

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации**  
**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ**  
**ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ**  
**СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**  
**(ИАиЭ СО РАН)**

УДК 535.33/34: 621.373.826  
№ гос. Регистрации  
AAAA-A17-117052210003-4  
Инв. №

**УТВЕРЖДАЮ**  
Директор Института  
чл.-корр. РАН

\_\_\_\_\_ С.А. Бабин  
« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2020 г.

**ОТЧЕТ**  
**О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ**

**Нелинейные и когерентные оптические явления в атомах и их конденсатах при  
внешнем воздействии (статические поля, межатомные столкновения,  
взаимодействие с поверхностью)**  
(заключительный)

Номер проекта 0319-2019-0002

Приоритетное направление П.10 Актуальные проблемы оптики и лазерной физики, в том числе достижение предельных концентраций мощности и энергии во времени, пространстве и спектральном диапазоне, освоение новых диапазонов спектра, спектроскопия сверхвысокого разрешения и стандарты частоты, прецизионные оптические измерения, проблемы квантовой и атомной оптики, взаимодействие излучения с веществом

Программа ФНИ СО РАН П.10.2. Фундаментальные проблемы взаимодействия лазерного излучения с однородными и структурированными средами, проект П.10.2.2.

Протокол Ученого совета ИАиЭ СО РАН  
№ 20-12 от «15» декабря 2020 г.

Руководитель проекта  
академик

\_\_\_\_\_  
(подпись)

А.М. Шалагин

Новосибирск 2020

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель работы, академик	<hr/> <i>(подпись)</i>	А.М. Шалагин (реферат, введение, заключение, приложения, разделы 1, 4)
Ответственный исполнитель, г.н.с., д.ф.-м.н.	<hr/> <i>(подпись)</i>	П.Л. Чаповский (разделы 1,3)
Ответственный исполнитель, в.н.с., д.ф.-м.н.	<hr/> <i>(подпись)</i>	Л.В. Ильичев (разделы 1,2)
Ответственный исполнитель, в.н.с., д.ф.-м.н.	<hr/> <i>(подпись)</i>	К.А. Насыров (разделы 1, 5)
Ответственный исполнитель, в.н.с., д.ф.-м.н.	<hr/> <i>(подпись)</i>	А.И. Пархоменко (разделы 1,4)
Ответственный исполнитель, в.н.с., к.ф.-м.н.	<hr/> <i>(подпись)</i>	Э.Г. Сапрыкин (раздел 1)
Исполнители:		
Н.с., к.ф.-м.н.	<hr/> <i>(подпись)</i>	В.А. Томилин (разделы 1,2)
Аспирант	<hr/> <i>(подпись)</i>	А.М. Ростом (раздел 2)
Инженер-электроник	<hr/> <i>(подпись)</i>	А.Г. Каракоцкий (раздел 3)
Старший инженер- программист	<hr/> <i>(подпись)</i>	Е.В. Ильичева (оформление)

## РЕФЕРАТ

Всего 28 с., 11 рис., 9 источников, 2 прил.

БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНОВСКИЙ КОНДЕНСАТ, НЕЛИНЕЙНЫЕ И КОГЕРЕНТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ, РЕЗОНАНСНАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ, НЕЛИНЕЙНЫЕ РЕЗОНАНСЫ, МАГНИТООПТИЧЕСКИЕ РЕЗОНАНСЫ, СВЕТОИНДУЦИРОВАННЫЙ ДРЕЙФ, ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫЕ ЗВЕЗДЫ, ГЕОМЕТРИЧЕСКАЯ ФАЗА, БОЗЕ-ЭЙНШТЕЙНОВСКИЙ КОНДЕНСАТ, РЕЗОНАНСНАЯ ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯ.

### **Объект исследования**

В работе изучались важные стороны проявления взаимодействия излучения с отдельными частицами и коллективом частиц газа.

### **Цель работы**

Целью работы являлось получение новых знаний по следующим актуальным проблемам:

1. Бозе-Эйнштейновский конденсат и ультрахолодные атомы в двухъямных потенциалах.
2. Анализ влияния столкновений на нелинейные оптические процессы и тестирование на этой основе потенциалов взаимодействия сталкивающихся атомов.
3. Когерентные эффекты при нелинейном взаимодействии излучения с атомами и их изотопами в газе и вблизи материальных тел.
4. Исследование транзиторных эффектов в спектрах щелочных металлов в оптических ячейках с антирелаксирующим покрытием высокого качества.

### **Полученные результаты**

По обозначенным проблемам за период 2017– 2020 гг. получены следующие важнейшие результаты:

1. Показано, что оптическая ловушка для атомарного конденсата, сформированная модой кольцевого резонатора, обладает специфическими свойствами. Они отсутствуют в ловушке, образованной свободными пучками, и обусловлены возникновением квантовых корреляций (зацепленности) между локализованными атомами и фотонной модой.

Операционное определение геометрической фазы в открытых квантовых системах обобщено на квантовую физику с симметрией прошлого и будущего. Использована модификация квантового формализма применительно к системам с пред- и пост-селекцией состояний.

Предложен эффективный способ интерферометрического контроля атомарного конденсата с помощью когерентной обратной связи (т.е. обратной связи, не основанной на измерениях).

Созданы двухъямные оптические потенциалы на основе акустооптических модуляторов, управляемых цифровыми синтезаторами радиочастот. Выполнены плановые работы по созданию автономной оптической системы дипольной оптической ловушки для атомов рубидия. Оптическая ловушка использует лазерное излучение с мощностью до 0.5 Вт и длиной волны 960 нм.

2. Теоретически исследованы спектральные особенности скорости светоиндуцированного дрейфа (СИД) атомов лития, находящихся в буферном газе неоне и в смеси буферных газов Ne + Ar.

Исследован эффект сужения линии поглощения легких атомов щелочных металлов  $7\text{Li}$  и  $23\text{Na}$ , находящихся в атмосфере тяжелого инертного газа Xe, при росте интенсивности внешнего излучения.

Теоретически исследовано влияние столкновений на спектр резонансной флуоресценции трехуровневых атомов с V-конфигурацией уровней при возбуждении двумя монохроматическими резонансными полями.

3. В процессе исследования проявлений аномальных изотопических резонансов (ОМРПЧ) обнаружено, что при изменении знака изотопического сдвига (ИС) резонансы ОМРПЧ изменяют знак при сохранении их положения в шкале магнитного поля.

Объяснены результаты экспериментов по выявлению парного эффекта Дике при наличии магнитного поля, изменяющего частоты изотопических атомов коррелирующей пары.

4. Проведены эксперименты, в которых лазерным излучением сканировался частотный спектр D1 линии естественной смеси паров Rb 85 и Rb 87 в вакуумной ячейке с парафиновым покрытием внутренних стенок. Скорость сканирования варьировалась от 1 Hz до 60 Hz. Были объяснены особенности в соотношениях пиков D1 линии в зависимости от скорости сканирования и направления изменения частоты лазера и связь со скоростью релаксации ядерного спина. По поведению спектра атомов в зависимости от скорости сканирования частоты лазера можно судить о качестве антирелаксирующего покрытия ячейки.

Полученные результаты являются новыми и расширяют сложившиеся представления о взаимодействии излучения с газовыми системами, а также о конкретных его проявлениях. К важнейшему можно отнести результат, представленный в п.1.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	6
1. Основные результаты, полученные по этапам 2017-2019 годов .....	9
2. Теоретическое исследование способа контроля делокализованного атомарного конденсата в комбинированной схеме когерентной обратной связи и обратной связи, основанной на измерениях. Теоретическое исследование схемы трансформирования состояния делокализованного атомарного конденсата однофотонным интерферометрическим зондированием с пост-селекцией .....	14
3. Реализация оптической дипольной ловушки для холодных атомов рубидия .....	17
4. Теоретическое исследование влияния столкновений на спектр резонансной флуоресценции возбуждаемых двумя монохроматическими полями трехуровневых атомов с V-конфигурацией уровней. ....	20
5. Исследование влияния направления и скорости сканирования частоты лазерного излучения на спектр резонансного поглощения паров щелочных металлов в ячейках с антирелаксационным покрытием в присутствии магнитного поля .....	23
Заключение .....	24
Приложение А. Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2020 г. в соответствии с государственным заданием, количественные показатели по публикациям по проекту в целом .....	26
Приложение Б. Копия плана НИР на 2020 г. по проекту .....	27

## ВВЕДЕНИЕ

Исследование нелинейных и когерентных явлений при резонансном взаимодействии световых полей с атомами и молекулами газа, несмотря на давнюю историю, остается актуальным и в настоящее время. При этом обнаруживаются новые явления, проливающие свет на физические процессы в атомах и создающие предпосылки для создания и усовершенствования прецизионных технических устройств.

Атомарный конденсат Бозе-Эйнштейна (БЭК) является протяжённой макроскопической квантовой системой с пространственной когерентностью, проявляющейся напрямую в интерференции атомов из разных областей конденсата. Объяснение феномена интерференции опирается на понятие фазы. Таким образом, важным является контроль фазовых соотношений между различными областями конденсата как его главной уникальной специфики, лежащей в основе перспективных технологических и метрологических применений. В настоящее время получила достаточное развитие технология создания конденсата, локализованного в нескольких минимумах оптического потенциала. Макроскопическая когерентность проявляется в особенностях туннелирования атомов между различными локализациями. Эффективным инструментом модификации свойств когерентности между фрагментами единого конденсата может служить тот или иной механизм генерации геометрической фазы. Общее понятие геометрической (топологической) фазы для квантовых систем сформировалось в работах Панчаратнама и Берри. Это чисто кинематический эффект, определяемый формой траектории в пространстве состояний при эволюции квантовой системы и обнаруженный к настоящему времени в различных системах квантовой оптики, молекулярной физики и физики конденсированного состояния. Исследования геометрической фазы в ВЕС находятся на самом начальном этапе.

В ИАиЭ СО РАН имеется существенный задел для экспериментальных исследований на основе ультрахолодных атомов. В Институте создана первая в России установка для получения бозе-эйнштейновских конденсатов разреженных газов (П.Л. Чаповский, Письма в ЖЭТФ, 2012). В ИАиЭ СО РАН выполнены экспериментальные и теоретические исследования взаимодействия конденсированной и неконденсированной фракций в вырожденном бозе-газе при конечных температурах. В Институте получен ряд других теоретических результатов по исследованию конденсата Бозе-Эйнштейна атомов рубидия.

В последнее десятилетие все чаще стали появляться в литературе данные расчета потенциалов взаимодействия возбужденных атомов и ионов с различными буферными

частицами. Наиболее чувствительный метод тестирования таких потенциалов основан на эффекте светоиндуцированного дрейфа (СИД). С его помощью измеряется относительное изменение транспортной частоты столкновений в основном и возбужденном состоянии атома. Наибольшая чувствительность к потенциалу взаимодействия проявляется в условиях так называемого аномального СИД. Эти условия можно создавать искусственно, варьируя набор буферных газов в эффекте СИД. Таким образом, анализ аномального СИД для разных потенциалов взаимодействия, взятых из литературных данных, дает основу для их тестирования. При этом расчет эффекта СИД для возбужденных ионов на основе новых данных о потенциалах взаимодействия важно для решения проблем сепарации элементов и их изотопов в атмосферах химически пекулярных звезд.

Исследование спектра резонансной флуоресценции, возбуждаемой интенсивным лазерным излучением, до сих пор является актуальной задачей. Она решена в простейшей двухуровневой системе с невырожденными уровнями (хорошо известный триплет Моллоу). Однако реальные уровни атомов вырождены по проекциям углового момента и при экспериментальных исследованиях, в особенности при варьировании поляризаций возбуждающего излучения и спонтанно испущенного, мы получаем эффективно многоуровневую задачу, где сильное излучение поглощается на смежных переходах. Поставленная нами задача о резонансной флуоресценции в трехуровневой V-системе с двумя сильными полями есть одна из возможных реализаций эксперимента.

В ИАиЭ СО РАН ряд лет назад обнаружены и до настоящего времени исследуются когерентные явления в спонтанном излучении пространственно разнесенных, изотопически разных атомов в условиях газового разряда. Это явление совершенно необычное и имеет российский приоритет (ИАиЭ СО РАН). Окончательной ясности в существовании явления пока не достигнуто. Поскольку эффект довольно яркий и проявляется отчетливо, продолжение исследований представляется целесообразным. В настоящем проекте предложены некоторые правдоподобные объяснения наблюдаемых эффектов.

В кооперации с болгарскими экспериментаторами в ИАиЭ СО РАН уже ряд лет проводятся систематические исследования магнитооптических явлений в парах щелочных металлов, помещенных в ячейку со специальной обработкой поверхности (антирелаксационные покрытия). Наблюдаемые магнитооптические резонансы, как оказывается, весьма чувствительны к качеству антирелаксационного покрытия, поскольку от этого качества зависит время жизни когерентности, наведенной между сверхтонкими компонентами энергетических уровней атома. В нашем Институте успешно осуществляется теоретическое сопровождение болгарских экспериментов.

## **План работ по годам.**

### **Блок 1. Бозе-Эйнштейновский конденсат и ультрахолодные атомы в двухъямных потенциалах.**

2017 г.: *Исследование взаимодействия атомарного конденсата в одном из минимумов двухъямного потенциала с квантованной оптической модой кольцевого резонатора.*

2018 г.: *Теоретическое и экспериментальное исследование состояний бозе-эйнштейновских конденсатов в двухъямных оптических потенциалах.*

2019 г.: *Теоретическое и экспериментальное исследование состояний бозе-эйнштейновских конденсатов в оптических потенциалах сложной контролируемой формы.*

2020 г.: *Теоретическое исследование способа контроля делокализованного атомарного конденсата в комбинированной схеме когерентной обратной связи и обратной связи, основанной на измерениях. Теоретическое исследование схемы трансформирования состояния делокализованного атомарного конденсата однофотонным интерферометрическим зондированием с пост-селекцией.*

*Реализация оптической дипольной ловушки для холодных атомов рубидия.*

### **Блок 2. Анализ влияния столкновений на нелинейные оптические процессы и тестирование на этой основе потенциалов взаимодействия сталкивающихся атомов.**

2017 г.: *Расчет формы линии аномального светоиндуцированного дрейфа (СИД) для атомов Li, находящихся в атмосфере инертного буферного газа Ne, на основе нескольких известных (вычисленных ab initio) межатомных потенциалов взаимодействия.*

2018 г.: *Расчет формы линии аномального светоиндуцированного дрейфа (СИД) для атомов Li, находящихся в бинарной смеси буферных инертных газов Ne+Ar, на основе нескольких известных (вычисленных ab initio) межатомных потенциалов взаимодействия.*

2019 г.: *Теоретическое исследование формы линии поглощения легких атомов щелочных металлов, находящихся в атмосфере тяжелых инертных буферных газов.*

2020 г.: *Теоретическое исследование влияния столкновений на спектр резонансной флуоресценции возбуждаемых двумя монохроматическими полями трехуровневых атомов с V-конфигурацией уровней.*

### **Блок 3. Когерентные эффекты при нелинейном взаимодействии излучения с атомами и их изотопами в газе и вблизи материальных тел.**

2017 г.: *Исследование проявлений аномальных изотопических резонансов в неоне при поглощении излучения видимого диапазона.*

*Теоретическое исследование флуоресценции атома вблизи наночастицы при возбуждении поляризованным светом.*

2018 г.: *Исследование изменений формы эмиссионных изотопических резонансов в неоне при изменении условий опытов и аномального поведения коэффициентов поглощения изотопов при изменении их относительного содержания в смеси.*

2019 г.: *Экспериментальное исследование специфики проявления парного эффекта Дике в опытах с магнитным полем, изменяющим частоты атомов коррелирующей пары.*

### **Блок 4. Исследование транзиторных эффектов в спектрах щелочных металлов в оптических ячейках с антирелаксирующим покрытием высокого качества.**

2017 г.: *Исследование транзиторных эффектов в смеси паров Rb 85 и Rb 87 в оптических ячейках с антирелаксирующим покрытием высокого качества.*



2018 г.: *Исследование влияния слабого магнитного поля на оптической накачку по зеемановским подуровням и по сверхтонкой структуре щелочных металлов в ячейках с покрытием.*

2019 г.: *Исследование влияния скорости сканирования частоты лазера на спектр щелочных металлов в ячейках с антирелаксирующим покрытием.*

2020 г.: *Исследование влияния направления и скорости сканирования частоты лазерного излучения на спектр резонансного поглощения паров щелочных металлов в ячейках с антирелаксационным покрытием в присутствии магнитного поля.*

## **1. Основные результаты, полученные по этапам 2017-2019 годов**

### Отчет НИР 2017 г.:

#### ***Исследование взаимодействия атомарного конденсата в одном из минимумов двухъямного потенциала с квантованной оптической модой кольцевого резонатора.***

Показано, что оптическая ловушка для атомарного конденсата, сформированная модой кольцевого резонатора, обладает специфическими свойствами. Они отсутствуют в ловушке, образованной свободными пучками, и обусловлены возникновением квантовых корреляций (зацепленности) между локализованными атомами и фотонной модой. В частности, имеет место эффект, близкий к известному оптомеханическому явлению “оптической пружины” (S. Martellucci et al., Bose-Einstein Condensates and Atom Lasers, Kluwer Acad. Publ. (2002)) и проявляющийся через возникновение эффективной добавки к межатомному взаимодействию локализованных атомов. Значением и знаком этой добавки можно управлять, варьируя частоту источника излучения, формирующего ловушку.

В 2017 году для контроля межатомного взаимодействия в бозе-конденсате предложено использовать оптические пучки, формирующие атомарную ловушку. В модели бозе-конденсата в двухъямном оптическом потенциале показано, что нерезонансное квантованное излучение имитирует изменение межатомного взаимодействия в яме. Величиной и знаком этого изменения можно эффективно управлять, варьируя частоту источника излучения, формирующего ловушку

#### ***Расчет формы линии аномального светоиндуцированного дрейфа (СИД) для атомов Li, находящихся в атмосфере инертного буферного газа Ne, на основе нескольких известных (вычисленных ab initio) межатомных потенциалов взаимодействия.***

На основе четырех известных неэмпирических (вычисленных ab initio) межатомных потенциалов взаимодействия для системы сталкивающихся частиц Li-Ne теоретически исследованы спектральные особенности скорости светоиндуцированного дрейфа (СИД) атомов лития, находящихся в буферном газе неоне. Расчеты с использованием каждого из четырех потенциалов взаимодействия предсказывают

сильную зависимость от температуры спектральной формы сигнала СИД атомов Li в атмосфере Ne в различных интервалах температур. Полученные результаты дают возможность высокоточного тестирования межатомных потенциалов взаимодействия в экспериментах по аномальному СИД.

***Исследование проявлений аномальных изотопических резонансов в неоне при поглощении излучения видимого диапазона.***

В процессе исследования проявлений аномальных изотопических резонансов (ОМРПЧ) обнаружено, что при изменении знака изотопического сдвига (ИС) резонансы ОМРПЧ изменяют знак при сохранении их положения в шкале магнитного поля. Это проливает свет на природу аномальных резонансов, согласующуюся с моделью их порождения при интерференции реактивных компонент полей ближних зон излучения пространственно разнесенных изотопических атомов.

***Теоретическое исследование флуоресценции атома вблизи наночастицы при возбуждении поляризованным светом.***

Теоретически исследована флуоресценция света атомом с вырожденными состояниями вблизи наночастицы. Предполагалось, что атом возбуждается импульсом света со средней частотой вблизи резонансной частоты оптического перехода атома и с шириной спектра, существенно большей обратных времен жизни комбинирующих уровней (с учетом присутствия наночастицы) и намного меньшей ширины плазмонных резонансов. Получена поляризационная матрица (в сферическом базисе) света флуоресценции, регистрируемого в заданном направлении.

***Исследование транзиторных эффектов в смеси паров Rb 85 и Rb 87 в оптических ячейках с антирелаксирующим покрытием высокого качества.***

Проведены эксперименты, в которых лазерным излучением сканировался частотный спектр D1 линии естественной смеси паров Rb 85 и Rb 87 в вакуумной ячейке с парафиновым покрытием внутренних стенок. Скорость сканирования варьировалась от 1 Hz до 60 Hz. Магнитное поле не экранировалось и соответствовало магнитному полю Земли. Главное внимание уделялось поведению пиков D1 линии Rb 85. Объяснены особенности в соотношениях пиков D1 линии в зависимости от скорости сканирования и направления изменения частоты лазера и связь со скоростью релаксации ядерного спина. Экспериментальные и теоретические результаты находятся в хорошем согласии.

**Отчет НИР 2018 г.:**

***Теоретическое и экспериментальное исследование состояний бозе-эйнштейновских конденсатов в двухъямных оптических потенциалах.***

Рассмотрен новый процесс генерации геометрической фазы в атомарном конденсате Бозе-Эйнштейна путём переноса на него оптической геометрической фазы. Квантовая система состоит из двух локализованных мод конденсата и квантованной моды кольцевого резонатора, формирующей потенциал ловушки для одной из атомарных мод. Оптическая мода контролируется внешним гармоническим источником и необратимой потерей фотонов из резонатора. Возникающее совместное состояние атомов и оптического поля оказывается зацепленным. Именно зацепленность является каналом, позволяющим переносить на атомарную моду геометрическую фазу из оптической моды.

Созданы двухъямные оптические потенциалы на основе акустооптических модуляторов, управляемых цифровыми синтезаторами радиочастот. Для создания оптических потенциалов использовано излучения лазера с длиной волны 960 нм, радиус перетяжки в фокусе светового пучка составляет 4 микрона, фокусное расстояние линзы – 60 мм.

***Расчет формы линии аномального светоиндуцированного дрейфа (СИД) для атомов Li, находящихся в бинарной смеси буферных инертных газов Ne+Ar, на основе нескольких известных (вычисленных ab initio) межатомных потенциалов взаимодействия.***

На основе пяти различных неэмпирических (вычисленных ab initio) потенциалов взаимодействия для пар сталкивающихся частиц Li - Ne и трех различных потенциалов взаимодействия для пар сталкивающихся частиц Li – Ar теоретически исследованы спектральные особенности скорости светоиндуцированного дрейфа (СИД) атомов Li, находящихся в буферном газе Ne и в буферной смеси газов Ne + Ar. Оказалось, что добавлением к Ne небольшой доли (примерно 10%) Ar можно перейти от нормального СИД к аномальному и тем самым радикально повысить чувствительность формы линии СИД атомов Li к различию этих потенциалов взаимодействия.

***Исследование изменений формы эмиссионных изотопических резонансов в неоне при изменении условий опытов и аномального поведение коэффициентов поглощения изотопов при изменении их относительного содержания в смеси.***

С использованием модели пары движущихся друг относительно друга волновых излучателей с круговой диаграммой направленности в основных чертах описана форма квадратурных оптикомагнитных резонансов, порождаемых нестационарной интерференцией реактивных квазистатических полей перекрывающихся ближних зон излучения пары движущихся изотопических атомов.

***Исследование влияния слабого магнитного поля на оптической накачку по зеемановским подуровням и по сверхтонкой структуре щелочных металлов в ячейках с покрытием.***

Исследованы особенности спектра щелочных металлов на примере D1 линии Rb<sup>85</sup> в ячейке с антирелаксирующим покрытием при разной скорости сканирования частоты лазера. Экспериментально было обнаружено, что вид спектра (относительные амплитуды пиков резонансов) существенно зависит от скорости и направления сканирования. Построена теоретическая картина, объясняющая это явление. В основе лежит соотношение скорости сканирования и времени релаксации атомов по внутренним состояниям, которое становится макроскопическим при высоком качестве антирелаксирующего покрытия. Численное моделирование подтвердило наблюдаемые в эксперименте эффекты.

**Отчет НИР 2019 г.:**

***Теоретическое и экспериментальное исследование состояний бозе-эйнштейновских конденсатов в оптических потенциалах сложной контролируемой формы.***

Операционное определение геометрической фазы в открытых квантовых системах обобщено на квантовую физику с симметрией прошлого и будущего. Использована модификация квантового формализма применительно к системам с пред- и пост-селекцией состояний. Для рассмотрения используется интерферометр Маха-Цандера с селекцией входного и выходного состояний и измерением в одном из плеч. В другом плече вносится контролируемый фазовый сдвиг. Показано, что в условиях пост-селекции возникает интерференция исходов измерений. В сдвиге этой интерференционной картины проявляется инвариантный геометрический фактор – геометрическая фаза. Аналогичный эффект имеет место без интерферометра Маха-Цандера, но с парой кубитов в зацепленном состоянии. Работа сделана в контексте задуманного исследования возможных путей воздействия на атомарный бозе-эйнштейновский конденсат через оптическую геометрическую фазу.

Разработана автономная оптическая система дипольной ловушки для ультрахолодных атомов. Система использует длиннофокусный объектив (фокусное расстояние 60 мм) и обеспечивает фокусировку лазерного излучения с радиусом пучка в перетяжке менее 4.7 микрона (по уровню  $1/e^2$ ).

***Теоретическое исследование формы линии поглощения легких атомов щелочных металлов, находящихся в атмосфере тяжелых инертных буферных газов.***

Исследован эффект сужения линии поглощения легких атомов щелочных металлов  ${}^7\text{Li}$  и  ${}^{23}\text{Na}$ , находящихся в атмосфере тяжелого инертного газа  $\text{Xe}$ , при росте интенсивности внешнего излучения. Для атомов  ${}^7\text{Li}$  при температуре  $T = 300 \text{ K}$  и давлении буферного газа ксенона  $p_{\text{Xe}} = 0.002 \text{ Torr}$  ширина линии на полувысоте уменьшается в 1.20 раза при росте интенсивности излучения от  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  до  $2.5 \text{ mW}/\text{cm}^2$ . Для атомов  ${}^{23}\text{Na}$  при  $T = 600 \text{ K}$  и  $p_{\text{Xe}} = 0.01 \text{ Torr}$  ширина линии на полувысоте уменьшается в 1.29 раза при росте интенсивности излучения от  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  до  $6 \text{ mW}/\text{cm}^2$ .

***Экспериментальное исследование специфики проявления парного эффекта Дике в опытах с магнитным полем, изменяющим частоты атомов коррелирующей пары.***

Исследованы результаты экспериментов по выявлению парного эффекта Дике при наличии магнитного поля, изменяющего частоты изотопических атомов коррелирующей пары. Выяснено, что в зависимости от расстояния между изотопами они образуют когерентную суперпозиционную пару, которая может находиться в сверхизлучательном или субизлучательном состояниях.

***Исследование влияния скорости сканирования частоты лазера на спектр щелочных металлов в ячейках с антирелаксирующим покрытием.***

На примере  $\text{Rb}$  экспериментально и теоретически изучена деформация спектра линии  $D_1$  в ячейке с антирелаксирующим покрытием в зависимости от скорости сканирования частоты лазера. Выяснилось, что при высоких скоростях сканирования деформация пиков спектра обусловлена тем, что после прямого прохода сканирования заселенности уровней  $\text{Rb}$  не успевает прийти к равновесию ко времени обратного хода сканирования. При низких частотах сканирования деформация пиков спектра обусловлена релаксационными процессами во время прохождения частоты лазера внутри самих пиков  $D_1$  линии. При этом нет взаимного влияния прямого и обратного направлений сканирования.

## **2. Теоретическое исследование способа контроля делокализованного атомарного конденсата в комбинированной схеме когерентной обратной связи и обратной связи, основанной на измерениях. Теоретическое исследование схемы трансформирования состояния делокализованного атомарного конденсата однофотонным интерферометрическим зондированием с пост-селекцией**

*Квантовая фаза для подпространств гильбертова пространства на примере явления когерентного пленения населённостей.*

Понятие геометрической фазы, приобретаемой квантовыми состояниями при эволюции, обобщено на геометрическую фазу эволюционирующих подпространств состояний квантовой системы. Физическая мотивация такого обобщения дается эффектом когерентного пленения населённости. При определенных условиях возникает двумерное подпространство в пространстве основных состояний атома, выводящее его из взаимодействия с излучением. Структура этого "темного" подпространства определяется локальной амплитудой поля излучения и варьируется вместе с ней. Обнаружена возможность обойти математические сложности нахождения необходимых характеристик "темного" подпространства путем вычисления аналогичных функций ортогонального "яркого" подпространства. Предложена экспериментальная процедура регистрации геометрической фазы «тёмного» подпространства. (Отражено в публикации [1]).

*Интерференция между актами пред- и пост-селекции. Применения в квантовой метрологии.*

Методы квантовой метрологии включают в себя искусственную генерацию редких событий, в которых находят концентрированное отражение параметры слабых измеряемых эффектов. Эти редкие события суть успешные акты надлежащей пред- и пост-селекции квантовых состояний. Известен эффект «усиления слабых значений», основанный на пред- и пост-селекции. В ходе запланированного на 2020 год исследования эффекта однофотонного зондирования делокализованного атомарного конденсата с последующей пост-селекцией обозначилось широкое направление с возможными приложениями в метрологии как альтернатива «усиления слабых значений». Для измерения тонких эффектов предлагается исследовать картину

интерференции, порождённой актами пред- и пост-селекции состояний квантовой системы. Был рассмотрен пример двух интерферометров Маха-Цандера, связанных общей средой с керровской нелинейностью (см. Рис.2.1). Пост-селекция фотонных состояний на выходе одного интерферометра и введение контролируемого фазового сдвига в одном из его плеч индуцирует интерференционные явления в статистике фоторегистраций на выходе второго интерферометра. Величиной параметра нелинейности определяется сдвиг, геометрическая фаза, и ширина структур картины интерференции. Исследованы ее основные черты в зависимости от величины керровской нелинейности и числа фотонов на входе в интерферометры. (Отражено в публикации [2]).

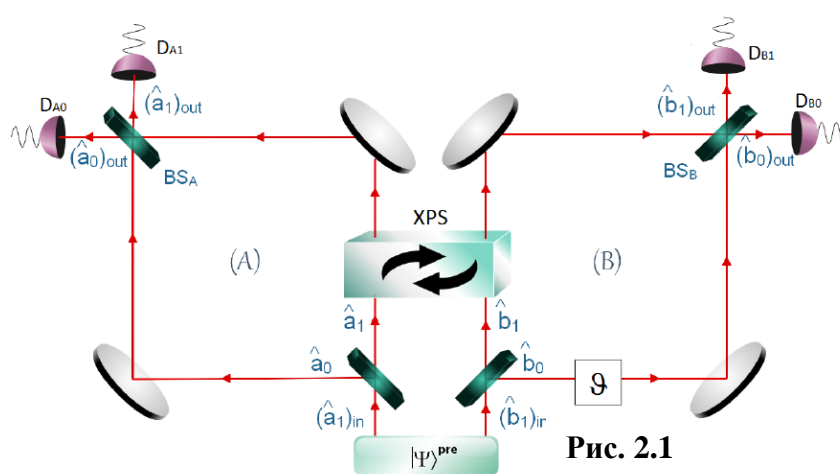


Рис. 2.1

**Точно решаемая модель обратной связи в квантовой оптике**

Рассмотрена задача о квантованной моде оптического излучения в неидеальном резонаторе с внешней накачкой в виде источника, рождающего пары фотонов, в цепи

квантовой обратной связи. Действие обратной связи инициируется актами детектирования фотонов, покинувших резонатор, и осуществляет скачкообразные переключения фазы поля в резонаторе (см. Рис.2.2). Найдено аналитическое выражение

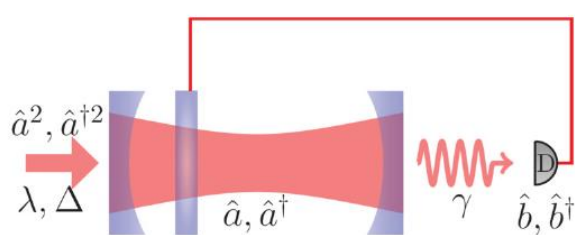
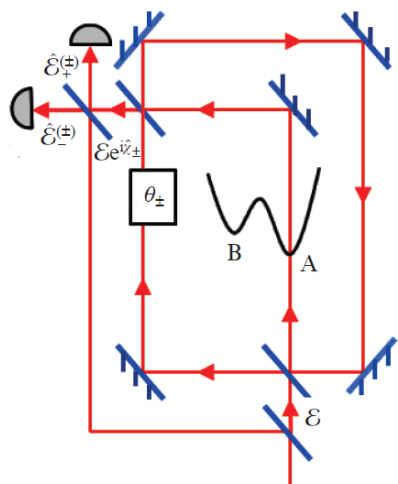


Рис. 2.2

для стационарного состояния такой системы и выражения для корреляционных функций поля первого порядка. Также рассчитаны спектры прошедшего излучения и проведено сравнение со

случаем отсутствия обратной связи. Показано, что введение обратной связи приводит к асимметрии спектра, а также эффективно увеличивает величину расщепления спектральных компонент. (Отражено в публикациях [3,4]).

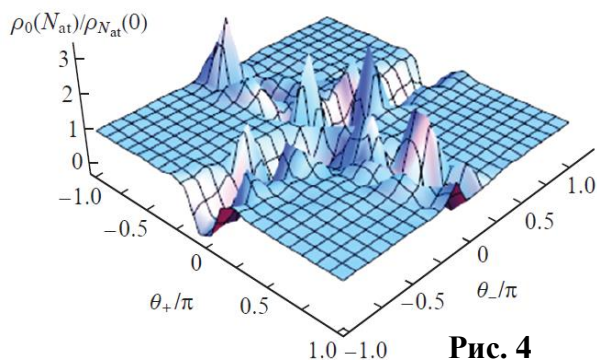


**Рис. 2.3**

### *Контроль атомарного конденсата в интерферометрической системе с когерентной обратной связью.*

Предсказан эффективный способ интерферометрического контроля атомарного конденсата с помощью когерентной обратной связи (т.е. обратной связи, не основанной на измерениях). Рассматривалась проблема декогеренции конденсата невзаимодействующих атомов в двухъямном потенциале при интерферометрическом зондировании с

классическим монохроматическим внешним полем. Конденсат находится в одном из пучков интерферометра Маха-Цендера, а часть излучения на выходе интерферометра возвращается на вход, тем самым замыкая цепь когерентной обратной связи. Рассматривалась и более общая схема, в которой конденсат помещается в систему интерферометров, вложенных друг в друга, а часть выходного излучения каждого из них также возвращается на свой вход, создавая многопетлевую обратную связь. В зависимости от сигнала на выходе интерферометра происходило переключение между



**Рис. 4**

двумя значениями фазового сдвига в пучке, не затрагивающем конденсат (см. Рис.2.3). Выбор значений этих фазовых сдвигов позволяет эффективно управлять стационарным распределением атомов между ямами (см. Рис.2.4). (Отражено в публикации [5]).

### *Дуальные формы принципов ЛС (локальной причинности) и NS (запрета на отправку сигналов)*

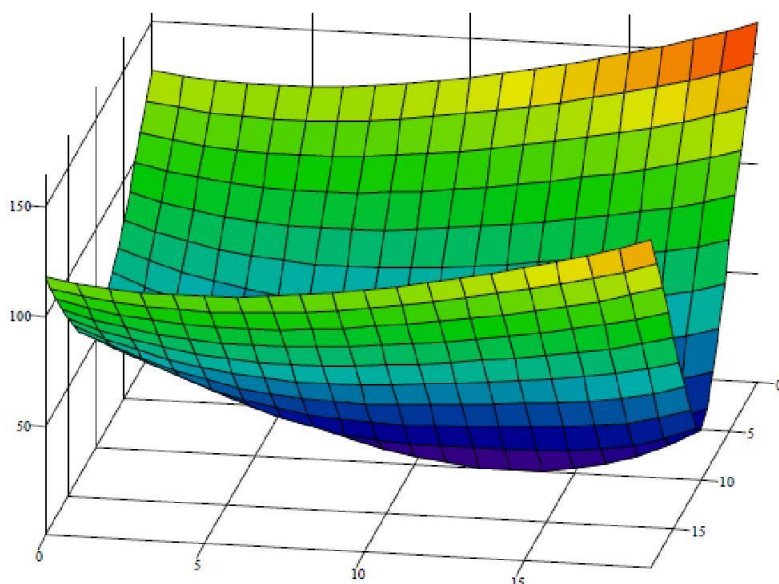
Важнейшие (мета)физические положения – принцип NS (запрет на отправку сигналов посредством физических корреляций) и ЛС (принцип локальной причинности, отделяющий корреляции классического типа от корреляций, демонстрирующих нелокальность) рассмотрены с точки зрения теории категорий. Исходные формулировки этих принципов имеют дело со свойствами совместного распределения вероятности исходов экспериментов, проводимых в двух различных пространственно-временных областях. Новые формы являются утверждениями о свойствах определённых коммутативных диаграмм. Каждому совместному распределению сопоставлена стрелка (морфизм) в этих диаграммах. Принцип ЛС превращается в утверждение о возможности



пропустить эту стрелку через некоторую стандартную, а принцип NS – в утверждении о единственности морфизма, превращающего определённую диаграмму с участием выбранного морфизма-распределения в коммутативную. Эти диаграммы оперируют монадой распределений – специальным эндифунктором в категории множеств. Сопоставляя пару присоединённых функторов монаде распределений, можно построить дуальные формы рассмотренных понятий. Если дуальность входит в число первостепенных свойств нашего Мира, дуальные формы принципов NS и LC должны найти в нем свое место. (Отражено в публикации [6]).

### 3. Реализация оптической дипольной ловушки для холодных атомов рубидия

Для выполнения экспериментальных исследований с ультрахолодными атомами рубидия в ИАиЭ СО РАН имеются следующие технологии и опыт. Магнитооптическая ловушка (MOT). Количество охлаждаемых атомов до  $3 \times 10^9$ , температура около 200 К. Магнитная ловушка и испарительное радиочастотное охлаждение позволяют получить до  $10^6$  атомов с температурой 100 наноК. Облако холодных атомов в магнитной ловушке имеет сигарообразную форму. Магнитный потенциал для атомов рубидия имеет вид вытянутой долины (Рис.3.1).

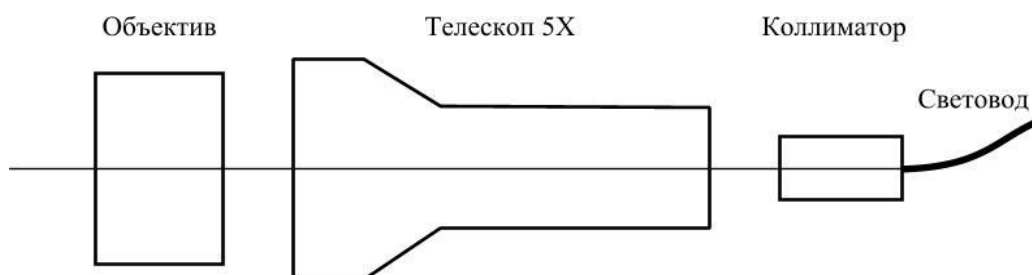


**Рис.3.1** Распределение магнитного поля в магнитной ловушке QUIC. По вертикальной оси указан модуль магнитного поля в Гс, расстояния в горизонтальной плоскости указаны в миллиметрах. Экспериментальные исследования с ультрахолодными атомами существенно зависят от возможностей удержания и манипуляции этими очень

хрупкими объектами. Лучшее что сейчас есть в арсенале – это оптические дипольные ловушки, образованные полями с большой красной отстройкой. Такие ловушки требуют использование сильных световых полей, поэтому требуют жесткую фокусировку

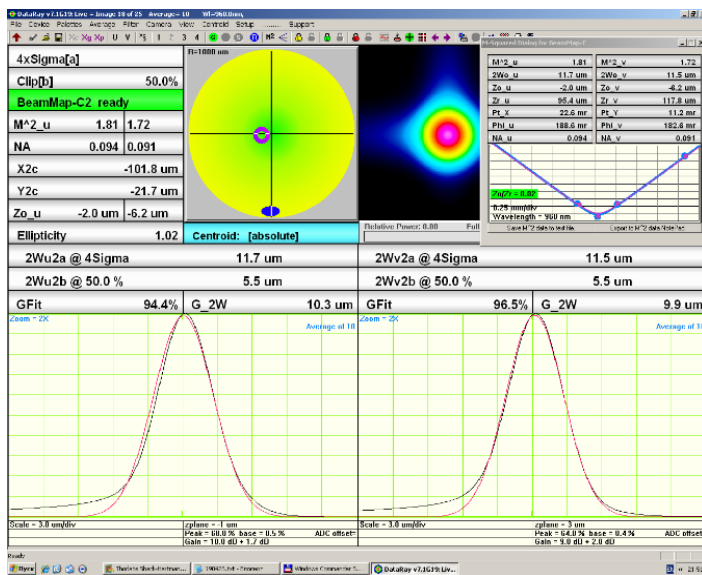
лазерного луча в пятно с радиусом в перетяжке всего несколько микрон. Обычно задача жесткой фокусировки решается в оптике с помощью короткофокусных объективов. Особенность нашей системы лазерного охлаждения атомов и создания БЭК такова, что все элементы оптической системы дипольной ловушки должны быть расположены снаружи высоковакуумной камеры. Это вынуждает использовать для фокусировки излучения длиннофокусные объективы. Минимальное допустимое рабочее расстояние объектива составляет 60 мм для нашей экспериментальной установки.

Достижение сильной фокусировки в системах с длиннофокусными объективами требует исключительно тщательной юстировки всех оптических элементов оптической системы при прецизионном контроле распределений интенсивности световых полей и их волновых фронтов. В ограниченном пространстве вблизи вакуумной камеры БЭК нет достаточно места громоздким юстировкам оптических элементов и средствам контроля распределения интенсивности полей и их волновых фронтов. Проблема решается в нашем подходе следующим способом. Создается оптическая система со всеми необходимыми юстировками и средствами контроля для осуществления их прецизионной юстировки. Затем, положения всех элементов будут зафиксированы на специальной платформе, что превратит оптическую систему в автономную систему без юстировок. Автономная система будет достаточно компактной для ее размещения вблизи камеры БЭК. Схема автономной оптической системы дипольной ловушки представлена на Рис. 3.2. В установке использован объектив АСА254-060-В, телескоп GBE05-В, коллиматор TC12FC-980 и одномодовый световод на 980 нм (длина 5 м), сохраняющий линейную поляризацию светового поля. Все использованные оптические элементы являются серийными продуктами фирмы Thorlabs, США.



**Рис.3. 2.** Схема автономной оптической системы дипольной ловушки.

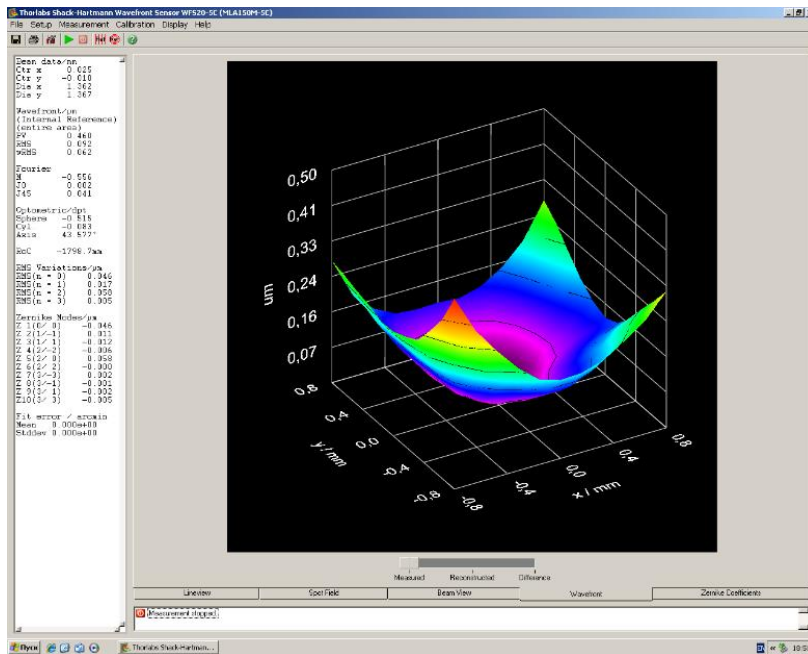
Измерение распределения интенсивности оптических полей в нашей установке осуществляется с помощью двухкоординатного профайлера BMS2-4XY фирмы DataRay, США. Профайлер имеет 4 вращающихся диска с узкими щелями и измеряет каустику сфокусированного гауссова пучка за время менее 1 сек. Пример измеренного распределения интенсивности светового поля в фокальной плоскости объектива приведен на Рис.3. 3.



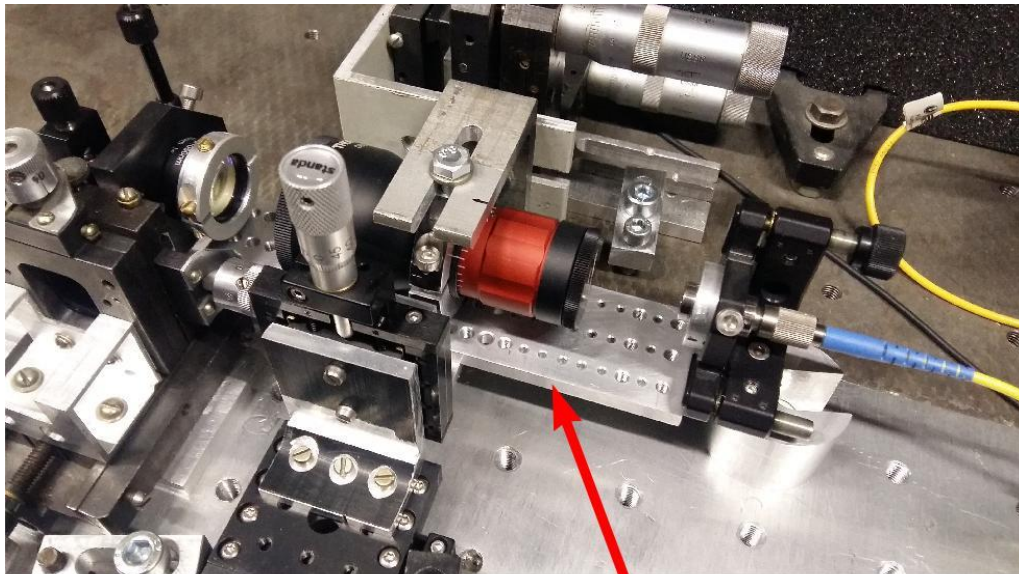
**Рис.3.3.** Распределение интенсивности лазерного пучка оптической ловушки в перетяжке в плоскости перпендикулярной оптической оси системы.

Измерение формы волновых фронтов выполняется в нашей системе с помощью датчика Шака-Гартмана, модель прибора WFS20-5C, фирма Thorlabs, США. Прибор измеряет форму волнового фронта оптической волны и осуществляет

разложение измеренной поверхности по полиномам Цернике. Это позволяет получить сведения об aberrациях оптических элементов дипольной ловушки. Пример измеренного волнового фронта приведен на Рис.3.4.



**Рис.3.4.** Волновой фронт светового пучка перед фокусирующим объективом. Слева указаны коэффициенты разложения волнового фронта по полиномам Цернике.



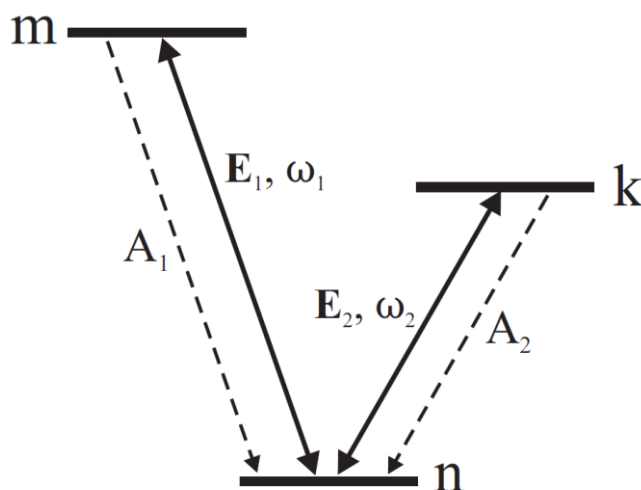
платформа

**Рис. 3. 5.** Технология создания автономной дипольной оптической ловушки.

На Рис.3.5 представлена оптическая система со всеми необходимыми юстировками и платформой, на которой оптические элементы должны быть в дальнейшем закреплены.

#### **4. Теоретическое исследование влияния столкновений на спектр резонансной флуоресценции возбуждаемых двумя монохроматическими полями трехуровневых атомов с V-конфигурацией уровней**

В настоящей работе теоретически исследован спектр резонансной флуоресценции движущихся трехуровневых атомов с V-конфигурацией уровней (Рис.4.1), находящихся в поле двух сильных монохроматических волн и испытывающих столкновения с атомами буферного газа. Анализ проведен в модели сильных столкновений (распределение атомов по скоростям после столкновения не зависит от значения скорости до столкновений) для общего случая произвольного изменения (от полного сбоя до полного сохранения) фаз



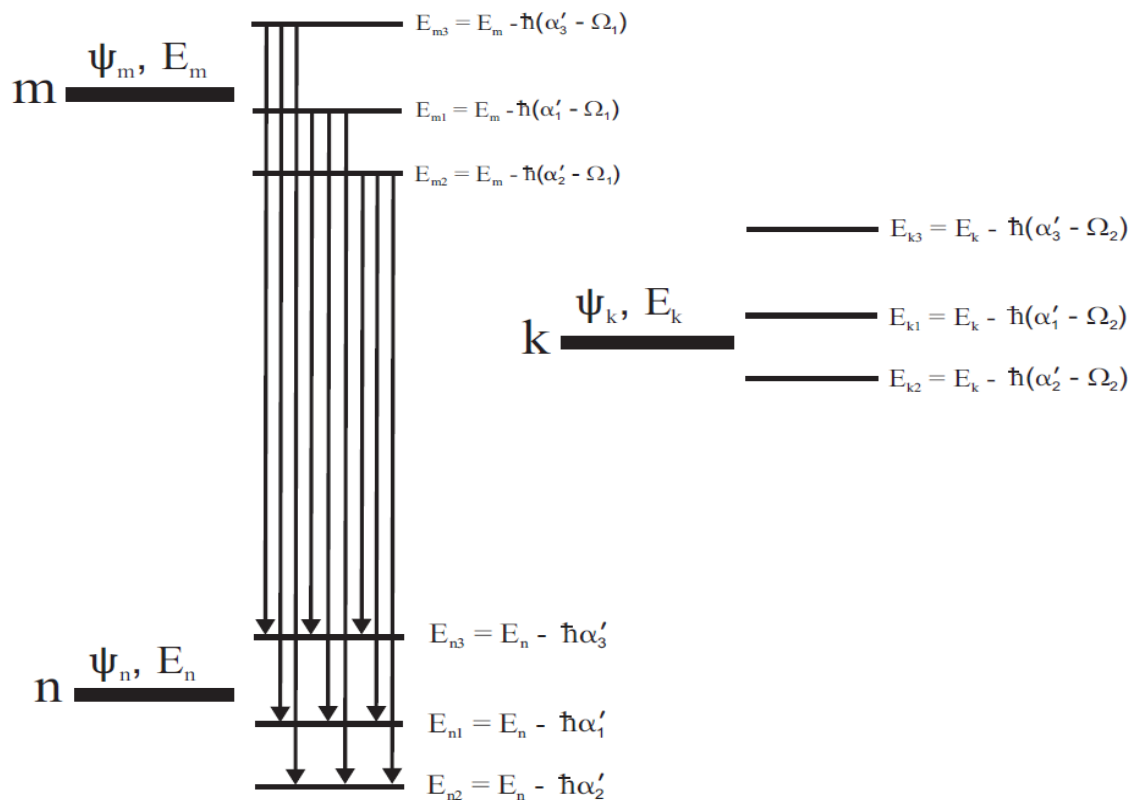
наведенных излучениями дипольных моментов при упругих столкновениях частиц газа.

**Рис.4.1.** Схема энергетических уровней и переходов. Сплошными стрелками обозначены переходы под действием излучения, штриховыми — спонтанные радиационные переходы.

Столкновения, сохраняющие фазу, приводят, как известно, к эффекту Дике

сужения спектральных линий. Рассмотрен случай слабо селективного по скоростям взаимодействия атомов с излучением, соответствующий малому доплеровскому уширению по сравнению с суммой частоты столкновений и скорости радиационной релаксации. Это позволило применить простой метод расчета, основанный на процедуре усреднения по скоростям в самих кинетических уравнениях для матрицы плотности. В итоге получены уравнения, совпадающие с соответствующей системой уравнений для покоящихся частиц с точностью до переопределения констант релаксации, в которых отражено движение частиц по диффузионному закону.

Задача решена в условиях произвольного изменения (от полного сбоя до полного сохранения) фаз наведенных излучениями дипольных моментов при упругих столкновениях. Оказалось, что даже при малом доплеровском уширении линий поглощения (слабо селективное по скоростям взаимодействие атомов с излучением) учет движения атомов совершенно необходим, так как он приводит к резкой трансформации спектра резонансной флуоресценции. Благодаря движению атомов спектр резонансной флуоресценции обладает ярко выраженной анизотропией по отношению к взаимной ориентации волновых векторов спонтанного и возбуждающих излучений. Полное число спектральных компонентов спектра и их положение в шкале частот определяется картиной уровней квазиэнергии, создаваемой возбуждающими излучениями (см. Рис.4.2).



**Рис.4.2.** К интерпретации спектра спонтанного испускания. Сплошными стрелками обозначены переходы между уровнями квазиэнергии.

Ширины и амплитуды спектральных компонент оказались зависящими от коэффициента диффузии взаимодействующих с излучением атомов в буферном газе. В рассмотренных условиях несмещенная линия когерентного (рэлеевского) рассеяния в спектре резонансной флуоресценции становится заметной лишь при наблюдении спонтанного излучения в направлении, близком к направлению распространения возбуждающего излучения на том же переходе. Эта линия испытывает только диффузионное уширение. Показано, что ширины линий спектра резонансной флуоресценции сильно зависят от отношения интенсивностей возбуждающих излучений. В этом отношении наиболее интересен спектр спонтанного испускания на переходе  $m-n$  в случае столкновений, сохраняющих фазовую память на смежном переходе  $k-n$  (отсутствие столкновительной релаксации когерентности). При относительно малой интенсивности излучения, резонансного переходу  $k-n$ , ширины всех линий спектра по величине сопоставимы с ударной шириной линии поглощения на переходе  $m-n$ . С ростом интенсивности излучения, резонансного смежному переходу  $k-n$ , происходит резкое сужение центральной линии и внешних боковых линий. При этом их ширины будут полностью определяться релаксационными константами смежного перехода  $k-n$ .

В условиях точного резонанса возбуждающих излучений с невозмущенными переходами  $m-n$  и  $k-n$  и при значительном увеличении интенсивности излучения, резонансного переходу  $k-n$ , интенсивность спонтанного испускания на переходе  $m-n$  резко падает. Это связано с тем, что поглощение излучения на переходе  $m-n$  становится сильно не резонансным и, как следствие, слабо заселяется уровень  $m$ . Сигнал резонансной флуоресценции многократно возрастает при настройке частоты первого излучения под новые условия резонанса с частотами переходов между уровнями квазиэнергии в данной конкретной ситуации.

Проведенный в работе анализ показывает, в частности, что на основе исследования спектра резонансной флуоресценции в определенных условиях можно получить полезную информацию о коэффициентах диффузии излучающих атомов в газе буферных частиц. (Отражено в публикации [7])

## **5. Исследование влияния направления и скорости сканирования частоты лазерного излучения на спектр резонансного поглощения паров щелочных металлов в ячейках с антирелаксационным покрытием в присутствии магнитного поля**

Экспериментально показано, что асимметрия в амплитудах пиков спектра D1 линии  $85\text{Rb}$  меняется на противоположную при переходе от быстрого сканирования к медленному. Теоретические расчеты показали, что эта асимметрия возникает из-за соотношения скорости сканирования и времени релаксации атомов по внутренним состояниям, которое становится макроскопическим при высоком качестве антирелаксирующего покрытия. Вторым главным фактором является существенная разница в скорости распада возбужденного состояния на разные сверхтонкие компоненты основного состояния атома и порядок прохождения в резонансе этих переходов при прямом и обратном направлении сканирования частоты лазера. Экспериментально исследованы магнитооптические резонансы в горячих парах калия, где зафиксированы подобные закономерности.

(Отражено в публикации [8])

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В процессе исследований за отчетный период выявлены следующие закономерности и особенности.

Найдены новые проявления квантовой геометрической фазы в нестандартных ситуациях. Предложены практические применения операционного определения геометрической фазы, распространённого на открытые квантовые системы, обменивающиеся с окружением информацией и энергией. Это сделано на примере измерения слабой керровской нелинейности во взаимодействии между парой фотонов в условиях пре- и пост-селекции.

Найдено точное решение для квантово-оптической системы с обратной связью. Насколько нам известно, это второй пример такого рода. Теоретически продемонстрирована эффективность когерентной квантовой обратной связи для контроля состояния конденсата в двухъямном потенциале.

Получены новые результаты в теоретико-категорном подходе к анализу фундаментальных физических принципов.

Выполнены плановые работы по созданию автономной оптической системы дипольной оптической ловушки для атомов рубидия. Оптическая ловушка использует лазерное излучение с мощностью до 0.5 Вт и длиной волны 960 нм. Загрузка ловушки атомами рубидия будет осуществляться из магнитооптической ловушки (температура атомов 200 микроК), либо из магнитной ловушки (температура атомов 100 наноК).

Теоретическое исследование спектральных особенностей скорости светоиндуцированного дрейфа (СИД) атомов Li, находящихся в буферном газе Ne и в смеси газов Ne + Ar показало, что добавлением к Ne небольшой доли (примерно 10%) Ar можно перейти от нормального СИД к аномальному и тем самым радикально повысить чувствительность формы линии СИД атомов Li к различию этих потенциалов взаимодействия.

Обнаружен эффект сужения линии поглощения легких атомов щелочных металлов в атмосфере тяжелых инертных газов при росте интенсивности излучения. Этот эффект обусловлен сильным различием скоростей столкновительной релаксации по направлению и по величине скорости легких резонансных частиц в атмосфере тяжелых буферных



частиц и отсутствием столкновительных переходов между сверхтонкими компонентами основного состояния.

Спектр резонансной флуоресценции трехуровневых атомов с V-конфигурацией уровней при возбуждении двумя монохроматическими резонансными полями существенно богаче, чем в простой двухуровневой системе. Количество спектральных линий в спектре может достигать до девяти. Их число и положение на шкале частот связано с картиной формирующихся уровней квазиэнергии. В определенных условиях ширины линий будут полностью определяться релаксационными характеристиками смежного перехода и, в частности, могут быть многократно сужены при росте интенсивности излучения на смежном переходе.

Представлены результаты опытов по наблюдению изотопических резонансов, в которых эффект Дике проявляется в виде чисто синфазных оптикомагнитных резонансов пересечения частот (ОМРПЧ) и в комбинации с квадратурными ОМРПЧ. Даны правдоподобные интерпретации наблюдаемых эффектов.

Найдены и описаны физические причины различия деформации и асимметрии спектра линии D1 атомов Rb в ячейке с антирелаксирующим покрытием в зависимости от скорости и направления сканирования частоты лазерного излучения. Теоретические расчеты полностью подтвердили экспериментально обнаруженные эффекты зависимости амплитуд магнито-оптических спектральных резонансов от скорости сканирования частоты излучения. Эти эффекты возникают в ячейках с антирелаксационным покрытием поверхности и обусловлены большим временем жизни наведенной когерентности атомных уровней.

## Приложение А

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2020 г. в соответствии с государственным заданием, количественные показатели по публикациям по проекту в целом

### Список публикаций в 2020 году по проекту

1. Yakovleva T.S., Rostom A.M., Tomilin V.A., Ilichov L.V. Geometric phase for ‘dark’ subspaces in coherent population trapping // Modern Physics Letters B, 2020. V. 34, No. Supp01, 2150021. DOI:10.1142/S0217984921500214 (31 декабря 2020 г.)
2. Rostom A.M. Interference in between the acts of pre- and postselection // Quantum Electronics, 2020, V.50 (6), P.595-599. DOI: 10.1070/QEL17335 (16 июня 2020 г.)
3. Tomilin V.A., Ilichov L.V. Solvable model of quantum-optical feedback // Physics Letters A, 2020. V.384. P.126718. DOI: 10.1016/j.physleta.2020.126718 (28 сент. 2020 г.)
4. Tomilin V.A., Ilichov L.V. Solvable model of phase-switching quantum feedback // AIP Conference Proceedings, 2020. V.2241 P.20035. DOI: 10.1063/5.0011404 (23 Июня 2020 г.)
5. Tomilin V.A., Ilichov L.V. Control of atomic Bose – Einstein condensate with interferometric feedback probing // Quantum Electronics, 2020. V.50 (6), P.537-542. DOI: 10.1070/QEL17334 (16 июня 2020 г.)
6. Ilichov L.V. Category forms of Local-Causality and Non-Signalling and their duals // Journal of Physics: Conference Series, 2020, V.1557 P.012025 DOI: 10.1088/1742-6596/1557/1/012025 (18 июня 2020 г.)
7. Пархоменко А.И., Шалагин А.М. Влияние столкновений на спектр резонансной флуоресценции трехуровневых атомов с V-конфигурацией уровней // Оптика и спектроскопия. – 2021 (в печати). (18 марта 2021 г.)
8. Gateva S., Tsvetkov S., Gozzini S., Nasyrov K., Andreeva C., Todorov G., Cartaleva. Enhanced absorption and transparency coherent magneto-optical resonances in hot potassium vapor. // XXI International Conference and School on Quantum Electronics: “Laser Physics and Applications” VIRTUAL FORUM 21-24 September 2020, BOOK OF ABSTRACTS, p.75. <http://www.icsqe2020.ie-bas.org/> (21 сентября 2020 г.)
9. Perevalov T.V, Gismatulin A.A, Seregin D.S Wang Y., Xu H., Kruchinin V.N., Evgeniy V. Spesivcev E.V., Gritsenko V.A., Nasyrov K.A., Igor’ P. Prosvirin I.P., Zhang J., Vorotilov K.A., Baklanov V.R. Critical properties and charge transport in ethylene

bridged organosilica low- $\kappa$  dielectrics. // J. Appl. Phys. 127, 195105 (2020);

<https://doi.org/10.1063/1.5145239> (20 мая 2020 г.)

КОЛИЧЕСТВЕННЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ПО ПУБЛИКАЦИЯМ ПО ПРОЕКТУ В ЦЕЛОМ:

Индикатор	Ед. измерения	Всего з 2017-2020 гг	2017	2018	2019	2020
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	единиц	31	10	8	7	6
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	единиц	31	10	8	7	6
Число тезисов в конференциях	единиц	13	7	1	3	2
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности: зарегистрированных патентов в России зарегистрированных патентов за рубежом	единиц единиц					

Приложение Б

Копия плана НИР на 2020 г. по проекту

**Теоретическое исследование способа контроля делокализованного атомарного конденсата в комбинированной схеме когерентной обратной связи и обратной связи, основанной на измерениях. Теоретическое исследование схемы трансформирования состояния делокализованного атомарного конденсата однофотонным интерферометрическим зондированием с пост-селекцией.**

*Ожидаемый результат:*

Предполагается определить параметры петли обратной связи, обеспечивающие наиболее эффективное преобразование состояния конденсата.

Предполагается найти множество распределений чисел атомов конденсата между его различными локализациями после трансформации и исследовать фазовые соотношения соответствующих состояний через величину потока атомов между фрагментами конденсата.

**Реализация оптической дипольной ловушки для холодных атомов рубидия.**

*Ожидаемый результат:*

Будет создана оптическая дипольная ловушка на основе длиннофокусного объектива.

**Теоретическое исследование влияния столкновений на спектр резонансной флуоресценции возбуждаемых двумя монохроматическими полями трехуровневых атомов с V-конфигурацией уровней.**

*Ожидаемый результат:*

Ожидается, что в определенных условиях ширина линии спонтанного испускания на одном из переходов будет полностью определяться релаксационными константами смежного перехода. В частности, ширина линии спонтанного испускания может быть многократно сужена при росте интенсивности излучения, резонансного смежному переходу.

**Исследование влияния направления и скорости сканирования частоты лазерного излучения на спектр резонансного поглощения паров щелочных металлов в ячейках с антирелаксационным покрытием в присутствии магнитного поля.**

*Ожидаемый результат:*

На примере Rb будет теоретически исследовано влияние скорости и направления сканирования частоты лазера на форму пиков D1 (или D2) линии в присутствии лабораторного магнитного поля в ячейках с антирелаксирующим покрытием. Будет показано заметное влияние магнитного поля на спектр поглощения. Результаты будут сопоставлены с данными проведенного эксперимента.