

на правах рукописи

Соколов Игорь Михайлович

Когерентные и корреляционные эффекты при взаимодействии света с  
неравновесными многоатомными системами.

специальность 01.04.02 - теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург  
2004

Работа выполнена на кафедре "Теоретическая физика" в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Научный консультант: Доктор физико-математических наук  
профессор, Матисов Борис Григорьевич

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук,  
профессор  
Трифонов Евгений Дмитриевич

Доктор физико-математических наук,  
профессор  
Быков Андрей Михайлович

Доктор физико-математических наук,  
профессор  
Кулик Сергей Павлович

Ведущая организация: Санкт-Петербургский  
государственный университет

Защита состоится "20" октября 2004 г. в 16ч. 00 мин. часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.05 в ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет" по адресу:  
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул. 29, II уч. корпус, ауд.265

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО "Санкт-Петербургский государственный политехнический университет"

Автореферат разослан " " сентября 2004 г.

Ученый секретарь  
диссертационного Совета  
доктор физико-математических наук,  
профессор

Ю.Ф. Титовец

**Актуальность.** Традиционные исследования взаимодействия электромагнитного излучения с атомными ансамблями, как правило, ориентированы на круг задач, в которых свойства поля могут быть описаны корреляционными функциями операторов напряженности второго порядка, а для определения свойств атомной системы достаточно задать одноатомную матрицу плотности. К этому кругу можно отнести подавляющее большинство задач атомной и молекулярной спектроскопии высокого разрешения, которые связаны с анализом интенсивности, спектрального состава или поляризации излучения, прошедшего исследуемую среду или рассеянного ею. Сюда же относятся и традиционные методы оптической накачки и оптической ориентации, используемые для создания неравновесных по внутреннему состоянию атомных и молекулярных систем. В последнее время, однако, все большее внимание привлекают явления, в которых важную роль играют корреляционные, статистические свойства как света, так и корпускулярных систем. Такое внимание обусловлено целым рядом причин. Во-первых, статистические свойства играют важную роль при определении точности оптических измерений и тех предельных ограничений, которые накладывает квантовая природа света и квантовый характер взаимодействия с атомами исследуемого объекта на предельную чувствительность этих измерений. Предсказание, а затем и экспериментальная реализация сжатых состояний электромагнитного излучения и света с субпуассоновской статистикой, с одной стороны, открыли возможности преодоления, так называемого, дробового или стандартного квантового предела чувствительности и дальнейшего совершенствования техники оптических измерений, а с другой – вызвали огромный интерес к исследованию конкретных механизмов сжатия и созданию соответствующих источников света. Второй причиной интереса к корреляционным свойствам излучения явился тот факт, что его флуктуации играют не только негативную роль, определяя точность и чувствительность оптических измерений. В тех случаях, когда статистика рассеянного исследуемым объектом излучения отличается от гауссовой или пуассоновской, изучение статистических свойств может стать источником дополнительной информации об исследуемых системах. Информативные свойства флуктуаций послужили основой создания новой, интенсивно развивающейся в последнее время методики, – корреляционной спектроскопии или спектроскопии флуктуаций интенсивности (СФИ)<sup>1</sup>, используемой как вариант спектроскопии высокого

---

<sup>1</sup>Отметим, что термин спектроскопия флуктуаций интенсивности обычно используется в отечественной литературе. В англоязычной литературе чаще используются другие названия: корреляционная спектроскопия, спектроскопия оптического смещения, спектроскопия квантовых биений.

разрешения для исследования кинетических и релаксационных характеристик газообразных и жидких сред, а также для исследования поведения макроскопических молекул в растворах в различных биофизических приложениях. Наконец, особый интерес к корреляционным эффектам, наметившийся в последние несколько лет, обусловлен бурным развитием квантовой информатики – задачами квантовой криптографии, телепортации, квантовых вычислений. В этих задачах свет рассматривается как очень удобное средство переноса информации, а атомные системы – как средство ее сохранения. При этом оказалось, что проблема записи и передачи квантовой информации может быть решена при использовании перепутанных состояний, т.е. состояний света и вещества, характеризующихся сильными внутренними корреляциями. Заметим, что задачи квантовой информатики самым тесным образом связаны с принципиальными вопросами, касающимися проблемы измерения в квантовой механике: исследование парадокса ЭПР, неравенств Белла и ряда других.

Все рассмотренные выше применения корреляционных эффектов в оптике – как современное квантово-информационное, так и более традиционное спектроскопическое – объединены тем, что в их основе лежит один и тот же процесс – рассеяние света, что, безусловно, подталкивает к более глубокому изучению последнего. Явление рассеяния света атомами, представляющее базовый процесс взаимодействия поля и корпускулярной материи в оптической области, сохраняет, таким образом, свою актуальность как объект исследований с момента создания квантовой теории и по настоящее время.

Совершенствование техники физического эксперимента позволило в настоящее время перевести многие задачи фундаментальной квантовой механики и квантовой статистики, к которым относятся, например, большинство задач квантовой информатики, из области мысленных экспериментов в область практических исследований. Использование в экспериментах атомных и молекулярных ансамблей ограничивает применение при их теоретическом описании модельных двух-трех уровневых квантовых систем без релаксации и заставляет учитывать реальную структуру термов и негативное влияние релаксационных процессов. Кроме этого, подавляющее большинство опытов проводится с макроскопическими системами, содержащими большое число частиц. Так, одними из наиболее перспективных объектов исследований являются ансамбли неподвижных (холодных) атомов, находящихся в, так называемых, атомных ловушках. Эти системы обладают целым рядом уникальных свойств, что обусловило интерес к ним в различных областях физики – в спектроскопии, квантовой электронике, квантовой оптике, кван-

товой информатике и т.д. Особо следует выделить огромный интерес к таким ансамблям в связи с исследованиями Бозе-Эйнштейновского конденсата. Исследование макроскопических ансамблей во многих случаях приводит к необходимости рассматривать в теории оптически плотные среды с присутствующими им процессами многократных рассеяний. В результате многократных рассеяний когерентность проявляется не только в излучении, рассеянном вперед, но и при рассеянии назад. Оба процесса, которые будут подробно анализироваться в данной работе, чрезвычайно интересны с точки зрения эффектов неклассической статистики, когерентности и квантовой природы взаимодействия света и атомов в целом.

Так, при когерентном рассеянии вперед создается возможность для эффективного динамического (т.е. описываемого некоторым эффективным гамильтонианом) взаимодействия света и атомов, приводящего к перепутыванию их коллективных переменных. При этом "квантовая информация", под которой понимают квантовую неопределенность флуктуаций коллективных канонических переменных системы, может передаваться между светом и атомами и этот обмен может достаточно надежно контролироваться в эксперименте. Узкой диаграммой направленности вблизи рассеяния вперед характеризуется также процесс параметрического рассеяния, который при определенных условиях может приводить к формированию сжатых состояний света. Важно, что, ввиду отсутствия доплеровского смещения для частоты света, рассеиваемого вперед, явление когерентного рассеяния в этом случае может наблюдаться уже при обычных комнатных температурах, т.е. при рассеянии на ансамбле атомов, находящихся в газовой ячейке.

Процесс когерентного рассеяния назад формируется как результат интерференции света последовательно провзаимодействовавшего с некоторой произвольной цепочкой атомов среды. Интерферируют волны, прошедшие эту цепочку рассеивателей в противоположном порядке. Принципиальным для существования интерференции является отсутствие существенного доплеровского смещения в каждом акте рассеяния, поэтому эффект обычно наблюдается при рассеянии на холодных атомах, находящихся в магнитооптической ловушке. При этом в каждом индивидуальном акте упругого рассеяния присутствуют релеевский и рамановский каналы, существенно влияющие на поляризационное состояние распространяющегося в среде излучения. Благодаря этому анализ формируемого в результате интерференции конуса обратного рассеяния является достаточно информативным спектроскопическим инструментом для диагностики состояния атомного ансамбля.

Особое место в задаче о *когерентном обратном рассеянии* (КОР) света

атомными ловушками занимает так называемое зависимое рассеяние. Близко расположенные атомы среды рассеивают свет согласованно, формируя суб- и суперизлучательные состояния, являющиеся квантовыми суперпозиционными состояниями поле-вещество. Спектральная структура резонансов существенным образом меняется, отражая влияние коллективных эффектов. Это явление тесно связано с сильной локализацией света, явлением, аналогичным андерсоновской локализации электронов в твердом теле и вызывающим пристальный интерес исследователей в последнее время.

Настоящая работа посвящена всестороннему исследованию коллективных квантово-статистических эффектов при многократном рассеянии света атомным ансамблем, находящимся в газовой ячейке, либо облаком холодных атомов, находящихся в магнитооптической ловушке. По этой причине основное внимание уделено анализу свойств света, описываемых нормальными корреляционными функциями четвертого порядка или аномальными корреляторами второго порядка. В то же время определенное внимание уделено когерентным эффектам, т.е. расчетам поляризационного тензора, определяемого нормальной корреляционной функцией второго порядка и измеряемого традиционными методами линейной спектроскопии. Это связано с целым рядом причин. Во-первых, нормальные корреляционные функции второго порядка естественным образом возникают на промежуточных этапах в задачах об учете конечной оптической толщины. Во-вторых, в ряде случаев корреляционные свойства рассеивающих сред проявляются уже в поляризационных и спектральных свойствах света. И, наконец, при анализе точности и чувствительности традиционных оптических измерений, которому посвящена заключительная часть работы, вычисление отношения сигнал/шум невозможно без знания средних значений наблюдаемых, которые и определяются поляризационным тензором.

Важной особенностью, объединяющей все рассматриваемые в данной работе задачи, является неравновесность внутреннего состояния ансамблей, рассеивающих свет. Поляризация по внутреннему угловому моменту естественным образом появляется в задачах квантовой магнитометрии и стандартизации частоты. Ансамбль холодных атомов в магнитооптической ловушке также является накаченным на один из сверхтонких подуровней основного состояния. Поляризация среды существенно меняет характер нелинейного рассеяния света, приводящего к ряду особенностей спектра флуктуаций интенсивности и формированию сжатых состояний света. Рассеяние пар коррелированных фотонов приводит к эффективному спиновому сжатию, если атомный ансамбль изначально поляризован по угловому моменту.

Таким образом, **целью настоящей работы** является исследование когерентных и корреляционных эффектов при рассеянии света неравновесными многоатомными ансамблями. В рамках достижения этой цели рассмотрены следующие задачи:

1. Исследование когерентного рассеяния света оптически плотным ансамблем поляризованных атомов и анализ возможностей его применения для задач детектирования оптической анизотропии.

2. Анализ генерации сжатых состояний электромагнитного поля при радиооптическом резонансе и в результате параметрического рассеяния в оптически плотной среде поляризованных по угловому моменту атомов.

3. Исследование угловых, спектральных и поляризационных характеристик когерентного обратного рассеяния света ансамблем атомов, охлажденным в магнитооптической ловушке. Изучение зависимого рассеяния на паре атомов рубидия.

4. Анализ чувствительности оптических измерений с модуляцией поляризации и возможности ее повышения при использовании сжатого света. Исследование применения сжатого света в магнитометрии и стандартизации частоты.

5. Определение чувствительности спектроскопии флуктуаций интенсивности и возможности ее повышения при использовании света с неклассической статистикой.

6. Анализ возможностей переноса квантово-статистических свойств света – перепутанности и сжатия – на атомную систему в результате их взаимодействия.

### **Научная новизна.**

1. Показано, что корреляционные функции света, рассеянного оптически плотной газовой средой, можно представить в виде разложения по числу актов некогерентного рассеяния, причем эти ряды сходятся достаточно быстро, что дает возможность использовать их при описании интерференционных и корреляционных эффектов при диффузии излучения в неупорядоченной среде конечных размеров. При проведении расчетов в рамках квантовой электродинамики макроскопические усреднения используются в минимальной степени – только для описания когерентного рассеяния света вперед. Это рассеяние учитывается введением точной запаздывающей функции Грина, для которой в рамках линейной электродинамики получено уравнение переноса, справедливое для неравновесных состояний атомного ансамбля. Для ряда практически важных случаев найдено аналитическое

решение этого уравнения, позволяющее описывать такие анизотропные оптические свойства поляризованных атомных ансамблей, как двулучепреломление и дихроизм. Результаты общей теории применены для анализа пространственной анизотропии ориентированных атомов, получающихся в результате фотодиссоциации двухатомных молекул. Обоснована возможность спектроскопического выделения слабого интерференционного канала формирования ориентации фотофрагментов посредством совместного исследования спектральных зависимостей циркулярного дихроизма и гиротропии атомной среды.

2. На основе применения методов теории переноса излучения и теории упругости исследовано распространение поляризованного света в призмах полного внутреннего отражения, используемых в кольцевых резонаторах лазерных гироскопов. Теоретически обосновано их двулучепреломление, наблюдавшееся в прецизионных экспериментах (см. [10,11]). Показано, что изготовленные из изотропного плавленого кварца эти призмы приобретают слабую анизотропию вследствие внутренних напряжений, обусловленных взаимодействием с тем основанием, на котором они установлены. Эти внутренние напряжения существенно неоднородны, величина двулучепреломления меняет знак, имеются области, для которых интегральное двулучепреломление отсутствует в силу компенсации набегов фаз в разных частях призмы по ходу луча.

3. Исследовано влияние конечной оптической толщины на формирование сжатых состояний электромагнитного поля, имеющее место в результате нелинейного взаимодействия классического излучения с системой оптически ориентированных атомов. С этой целью получены уравнения переноса для нормальных и аномальных корреляционных функций излучения, распространяющегося в такой среде. В отличие от обычно рассматриваемой теории четырехволнового смешения в газе неподвижных двухуровневых атомов рассмотрено взаимодействие волны накачки с предварительно ориентированными многоуровневыми атомами, неравномерно заселяющими подуровни основного состояния. Проведено количественное сравнение роли комбинационного и параметрического рассеяния, а также осуществлена оценка роли нелинейной дисперсии. Указаны условия, при которых негативное влияние нелинейной дисперсии может быть ослаблено, а эффект корреляции в протяженной среде будет накапливаться и может быть достигнута высокая степень сжатия.

4. Исследованы флуктуации интенсивности излучения в условиях радиооптического резонанса. Показано, что в спектре флуктуаций наблюдаются



дополнительные резонансы, обусловленные наличием радиочастотного поля. При зондировании в полосе поглощения форма резонансов – лоренцева, в случае зондирования в полосе прозрачности – дисперсионная, а при определенных условиях имеет место частичное подавление флуктуаций. Исследованы зависимость этих эффектов от условий эксперимента и возможность выделения обнаруженных резонансов на фоне дробового шума.

5. Получены аналитические выражения для сечения когерентного обратного рассеяния света ансамблем атомов, охлажденным в магнитооптической ловушке, позволяющие учесть все основные факторы, влияющие на характер рассеяния – всю сверхтонкую и зеемановскую структуру основного и возбужденного состояния атомов; поляризацию пробного излучения; реальную форму и размеры атомного облака, его пространственную неоднородность; движение атомов; поляризацию атомов по угловому моменту, обусловленную как самим пробным светом, так и возможной вспомогательной оптической накачкой; конечную ширину спектра пробного излучения. Исследованы угловая, поляризационная и спектральная зависимости сечения КОР. Теоретически обосновано наблюдающееся в эксперименте малое значение фактора усиления рассеяния назад для атомарных рассеивателей. Показано, что конус КОР имеет сложную форму, полуширина которой определяется размерами рассеивающего облака, а скорость убывания крыльев обратно пропорциональна длине свободного пробега фотонов в среде.

6. Предсказана существенная роль нерезонансных сверхтонких переходов при формировании сигналов КОР, проявляющаяся в асимметричной спектральной зависимости фактора усиления и возможности деструктивной интерференции, приводящей к факторам усиления меньше единицы. Показано, что при количественном описании экспериментально наблюдаемых спектров КОР необходимо учитывать конечную ширину спектра зондирующего света, разогрев облака рассеиваемым светом, а также его поляризацию вследствие явления оптической накачки. Эти эффекты меняют спектр рассеяния не только количественно, но и приводят к качественным изменениям. В частности предсказано, что для полностью ориентированных оптически тонких сред при зондировании циркулярно поляризованным светом вдоль вектора ориентации можно наблюдать идеальную интерференцию с фактором усиления, равным двум.

7. Проанализировано применение методов спектроскопии флуктуаций интенсивности для наблюдения КОР. Рассчитан фактор усиления для спектра флуктуаций фототока при гетеродинном детектировании рассеянного назад излучения. Показано, что для оптически плотной среды движущихся ато-

мов вклады различных порядков рассеяния частично разделены в спектре флуктуаций. При этом максимальное значение спектрального корреляционного фактора усиления оказывается существенно больше соответствующего значения, измеренного традиционными методами.

8. Исследована динамика формирования сигналов КОР при рассеянии импульсного излучения. Рассчитаны времена установления стационарного режима рассеяния, а также характер временной задержки излучения, испытывавшего многократные рассеяния. Диффузия многократно рассеянного света приводит к тому, что после окончания импульса возбуждения интенсивность затухает по сложному закону, а фактор усиления в течение определенного времени существенно превышает свое стационарное значение.

9. Рассмотрено рассеяние света на паре атомов рубидия 85, расстояние между которыми меньше длины световой волны (зависимое рассеяние). Найден спектр квазимолекулярных состояний системы с учетом резонансного диполь-дипольного взаимодействия атомов и сверхтонкой структуры атомов. Показано, что часть этих состояний является долгоживущими субизлучательными, что может явиться физической основой сильной локализации света в плотной атомной среде. Показано, что диполь-дипольное взаимодействие качественно меняет спектральную и угловую зависимость рассеяния по сравнению с парой невзаимодействующих атомов. Проведена оценка роли зависимого рассеяния в опытах по наблюдению КОР в ловушках, для которых при реализуемых концентрациях атомов вероятность образования квазимолекулярного кластера мала.

10. Предложен и обоснован механизм создания перепутанного состояния двух атомов, основанный на кооперативном, стимулированном комбинационном рассеянии света с неклассической статистикой, при котором рамановское рассеяние усиливается дополнительным взаимодействием поляризованных атомов с классической когерентной волной. Рассмотрен случай квантованного поля с конечной шириной спектра. Определены условия, при которых кооперативный процесс является доминирующим. На основе уравнения Лиувилля-Неймана вычислена матрица плотности системы, состоящей из двух атомов и квантованного поля при учете дополнительного когерентного монохроматического поля. Использование критерия Переса-Хородецких позволило провести анализ степени перепутанности в зависимости от условий эксперимента.

На основе последовательного квантово-электродинамического расчета указана область времен на начальном этапе эволюции системы, для которого справедливы более простые методы, например, метод эффективного

гамильтониана. С использованием этого метода и уравнения Гейзенберга-Ланжевена проанализированы флуктуации макроскопической системы, взаимодействующей со сжатым светом, а также корреляции флуктуаций поперечных компонент углового момента двух пространственно разделенных макроскопических систем. Показано, что кооперативное комбинационное рассеяние света, формирующее слабую примесь перепутанного состояния для двух изолированных атомов, приводит к сильной корреляции флуктуаций поперечных компонент углового момента макроскопических систем и высокой степени сжатия изолированной системы.

11. Исследовано оптическое детектирование магнитного и радиооптического резонанса излучением с неклассической статистикой. Определены параметр качества квантового стандарта частоты и предельная чувствительность магнитометра при использовании сжатого света и интерференционной схемы регистрации. Проанализирована зависимость этих величин от условий эксперимента.

Исследовано влияние глубокой фазовой модуляции и последующего фазово-чувствительного или синхронного детектирования на преобразование избыточных флуктуаций пробного излучения, а также на шумы фотоприема. Исследованы условия, при которых эти избыточные шумы могут быть подавлены при использовании дифференциальных схем регистрации.

12. Проведен последовательный анализ чувствительности метода спектроскопии флуктуаций интенсивности, учитывающий квантовый характер фотопоглощения и возможность использования для детектирования пробного излучения с неклассической статистикой фотонов. Показано, что погрешности этого метода определяются корреляционной функцией гейзенберговских операторов фототока четвертого порядка, которая представлена суммой вкладов от  $TN$ -упорядоченных корреляционных функций оператора напряженности детектируемого излучения четных порядков от второго до восьмого. В случае гетеродинного фотоприема дисперсия флуктуации, наблюдаемой в методе СФИ, выражена через спектральный параметр Мандела пробного излучения  $\xi(\Omega)$ . Для пробного излучения, находящегося в сжатом состоянии, для которого предельное значение  $\xi(\Omega) \rightarrow -1$ , можно ожидать заметного увеличения чувствительности метода СФИ, причем замена классического света сжатым оказывается более существенной, чем в аналогичной ситуации в линейной спектроскопии. Показано, что использование сжатого излучения приводит к возможности наблюдения качественно нового эффекта в спектроскопии флуктуаций – корреляционного эффекта Фарадея.

**Научная и практическая значимость.** Используемые в работе методы расчета корреляционных функций рассеянного света могут быть обобщены на случай коррелированных атомных рассеивателей, на анализ корреляционных функций поля высокого порядка. Метод расчета парных межатомных корреляций, возникающих при рассеянии сжатого света, может быть обобщен на случай большего числа атомов и использован в более высоких порядках теории возмущений. Помимо возможности рассмотреть квантованные поля с конечной шириной спектра, т.е. отказаться от марковского приближения, он позволяет также выйти за рамки приближения вращающейся волны. При этом результаты для многоатомной матрицы плотности получаются в аналитическом виде. Примененный метод может использоваться для определения области применимости более простых приближений, например, метода эффективного гамильтониана.

Практическая значимость представленной работы определяется также тем, что часть исследований проведена в тесном сотрудничестве с экспериментаторами и ориентирована либо на объяснение уже проведенных, либо на постановку новых экспериментов. Так, материалы диссертационного исследования могут быть использованы для совершенствования методов оптического детектирования поляризованных атомных ансамблей, представляющих интерес для задач оптической ориентации атомов или молекул, в том числе в фотохимии. Например, полученные аналитические решения уравнений переноса излучения показывают возможность изучения поляризации атомных ансамблей неполяризованным излучением, что особенно важно для атомов, частоты переходов которых лежат в области вакуумного ультрафиолета. Использование этих решений позволяет избежать специальных корреляционных экспериментов и наблюдать методами традиционной линейной спектроскопии корреляции функций распределения атомов по различным степеням свободы, имеющие место при фотодиссоциации молекул.

Хорошее согласие результатов, полученных при теоретическом анализе оптической анизотропии призм полного внутреннего отражения, с данными экспериментов позволяет применять разработанные простые модели упруго-оптических эффектов в тех случаях, когда экспериментальные исследования затруднительны. Полученные результаты дают также возможность оптимизировать работу лазерных гироскопов, использующих эти призмы.

Анализ конкретных условий формирования сжатых состояний света, рассеянного поляризованным ансамблем атомов, дает возможность рассматривать этот механизм как еще один практический способ получения света с неклассическими статистическими свойствами. Использование эффекта ра-

диооптического резонанса при этом позволяет осуществлять дополнительное управления спектром сжатия.

Результаты, полученные при исследовании КОР, ориентированы на совершенствование как традиционных, так и корреляционных методов оптического детектирования состояния холодных атомных ансамблей, являющихся интенсивно исследуемыми объектами современной квантовой физики. Интерференционные явления при рассеянии света могут быть использованы для более глубокого анализа происходящих с атомами процессов. Предложенные в работе методы частичного разделения вкладов рассеяния различной кратности дают возможность сделать этот анализ еще более детальным. Исследованные особенности зависящего рассеяния на реальных многоуровневых атомах могут быть использованы для более точного определения условий для наблюдения сильной локализации света в атомных ансамблях.

Выполненный в работе анализ точности оптических измерений направлен на поиск оптимальных условий проведения эксперимента по детектированию малой анизотропии. Проанализированный метод построения квантового магнитометра и стандарта частоты с использованием интерферометра Маха-Цандера важен для задач совершенствования приборов квантовой электроники, таких как квантовые магнитометры и стандарты частоты с оптической накачкой и оптическим детектированием. Доказательство существенного повышения чувствительности метода СФИ при использовании сжатого света может способствовать более широкому применению корреляционной спектроскопии.

Предложенный и обоснованный механизм переноса перепутанности с полевой подсистемы на атомную может использоваться в задачах квантовой информатики для создания перепутанности пространственно разделенных и не взаимодействующих между собой непосредственно атомов. В отличие от предложенных ранее вариантов он применим для оптически тонких ансамблей. Он особо интересен для случая охлажденных атомов в ловушках, поскольку связан со слабым разогревом ансамбля рассеиваемым светом.

### **Основные результаты, выносимые на защиту.**

1. Теория когерентного обратного рассеяния света ансамблем атомов, охлажденным в магнитооптической ловушке.
2. Теоретическое описание переноса излучения в оптически плотных поляризованных по угловому моменту неоднородных атомарных газах и использование полученных соотношений для задач оптического детектирования.
3. Механизм создания сжатых состояний электромагнитного поля в опти-

чески плотной поляризованной по угловому моменту газовой среде, а также при радиооптическом резонансе.

4. Анализ чувствительности методов спектроскопии флуктуаций интенсивности при использовании света с неклассической статистикой.

5. Теоретический анализ применения сжатого излучения в задачах квантовой магнитометрии и стандартизации частоты.

6. Теоретическое обоснование метода создания спинового сжатия и перепутанности в многоатомных ансамблях.

**Личный вклад автора.** Основные результаты диссертации, вынесенные на защиту, получены лично автором. Ему принадлежит постановка задачи, разработка физических моделей, выбор методов решения, получение основных как аналитических, так и численных результатов и их анализ. В большинстве работ, опубликованных в соавторстве, роль автора является определяющей в той части, которая вошла в данную диссертацию. В ряде работ – [20,26] роль автора не является приоритетной, однако все приведенные там результаты получены и проанализированы им независимо.

**Апробация работы.** Изложенные в диссертации материалы докладывались на научных семинарах кафедры теоретической физики СПбГПУ, на кафедре теоретической физики и астрономии РГПУ им.Герцена, на факультете атомной физики Old Dominion University (Норфолк, США), лаборатории квантовой оптики (Орхус, Дания), лаборатории квантовой электроники ФТИ им. А.Ф.Иоффе, в лаборатории нелинейной оптики МГУ. В течение последних трех лет по материалам диссертации выполнены доклады на следующих конференциях и семинарах: IX Международной конференции по квантовой оптике (Минск, 2002); 2-ом семинаре по квантовой оптике, посвященный памяти Д.Н.Клышко (Москва, май 2002); Международной конференции по квантовой электронике IQEC/LAT (Москва, июнь 2002); 34-ой конференции Европейской Группы по Атомной Спектроскопии EGAS-34 (София, Болгария, июль 2002); семинаре по квантовой атомной оптике (Сан-Фелио-де-Гишолс, Испания, сентябрь 2002); 2-ой конференции "Фундаментальные проблемы оптики" (Санкт-Петербург, октябрь 2002); 3-м семинаре по квантовой оптике, посвященный памяти Д.Н.Клышко (Москва, май 2003); 35-ой конференции Европейской Группы по Атомной Спектроскопии EGAS-35 (Брюссель, Бельгия, июль 2003); Международном семинаре "Эффекты насыщения при многократном рассеянии света холодными атомными газами" (Ницца, Франция, октябрь 2003); X Международной конференции по квантовой оптике (Минск, июнь 2004).

## **Структура и объем диссертации.**

Диссертация состоит из пяти содержательных глав. Помимо общего введения, все главы сопровождаются отдельными вводными частями, содержащими детальную постановку конкретных задач и обзор соответствующей литературы. Основные результаты работы разделены по главам и приведены в заключениях к каждой главе. Объем диссертации составляет 267 страниц, в том числе 63 рисунка. Библиография включает 228 наименований.

## **Содержание работы.**

Во **введении** обоснована актуальность выбранной темы, отмечены научная новизна и практическая значимость а также сформулированы основные цели работы.

В **первой главе** на основе анализа схем фотодетектирования, применяемых в традиционной линейной поляризационно-чувствительной спектроскопии, а также при исследовании статистических свойств света в методе СФИ, рассмотрена связь экспериментально наблюдаемых величин с корреляционными функциями операторов напряженности электромагнитного излучения, а также стандартными гриновскими функциями поля, вводимыми в квантовой электродинамике. В случае СФИ анализируется как гомодинная, так и гетеродинная схема фотодетектирования. В последнем, наиболее интересном случае, получена связь корреляционной функции флуктуаций фототока и набора нормальных и аномальных полевых функций Грина второго порядка. Изменение последних, обусловленное взаимодействием с рассеивающей средой, вычисляется с использованием методов диаграммной техники Константинова-Переля-Келдыша для неравновесных систем. Вначале рассмотрен случай оптически тонких сред. Анализ диаграмм, описывающих однократное рассеяние света атомами, показал, что влияние вакуумного термостата, определяющее спонтанную релаксацию, можно корректно учесть, введя точные атомные гриновские функции возбужденного состояния атомов. Для этих функций получено и решено уравнение Дайсона, что позволило получить выражения, описывающие резонансную флуоресценцию атомов.

Проведен анализ поправок, связанных с учетом конечной оптической толщины рассеивающей среды, т.е. с многократным рассеянием. Показано, что их можно разделить на две группы – поправки к запаздывающей и опережающей функциям Грина, описывающие когерентное рассеяние вперед, и поправки, связанные с некогерентным рассеянием, т.е. с рассеянием, при

котором происходит изменение волнового вектора фотона в среде. Последние могут быть двух типов – лестничные и циклические (названия связаны с явным видом соответствующих диаграмм). Вклад лестничных диаграмм отличен от нуля при рассеянии света в плотной среде на произвольный угол. Циклические диаграммы ответственны за интерференционные эффекты при многократном рассеянии и дают ненулевой вклад только в узком конусе вблизи направления, противоположного направлению падающей на среду волны.

Частичное суммирование диаграмм всех типов показало, что эффекты когерентного рассеяния вперед для слабого излучения можно учесть точно введением соответствующей запаздывающей функции Грина. Во втором параграфе данной главы для нее выведено уравнение переноса в оптически плотной неравновесной среде. Диаграммная техника позволила получить явное выражение для тензора диэлектрической восприимчивости ансамбля, характеризующегося произвольным распределением атомов по скоростям, их неоднородным пространственным распределением и произвольным внутренним состоянием с учетом реальной сверхтонкой и зеемановской структурой уровней. Применение представления неприводимых тензорных компонент атомной матрицы плотности дало возможность выразить тензор диэлектрической восприимчивости через ориентацию и выстраивание углового момента и описать такие анизотропные оптические свойства поляризованных атомных ансамблей как двулучепреломление и дихроизм. Полученные соотношения являются обобщениями ранее известных результатов, справедливых либо для оптически тонких сред либо бесструктурных частиц.

Корректный учет когерентного рассеяния позволил получить для корреляционных функций света, рассеянного оптически плотной средой в произвольном направлении, явные выражения в виде разложения по числу актов некогерентного рассеяния.

В заключительном параграфе этой главы рассмотрено влияние нелинейных эффектов на процесс распространения света в оптически плотной неравновесной атомной среде. С этой целью методами диаграммной техники получены уравнения переноса для нормальных и аномальных корреляционных функций. Расчет проведен для случая зондирования в полосе прозрачности с удержанием первых исчезающих нелинейных поправок по интенсивности падающего на среду излучения. Полученные уравнения в силу нелинейного параметрического рассеяния волны в среде оказались связанными, при этом в каждом из них появляются свободные члены, которые описывают распределенные по объему источники корреляционных функций: для



нормальных корреляторов – квазирезонансное комбинационное рассеяние, для аномальных – параметрическое рассеяние. Детальное обсуждение сделанных при выводе приближений показало существование широкой области возможных применений этих уравнений. В отличие от обычно рассматриваемой теории четырехволнового смешения в газе неподвижных двухуровневых атомов, использованный в работе подход позволяет исследовать влияние пространственно-временных корреляций и рассмотреть взаимодействие падающей на среду волны с предварительно ориентированными многоуровневыми атомами, неравномерно заселяющими подуровни основного состояния.

Полученные в первой главе соотношения являются теоретической основой исследований когерентных и корреляционных эффектов при рассеянии света, проводимых в последующих главах диссертации.

**Вторая глава** посвящена анализу когерентных и корреляционных свойств излучения, рассеянного вперед, т.е. свойств, так называемого, прошедшего среду света. В первой части этой главы показано, что уравнения переноса для запаздывающей функции Грина, полученные в первой главе и описывающие когерентное рассеяние света вперед, может быть решено *аналитически* даже для неоднородной поляризованной среды. Это можно сделать в практически важных случаях, когда неоднородность связана только с пространственной зависимостью концентрации атомов, или, когда поляризация среды слабо меняется по направлению на расстояниях порядка длины свободного пробега фотона. На основе результатов для запаздывающей функции Грина получены формулы преобразования интенсивности и поляризационного тензора излучения при его распространении в оптически плотной анизотропной среде. В качестве примеров применения общей теории рассмотрены следующие задачи: а) Проанализирован эффект возникновения циркулярной поляризации при прохождении линейно поляризованного света через среду атомов, характеризующихся выстроенностью углового момента; б) Рассмотрено поляризационно-чувствительное оптическое детектирование состояния атомного ансамбля в случае, когда вероятность заселения зеемановских подуровней атомов коррелирует с их поступательным движением. Полученные общие соотношения применены для анализа пространственной анизотропии ориентированных атомов, образующихся при фотодиссоциации двухатомных молекул; в) Проанализированы анизотропные оптические свойства призм полного внутреннего отражения, используемых в лазерных гироскопах. Теоретически рассмотрены две модельные системы – плоская пластина в условиях плоско-деформированного состояния и цилин-

дрическая призма, подвергающаяся касательной нагрузке в основании. Для них решены уравнения для тензора напряжений, что позволило определить тензор диэлектрической проницаемости, входящий в уравнения переноса излучения. В результате решения последнего получено хорошее качественное и удовлетворительное количественное согласие с данными прецизионных измерений.

Во второй части этой главы исследовано влияние конечной оптической толщины на процесс формирования сжатых состояний электромагнитного поля, имеющий место в результате нелинейного взаимодействия классического излучения с системой ориентированных атомов. В качестве конкретного примера рассмотрено распространение циркулярно поляризованного света в среде, основное и возбужденное состояние атомов которой характеризуется моментом  $1/2$ . Атомы предполагаются помещенными во внешнее постоянное магнитное поле, приводящее к зеемановскому расщеплению уровней. Проведено количественное сравнение роли комбинационного и параметрического рассеяния. Рассмотрена роль нелинейной дисперсии. Указаны условия, при которых негативное влияние последней в плотной среде может быть ослаблено. Для этих условий получено асимптотическое аналитическое выражение для спектра флуктуаций фототока прошедшего света. В более общем случае полученная в первой главе система уравнений переноса для нормальных и аномальных корреляционных функций решена численно. Проведено сравнение со случаем оптически тонкой среды. Показано, что в протяженной среде эффект квантовых корреляций накапливается и может быть достигнута высокая степень сжатия. Проанализированы конкретные условия, при которых такое накопление имеет место.

Исследованы флуктуации интенсивности оптического излучения, прошедшего поляризованную газовую среду, атомы которой неравномерно заселяют подуровни зеемановской или сверхтонкой структуры и подвергнуты дополнительному воздействию классического электромагнитного поля, квазирезонансного переходу между этими подуровнями. Подобная постановка задачи, с одной стороны, представляет интерес с точки зрения влияния низкочастотных полей на спектры флуктуаций неравновесных систем, а с другой, имеет реальное практическое значение, поскольку соответствует условиям работы таких приборов квантовой электроники, как магнитометры и стандарты частоты с оптической накачкой. Ориентируясь на практические приложения, рассмотрен типичный случай гауссовой статистики оптического излучения и гомодинной схемы детектирования. Вычисления ограничены случаем трехуровневых систем, влияние реальной зеемановской струк-

туры уровней проанализировано качественно. При решении применен подход, основанный на диаграммном разложении двухфотонной функции Грина. Показано, что коррелятор фототока, наблюдаемый при детектировании рассматриваемого излучения, выражается через корреляционные функции флуктуаций населенностей различных атомных подуровней, которые в свою очередь выражены через одноатомные функции Грина. Для последних методами диаграммной техники получены графические уравнения, описывающие эволюцию атома в переменном низкочастотном поле. Обнаружено, что при зондирования в полосе прозрачности при определенных условиях имеет место частичное подавление дробового шума. Обсуждается зависимость этого эффекта от условий эксперимента.

**Третья глава** посвящена развитию теории *когерентного обратного рассеяния* света атомными ансамблями, охлажденными в магнитооптических ловушках. Расшифровка диаграмм, полученных в первой главе и описывающих корреляционные функции рассеянного света, позволяет выразить эти величины через матрицу однократного рассеяния, запаздывающую функцию Грина излучения, описывающую распространение света в среде между актами некогерентного рассеяния и атомную матрицу плотности. Сечение рассеяния получается в виде ряда по числу актов некогерентного рассеяния. Аналитические выражения для амплитуды рассеяния, а также аналитические решения уравнения для фотонной функции Грина, найденные во второй главе, дают явное выражение для парциальных вкладов рассеяния различной кратности в полное сечение КОР. Для  $n$ -кратного рассеяния эти выражения имеют вид  $6n$ -кратных интегралов по координатам и скоростям цепочки  $n$  атомов, участвующих в некогерентном рассеянии. Многократные интегралы, появляющихся в расчетах, вычисляются методом существенной выборки в рамках процедуры Монте-Карло. Полученные соотношения позволяют последовательно учесть все основные факторы, влияющие на характер КОР, – всю сверхтонкую и зеемановскую структуру основного и возбужденного состояния атомов; поляризацию пробного излучения; реальную форму атомного облака, его размеры и пространственную неоднородность; движение атомов; поляризацию атомов по угловому моменту, обусловленную как самим пробным светом, так и возможной вспомогательной оптической накачкой; конечную ширину спектра пробного излучения.

Все выполненные к настоящему времени эксперименты по наблюдению когерентного обратного рассеяния проводились в условиях, когда естественная ширина атомных уровней  $\gamma$  существенно превышала доплеровские сдвиг,

а распределение атомов по зеемановским подуровням являлось равномерным. Поэтому теоретические исследования начались с рассмотрения ансамбля неподвижных неполяризованных атомов. Для таких атомов подробно проанализирована угловое распределение рассеянного резонансного излучения (переход  $F_g = 3 \rightarrow F_e = 4$   $D_2$ -линии  $^{85}\text{Rb}$ ) в зависимости от поляризационной схемы наблюдений, оптической толщины атомного облака, его формы и размеров. Пространственное распределение атомов в ансамбле считалось гауссовым, полуширина которого для трех ортогональных направлений в общем случае была разной.

В результате выполненных расчетов было надежно теоретически обосновано, а при качественном анализе и объяснено, обнаруженное в эксперименте малое абсолютное значение фактора усиления КОР атомарных газов, которое существенно меньше классического значения, равного двум (рис.1а). Обнаружено также, что конусы не всегда являются круговыми, имеют сложную форму, ширина центральной части которой определяется размерами облака, а крутизна крыльев обратно пропорциональна длине пробега фотона в среде. Такая форма конуса объясняется существенным вкладом процессов многократного рассеяния в область вблизи вершины конуса, тогда как крылья определяются главным образом двукратным рассеянием. Для облаков, оптическая толщина которых фиксирована и не превышает десяти, с хорошей точностью наблюдается обратно пропорциональная зависимость полуширины конуса от размеров облака, амплитуда конуса при этом практически не меняется.

При исследовании спектральной зависимости сечения КОР предсказан целый ряд особенностей, не исследовавшихся до этого в эксперименте. Так, зависимость фактора усиления КОР от частоты квазирезонансного пробного излучения является существенно более асимметричной по сравнению с тем, чего можно было бы ожидать при существующей сверхтонкой структуре. Помимо этого, для поляризационной схемы эксперимента, при которой регистрируется излучение с той же спиральностью, что и у падающего на среду света, в точном резонансе наблюдается локальный минимум фактора усиления КОР, величина которого уменьшается с увеличением оптической толщины (рис. 1б). Анализ причин нетривиальной спектральной зависимости выявил принципиальную роль квантовой интерференции переходов через различные сверхтонкие компоненты возбужденного состояния, в том числе и нерезонансные. Роль этой интерференции возрастает при многократном рассеянии в оптически плотных средах.

Квантовая интерференция проявляется еще более существенно при исследовании

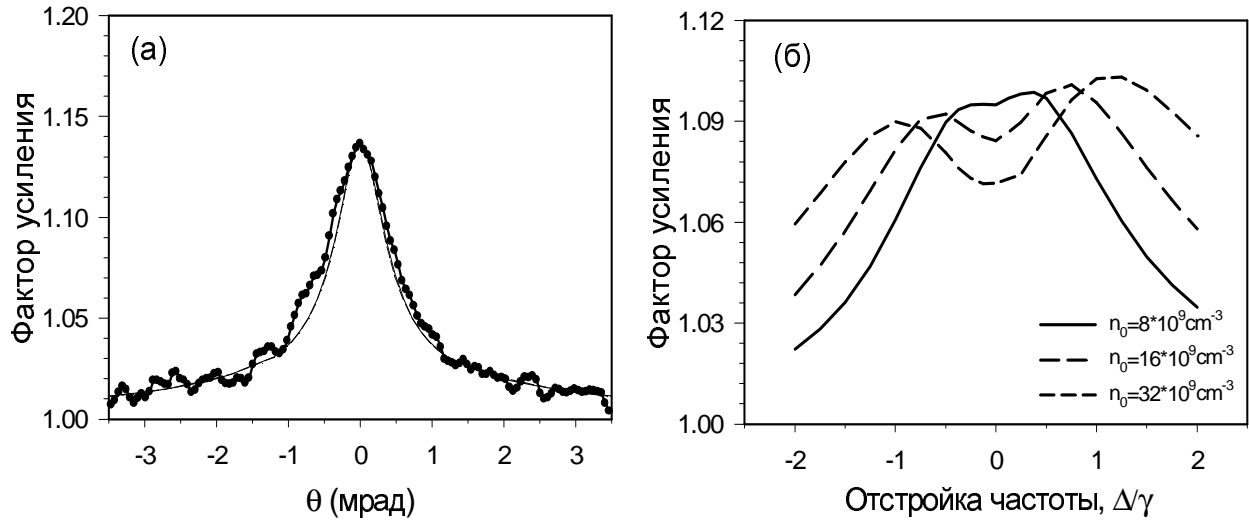


Рис. 1: (а) Профиль конуса обратного рассеяния при наблюдении рассеянного излучения с сохраняющейся линейной поляризацией ( $Lin \parallel Lin$ ). Сплошная кривая – результаты расчета, точки – эксперимент (см. [24,25]); (б) Спектральная зависимость фактора усиления для атомных ансамблей одинакового размера, но разной концентрации  $n_0$ , поляризационная схема эксперимента соответствует регистрации света с сохраняющейся спиральностью ( $H \parallel H$ ), частота измеряется в единицах  $\gamma$  и отсчитывается от частоты перехода  $F_g = 3 \rightarrow F_e = 4$   $D_2$ -линии  $^{85}\text{Rb}$ , атомное облако имеет гауссово пространственное распределение с дисперсией 1 мм.

довании спектральной зависимости в широком частотном диапазоне, перекрывающем всю сверхтонкую структуру возбужденного состояния. В некоторых спектральных областях фактор усиления может стать меньше единицы: интерференция переходов через разные сверхтонкие подуровни возбужденного состояния может быть деструктивной. С другой стороны, для ряда поляризационных схем есть спектральные области, где фактор усиления близок к своему максимальному значению, равному двум (рис. 2а). Наличие сверхтонкой структуры приводит к тому, что вследствие упругих рамановских процессов при рассеянии на некоторой цепочке атомов фотон на прямом и обратном пути будет "взаимодействовать" с разными подуровнями. При определенных частотах пробного излучения соответствующие амплитуды рассеяния могут быть близки по абсолютной величине. В зависимости от относительного знака амплитуд возможна как конструктивная, так и деструктивная интерференция.

Хорошее совпадение результатов расчета формы конуса обратного рассеяния с данными эксперимента [25] (см. рис.1а), особенно, учитывая отсутствие каких-либо подгоночных параметров, говорит как о правильном вы-

боре модели, так и о потенциальных возможностях приведенного расчета в более сложных ситуациях. С другой стороны, сравнение экспериментальных и теоретических зависимостей фактора усиления от частоты пробного излучения показало, что увеличение времени наблюдения КОР в эксперименте [29], необходимое для увеличения точности измерений, а, следовательно, и времени взаимодействия с рассеиваемым светом, приводит к ряду важных последствий. Во-первых, происходит разогрев образца и наблюдается дрейф его как целого. Вторым следствием может быть эффект поляризации атомного ансамбля по внутреннему угловому моменту, т.е. эффект типа оптической накачки или оптической ориентации. По этой причине в данной главе проведено также исследование процесса КОР для ансамбля движущихся и поляризованных атомов. Для более детального анализа эти два аспекта рассмотрены по-отдельности.

С движением атомов связано несколько физических эффектов. Во-первых, в процессе элементарного акта рассеяния свет испытывает сдвиг фазы, величина которого определяется отношением отстройки частоты к полуширине линии. Эта величина зависит от скорости атома, которая является случайной и разной для разных атомов. Кроме этого, рассеяние на движущемся атоме приводит к изменению частоты, поэтому один и тот же участок траектории на прямом и обратном пути фотон проходит, имея разную частоту, которой соответствуют разные показатели поглощения и преломления. Развитая общая теория КОР позволяет последовательно учесть все эти эффекты. Расчеты показывают, что уже при температурах, при которых  $kv_0 = 0.1\gamma$  ( $k$  – модуль волнового вектора, падающего на ансамбль излучения, а  $v_0$  – наиболее вероятная скорость), т.е. в случае, когда характерные доплеровские сдвиги составляют одну десятую естественной ширины атомной линии, для резонансного излучения начинает проявляться локальный минимум фактора усиления для всех поляризационных схем, а не только для случая сохраняющихся спиральностей. Второй качественной особенностью приведенных кривых является быстрое увеличение ширины спектра и уменьшение его амплитуды. При температурах  $kv_0 = 0.25\gamma$  эффективная ширина увеличивается, а характерная величина фактора уменьшается почти в два раза. Разогрев до температур порядка  $kv_0 = \gamma$  делает эффект когерентного обратного рассеяния трудно наблюдаемым. Отметим, что уширение контура и появление минимума в области резонансных частот – это те два основных эффекта, которые наблюдались в эксперименте [29]. Анализ влияния дрейфа облака как целого показал наличие сдвига спектрального контура без изменения его формы, что также наблюдалось в эксперименте

[29].

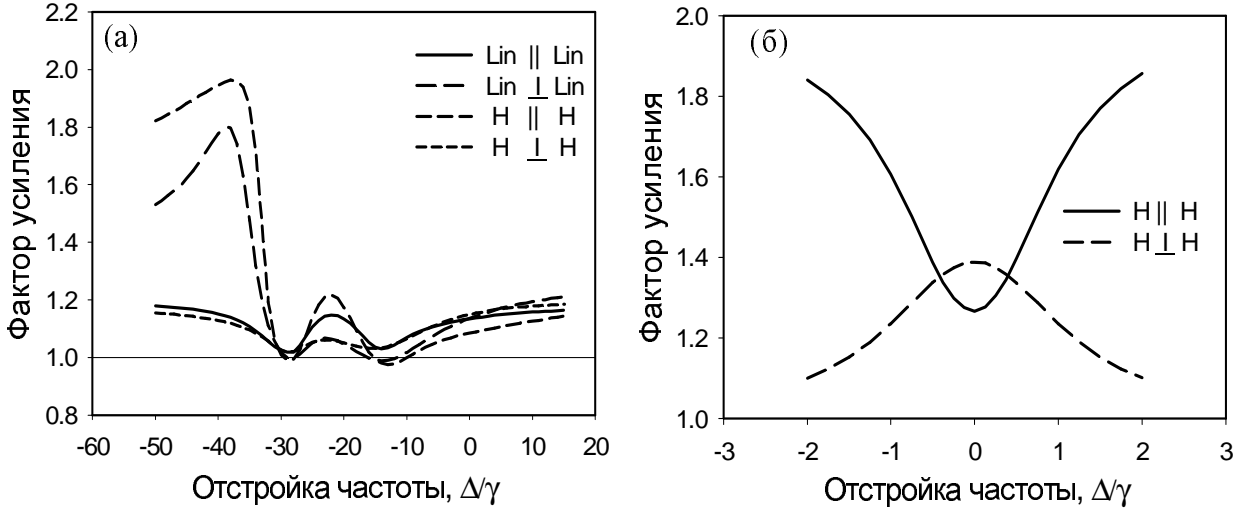


Рис. 2: (а) Спектральная зависимость фактора усиления в широком спектральном диапазоне; (б) Спектральная зависимость фактора усиления для ансамбля атомов, ориентированных по угловому моменту в направлении падающего излучения. Знак  $\perp$  означает, что в эксперименте регистрируется излучение с поляризацией, ортогональной исходной. Остальные обозначения совпадают с приведенными на рис. 1.

Влияние неравновесности ансамбля атомов по внутреннему состоянию проанализировано для двух частных случаев. Вначале рассмотрена спектральная зависимость КОР для ориентированной среды, когда все атомы находятся на уровне  $F_g = 3$ ,  $M_g = 3$  основного состояния, поскольку роль поляризации проявится здесь в максимальной мере. Ориентация предполагается созданной вспомогательным источником света, так что поляризация пробного излучения может выбираться произвольной. Обнаружено, что поляризация среды не только существенно меняет количественные характеристики рассеяния, но и приводит к качественно новым результатам. Так, в рассматриваемом случае при правой поляризации падающего света правила отбора допускают только один переход – на уровень  $F_e = 4$ ,  $M_e = 4$  возбужденного. Переход оказывается изолированным. В обратном направлении при этом может рассеиваться только излучение с левой спиральностью. Это приводит к тому, что в крыле линии в оптически тонкой среде фактор усиления достигает своего максимально возможного значения, равного двум (рис. 2б). Вторым рассмотренным был ансамбль, атомы которого поровну заселяют подуровни  $F_g = 3$ ,  $M_g = \pm 3$ , а на других подуровнях атомы отсутствуют. В этом случае неравновесность по угловому моменту имеет характер выстраивания и приводит приблизительно к двукратному увеличению фак-

тора усиления по сравнению со случаем неполяризованной среды.

Для количественной интерпретации экспериментов по наблюдению спектров КОР существенное значение имеет учет конечной ширины спектра пробного излучения даже в случае использования диодного лазера с внешним резонатором, ширина линии которого значительно меньше естественной ширины линий атома. Показано, что уже в случае неподвижных атомов имеется отличие спектров падающего на среду и рассеянного назад света. Так, для зондирующего излучения, центральная частота которого  $\omega_L$  отличается от резонансной, наблюдается заметное увеличение относительного числа фотонов с частотой, близкой к частоте атомного перехода  $\omega_0$ . Изменяются также интегральные характеристики рассеяния – фактор усиления и полная интенсивность рассеянного назад света. Происходит эффективное уширение спектральных кривых (зависимостей этих величин от  $\omega_L$ ) по сравнению со случаем монохроматического пробного излучения. Наиболее существенно данные эффекты проявляются тогда, когда по тем или иным причинам многократное рассеяние играет относительно большую роль, например, при больших оптических толщинах атомных ансамблей или в поляризационных схемах с сохраняющимися спиральностями, для которых относительная роль однократного рассеяния мала.

Во втором параграфе третьей главы проанализировано применение метода спектроскопии флуктуаций интенсивности для наблюдения эффекта когерентного обратного рассеяния. Показано, что метод гетеродинамирования при СФИ позволяет анализировать фактор усиления для *данной спектральной компоненты* рассеянного света, т.е. отношение спектральной плотности интенсивности рассеянного назад света к спектральной плотности неинтерференционной составляющей (*спектральный фактор усиления*), что более детально характеризует процесс КОР. Для оптически плотной среды движущихся атомов рассчитан спектральный состав света, испытавшего рассеяния различной кратности, и выявлены различия формы спектров когерентной и некогерентной составляющих. Обнаружено, что вследствие доплеровского эффекта спектры рассеянного назад излучения оказываются сдвинутыми относительно спектра падающего излучения, причем наиболее сильный сдвиг испытывает однократно рассеянное излучение. Это приводит к частичному разрешению спектров различных порядков рассеяния. Имеется также различие доплеровских сдвигов для интерференционной и неинтерференционной составляющих для одной и той же кратности рассеяния. Максимальное значение спектрального фактора усиления оказывается существенно больше его интегрального значения (см.рис. 3а), что позволяет



указать экспериментальные условия, при которых даже в случае  $kv_0 > \gamma$  можно наблюдать эффект усиления при рассеянии назад.

Разработанная теория когерентного обратного рассеяния позволяет описать не только стационарный режим, но и переходные процессы, приводящие к его установлению, а также послесвечение ансамбля атомов после выключения источника света. В третьем параграфе этой главы исследована динамика КОР при импульсном возбуждении в зависимости от длительности импульса, типа поляризационной схемы наблюдений, от оптической толщины, отстройки частоты излучения от резонансной. Показано, что после окончания импульса возбуждения интенсивность затухает по сложному закону, который можно описать разложением по модам, соответствующим различной кратности рассеяния. Диффузия многократно рассеянного света приводит к изменению соотношения парциальных вкладов различных порядков рассеяния со временем. При этом фактор усиления после окончания импульса в течение определенного интервала времени существенно превышает свое стационарное значение (рис. 3б). Временная зависимость фактора усиления и полной интенсивности рассеянного назад света для нерезонансного излучения существенно отличается от резонансного.

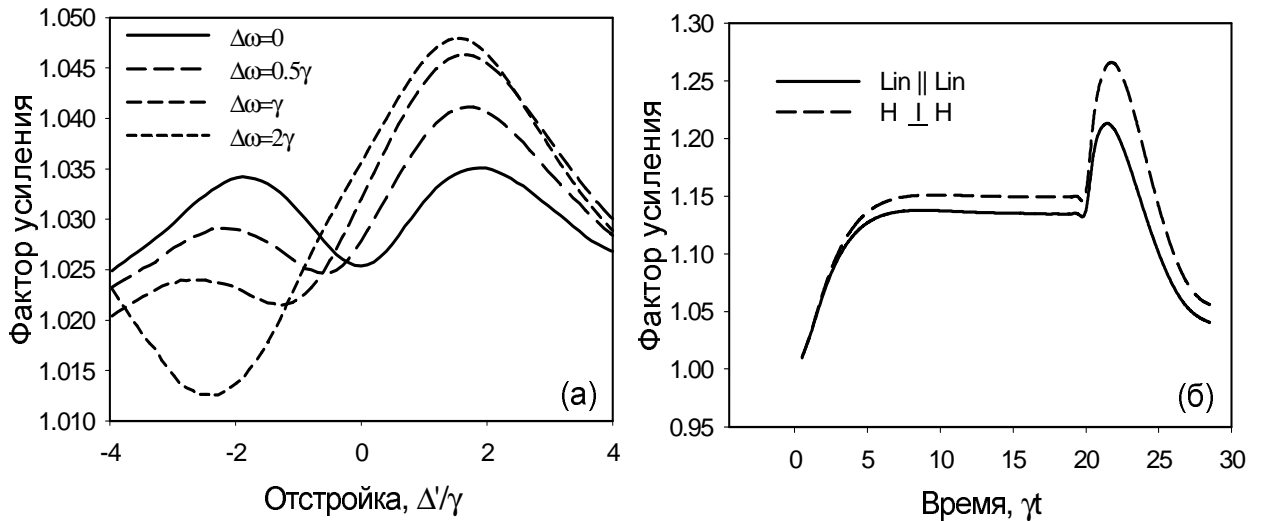


Рис. 3: (а) Спектральный фактор усиления для ансамбля движущихся атомов ( $kv_0 = \gamma$ ),  $\Delta$  и  $\Delta'$  – отстройки частот падающего и рассеянного света от частоты перехода  $F_g = 3 \rightarrow F_e = 4$ ; (б) Временная зависимость фактора усиления обратного рассеяния для импульсного излучения.

В последнем параграфе третьей главы рассмотрено зависимое рассеяние света. Атомы в ловушке расположены хаотически. При существующих концентрациях имеется малая, но конечная вероятность рассеяния света на ква-

зимолекуле, образованной парой атомов, расстояние между которыми меньше длины световой волны. Для такой пары рассчитан спектр квазимолекулярных электронных термов с учетом резонансного диполь-дипольного взаимодействия атомов. Определены частоты и времена жизни квазимолекулярных состояний. Проанализирована угловая и спектральная зависимость сечения при различных расстояниях между атомами. Обнаружено, что в спектре имеются узкие линии, связанные с субизлучательными состояниями, однако абсолютные величины сечений оказываются меньше соответствующих величин для изолированных атомов. Это обстоятельство вместе с малой вероятностью образования кластеров позволяет не учитывать их при описаниях КОР. В то же время наличие долгоживущих возбужденных состояний приводит к подавлению диффузии фотонов и важно с точки зрения возможного наблюдения эффекта сильной локализации. Расчет полной населенности возбужденного состояния квазимолекулы показал, что основная доля энергии поля, поглощенной веществом, связана именно с этими долгоживущими состояниями.

В процессе рассеяния электромагнитных волн изменяются как свойства света, так и атомов. В **четвертой главе** рассмотрены статистические свойства атомных ансамблей, формирующиеся в результате взаимодействия с излучением, обладающим неклассической статистикой. Проанализирована возможность создания спинового сжатия в основном, долгоживущем состоянии атомных систем, а также перепутанных состояний двух разделенных макроскопических атомных ансамблей. Спонтанные процессы, неизбежно сопровождающие поляризацию основного состояния, происходят недетерминированно и оказывают негативное воздействие на корреляционные эффекты. Для нейтрализации этого воздействия предложен метод оптической накачки, основанный на вынужденном комбинационном рассеянии света с сильными двухфотонными корреляциями, при котором процесс комбинационного рассеяния усиливается дополнительным взаимодействием атомов с классическим когерентным излучением. Чтобы сопоставить влияние различных каналов возбуждения на динамику двухчастичной матрицы плотности и обосновать эффективность предложенного механизма, проведен анализ различных элементарных процессов, основанный на применении методов теории возмущений. Вычислены скоростные константы, соответствующие комбинационному рассеянию, происходящему на атомах независимо, спонтанному комбинационному рассеянию фотонов квантовой моды, стимулированному и спонтанному рассеянию классической моды. Определена также

вероятность наиболее важного процесса – стимулированного кооперативного комбинационного рассеяния пар фотонов на парах атомов. Показано, что последний процесс, приводящий к формированию перепутанных состояний атомов, может быть усилен по отношению к негативным некоррелированным процессам. Это можно сделать двумя способами. Во-первых, используя излучение невырожденного параметрического осциллятора, можно подобрать частоты двух коррелированных мод и классического поля так, чтобы процессы независимого рассеяния были нерезонансны, а для кооперативного процесса выполнялось условие четырехфотонного резонанса. Вторым возможным способом является использование излучения редких фотонных пар сильно коррелированных фотонов, т.е. излучения оптического параметрического осциллятора существенно ниже порога. Для такого излучения вероятность коррелированных процессов, определяемых аномальной корреляционной функцией поля, существенно больше некоррелированного, зависящего от величины нормальных корреляционных функций.

Помимо анализа элементарных процессов проведен расчет динамики двухатомной системы, взаимодействующей с двумя полями – квантованным и классическим, и с учетом возможной спонтанной релаксации возбужденного состояния. Рассмотрен случай перехода  $1/2 \rightarrow 1/2$ , соответствующего  $D_1$  линии атомов щелочного металла без учета сверхтонкой структуры. Расчет взаимодействия атомов со светом с неклассической статистикой усложнен в нашем случае необходимостью учета конечной ширины спектра этого излучения, что ограничивает применение методов, основанных на использовании кинетического уравнения. Была использована специальная процедура, основанная на уравнении Лиувилля-Неймана для объединенной системы атомы+поле. На первом этапе найдено аналитическое решение для оператора независимой эволюции каждого атома  $S(t, 0)$ , описывающего изменение его матрицы плотности под действием когерентного поля и с учетом спонтанной релаксации при произвольных начальных условиях. Знание  $S(t, 0)$  позволило также определить сдвиги подуровней основного состояния атомов в результате динамического Штарк-эффекта и уширение уровней  $\Gamma$ , индуцированное взаимодействием с сильным когерентным полем. Учет квантовых мод проводится методами теории возмущений. В результате получается матрица плотности системы атомы+поле, суммирование которой по всем возможным состояниям поля дает искомого двухатомную матрицу плотности. Дальнейшая процедура сводится к применению теоремы Вика, что приводит к выражению атомной матрицы плотности в виде суммы определенных интегралов от осциллирующих функций, которые вычисляются аналитически

с помощью стандартных компьютерных программ. Таким образом, разработанная процедура позволяет в низких порядках по взаимодействию атомов с квантованным полем получить *аналитическое* выражение для двухатомной матрицы плотности при точном учете спонтанной релаксации и взаимодействия с когерентным полем. Отметим, что предложенный метод расчета может быть рассмотрен в более высоких порядках теории возмущений и обобщен на случай большего числа атомов. Помимо возможности рассмотреть квантованные поля с конечной шириной спектра он позволяет также отказаться от приближения вращающейся волны.

Для определения наличия перепутанности в системе двух пространственно разнесенных атомов применен критерий Переса-Хородецких. Для этого была найдена вспомогательная матрица, получающаяся из двухатомной матрицы плотности транспонированием по переменным одной из частиц, и определены ее собственные числа. Показано, что одно из собственных чисел является отрицательным, что в соответствии с критерием является признаком перепутанности. Проанализирована степень перепутанности в зависимости от параметров задачи. Показано, что роль основного некооперативного процесса – спонтанного рамановского рассеяния – может быть подавлена увеличением отстройки  $\Delta$  когерентного и квантового поля от частоты резонансов. При этом эффективность кооперативных процессов может поддерживаться увеличением интенсивности когерентной моды.

Помимо описанной процедуры были проведены два более простых приближенных расчета, основанных на методе эффективного гамильтониана и методе кинетического уравнения. Сравнение результатов различных расчетов показывает, что на начальной стадии эволюции, на временах меньших  $\Gamma^{-1}$ , точное решение может быть аппроксимировано решением, полученным с помощью эффективного гамильтониана. Это обстоятельство было использовано при расчете перепутывания в системе двух макроскопических пространственно разнесенных ансамблей. Анализ динамики коллективных спинов этих двух ансамблей позволяет сделать вывод, что в процессе кооперативного рамановского рассеяния коррелированных фотонов спиновые подсистемы обоих ансамблей переходят в перепутанное состояние. Флуктуации поперечных спиновых компонент становятся жестко коррелированными.

В заключительном параграфе этой главы рассмотрено формирование спиново сжатого состояния в одном многоатомном ансамбле. Физической основой формирования сжатия, как и ранее, является кооперативное рамановское рассеяние пар коррелированных фотонов в моды, первоначально заполненные когерентным излучением. Однако в отличие от предыдущего

случая обеспечить усиление кооперативных процессов по отношению к некооперативным посредством частотных отстроек не удастся – атомы одного ансамбля находятся в одинаковых условиях. В этом случае предполагается использование слабого излучения, получающегося в результате вырожденного параметрического процесса. На основе решения уравнения Гейзенберга-Ланжевена проанализированы флуктуации поперечных компонент углового момента системы атомов, предварительно полностью оптически ориентированных. Расчет, проведенный для сверхтонкого перехода  $F_g = 1 \rightarrow F_e = 1$  (выделенный сверхтонкий переход в рубидии 87), показал, что в рамках предложенного механизма стандартный квантовый предел флуктуаций  $N/4$  может быть подавлен в  $|\langle \epsilon \epsilon \rangle| / \langle \epsilon^\dagger \epsilon \rangle \gg 1$  раз. Здесь  $\langle \epsilon^\dagger \epsilon \rangle$  и  $\langle \epsilon \epsilon \rangle$  – нормальный и аномальный корреляторы поля рассматриваемого источника.

**Пятая глава** посвящена одной из наиболее важных с практической точки зрения задач статистической оптики – анализу чувствительности оптических измерений и тех предельных ограничений, которые накладывает квантовая природа света и квантовый характер его взаимодействия с атомами исследуемого объекта на точность этих измерений.

В первой части главы анализируются традиционные схемы линейной спектроскопии и поляриметрии. Теоретически исследована точность определения стационарного двулучепреломления прозрачных объектов в измерениях с модуляцией поляризации пробного излучения и дифференциальным подавлением избыточных шумов. Рассмотрены две используемые при подобных измерениях конфигурации построения поляризационного анализатора, проведен подробный количественный анализ возможностей обеих схем. Получены аналитические выражения для наблюдаемого сигнала двойного лучепреломления и для спектра его флуктуаций. Проанализировано отношение сигнал/шум в зависимости как от свойств измеряемого объекта, так и от параметров измерительной схемы. Показано, что применение дифференциальной методики регистрации в схемах с модуляцией поляризации не всегда обеспечивает существенное уменьшение влияния избыточных шумов источника пробного излучения. Наибольшее подавление избыточных шумов следует ожидать в измерительных конфигурациях, для которых в спектрах фототоков на гармониках частоты модуляции поляризации отсутствуют обусловленные модуляцией сильные регулярные компоненты, а постоянные составляющие фототоков не зависят от измеряемого двулучепреломления. В указанной конфигурации может быть достигнута пороговая, на уровне дробовых шумов, чувствительность измерений. Для тех областей параметров,

где имеются экспериментальные данные, обнаружено хорошее качественное и количественное совпадение результатов (см. [19]).

Проведено сравнение чувствительности оптического детектирования магнитного резонанса классическим и сжатым светом. Проанализированы две основные постановки задачи – определение малого намагничивания атомных и молекулярных систем, а также задача прецизионных измерений магнитного поля. Рассмотрены два возможных способа детектирования магнитного резонанса – по измерению дихроизма (зондирование в полосе поглощения) и на основе анализа двулучепреломления исследуемого ансамбля (зондирование в полосе прозрачности). Для всех представляющих интерес величин – предельной чувствительности магнитометра и предельно измеримого намагничивания атомного ансамбля – получены количественные соотношения, определяющие зависимость этих величин от основных параметров задачи – скоростей релаксации, частоты пробного излучения, сечений резонансного рассеяния, размеров фотодетектора, времен измерения и т.д. Показано, что для света с пуассоновской статистикой предельная чувствительность магнитометра выше при зондировании в полосе поглощения, что связано с негативным влиянием световых сдвигов при зондировании в полосе прозрачности. При измерении классическим светом малой анизотропии ансамблей ориентированных парамагнитных атомов световые сдвиги не важны, имеется возможность использования более интенсивных источников, не разрушающих атомную поляризацию, поэтому большей чувствительностью характеризуется зондирование в полосе прозрачности.

При распространении сжатого света в оптически плотной среде его статистические свойства ухудшаются из-за случайного характера поглощения, поэтому для такого излучения в работе рассмотрено только зондирование в полосе прозрачности. Предложена и проанализирована схема магнитометра, когда его рабочая ячейка помещается в одно из плеч интерферометра Маха-Цандера. Показано, что при малой глубине модуляции предложенная схема обладает такой же чувствительностью, которой можно достичь при традиционной фарадеевской регистрации с использованием классического излучения только в случае глубокой модуляции. Это означает, что использование сжатого света наиболее перспективно для опытов с образцами, имеющими малую оптическую толщину, что реально имеет место для подавляющего большинства магнитометров с оптической накачкой. При этом преимущества сжатого света проявляются, даже если условия наблюдения магнитного резонанса не являются оптимальными.

С целью определения предельной разрешающей способности частотно-

го дискриминатора стандарта частоты проанализированы две возможные схемы оптического детектирования радиооптического резонанса с помощью пробного излучения – зондирование в полосе поглощения и в полосе прозрачности. В случае света с пуассоновской статистикой обе рассматриваемые схемы не обнаружили существенных преимуществ по сравнению с традиционной регистрацией самого света накачки. Чувствительность дискриминатора может быть существенно улучшена при использовании сжатого света с субпуассоновской статистикой. Еще более существенные преимущества демонстрирует интерференционная схема регистрации, когда газовая ячейка стандарта частоты помещается в одно из плеч интерферометра Маха-Цандера. Рассмотрена эффективность использования сжатого света в этом случае при различных условиях возбуждения радиооптического резонанса.

Во второй части главы проведена оценка чувствительности метода СФИ, основанная на квантовом описании излучения, зондирующего исследуемую среду. Корреляционная функция фототока четвертого порядка, определяющая погрешность измерения спектра фототока (являющегося наблюдаемой в методе СФИ), представлена суммой вкладов от  $TN$ -упорядоченных корреляционных функций оператора напряженности поля от второго до восьмого порядка. В случае гетеродинного фотоприема, предполагая квази-гауссову статистику при раскрытии операторных средних от некогерентной составляющей поля, дисперсия наблюдаемой выражена через спектральный параметр Манделя в детектируемом излучении  $\xi(\Omega)$ . Полученная оценка показывает, что в случае зондирования сжатым излучением, для которого предельное значение  $\xi(\Omega) \rightarrow -1$ , можно ожидать заметного увеличения чувствительности метода СФИ, причем замена классического света сжатым оказывается более существенной, чем в аналогичной ситуации в линейной спектроскопии. В качестве примера СФИ сжатым светом рассмотрено двухфотонное поглощение на двухуровневом атомном переходе и параметрическое преобразование света в четырехволновом процессе при рассеянии на ориентированных атомах. Показано, что для двухфотонного поглотителя чувствительность регистрации малых изменений параметра Манделя заметно выше в случае сжатого излучения, чем в случае классического. Данное обстоятельство представляется достаточно важным для приложений, поскольку процессы двухфотонного и многофотонного поглощения широко используются в атомной и молекулярной спектроскопии, а также в фотохимии. В случае параметрического рассеяния использование сжатого излучения создает качественно новые возможности для метода СФИ. Наблюдаемые изменения параметра Манделя в прошедшем свете могут быть связаны в этом случае

с поворотом эллипса сжатия на плоскости комплексных амплитуд относительно опорной волны. В рассмотренном примере угол поворота оказывается пропорциональным ориентации угловых моментов атомов в направлении, перпендикулярном зондирующему лучу. Данный эффект, названный корреляционным эффектом Фарадея, интересен тем, что он не может быть интерпретирован, основываясь на классических представлениях как о флуктуациях интенсивности света, так и о флуктуациях восприимчивостей рассеивающей среды, ибо последние, обеспечивая генерацию фазовосопреженных фотонных пар, фактически изменяют состояние поля лишь на уровне квантового соотношения неопределенности.

**Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:**

[1] Batygin V.V., Sokolov I.M. Some features of relaxation and spacial distribution of atomic polarization momenta in stationary optical pumping// Physics Letters A.- 1985.- V.108.- P.29-33.

[2] Соколов И.М. К вопросу о влиянии диффузии атомов на сигнал оптический накачки и магнитного резонанса.// Оптика и спектр.- 1987.- Т.62.- С.487-493.

[3] Куприянов Д.В., Соколов И.М., Субботин С.В. Влияние поляризации атомов на процесс распространения квазирезонансного излучения в газовой среде// ЖЭТФ.- 1987.- Т.93.- С.127-140.

[4] Куприянов Д.В., Соколов И.М. Флуктуации поляризации излучения прошедшего неравновесную газовую среду// ЖЭТФ.- 1988.- Т.94.- С.75-85.

[5] Куприянов Д.В., Соколов И.М. Квантовые особенности в спектре шумов излучения, прошедшего неравновесную газовую среду// ЖЭТФ.- 1989.- Т.95.- С.1980-1987.

[6] Куприянов Д.В., Соколов И.М. Спектр флуктуаций интенсивности излучения при радиооптическом резонансе// Оптика и спектр.- 1990.- Т.68.- С.602-760.

[7] Куприянов Д.В., Соколов И.М. Генерация сжатых состояний электромагнитного поля при взаимодействии излучения с оптически ориентированными атомами// ЖЭТФ.- 1991.- Т.99.- С.93-106.

[8] Васютинский О.С., Куприянов Д.В., Соколов И.М. Способ определения ориентации спинов атомов// Авторское свидетельство №1693477.- 1991.

[9] Kupriyanov D.V., Sokolov I.M. Optical detection of magnetic resonance by classical and squeezed light// Quant. Opt.- 1992.- V.4.- P.55-70.

[10] Индисов И.О., Курятов В.Н., Семенов Б.Н., Соколов И.М., Фофанов



Я.А. Исследование поляризационных характеристик лазерных призм полного внутреннего отражения. I // Оптика и спектр.- 1993.- Т.75.- С.204-215.

[11] Индисов И.О., Курятов В.Н., Семенов Б.Н., Соколов И.М., Фофанов Я.А. Исследование поляризационных характеристик лазерных призм полного внутреннего отражения. II // Оптика и спектр.- 1993.- Т.75.- С. 451-460.

[12] Batygin V.V., Kupriyanov D.V., Platonov K.Yu., Sokolov I.M. Limiting sensitivity of frequency discriminator based on microwave-optical double resonance detection by squeezed light // Quant. Opt.- 1994.- V.4.- P.355-378.

[13] Batygin V.V., Kupriyanov D.V., Sokolov I.M. "Polarization - sensitive correlation spectroscopy of atomic medium" Proceedings of ICONO'95.- 1995.- SPIE, V.2799.- P.302-312, Atomic and Quantum Optics: High-Precision Measurements, ed. S.N.Bagayev, A.S.Chirkin.

[14] Batygin V.V., Kupriyanov D.V., Sokolov I.M. "Correlation spectroscopy with squeezed light", Proceedings of ICONO'95.- 1995.- SPIE.- V.2799.- P.288-294.- Atomic and Quantum Optics: High-Precision Measurements, ed. S.N.Bagayev, A.S.Chirkin.

[15] Sokolov I.M., Fofanov Ja.A. Investigation of the small birefringence of transparent objects by strong phase modulation of probing laser radiation // J.Opt.Soc.Am.A.- 1995.- V.12.- P.1579-1588.

[16] Куприянов Д.В., Соколов И.М. Спектроскопия флуктуаций интенсивности с использованием сжатого света // ЖЭТФ. 1996.- Т.110.- С.837-864.

[17] Куприянов Д.В., Соколов И.М., Субботин С.В. О наблюдении в прошедшем свете корреляций между поляризацией угловых моментов и пространственной анизотропией атомных фотофрагментов // Оптика и спектр.- 1996.- Т.80.- С.728-742.

[18] Куприянов Д.В., Соколов И.М. Спектроскопия флуктуаций интенсивности поляризованных атомных сред с использованием сжатого света // Оптика и спектр.- 1997.- Т.82.- С.952-960.

[19] Соколов И.М., Фофанов Я.А. Подавление избыточных шумов модулированного по поляризации пробного излучения в измерениях малого оптического двулучепреломления // Оптика и спектр.- 1999.- Т.86.- С.833-841.

[20] Havey M.D., Kupriyanov D.V., Sokolov I.M. Two-Photon Coherent Control of Atomic Collisions by Light with Entangled Polarization // Phys. Rev. Lett.- 2000.- V.84.- P.3823-3826.

[21] Havey M.D., Bayram S.B., Kupriyanov D.V., Sokolov I.M. Anomalous depolarization of the  $5p\ 2P_j \rightarrow 8p\ 2P_j$  transitions in atomic  $87\text{Rb}$  // Phys. Rev.A.- 2000.- V.62- P.012503-1-7.

[22] Kupriyanov D.V., Sokolov I.M., Slavgorodskii A.V. Cooperative Raman-

type transition in a system of two four-level atoms: Entanglement in the spin subsystem of two spatially separated atomic ensembles// Phys. Rev. A.- 2001.- V.63.- P.063811-1-15.

[23] Куприянов Д.В., Соколов И.М. Эффекты квантовой статистики в поляризационно-чувствительной спектроскопии свободных и взаимодействующих атомов// Laser Physics.- 2002.- Т.12.- С.908-914.

[24] Kupriyanov D.V., Sokolov I.M., Kulatunga P., Sukenik C.I., Havey M.D. Coherent Backscattering of Light in Atomic Systems: Application to Weak Localization in an Ensemble of Cold Alkali Atoms// Phys. Rev. A.- V.67.- С.013814-1-13.

[25] Kulatunga P., Sukenik C.I., Balik S., Havey M.D., Kupriyanov D.V., Sokolov I.M. Measurement of Correlated Multiple Light Scattering in Ultracold Atomic  $85\text{Rb}$ // Phys. Rev. A.- 2003.- V.68.- С.033816-1-10.

[26] Куприянов Д.В., Соколов И.М., Славгородский А.В. Перепутанные состояния в спиновых подсистемах многоатомных ансамблей// Оптика и спектр.- 2003.- Т.94.- С.717-723.

[27] Голубев Ю.М., Куприянов Д.В., Соколов И.М. Квантовые статистические приложения метода спектроскопии флуктуаций интенсивности// Лазерные исследования в С.-Петербургском Гос. университете. Вып. 2. С.Пб.:НИИ "Российский центр лазерной физики", 2003.- с.168-188.

[28] Kupriyanov D.V., Sokolov I.M., Slavgorodskii A.V. Optical pumping method for squeezing or entanglement in the ground state spin subsystems of macroscopic atomic ensembles// Phys. Rev. A.- 2003.- V.68.- 043815-1-9.

[29] Kupriyanov D.V., Sokolov I.M., Larionov N.V., Kulatunga P., Sukenik C., Balik S., Havey M. Spectral dependence of coherent backscattering of light in a narrow-resonance atomic system// Phys. Rev. A.- 2004.- V.69.- 033801-1-10.

[30] Куприянов Д.В., Ларионов Н.В., Соколов И.М. Когерентное обратное рассеяние некогерентного света ансамблем холодных атомов// Оптика и спектр.- 2004.- Т.96.- С.812-819.