квантово-информационных логических операций

определяется оптимальностью протокола рамановского охлаждения. Этот протокол в данный момент рассматривается как наиболее эффективный способ замедления движения атома в микроскопической дипольной ловушке и обеспечения долговременной когерентности (согласованности) в преобразовании сложных квантовых состояний.

Благодаря достижениям в области квантовой оптики, в нелинейной и интегральной оптике, а также в атомной физике появились новые физические платформы обработки и передачи данных на уровне элементарных объектов материи - фотонов, атомов, в том числе кооперированных и связанных эффектом квантовой запутанности. Ансамбли холодных атомов, как в пространственно однородном состоянии, 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.

Развитие теоретических методов для описания подобных атомных систем является несомненно необходимым шагом на пути к разработке и созданию квантово-информационных приложений. Таким образом, возникшие в последние годы задачи, связанные как с исследованиями особенностей свойств ультрахолодных атомных ансамблей, так и с их практическим использованием (кубиты), требуют развития новых методов, позволяющих проводить теоретическое моделирование атомов и рассчитывать параметры атомных структур, имеющих перспективы практического использования в качестве рабочих элементов приборов современной квантовой оптики и информатики.

Представленная диссертационная работа посвящена разработке таких методов и их апробации в применении к описанию оптических процессов, связанных с когерентным взаимодействием света с системами ультрахолодных атомов, актуальных для различных квантово-информационных применений. Все сказанное выше позволяет сделать вывод, что тема диссертационной работы Викторией Михайловной Порозовой является, несомненно, актуальной.

### **Новизна исследований и полученных результатов**

Научная новизна результатов диссертационной работы заключается, в первую очередь, в следующем:

1. Автором последовательно разработана и применена 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. Автором построено аналитическое решение этого уравнения и проанализировано распространение одночастичного возбуждения в бесконечно протяженной однородной среде.
3. Было показано, что идеальное совпадение 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 определенные соотношения между частотами Раби управляющих полей.

#### **Обоснованность и достоверность научных положений и выводов**

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций, содержащихся в диссертации, подтверждается примененным автором квантово-электродинамическим методом исследования: 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 расчеты позволяют провести упреждающее моделирование планируемых экспериментов.

**Теоретическая и практическая ценность работы** заключается в развитии 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. Теория рамановского охлаждения атома, захваченного микроскопической дипольной ловушкой - оптическим пинцетом - и оптимизация протокола охлаждения и локализации атома имеет важное практическое применение. Для достижения высокой согласованности квантовых логических операций необходимо осуществить охлаждение захваченного ловушкой атома, понизив его энергию вплоть до основного колебательного состояния.

### **Рекомендации для использования результатов и выводов диссертационной работы**

Полученные в работе результаты и развитые подходы могут быть использованы при теоретическом исследовании как локализованных одиночных атомов, так и атомных ансамблей, находящихся в вырожденном состоянии, а также при разработке в дальнейшем приборов, основанных на кванто-информационном интерфейсе между полевой и атомной подсистемами в различных научно-исследовательских и производственных организациях, среди которых можно выделить такие как Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Санкт-Петербургский государственный университет, Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Институт прикладной физики РАН, Новосибирский государственный университет, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Институт автоматизации и электрометрии СО РАН, Университет ИТМО, Институт спектроскопии РАН.

### **Общая оценка диссертационной работы**

Диссертационная работа выполнена на актуальную тему, связанную с разработкой теоретических подходов для описания оптических процессов, связанных с когерентным взаимодействием света с системами ультрахолодных атомов, и представляющую в настоящее время как научный, так и практический интерес. Автором применены надежные методы расчета и моделирования изучаемых свойств, обобщены результаты всех проведенных исследований, четко сформулированы и обоснованы основные научные выводы диссертационной работы.

### **Замечания по диссертационной работе**

Можно сделать следующие замечания к диссертационной работе.

1. В главе 2 показано, что развиваемый квантово-электродинамический подход приводит к формуле (2.27) для диэлектрической проницаемости конденсата, совпадающей с формулой для классического газа. Однако не отмечено, что такое совпадение связано, по-видимому, с тем, что в рассматриваемом приближении опущен вклад боголюбовских возбуждений, ведущих к малым модуляциям плотности конденсата. Для полноты излагаемого теоретического подхода было бы желательно дать оценку величины этого вклада.
2. В главе 3 большое внимание уделено рассеянию света на решётке, образуемой в результате интерференции двух сталкивающихся конденсатных облаков. При этом *молчаливо* предполагается, что эта интерференционная картина статична и период решётки постоянен

вдоль образца. Однако в реальных экспериментах возникающая при интерференции конденсатов волновая структура неоднородна и зависит от времени. Было бы желательно дать оценки того, насколько такая неоднородность и зависимость от времени влияет на обсуждаемые в диссертации эффекты.

3. При рассмотрении одиночного атома в оптической дипольной ловушке автор рассматривает трёхмерный протокол рамановского охлаждения для перевода атома на колебательные подуровни оптического потенциала с пониженным значением квантового числа. При этом утверждается, что описанный подход является оптимальным. Однако в диссертационной работе отсутствует сравнение полученных результатов с другими работами в данной области. Непонятно в чём заключаются принципиальные отличия предложенной схемы по сравнению с существующими аналогами. Например, как соотносятся предельные достижимые параметры по заселению колебательных подуровней оптического потенциала предложенным методом и экспериментальные результаты, продемонстрированные в работе [Kaufman A. M., Lester B. J., Regal C. A., "Cooling a single atom in an optical tweezer to its quantum ground state", *Physical Review X*, 2, 041014 (2012)].

### **Апробация работы**

Все основные результаты проведенных автором исследований, представленные в диссертационной работе, опубликованы в 4 научных статьях в реферируемых журналах, входящих в перечень ВАК и индексируемых в международных научных базах (Scopus, Web of Science). Результаты работы представлялись на достаточно большом числе российских и международных научных конференций по ее тематике, проведенных в 2013-2019 гг., а также докладывались на ряде научных семинаров. Автореферат диссертации правильно и достаточно полно отражает содержание диссертационной работы и соответствует ее основным положениям.

### **Заключение**

Диссертационная работа Порозовой Виктории Михайловны на тему:

«Когерентное взаимодействие света с одиночными атомами и атомными ансамблями в условиях квантового вырождения», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика, является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена научная проблема, имеющая существенное значение для современной теоретической физики – предложен, обоснован и апробирован метод теоретического описания оптических процессов, связанных с когерентным взаимодействием света с системами ультрахолодных атомов.

Уровень диссертации соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а соискатель Порозова Виктория Михайловна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – Теоретическая физика.

Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании семинара №1104 отдела лазерной спектроскопии ИСАН 17 июня 2020 г., протокол № 1104 от 17 июня 2020 г.

Отзыв подготовили:

Заведующий теоретическим отделом ИСАН,  
доктор физико-математических наук ✓

Камчатнов Анатолий  
Михайлович/

Старший научный сотрудник отдела лазерной  
спектроскопии лаборатории лазерной  
спектроскопии ИСАН, кандидат физико-  
математических наук

Афанасьев Антон Евгеньевич/

Председатель семинара:

Главный научный сотрудник, исполняющий  
обязанности заведующего отделом лазерной  
спектроскопии ИСАН, доктор физико-  
математических наук

Рябов Евгений Артурович/

Подписи сотрудников ИСАН А.М. Камчатнов,  
А.Е. Афанасьева и Е.А. Рябова заверяю.

Учёный секретарь ИСАН, кандидат  
математических наук

Кильдиярова Римма Рифовна/

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии  
Российской академии наук (ИСАН)

Адрес: 108840 Москва, Троицк ул. Физическая, д. 5.

Телефон: +7 (495)851-05-79

E-mail: isan@isan.troitsk.ru