



МИНОБРНАУКИ РОССИИ

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«Санкт-Петербургский государственный
политехнический университет»
(ФГАОУ ВО «СПбПУ»)

ИНН 7804040077, ОГРН 1027802505279,
ОКПО 02068574

Политехническая ул., 29, С.-Петербург, 195251
Телефон (812) 297-20-95, факс 552-60-80
E-mail: office@spbstu.ru

№ _____

“УТВЕРЖДАЮ”

Проректор Санкт-Петербургского
государственного политехнического
университета по научной работе Д.Ю. Райчук



«16» февраля 2015 г.

В диссертационный Совет Д003.024.01
при Институте лазерной физики СО РАН

на № 15319-07-01/6224 от 15.01.2015

ОТЗЫВ

Ведущей организации о диссертации Махалова Василия Борисовича «Приготовление и диагностика двумерного ферми-газа атомов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Экспериментальная и теоретическая атомная физика претерпевает в настоящее время революционный этап своего развития, связанный с феноменальным прогрессом в разработке систем лазерного охлаждения. Приготовление атомных ансамблей, как в неупорядоченных, так и упорядоченных состояниях, при температурах ниже доплеровского предела в диапазоне порядка ста микро-Кельвин уже является стандартным инструментом управления коллективными состояниями атомного газа, в котором атомы, фактически, неподвижны в течение времени взаимодействия с внешними оптическими полями. Ближайшей перспективой представляется разработка надежно воспроизводимых и контролируемых систем глубокого охлаждения, характеризующихся температурой системы ниже предела отдачи. При умеренных плотностях атомного газа (порядка нескольких атомов в объеме длины волны излучения) понижение температуры в диапазон ста нано-Кельвин приводит к проявлению эффектов вырождения и квантовой статистики атомов. Переход атомного газа в квантовое состояние конденсата Бозе-Эйнштейна или вырожденного Ферми газа является принципиально новым шагом в направлении создания коллективных комплексных квантовых систем, являющихся, по сути, макроскопическими квантовыми объектами. В подобных системах возможно моделирование новых более сложных и труднодоступных для эксперимента физических состояний материи, исследование процессов самоорганизации, явления квантового перепутывания и др. тонких физических явлений. Это, в свою очередь, интересно и важно в общем контексте инновационной разработки информационных и вычислительных систем нового поколения, позволяющих осуществить эффективное и контролируемое взаимодействие между светом и веществом, понимаемое как квантовый интерфейс между объектами различной физической природы. Диссертационная работа Махалова В.Б. представляет собой важный шаг в направлении исследования макроскопических квантовых состояний материи и, безусловно, является **актуальным** научным исследованием в области физики холодных атомов.

направлении исследования макроскопических квантовых состояний материи и, безусловно, является **актуальным** научным исследованием в области физики холодных атомов.

Диссертация состоит из введения, пяти глав (нумерация со второй по шестую) и заключения. Общий объем диссертации составляет 148 страниц, она содержит 63 рисунка, 5 таблиц, список цитируемой литературы содержит 131 наименование.

Во введении представлен общий обзор систем лазерного охлаждения и сформулированы цели и задачи диссертационной работы.

Во второй главе проводится последовательное описание разработанной при участии соискателя экспериментальной установки, обеспечивающей глубокое охлаждение атомов. Обратим внимание на то, что хотя в настоящее время схемы охлаждения атомов с использованием магнито-оптической и квазистатической ловушек является апробированной экспериментальной методикой разработка и создание подобной установки требует высокой экспериментальной квалификации. Глава написана весьма подробно и убедительно, демонстрируя глубокое понимание автором всей сложности проблемы и его непосредственное участие в ее решении.

Автор владеет всеми основными современными экспериментальными методиками управления состояния атомного облака. Схема испарительного охлаждения реализована для достаточно большого количества атомов (до $5 \cdot 10^5$) при высокой плотности (до 10^{13} см^{-3}). Контроль межатомного взаимодействия с помощью изменения магнитного поля и резонанса Фешбаха, влияющего на длину рассеяния и эффективный потенциал взаимодействия позволяет трансформировать систему в состояние идеального Ферми-газа.

Третья глава диссертации посвящена проблеме приготовления двумерной структуры, интерпретируемой автором как управление «кинематической размерностью» вырожденного атомного газа. Исключения продольной степени свободы в движении атомов можно добиться созданием связывающего потенциала в стоячей волне излучений двух CO₂ лазеров, распространяющихся во встречном направлении.

Автором подробно разбираются критерии двумерности и вырожденности фермионного газа и соответствие с результатами других экспериментальных групп, работающих в этом направлении. Обратим внимание, что у автора есть приоритетные результаты в этой области.

В четвертой главе диссертации описывается методика измерения параметров атомной ловушки с помощью метода параметрического резонанса. В эту стандартную методику измерений автором вносится ряд улучшений. В основе лежит математическое моделирование задачи движения частицы в гауссовом потенциале, предполагающее резонансный переход атомов в первое возбужденное состояние в связывающем потенциале и их свободное движение в поперечном направлении. Это позволило добиться измерения параметров потенциальной ямы с высокой точностью, что, безусловно, важно для детальной характеристики полученного квантового состояния.

В пятой главе автором рассматривается оптическая диагностика полученного двумерного квантового состояния фермионной системы. Это необходимо как для определения параметров состояния с помощью оптической диагностики, так и для выяснения физических эффектов, сопровождающих взаимодействие со светом коллективной

квантовой системы. Авторами проводится рассмотрение этой проблемы в самосогласованной схеме расчета, использующей в своей основе известный закон Бера-Бугера-Ламберта. Анализ экспериментальных результатов показал явное отклонение от подобного описания уже при относительно невысоких плотностях. Автор связывает эти отклонения с существованием коллективных и кооперативных эффектов в процессе рассеяния света.

Шестая глава посвящена измерению ключевого параметра – температуры приготовленного двумерного фермионного газа. Измерения выполнены с помощью традиционных методик и результаты этой главы, важные в контексте полноты описания, не связаны с защищаемыми положениями.

Наиболее интересными и значимыми новыми результатами, полученными в работе, являются следующие:

1. Впервые в России создана экспериментальная установка по приготовлению квантово-вырожденного атомного газа. Достигнута рекордная для страны температура охлаждения – 18 нК.
2. Впервые в мире приготовлен двумерный ферми-газ атомов. Реализованы методы управления такими параметрами этого газа, как плотность, межчастичное взаимодействие, температура, спиновый состав.
3. Разработан и реализован комплекс методов прецизионной диагностики состояния газа в оптических ловушках. В частности прямое измерение распределения плотности двумерного атомного газа проведено с разрешением порядка 1,1 мкм.

Результаты, полученные в диссертации, **надежно обоснованы**. Их **достоверность** обусловлена использованием современных экспериментальных методов исследования и проведением ряда необходимых контрольных измерений. В работе проводится сравнение полученных данных с предсказаниями имеющихся, а также специально выполненных автором детальных теоретических оценок. Проводится сравнение с результатами проведенных ранее экспериментов.

Теоретическая и практическая значимость представленной диссертационной работы обусловлена тем, что эксперименты с ультрахолодными газами являются в настоящее время одним из инструментов поиска новых квантовых явлений и проверки идей, касающихся квантовых систем исследуемых в других областях физики – физике твердого тела, физике элементарных частиц, ядерной физике и т.п. Особую значимость результаты работы имеют для проверки теорий высокотемпературной сверхпроводимости. Созданная в процессе выполнения работ установка позволяет проводить эксперименты как с ферми-, так и с бозе-газами. Разработанные методы охлаждения для систем с различной кинематической размерностью могут быть использованы не только для атомов лития, но и для других газов. Широкой универсальностью обладают также развитые методы диагностики ультрахолодных атомных ансамблей.

По диссертации имеются следующие пожелания и замечания.

- 1) Материал изложен методически очень хорошо. Есть пожелание подготовить и издать на этой основе методическое пособие по схемам охлаждения и диагностики атомных систем при сверхнизких температурах.

- 2) На стр. 71 приведена формула (3.11) для распределения плотности фермионного газа. Формула получена интегрированием распределения Ферми-Дирака, содержащей одновременно зависимость от координаты (через потенциал) и импульса (через энергию), т. е. являющимся по предположению Вигнеровским распределением квазивероятности. Это обстоятельство нигде не объясняется и никак не комментируется. Но оно не является столь самоочевидным и требует определенных пояснений.
- 3) Учет эффектов вырождения в канале рассеяния света вперед является определенной проблемой для автора. Основные результаты пятой главы не должны быть поставлены под сомнение. Однако описание рассеяния света в духе одночастичного приближения с некоторой феноменологической коррекцией, учитывающей коллективные эффекты, не выглядит вполне убедительным. Из поведения родственных систем таких, например, как конденсат Бозе-Эйнштейна известно, что механизм кооперативного рассеяния весьма нетривиален и приводит к пространственной фрагментации, появлению выделенных каналов когерентного рассеяния и т. п.

Сделанные замечания никоим образом не влияют на общую, безусловно, положительную оценку выполненной работы и не ставят под сомнение выводы диссертации. Результаты работы Махалова В.Б. имеют высокую научную ценность. Материалы диссертации могут быть использованы следующими организациями: МГУ им. М.В. Ломоносова, ФТИ им. А.Ф. Иоффе, ГОИ им. С.И. Вавилова, Институте лазерной физики СО РАН. Диссертация написана ясным языком и четко структурирована. Автореферат правильно отражает ее содержание. Основные результаты опубликованы в открытой печати в ведущих отечественных и зарубежных журналах.

Работа удовлетворяет требованиям п.9 Положения (№842 от 24.09.2013), а ее автор **Махалов Василий Борисович** заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.21 – лазерная физика.

Отзыв составлен профессором, доктором физ.-мат. наук И.М.Соколовым и заведующим кафедрой Теоретической физики СПбПУ Д.В.Куприяновым. Отзыв рассмотрен и утвержден на заседании кафедры Теоретической физики Санкт-Петербургского политехнического университета (протокол №5 от 19 февраля 2015 г.).

Результаты голосования : за – 11 человек, против – 0 человек.

Проф. кафедры Теоретической физики» СПбПУ
д.ф.-м.н. И.М. Соколов

Зав. кафедрой Теоретической физики» СПбПУ
д.ф.-м.н. Д.В. Куприянов

Подпись *И.М. Соколов*

УДОСТОВЕРЯЮ

Ведущий специалист
по кадрам. *Д.В. Куприянов*

«25» 02 2015 г.

