

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ИНСТИТУТ АВТОМАТИКИ И ЭЛЕКТРОМЕТРИИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИАиЭ СО РАН)

УДК
№ гос. Регистрации
АААА-А17-117052210003-4
Инв. №

УТВЕРЖДАЮ
Директор Института
чл.-корр. РАН

_____ С.А. Бабин
« _____ » _____ 2018 г.

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

По программе П.10.2.

Фундаментальные проблемы взаимодействия лазерного излучения с однородными и структурированными средами

ПРОЕКТ П.10.2.2

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

(промежуточный, 2018 г.)

Номер проекта 0319-2018-0002

Руководитель темы академик _____

А.М. Шалагин

Протокол Ученого совета ИАиЭ СО РАН
№ 18-13 от «04» декабря 2018 г.

Новосибирск, 2018

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

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

РЕФЕРАТ

Всего 13 с., 2 рисунка, 17 источников.

Ключевые слова: *нелинейные и когерентные явления, зацепленность, квантовые корреляции, геометрическая фаза, магнитооптические резонансы, светоиндуцированный дрейф, потенциалы взаимодействия, антирелаксационное покрытие, бозе-эйнштейновский конденсат*

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.

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.

Исследованы особенности спектра щелочных металлов на примере D1 линии Rb⁸⁵ 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. Численные моделирования подтвердили наблюдаемые в эксперименте эффекты.

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.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	5
1. Теоретическое и экспериментальное исследование состояний бозе-эйнштейновских конденсатов в двухъямных оптических потенциалах.....	7
2. Расчет формы линии аномального светоиндуцированного дрейфа (СИД) для атомов Li, находящихся в бинарной буферной смеси инертных газов Ne+Ar, на основе нескольких известных (вычисленных ab initio) межатомных потенциалов взаимодействия.....	9
3. Исследование влияния слабого магнитного поля на оптической накачку по зеэмановским подуровням и по сверхтонкой структуре щелочных металлов в ячейках с покрытием.....	10
4. 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.....	12
Заключение.....	13
Список использованных источников.....	14

Введение

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 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. В частности, аномальный СИД легко достигается при использовании смеси двух буферных газов. Таким образом, анализ аномального СИД для разных потенциалов взаимодействия, взятых из литературных данных, дает основу для их тестирования. Расчет эффекта СИД для возбужденных ионов на основе новых данных о потенциалах взаимодействия важен, в частности, для решения проблем сепарации элементов и их изотопов в атмосферах химически пекулярных звезд.

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). Ранее предлагались разные модели для объяснения обнаруженных оптикомагнитных резонансов пересечения частот (ОМРПЧ) земановских компонент переходов разных изотопов. Однако окончательной ясности в существовании явления пока не достигнуто. Поскольку эффект довольно яркий и проявляется отчетливо, продолжение исследований представляется целесообразным. Нужны дополнительные экспериментальные данные и новые плодотворные гипотезы.

Применение оптических ячеек со стенками, покрытыми антирелаксирующей пленкой (не изменяющей спин атома при столкновении со стенкой) открывает новые возможности в исследовании взаимодействия лазерного излучения с парами щелочных металлов. В таких ячейках уже возможно создание поляризованным излучением долгоживущего ансамбля ориентированных по спинам атомов. Время релаксации по атомным спинам в таких ячейках может достигать минуты и более. В мировой литературе

обсуждается вопрос о коллективном поведении таких атомов, что может привести к новым физическим явлениям, радикальному увеличению чувствительности к внешним полям, в частности, к магнитному полю и др.

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

Перенос оптической геометрической фазы на атомарный конденсат.

Наиболее развита технология создания и наблюдения геометрической фазы в оптике. При этом оптические поля в виде дипольных ловушек используются для удержания и контроля атомарного конденсата. Поэтому актуальным является поиск возможности генерации геометрической фазы в оптической подсистеме ловушки с переносом её на подсистему атомарного конденсата. Каналом переноса может служить зацепленность – чисто квантовые корреляции состояний оптического поля ловушки и находящихся в ней атомов.

Основой служит схема, рассмотренная в работах [Ильичёв Л.В. Письма в ЖЭТФ. Т.106. №1-2. 2017. С.14; Ильичёв Л.В., Чаповский П.Л. Квантовая электроника. Т.47. №5. 2017. С.463]. Оптической частью атомно-фотонной системы является квантованная бегущая мода кольцевого резонатора, формирующая минимум оптического потенциала для атомов. Второй минимум потенциала для локализации атомов формируется обычным оптическим пучком (см. Рис.1).

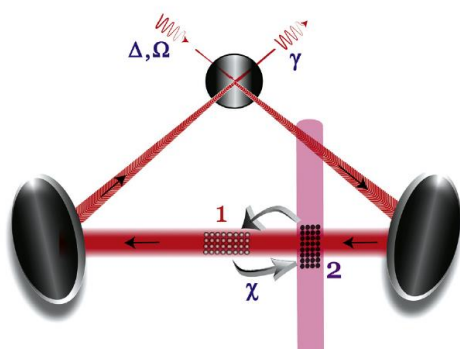


Рис. 1

Квантованная оптическая мода рассматривается вместе со своим источником и механизмом необратимой потери фотонов. Собственная частота моды определяется оптической длиной резонатора и зависит также от числа атомов, локализованных в минимуме потенциала.

Изменение этой частоты смещает баланс совместного действия источника и процесса необратимого ухода фотонов из резонатора. Это меняет стационарное состояние моды и, следовательно, параметры потенциала, удерживающего атомы. Согласованная эволюция обеих подсистем приводит в итоге к формированию квазистационарного зацепленного состояния, которое может служить основой для переноса оптической геометрической фазы на атомарный конденсат. Интерес

представляет процесс туннелирования атомов единого ВЕС между минимумами потенциала, и на этот процесс прямое влияние оказывает геометрическая фаза.

(Квази)стационарное состояние атомов и фотонной моды зависит от двух легко контролируемых параметров интенсивности и частоты внешнего источника. Проход по замкнутому контуру в плоскости этих параметров (см. Рис.2) инициирует обход некоторого замкнутого контура в комплексной плоскости параметра α , задающего компоненты фотонной части общего состояния (Рис.3), с приобретением некоторой геометрической фазы. Эта фаза является ориентированной площадью, замечаемой радиус-вектором при обходе контура, взятой с коэффициентом -2 .

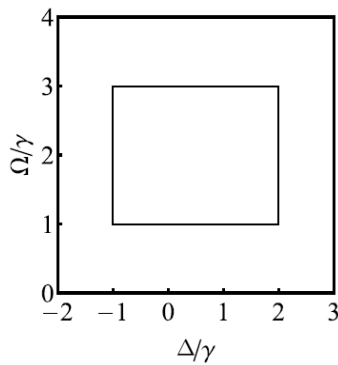


Рис. 2

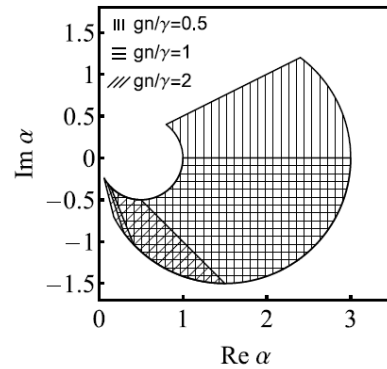


Рис.3

Для визуализации эффекта привнесённой геометрической фазы удобно перейти к альтернативному представлению квантового состояния -- некоторой скалярной функции, зависящей от фазы и числа атомов в бозонной моде 2 конденсата. В качестве такой функции выбрана функцию Вигнера для числа и фазы, являющуюся аналогом традиционной W-функции Вигнера для канонически сопряженных координат и импульсов.

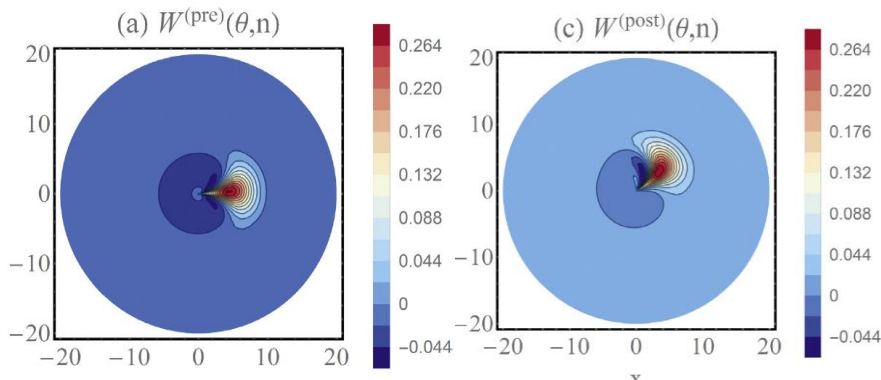


Рис.4

Результаты вычисления функции Вигнера для числа и фазы для состояний до и после генерации геометрической фазы представлены на Рис. 4. Основное изменение состояния в результате приобретения геометрической фазы заключается в повороте функции Вигнера

исходного состояния на некоторый угол. Расчёт потока между локализациями для выбранных условий показывает изменение его знака и увеличение в шесть раз по абсолютной величине.

(Публикации [1 – 4])

2. Расчет формы линии аномального светоиндуцированного дрейфа (СИД) для атомов Li, находящихся в бинарной буферной смеси 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. Расчеты СИД атомов Li в буферном газе Ne для двух потенциалов взаимодействия предсказывают аномальный СИД и, как следствие, сильную чувствительность спектральной формы линии СИД к различию этих потенциалов. Для трех других потенциалов (из пяти протестированных) форма линии СИД атомов Li в Ne малочувствительна к их различию из-за того, что расчеты с этими потенциалами предсказывают нормальный эффект СИД. В этом случае, как оказалось, 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.

Важной характеристикой метода тестирования потенциалов по форме линии СИД является его чувствительность к различию используемых потенциалов взаимодействия. На рис. 1а показаны два разных потенциала взаимодействия для пар сталкивающихся частиц Li - Ne, по которым рассчитаны кривые (формы линии СИД) на рис. 1б (сплошные и штриховые кривые на рис. 1 соответствуют двум разным потенциалам). Визуально потенциалы на рис. 1а отличаются чрезвычайно слабо. Тем не менее, из сопоставления рис. 1а и кривых на рис. 1б видно, что даже малое различие в межатомных потенциалах взаимодействия резонансных и буферных частиц сильно проявляется в частотной зависимости скорости дрейфа в области аномального СИД.

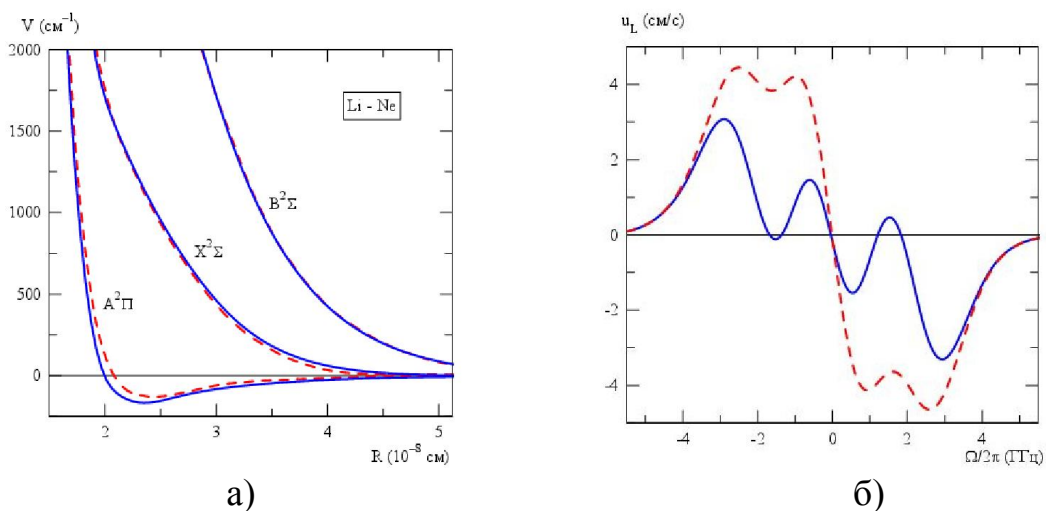


Рис.1. (а) – Потенциалы взаимодействия для пар сталкивающихся частиц Li – Ne. Взаимодействию невозбужденных атомов Li с атомами Ne соответствует один молекулярный терм $X^2\Sigma$, а возбужденным атомам Li - два терма $A^2\Pi$ и $B^2\Sigma$. (б) – Зависимости проекции скорости СИД на направление излучения от отстройки частоты излучения Ω для атомов ^7Li в буферной смеси газов Ne + Ar при доле аргона 11%, $T = 600 \text{ K}$, $I = 40 \text{ мВт/см}^2$, $P_{\text{buf}} = 5 \text{ Торр}$. Сплошные и штриховые кривые на рис. 1 соответствуют двум разным потенциалам взаимодействия для пар сталкивающихся частиц Li – Ne.

Полученные результаты дают возможность высокоточного тестирования межатомных потенциалов взаимодействия в экспериментах по аномальному СИД. (Публикации [5 – 7]).

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

Метод измерения числа столкновений атомов со стенками ячейки без изменения атомного спина, предложенный в работе Nasyrov K, Entin V, Nikolov N, Petrov N and Cartaleva S, 2015. Proc. SPIE 9447 944704, был использован для исследования свойств антирелаксирующего покрытия для двух PDMS покрытий, изготовленных для разных концентраций раствора (PDMS 2% и PDMS 5%). Было обнаружено различие в свето-индуцированной десорбции атомов Rb (LIAD) в ячейках с разными покрытиями. В частности, в ячейке с PDMS 2% процесс свето-индуцированной десорбции с атомов из покрытия идет намного медленнее, чем для ячейки с покрытием PDMS 5%.

Изучены особенности спектра щелочных металлов на примере D1 линии ^{85}Rb в ячейке с антирелаксирующим покрытием при разной скорости сканирования частоты

лазера. Эксперименты были проведены с вакуумными ячейками, содержащими естественную смесь изотопов ^{85}Rb и ^{87}Rb . Обнаружено, что вид спектра для обоих изотопов (относительные амплитуды пиков резонансов) существенно зависит от скорости и направления сканирования.

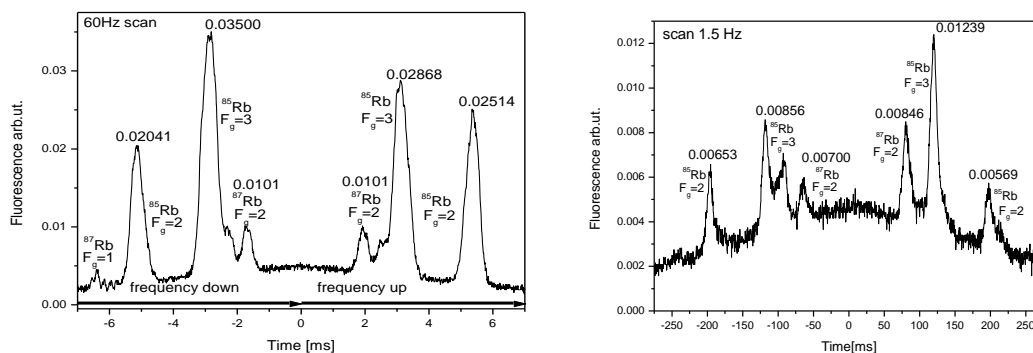


Рис.1. Экспериментально записанный спектр флуоресценции естественной смеси ^{85}Rb и ^{87}Rb в области частот D1 линии в вакуумной оптической ячейке с парафиновым покрытием внутренней поверхности ячейки. Спектр D1 линии прописан дважды, когда частота лазера сначала уменьшалась, а затем с момента времени 0 - увеличивалась. Частота сканирования – 60 Hz и 1.5 Hz. Присутствует лабораторное магнитное поле.

В эксперименте видно, что асимметрия в амплитудах пиков спектра меняется на противоположную при переходе от быстрого сканирования к медленному. Главное внимание уделялось объяснению этого явления на примере спектра ^{85}Rb , как более выраженного. Как показали расчеты, в основе объяснения этого эффекта лежит соотношение скорости сканирования и времени релаксации атомов по внутренним состояниям, которое становится макроскопическим при высоком качестве антирелаксирующего покрытия, а также существенная разница в скорости распада возбужденного состояния на разные сверхтонкие компоненты основного состояния атома.

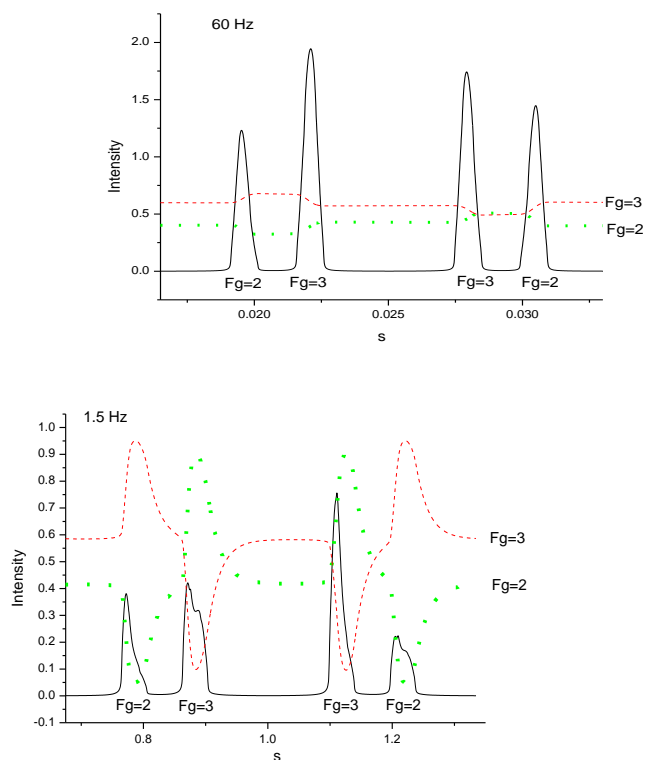


Рис.2. Расчетный спектр при сканировании D1 линии ^{85}Rb . Красная линия показывает зависимость от времени заселенности уровня Fg=3, а зеленая – заселенность уровня Fg=2. Скорость сканирования 60 Hz и 1.5 Hz.

По поведению спектра атомов в зависимости от скорости сканирования частоты лазера можно судить о качестве антирелаксирующего покрытия ячейки.

(Публикации [8 – 9])

4. 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.

При исследовании поглощения пробного лазерного излучения в газоразрядной плазме смесью четных изотопов неона методом магнитного сканирования перехода $3s_2-2p_4$ были

разрешены с помощью численного моделирования контуры поглощения изотопов и обнаружено, что с уменьшением относительной концентрации одного из них его вклад в поглощение сменяется усилением. Выдвинута гипотеза, что эффект обусловлен радиационным механизмом передачи энергии возбуждения между атомами разного сорта при отсутствии различия энергий уровней.

(Публикации [10]).

Заключение

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

Исследована квантовая система состоящая 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. В последней геометрическая фаза формируется обходом замкнутого контура на плоскости «интенсивность-частота» внешнего источника. Визуализация перенесённой фазы осуществлена с помощью функции Вигнера для переменных «число атомов - фаза». Экспериментальную регистрацию перенесённой фазы предлагается осуществлять через наблюдение модификации процесса туннелирования атомов между двумя локализациями единого конденсата.

Теоретически исследованы спектральные особенности скорости светоиндуцированного дрейфа (СИД) атомов лития, находящихся в буферном газе неоне и в смеси буферных газов неона и аргона. Полученные результаты предсказывают возможность высокоточного тестирования межатомных потенциалов взаимодействия в экспериментах по аномальному СИД.

Теоретические расчеты показали, что в основе объяснения результатов экспериментов по спектрам флуоресценции паров рубидия, снятых при различных скоростях сканирования в ячейках с антирелаксационным покрытием, лежит соотношение скорости сканирования и времени релаксации атомов по внутренним состояниям, которое становится макроскопическим при высоком качестве антирелаксирующего покрытия, а

также существенная разница в скорости распада возбужденного состояния на разные сверхтонкие компоненты основного состояния атома.

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.

Полученные за отчетный период научные результаты согласуются с ожиданиями, так что продолжение исследований в рамках проекта представляется целесообразным.

Список использованных источников

1. Yakovleva T.S., Rostom A.M., Tomilin V.A., Il'ichov L.V. Geometric Phase Transferred from Photonic Mode to Atomic BEC. // *Optics Communications*, 2019, v. 436. P. 52 – 56.
2. Yakovleva T.S., Rostom A.M., Tomilin V.A., Il'ichov L.V. Geometric phase in non-standard settings. // *Technical Digest of the 8 Int. Symposium “Modern Problem of Laser Physics” MPLP-2018. Novosibirsk, Russia, 25 August – 01 September 2018 г. P. 209.*
<http://mplp2018.laser.nsc.ru/>
3. Il'ichov L.V., Tomilin V.A. Coherent states of quantum linear rotator.// *Physica A*, 2018, v. 503. P. 856 – 861.
4. Yakovleva T.S., Rostom A.M., Tomilin V.A., Il'ichov L.V. Geometric phase in open quantum system as a function of its history. // *Quantum Studies: Mathematics and Foundations* (в печати).
5. Пархоменко А.И., Шалагин А.М. Сепарация изотопов кальция в атмосферах СР-звезд вследствие эффекта светоиндуцированного дрейфа. // *Астрономический журнал*, 2018, т. 95, № 6, с. 407–420.
6. Пархоменко А.И., Шалагин А.М. О возможности прецизионного тестирования межатомных потенциалов взаимодействия с помощью эффекта аномального светоиндуцированного дрейфа. // *ЖЭТФ*, 2018, т. 154, № 2, с. 300–309.
7. Пархоменко А.И., Шалагин А.М. Повышение чувствительности эффекта светоиндуцированного дрейфа к потенциалам межатомного взаимодействия за счет использования смеси двух буферных газов. // *Квантовая электроника* (в печати).

8. Крестева А., Насыров Р.К., Петров Н., Гатева С., Карталева С., Насыров К.А. Особенности спектра Rb^{85} в ячейке с антирелаксирующим покрытием. // Автометрия, 2018, т. 54, № 3, С. 111-118.
9. Tsvetkov S., Gateva S., Cartaleva S., Mariotti E., Nasyrov K. Optical characterization of antirelaxation coatings. // J. Phys.: Conf. Ser. 2018, **992** 012039, doi :10.1088/1742-6596/992/1/012039
10. Сапрыкин Э.Г., Черненко А.А. Поляризационные явления в эффектах прозрачности и абсорбции, индуцируемых полем однонаправленных волн. // ЖЭТФ, 2018, т. 154, № 2, с. 223 – 237.
11. Пархоменко А.И., Шалагин А.М. Влияние геометрии накачки на эффективность генерации лазера на парах щелочных металлов. // Квантовая электроника (в печати).