

На правах рукописи

Томилин Владимир Александрович

**ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ С ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕМ ФАЗЫ
В СИСТЕМАХ КВАНТОВОЙ ОПТИКИ
И КОНДЕНСИРОВАННЫХ АТОМОВ**

01.04.05 "Оптика"

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск–2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской Академии наук (ИАиЭ СО РАН)

Научный руководитель: д.ф.-м.н., проф., в.н.с. ИАиЭ СО РАН
Ильичёв Леонид Вениаминович

Официальные оппоненты: Прудников Олег Николаевич
д.ф.-м.н., Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Лазерной физики Сибирского отделения Российской Академии наук, с.н.с.

Хорошко Дмитрий Борисович
д.ф.-м.н., Государственное научное учреждение Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной Академии наук Беларуси, с.н.с.

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Лазерной физики Сибирского отделения Российской Академии наук

Защита состоится “___” _____ 20___ г. в ___ часов на заседании диссертационного совета при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской Академии наук по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИАиЭ СО РАН.

Автореферат разослан “___” _____ 2018г.

Ученый секретарь диссертационного совета

д.ф.-м.н.

Ильичёв Л.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Теория управления системами, проявляющими существенно квантовые свойства, начала развиваться как отдельная область в середине 80-х – начале 90-х годов прошлого века [1, 2]. Она получила актуальность в связи с появлением экспериментальных методик, позволяющих осуществлять управление малоразмерными квантовыми системами. Наиболее эффективным методом в теории управления является использование обратной связи. Экспериментальная реализация квантовых цепей обратной связи изначально была осуществлена в квантовой оптике [2], поскольку именно в этой области впервые стало возможным измерение отдельных микроскопических степеней свободы. Приложения квантовой обратной связи, как и ее классического аналога, весьма обширны. К ним можно отнести широкий класс задач, связанный с инженерией экзотических квантовых состояний – суперпозиций макроскопически различимых состояний излучения [3, 4], сжатых [5, 6] и зацепленных [7, 8, 9] состояний. Помимо этого, обратная связь активно используется в квантовой информатике, решая задачи о субоптимальном различении и коррекции неортогональных квантовых состояний [10, 11]. В физике лазерного охлаждения обратная связь, основанная на коррекциях потенциала оптических ловушек по данным их оптического зондирования, может использоваться для улучшения степени охлаждения [12, 13]. В этой связи безусловно представляет интерес исследование различных подходов и методов к описанию систем, содержащих в себе механизмы обратной связи. Кроме того, ввиду сложности динамики квантовых систем их искусственная модификация при помощи обратной связи может также являться эффективным инструментом поиска новых физических явлений и эффектов.

Существует две принципиально различные парадигмы организации управления с использованием обратной связи в квантовых системах. Одна из них – т.н. *обратная связь, основанная на измерениях* [14] – предполагает оценку состояния квантовой системы путем извлечения из нее классической информации при помощи измерений. На основе этих оценок затем строится подходящее управляющее воздействие. В другой парадигме – т.н. *когерентной обратной связи* [15] – управление системой достигается за счет введения ее

во взаимодействие со специально подобранной вспомогательной системой. В данной работе акцент сделан на исследование стратегий управления, относящихся к первому типу, и лишь в последнем разделе рассмотрен пример системы с обратной связью когерентного типа.

Квантово-оптические системы, как правило, содержат в себе элементарные излучатели - атомы или молекулы. Наиболее естественными наблюдаемыми для них являются характеристики испускаемого ими спонтанного излучения. Таким образом, надлежащее описание систем квантовой оптики должно строиться на основе теории открытых квантовых систем [16]. Введение обратной связи лишь усугубляет эту необходимость, так как в этом случае окружение должно включать в себя также и устройства, обеспечивающие реализацию обратной связи. В данной работе рассмотрен особый тип обратной связи, инициируемой зарегистрированными спонтанными фотодетектированиями, т.е. действующий импульсно, скачкообразно. Отсюда следует, что устройство, задающее алгоритм обратной связи, может быть эффективно описано при помощи некоторого дискретного классического параметра. В этой связи естественным образом возникает понятие т.н. *гибридных систем* [17, 18], т.е. систем, состоящих из квантовой и классической частей. Данный метод предлагает более полное описание эволюции системы под действием обратной связи и позволяет дальше продвинуться по пути аналитического решения, что несомненно представляет интерес в плане нахождения точно решаемых моделей квантовой теории управления.

Целью настоящей диссертационной работы является теоретическое исследование эффектов обратной связи, основанной на скачкообразных переключениях параметров управляемой системы (в частности, фаз классических электромагнитных полей), возникающих в системах одиночных излучателей, атомных ансамблях и квантованных электромагнитных полях.

Научная новизна работы. В работе впервые использована теория гибридных квантово-классических систем для описания методов управления на основе обратной связи. Рассмотрены ее применения к разнообразным квантово-оптическим системам - от одиночных двухуровневых атомов до конденсатов Бозе-Эйнштейна и квантованных мод электромагнитного излучения. Показа-

но, что обратная связь импульсного типа в таких системах приводит к необычным, ранее не наблюдавшимся модификациям их спектральных и статистических свойств. В большинстве случаев использованный подход позволил далеко продвинуться по пути получения точных решений. В частности, получены точные аналитические выражения для спектра резонансной флуоресценции и корреляционных функций фотоиспусканий двухуровневого атома и пары таких атомов в резонансном поле для случаев спектрально-неселективной обратной связи и в присутствии 'мягкой' спектральной селекции. При рассмотрении спектроскопии Λ -подобной системы с использованием обратной связи показано возникновение различных типов 'темных' состояний и аналитически показана их роль в изменении формы резонанса когерентного пленения населенностей. В задаче об управлении двухъямным конденсатом Бозе-Эйнштейна найдены стационарные заселенности ям и продемонстрирована возможность управлять ими, варьируя параметры цепи обратной связи. Найдено стационарное состояние и спектр резонансной флуоресценции системы из двухуровневого атома, взаимодействующего с квантованной оптической модой, находящейся в специального вида суперпозиции глауберовских состояний большой амплитуды, когерентность которого непрерывно восстанавливается внешним источником, в приближении быстроты действия последнего. Также исследовано влияние взаимодействия поля в таком состоянии с ансамблем двухуровневых атомов на его статистические характеристики.

Практическая значимость. В диссертационной работе исследованы возможности использования обратной связи на основе переключений фазы для получения различных нетривиальных состояний исследуемых систем и модификаций известных квантово-оптических явлений. Разработан подход к описанию систем с импульсной обратной связью, основанный на аппарате гибридных кинетических уравнений, и продемонстрирована его эффективность. В частности, показана возможность получения устойчивых к варьированию амплитуды внешнего поля пиков триплета резонансной флуоресценции, которые могут быть использованы в качестве реперов частоты. Кроме того, узкие структуры, возникающие в зависимости работ полей от частот Раби в Λ -схеме двухполевой спектроскопии имеют потенциал использования для разработки новых

методов стабилизации интенсивностей.

Положения, выдвигаемые на защиту.

1. Спектр резонансной флуоресценции двухуровневого атома, находящегося во внешнем классическом поле, чья фаза переключается на π при каждой регистрации спонтанного атомного фотоиспускания, состоит из трех асимметричных пиков, устойчивых к изменению интенсивности внешнего поля.
2. Обратная связь на основе переключений фазы одного из внешних полей способна управлять шириной и формой резонанса когерентного пленения населенностей (КПН) в Λ -схеме спектроскопии пробного поля. Варьирование ширины может производиться при помощи модификации распутывания квантовой операции фотодетектирования.
3. При помощи обратной связи возможно эффективно управлять состоянием атомарного конденсата Бозе-Эйнштейна, локализованного в двухъямном оптическом потенциале и подвергаемого интерферометрическому зондированию.
4. Взаимодействие ансамбля двухуровневых атомов с внешним полем, находящемся в специального типа суперпозиции когерентных состояний Глаубера (состоянии Юрке-Столера) в присутствии механизма непрерывного восстановления его когерентности, приводит к возникновению между атомами и полем когерентной обратной связи, инициируемой вынужденными фотопоглощениями. Возникающие корреляции между атомом и полем приводят к подавлению боковых пиков спектра резонансной флуоресценции и диссипативному характеру поведения корреляционных функций спонтанных атомных фотоиспусканий.

Личный вклад автора. Все результаты, представленные в работе, получены при непосредственном активном личном участии автора.

Апробация работы и публикации. Результаты работы были представлены на следующих конференциях: XLIX Международная студенческая конференция “Студент и научно-технический прогресс” (Новосибирск, 16-20 апреля 2011); Международная конференция по когерентной и нелинейной фотонике

“ICONO/LAT 2013” (Москва, 18-22 июня 2013); Всероссийская конференция “Физика ультрахолодных атомов - 2015” (Новосибирск, 21-22 декабря 2015); Всероссийская конференция “Физика ультрахолодных атомов - 2016” (Новосибирск, 19-21 декабря 2016); VII Международный симпозиум “MPLP-2016” (Новосибирск, 22-28 августа 2016); XV международная конференция по квантовой оптике и квантовой информатике “ICQOQI’2017” (Минск, 20-23 ноября 2017); Всероссийская конференция “Физика ультрахолодных атомов - 2017” (Новосибирск, 18-20 декабря 2017).

Всего по теме диссертации соискателем опубликовано 14 печатных работ, в том числе 10 статей в рецензируемых научных изданиях, определенных Высшей аттестационной комиссией (список приведен в конце автореферата).

Структура и объем диссертационной работы. Работа состоит из Введения, трех Глав, Заключения и Списка цитируемой литературы из 124 наименований. Общий объем диссертации составляет 110 страниц, в том числе 29 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** приведена краткая история развития классической теории управления и дан обзор литературы, посвященной теории управления в квантовых системах и ее приложениям. Отдельно освещены две принципиально различные парадигмы квантовой теории управления - обратная связь, основанная на измерениях, и когерентная обратная связь. Приведены основные идеи подхода к описанию систем с импульсной обратной связью, основанной на измерениях, с использованием аппарата гибридных квантово-классических систем. Обоснована актуальность темы исследования, сформулированы его цель и задачи, показана научная новизна и практическая значимость, перечислены положения, выносимые на защиту, и приведены сведения об апробации работы.

Глава 1 состоит из пяти разделов и посвящена исследованию взаимодействию одиночных элементарных излучателей с классическим внешнем полем в присутствии обратной связи, основанной на переключении фазы этого поля, инициируемым спонтанными испусканиями.

Раздел 1.1 посвящен выводу квантового кинетического уравнения, опи-

сывающего эволюцию открытых квантовых систем в приближении Маркова-Борна (уравнения Линдблада) [19, 16].

Раздел 1.2 содержит вывод основного кинетического уравнения на оператор гибридной плотности $\hat{\rho}^{(\sigma)}$, характеризующий частичное состояние квантовой системы при конкретном значении классического индекса σ , описывающего состояние классической системы (цепи обратной связи):

$$\frac{d}{dt}\hat{\rho}^{(\sigma)} = -i[\hat{H}^{(\sigma)}, \hat{\rho}^{(\sigma)}] + \sum_{\sigma', \alpha} \left(\hat{L}_{\alpha}(\sigma, \sigma')\hat{\rho}^{(\sigma')} \hat{L}_{\alpha}^{\dagger}(\sigma, \sigma') - \frac{1}{2} \{ \hat{L}_{\alpha}^{\dagger}(\sigma', \sigma) \hat{L}_{\alpha}(\sigma', \sigma), \hat{\rho}^{(\sigma)} \} \right), \quad (1)$$

так что $Tr \sum_{\sigma} \hat{\rho}^{(\sigma)} = \hat{\mathbb{1}}$ и $\sum_{\sigma} \hat{\rho}^{(\sigma)}$ есть усредненный (по классической переменной) статистический оператор квантовой системы, а обобщенные операторы Линдблада $\hat{L}_{\alpha}(\sigma', \sigma)$ обеспечивают изменение классического индекса с σ на σ' при квантовых скачках типа α . Эти результаты затем применены к реше-

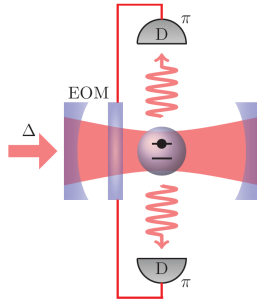


Рис. 1: Схема действия обратной связи. Детектирование фотона вызывает изменение фазы поля в резонаторе на π , что схематично показано через присутствие электрооптического модулятора (EOM).

нию задачи о спектре резонансной флуоресценции одиночного двухуровневого атома с оптическим дипольным переходом в классическом внешнем поле, фаза которого скачкообразно переключается на π после каждой регистрации спонтанного фотона, испущенного атомом (Рис. 1). При этом предполагается регистрация почти всех спонтанных фотонов, и лишь малая часть спонтанного излучения используется для проведения спектральных измерений. Используя

сопряженные гибридные уравнения на гейзенберговские атомные операторы, получено точное аналитическое выражение для спектральной плотности мощности спонтанного излучения. Спектр, как и в случае отсутствия обратной связи, имеет триплетную структуру, однако с ярко выраженной асимметрией пиков (2). Помимо этого, обнаруженная триплетная структура демонстрирует устойчивость, оставаясь хорошо различимой даже при слабых интенсивностях внешнего поля.

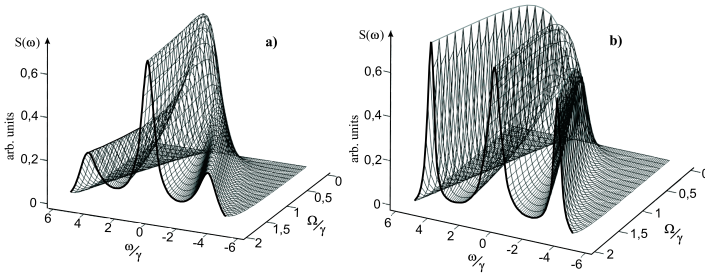


Рис. 2: Форма спектра резонансной флуоресценции: *a)* – без обратной связи и *b)* – с обратной связью как функция ω и частоты Раби Ω .

В Разделе 1.3 исследованы статистические свойства атомных фотоиспусканий в той же постановке в приближении ‘мягкой’ спектральной селекции (позволяющей однозначно различать фотоиспускания в различные компоненты триплета). В качестве количественной характеристики статистики фотоиспусканий введена корреляционная матрица, элементы которой описывают корреляции между одной и той же, либо различными компонентами спектра. Обнаружено, что фотоиспускания в боковые компоненты триплета демонстрируют супер-пуассоновскую статистику, тогда как без обратной связи эта статистика строго суб-пуассоновская [20]. Кроме того, характер корреляций между фотоиспусканиями в центральный и один из боковых пиков оказывается зависящим от значения отстройки внешнего поля, что также отличается от известных классических результатов.

Помимо описанного случая, когда действие обратной связи детерминировано и не зависит от типа зарегистрированного спонтанного события (в случае

‘мягкой’ спектральной селекции имеется три типа таких событий, по числу компонент спектра резонансной флуоресценции), был также рассмотрен случай, когда величина вводимого обратной связью фазового сдвига имеет такую зависимость. А именно – происходит переключение фазы поля на $-2\pi/3$, 0 или $2\pi/3$, если было зарегистрировано фотоиспускание в левую, центральную или правую спектральные компоненты соответственно. Анализ статистики фотоиспусканий на основе матрицы нормированных корреляторов показывает, что такая спектрально-селективная обратная связь приводит к возможности управления типом корреляций фотоиспусканий в боковые компоненты спектра путем варьирования отстройки внешнего поля.

Дальнейшее усложнение модели связано с рассмотрением систем с более сложной схемой энергетических уровней. Следующим шагом в этом направлении, рассмотренным в Разделе 1.4, является задача о статистике фотоиспусканий пары двухуровневых атомов во внешнем поле, размер пространственной локализации которых не превосходит длину волны последнего - это позволяет считать атомы тождественными и полагать, что симметрия состояния атомной пары не меняется при оптических переходах. При этом тип обратной связи был выбран аналогично Разделу 1.2, т.е. фаза поля переключается на π при каждой спонтанной фоторегистрации. Из четырех возникающих уровней энергии с внешним полем способны эффективно взаимодействовать лишь три из них (поскольку переходы с участием антисимметричного по перестановке состояния $(|eg\rangle - |ge\rangle)/\sqrt{2}$ запрещены для дипольных переходов по правилам отбора), т.е. вся система соответствует суммарному квазиспину $J = 1$. Для нахождения первых моментов распределения вероятностей фотоотсчетов по времени был использован метод операторно-значной производящей функции $\hat{Q}^{(\sigma)}(x, t) = \sum_{n=0}^{\infty} x^n \hat{\rho}^{(\sigma)}(n, t)$ соответствующего набора условных статистических операторов $\{\hat{\rho}^{(\sigma)}(n, t)\}_{n=0}^{\infty}$ ($\sigma = 0, 1$), индексированных числом n зарегистрированных к моменту времени t фотоотсчетов. Было показано, что введение обратной связи приводит к усилению антигруппировки атомных фотоиспусканий, причем степень этого усиления можно управлять в весьма широких пределах путем варьирования интенсивности и отстройки внешнего поля.

Раздел 1.5 посвящен изучению модификации явления когерентного пленения населенностей (КПН) в трехуровневой Λ -системе (верхний уровень $|0\rangle$, нижние $|1\rangle$ и $|2\rangle$) в присутствии обратной связи. Последняя переключает фазу поля на одном из двух оптических дипольных переходов в положение ‘0’ либо ‘ π ’ и инициируется т.н. ‘нетривиальным распутыванием’ операции фотодетектирования. Суть этой процедуры может быть проиллюстрирована на примере одномерного случая, в котором фотоны с различных переходов Λ -системы могут быть различены по поляризации (левый либо правый круг). ‘Нетривиальное распутывание’ в этом случае будет соответствовать детектированию фотонов в некотором произвольном базисе ортогональных эллиптических поляризаций, а в терминах операторов Линдблада Λ -системы $\hat{L}_i = \sqrt{\gamma_i}|i\rangle\langle 0|$ ($i = 1, 2$) означает их унитарное преобразование

$$\hat{L}_+ = \alpha\hat{L}_1 + \beta\hat{L}_2; \quad \hat{L}_- = -\beta^*\hat{L}_1 + \alpha^*\hat{L}_2; \quad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1. \quad (2)$$

В результате возникают два типа стационарных ‘темных’ состояний, соответствующих различным значениям фазы поля на переходе, управляемом обратной связью. Стационарное решение представляет собой статистическую смесь этих состояний с весами, зависящими от начального состояния трехуровневой системы и фазы внешнего поля.

В эксперименте явление КПН проявляется в виде т.н. ‘темных’ резонансов [21, 22] - провалов в графиках зависимостей работ полей как функций их отстроек, наблюдающихся в области равных отстроек внешних полей. Введение обратной связи дает возможность эффективного управления шириной ‘темного’ резонанса (в том числе возможность сделать его сколь угодно узким), меняя параметры распутывания операции фотодетектирования. Кроме того, исследование зависимости работ полей от их частот Раби показывает наличие необычных узких структур, ранее не наблюдававшихся в традиционной спектроскопии пробного поля. Их появление объясняется при помощи анализа состояний, в которых система оказывается после очередного фотоиспускания. При определенных условиях это состояние оказывается ‘светлым’ для текущего состояния поля, т.е. из него происходит быстрое возбуждение системы в верхнее состояние. При этом ширина резонанса КПН сужается, что и приво-

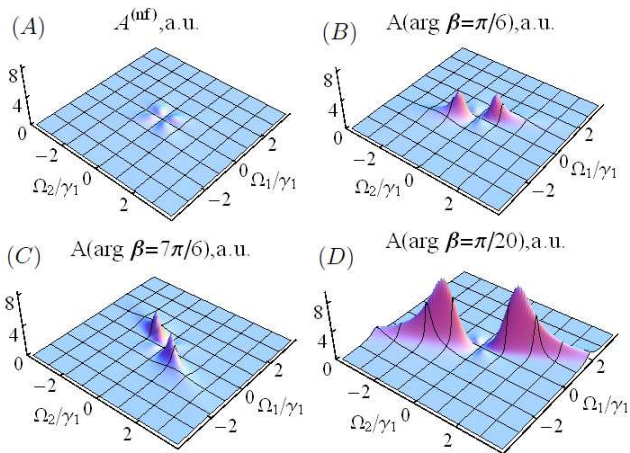


Рис. 3: Нормированная работа поля в зависимости от частот Раби в случае без обратной связи (A) и с обратной связью (B,C,D). Значения отстроек выбраны вблизи дна темного резонанса. Параметры распутывания: $\beta = \alpha e^{i\pi/6}$ (B), $\beta = \alpha e^{7i\pi/6}$ (C) и $\beta = \alpha e^{i\pi/20}$ (D).

дит к возникновению структур, представленных на Рис. 3.

Глава 2 посвящена исследованию возможностей управления атомарным конденсатом Бозе-Эйнштейна (бозе-конденсатом) в двухъямном оптическом потенциале при помощи обратной связи на основе фазо-контрастного интерферометрического зондирования. Конденсат расположен на пути светового пучка, распространяющегося в одном из плеч интерферометра, так что освещенной оказывается только одна из двух потенциальных ям (Рис. 4). Излучение, взаимодействуя с атомами конденсата нерезонансным образом, приобретает фазовый сдвиг, пропорциональный числу атомов в яме. Свободное от конденсата плечо интерферометра содержит управляемый фазовый сдвиг β . Разностный сигнал на выходе из интерферометра используется для изменения оптического потенциала ловушки. Система обратной связи переключает потенциал в одну из двух заранее заданных конфигураций, в зависимости от того, в каком из двух детекторов был зарегистрирован фотон.

В рамках двухмодового приближения предполагается, что все атомы зани-

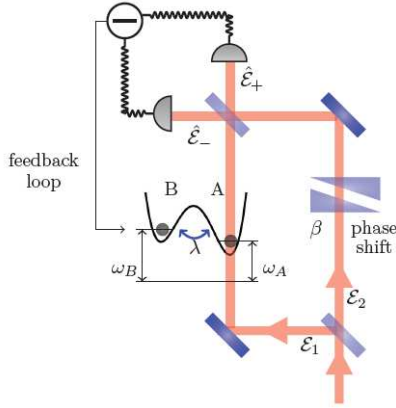


Рис. 4: Схема интерферометрического зондирования конденсата в двухъямном потенциале.

мают основные колебательные состояния находящихся рядом потенциальных ям A и B , имеющих глубины ω_A и ω_B . Туннелирование атомов через потенциальный барьер между ямами характеризуется параметром λ (в общем случае комплексным). Таким образом, потенциал ловушки описывается тремя параметрами – глубинами ям $\omega_{A,B}$ и туннелированием λ , которыми можно управлять при помощи обратной связи. При этом рассматривается случай, когда изменения потенциала значительны, т.е. в кинетических уравнениях доминируют динамические слагаемые. Такое приближение одновременно упрощает задачу, позволяя перейти в естественный базис новых бозонных мод, диагонализующих гамильтониан, и соответствует наиболее яркому проявлению эффектов обратной связи. Стационарные распределения атомов по ямам находятcя путем взятия матричных элементов гибридных статистических операторов в базисе исходных мод. Случайный характер загрузки атомов в ямах моделируется при помощи дополнительного усреднения по распределению Пуассона.

Результаты вычислений стационарных распределений показывают, что возможно эффективно управлять заселенностями ям (в том числе ‘перегонять’ атомы из одной ямы в другую) путем варьирования глубины одной либо обеих ям при помощи обратной связи. Аналогичного, хотя и не столь ярко выражен-

ного эффекта можно добиться при помощи варьирования *фазы* комплексного параметра туннелирования λ , в то время как варьирование его *модуля* на стационарные заселенности ям не влияет.

Глава 3 состоит из трех разделов и посвящена исследованию применений обратной связи на основе переключений фазы к квантованным модам оптического излучения.

В Разделе 3.1 рассматривается задача о моде монохроматического излучения в резонаторе конечной добротности, возбуждаемой накачкой в виде внешнего монохроматического источника. Резонатор помещен в цепь обратной связи с переключением фазы моды. Действие обратной связи инициируется детектированием фотонов, необратимо покинувших резонатор, и заключается в переключении фазы параметра когерентного состояния моды в резонаторе на π (детекторы предполагаются близкими к идеальным, скорость ухода фотонов из резонатора равна γ). Переход в P -представление Глаубера [16] приводит к следующему функционально-дифференциальному уравнению на P -функцию:

$$\frac{\partial}{\partial t} P = \gamma |\alpha|^2 (\bar{P} - P) + \frac{1}{2} \partial_{\alpha} [(\gamma + 2i\Delta)\alpha + 2i\lambda] P + \frac{1}{2} \partial_{\alpha^*} [(\gamma - 2i\Delta)\alpha^* - 2i\lambda] P, \quad (3)$$

где $\bar{P} = P(-\alpha, -\alpha^*)$. Его стационарное решение находилось численно. Показано, что в случае резонансной накачки распределение квазивероятности в основном сконцентрировано в области отрезка, соединяющего точки на плоскости комплексного параметра когерентного состояния, соответствующие стационарному (без обратной связи) состоянию $|\alpha_{st}\rangle$ и $|\alpha_{st}^*\rangle$. Приведено качественное объяснение этого явления на основе анализа траектории движения системы по плоскости комплексного параметра когерентного состояния. В случае больших отстроек внешнего источника предложена упрощенная теоретическая модель, с хорошей точностью описывающая стационарное состояние и объясняющее его близость к некоторому когерентному состоянию.

Раздел 3.2 посвящен исследованию взаимодействия одиночного двухуровневого атома с квантованным полем, находящимся в суперпозиции когерентных состояний Глаубера особого типа – т.н. состоянию Юрке-Столера [23]. Его основным свойством является возможность представления в виде собственно-

го состояния некоторого бозонного оператора уничтожения \hat{a}_{YS} , связанного с обычным оператором уничтожения \hat{a}_G :

$$\begin{aligned} \hat{a}_{YS}|\alpha\rangle_{YS} &= \alpha|\alpha\rangle_{YS}; \hat{a}_{YS} \doteq e^{i\pi\hat{n}}\hat{a}_G; \hat{a}_{YS}^\dagger \doteq \hat{a}_G^\dagger e^{-i\pi\hat{n}}, \\ |\alpha\rangle_{YS} &= \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|i\alpha\rangle_G + |i - i\alpha\rangle_G\right); \quad |\alpha\rangle_G = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(|i\alpha\rangle_{YS} + |i - i\alpha\rangle_{YS}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

Это позволяет говорить о своего рода дуальности состояний Глаубера и состояний Юрке-Столера, причем эта дуальность касается лишь их фазовых свойств, а с энергетической точки зрения они тождественны. Можно рассматривать явления квантовой оптики как в терминах состояний Глаубера, так и в терминах состояний Юрке-Столера, при этом оба подхода являются эквивалентными.

При рассмотрении взаимодействия суперпозиций когерентных состояний (т.н. ‘кошек Шредингера’) с атомными системами возникает проблема быстрой потери когерентности состояния поля в процессе взаимодействия. Поэтому для исследования стационарного режима такого взаимодействия необходимо ввести в модель источник, непрерывно восстанавливающий когерентность поля. Здесь удобно воспользоваться вышеупомянутой полной симметрией законов квантовой оптики в представлении состояний Глаубера и состояний Юрке-Столера. Когерентное состояние Глаубера возникает в результате совместного действия гармонически осциллирующего диполя (резонансного собственной частоте резонатора), играющего роль источника поля, и процесса необратимого ухода фотонов из резонатора вследствие его конечной добротности. То же самое справедливо и для состояний Юрке-Столера, иначе говоря, состояние Юрке-Столера является решением уравнения

$$\begin{aligned} \Lambda_{ph}[\hat{\rho}] &= -i\mu[\hat{a}_{YS} + \hat{a}_{YS}^\dagger, \hat{\rho}] + 2\nu\hat{a}_{YS}\hat{\rho}\hat{a}_{YS}^\dagger - \nu\{\hat{a}_{YS}^\dagger\hat{a}_{YS}, \hat{\rho}\} = 0, \\ \Lambda_{ph}[|\alpha\rangle_{YS}\langle\alpha|] &= 0; \alpha = -i\mu/\nu, \end{aligned} \quad (5)$$

где μ - параметр размерности частоты, пропорциональный амплитуде источника, ν - частота актов ухода фотонов из резонатора (Рис. 5). Данная модель хотя и не соответствует какому-либо конкретному способу приготовления состояния Юрке-Столера, однако является достаточной для цели исследования

стационарного режима взаимодействия атомов с полем, поскольку имеет своим стационаром требуемое суперпозиционное состояние.

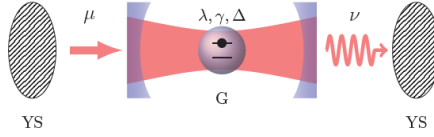


Рис. 5: К модели восстановления состояния поля.

Процесс взаимодействия атома с полем в состоянии Юрке-Столера можно рассматривать как пример квантовой когерентной обратной связи, возникающей естественным образом, без искусственной модификации системы, поскольку каждое *вынужденное* поглощение атомом фотона из поля эффективно переключает его фазу: $\hat{a}_G|\alpha\rangle_{YS} = \alpha|-\alpha\rangle_{YS}$.

В приближении многофотонного поля и быстрого (по сравнению с атомом) внешнего источника был введен анзац для полной матрицы плотности системы атом+поле:

$$\hat{\rho} = \hat{\rho}^{(+)} \otimes |\alpha\rangle_{YS}\langle\alpha| + \hat{\rho}^{(-)} \otimes |-\alpha\rangle_{YS}\langle-\alpha| + \hat{R} \otimes |\alpha\rangle_{YS}\langle-\alpha| + \hat{R}^\dagger \otimes |-\alpha\rangle_{YS}\langle\alpha|. \quad (6)$$

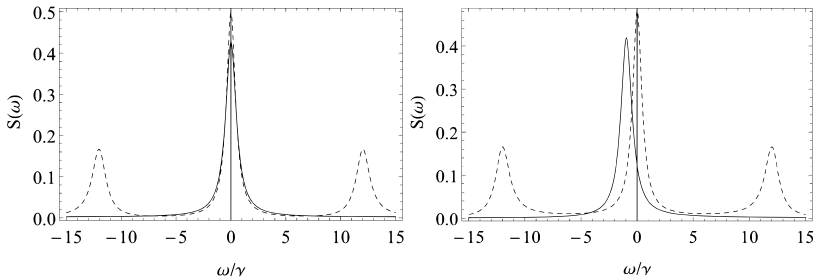


Рис. 6: Спектр резонансной флуоресценции в полях Юрке-Столера (сплошная линия) и Глаубера (пунктир) при $\Delta = 0$ (слева) и $\Delta = -\gamma$ (справа).

В рамках этого приближения найдены стационарное решение квантового кинетического уравнения и выражение для спектральной плотности мощности

спонтанных атомных фотоиспусканий. В отличие от обычного триплета резонансной флуоресценции (в глауберовском поле), спектр резонансной флуоресценции в поле Юрке-Столера содержит только один пик, центрированный на частоте атомного резонанса. Его ширина составляет $\sim \gamma$ (естественная ширина возбужденного состояния атома), как и в классическом случае, т.е. полная интенсивность излучения оказывается значительно ниже. Наличие боковых компонент в триплете резонансной флуоресценции объясняется возникновением когерентности между атомными энергетическими уровнями, создаваемой внешним полем. В нашем случае эта когерентность разрушается из-за корреляций между состояниями атома и поля. При этом оказывается, что несмотря на отсутствие когерентности в стационарном частичном состоянии поля (что само по себе является интересным эффектом, поскольку единственный атом оказывается способным разрушить суперпозицию между когерентными амплитудами, несмотря на действие мощного и быстрого источника, пытающегося восстановить эту когерентность), упомянутые корреляции между состоянием атома и поля ответственны за наблюдаемые необычные спектральные свойства. Смещение пика спектра также объясняется потерей когерентности полем, т.е. возбуждение эффективно имеет некогерентный характер.

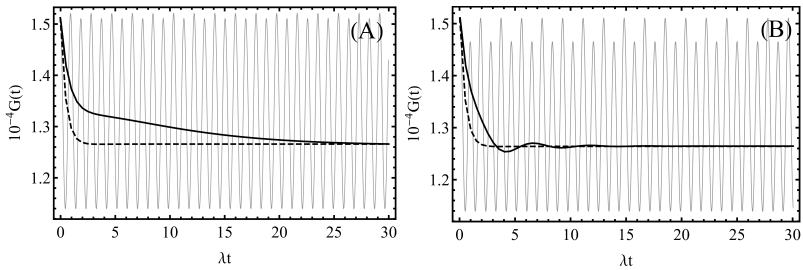


Рис. 7: Корреляционные функции атомных фотоиспусканий, вычисленные при $\Delta = \lambda/10$ (A) и $\Delta = 2\lambda/3$ (B) для $N = 25$ атомов. Корреляционные функции в поле Глаубера обозначены тонкими линиями, а в поле Юрке-Столера - жирными; пунктиром обозначено приближенное аналитическое решение.

В заключительном Разделе 3.3 рассмотрены статистические свойства спонтанных фотоиспусканий ансамбля невзаимодействующих двухуровневых ато-

мов в поле Юрке-Столера, с аналогичной моделью восстановления его когерентности. В этом случае вынужденное поглощение фотона любым атомом эффективно изменяет состояние поля для всего ансамбля, что контрастирует с классической нелинейной спектроскопией, в которой единичное фотопоглощение неспособно сколько-нибудь значительно повлиять на (многофотонное) поле. Для упрощения задачи и чтобы подчеркнуть эффект когерентной обратной связи, спонтанные атомные испускания были исключены из описания. Пользуясь аналогией системы из N компактно расположенных двухуровневых атомов и эффективного спина $J = N/2$, анализ системы производился в представлении неприводимых тензорных операторов [24]. Была получена система рекуррентных соотношений на коэффициенты разложения атомных операторов анзаца (6) по компонентам неприводимых тензоров. Поскольку искомая корреляционная функция второго порядка атомных фотоиспусканий зависит лишь от части этих коэффициентов, было предложено приближенное аналитическое решение, удовлетворительно описывающая численное в пределе большого числа атомов N . В отличие от корреляционных функций в поле Глаубера, полученные корреляционные функции в поле Юрке-Столера несут ярко выраженный диссипативный характер (Рис. 7), несмотря на предполагаемую медленность спонтанных фотоиспусканий.

В Заключение приведены основные результаты диссертационной работы:

1. Исследованы спектр и статистика резонансной флуоресценции одного и двух атомов в цепи обратной связи, возбуждаемой регистрациями испущенных спонтанных фотонов и скачкообразно меняющей фазу классического внешнего поля. Используемый теоретический аппарат основывался на подходе гибридных квантово-классических систем, в которых классическая часть соответствовала параметру, описывающему состояние цепи обратной связи (фазы поля). В спектре обнаружена резкая асимметрия пиков, чувствительная к отстройке внешнего поля, а в статистике фотоиспусканий - возможность управлять корреляциями атомных фотоиспусканий в различные пики триплета резонансной флуоресценции в приближении 'мягкой' спектральной селекции.
2. В трехуровневой Λ -системе с обратной связью, управляющей фазой по-

ля на одном из переходов и инициируемой нетривиальным распутыванием операции фотодетектирования, продемонстрирована возможность управления шириной и формой резонанса когерентного пленения населенностей.

3. Исследована схема интерферометрической обратной связи в контексте управления двухъямным атомарным бозе-конденсатом, локализованным в одном из плеч интерферометра Маха-Цандера и подвергающимся нерезонансному фазо-контрастному зондированию. Показана возможность эффективного управления заселенностями ям при помощи быстрых переключений потенциала в одно из двух заранее определенных положений, в зависимости от того, в каком из детекторов на выходе из интерферометра был зарегистрирован фотон.
4. При исследовании взаимодействия атомных ансамблей с оптическим полем в состоянии ‘кошки Шредингера’ обнаружено возникновение особого типа корреляций между атомами и полем, приводящее к подавлению боковых компонентов триплета резонансной флуоресценции и диссипативному характеру поведения атомных корреляционных функций.

Список публикаций автора по теме диссертации.

Статьи в журналах ВАК:

1. Томилин В.А., Ильичёв Л.В., Резонансная флуоресценция двухуровневого атома в цепи обратной связи// Письма в ЖЭТФ. - 2011. - Т. 94. - вып. 9.- С.734-737.
2. Томилин В.А., Ильичёв Л.В., Статистика резонансной флуоресценции пары атомов в цепи обратной связи// ЖЭТФ. - 2013. - Т.143. - вып. 2. - С.211-215.
3. Томилин В.А., Ильичёв Л.В., Статистика резонансной флуоресценции двухуровневого атома в цепи обратной связи// Доклады Академии Наук. - 2013. - Т.452. - вып.4. - С.282-284.
4. Tomilin V.A., Il'ichov L.V., Peculiarities of resonance fluorescence statistics for a two-level atom in frequency selective feedback loop// Ann. Phys. (Berlin). - 2014. - V.526. - issue 11-12. - pp.520-526.

5. Томилин В.А., Ильичёв Л.В., Квантованная оптическая мода в цепи обратной связи с переключением фазы// Письма в ЖЭТФ. - 2014.- Т. 100. - вып. 11. - С.858-862.
6. Tomilin V.A., Il'ichov L.V., BEC Dynamics in a Double-Well with Interferometric Feedback// Ann. Phys. (Berlin). - 2016. - V.528. - issue 7-8. - pp.619-625.
7. Tomilin V.A., Il'ichov L.V., The stationary resonance fluorescence of a two-level atom in a cat-state field// Opt. Commun. - 2016. - V.375. - pp.38-42.
8. Tomilin V.A., Il'ichov L.V., Λ -scheme feedback spectroscopy// Opt. Commun. - 2017. - V.391. - pp.57-62.
9. Томилин В.А., Ильичёв Л.В., Спектроскопия Λ -атома с использованием обратной связи// Квантовая Электроника. – 2017. – Т. 47. - С. 474–478.
10. Tomilin V.A., Il'ichov L.V., Correlations of photoemissions in a multi-atomic ensemble driven by a cat-state field// Phys. Rev. A. - 2017. - V.96 - p. 063805.

Тезисы конференций:

11. Томилин В.А., О спектре резонансной флуоресценции двухуровневого атома в цепи обратной связи/ Материалы XLIX Международной студенческой конференции “Студент и научно-технический прогресс” - физика. - 2011. - С.134.
12. Tomilin V.A., Il'ichov L.V., Resonance Fluorescence of One and Two Atoms in Feedback Loop/ “ICONO/LAT 2013” technical digest – IFP2. - 2013. - p.114.
13. Tomilin V.A., Il'ichov L.V., Elementary spectroscopic effects in a cat-state field/ “MPLP-2016” technical digest. - 2016. - p.244.
14. Tomilin V.A., Il'ichov L.V., Spectral and statistical properties of photo-emissions from multiatomic ensembles in a cat-state field/ “ICQOQI'2017” technical digest. - 2017. - p.84.

Список цитируемой литературы

- [1] Yamamoto Y., Imoto N., Machida S., Amplitude squeezing in a semiconductor laser using quantum nondemolition measurement and negative feedback// Phys. Rev. A. - 1986. - V. 33. - pp. 3243-3261.
- [2] Shapiro J. H. *et al.*, Theory of light detection in the presence of feedback// J. Opt. Soc. Am. B. - 1987. - V.4. - p. 1604.
- [3] Sayrin C. *et al.*, Real-time quantum feedback prepares and stabilizes photon number states// Nature. - 2011. - V.477. - p. 73.
- [4] Glancy S., de Vasconcelos H. M., Methods for producing optical coherent state superpositions// JOSA B. - 2008. - V.25. - p.12.
- [5] Iida S. *et al.*, Experimental Demonstration of Coherent Feedback Control on Optical Field Squeezing// IEEE Trans. Automat. Control. - 2012. - V.57. - p. 2045.
- [6] Crisafulli O. *et al.*, Squeezed light in an optical parametric oscillator network with coherent feedback quantum control// Opt. Express. - 2013. - V.21. - p. 18371.
- [7] Nurdin H. I., Yamamoto N., Distributed entanglement generation between continuous-mode Gaussian fields with measurement-feedback enhancement// Phys. Rev. A. - 2012. - V.86. - p. 022337.
- [8] Li Y., Luo B., Guo H., Entanglement and quantum discord dynamics of two atoms under practical feedback control// Phys. Rev. A. - 2011. - V.84. - p. 012316.
- [9] Carvalho A. R. R., Hope J. J., Stabilizing entanglement by quantum-jump-based feedback// Phys. Rev. A. - 2007. - V.76. - p. 010301(R).
- [10] Brańczyk A.M. *et al.*, Quantum control of a single qubit// Phys. Rev. A. -

2007. - V.75. - p. 012329.
- [11] Gilett G. G. *et al.*, Experimental Feedback Control of Quantum Systems Using Weak Measurements// Phys. Rev. Lett. - 2010. - V.104. - p. 080503.
- [12] Steixner V., Rabl P., Zoller P., Quantum feedback cooling of a single trapped ion in front of a mirror// Phys. Rev. A. - 2005. - V.72. - p. 043826.
- [13] Bushev P. *et al.*, Feedback Cooling of a Single Trapped Ion// Phys. Rev. Lett. - 2006. - V.96. - p. 043003.
- [14] Wiseman H. M., Milburn G. J., Quantum Measurement and Control/ Cambridge: Cambridge University Press. - 2009.
- [15] Lloyd S., Coherent quantum feedback// Phys. Rev. A. - 2000. - V. 62. - 022108.
- [16] Breuer H. P., Petruccione F., The Theory of Open Quantum Systems/ Oxford: Oxford University Press. - 2002.
- [17] Diósi L., Stochastic pure state representation for open quantum systems// Phys. Lett. A. - 1986. - V. 114A. - pp. 451-454.
- [18] Diósi L., Hybrid Quantum-Classical Master Equations// arXiv:1401.0476v1 - 2014.
- [19] Lindblad G., On the generators of quantum dynamical semigroups// Commun. Math. Phys. - 1976. V.48. - p.119.
- [20] Carmichael H. J., Walls D.F., A quantum-mechanical master equation treatment of the dynamical Stark effect// J. Phys. B. - 1976. - V.9. - p. 1199.
- [21] Alzetta G. *et al.*, An experimental method for the observation of r.f. transitions and laser beat resonances in oriented Na vapour// Nuovo Cimento B. - 1976. - V. 36. p. 5.
- [22] Arimondo E., Orriols G., Nonabsorbing atomic coherences by coherent two-photon transitions in a three-level optical pumping// Lett. Nuovo Cimento. - 1976. - V.17. - p. 333.
- [23] Yurke B., Stoler D., Generating quantum mechanical superpositions of macroscopically distinguishable states via amplitude dispersion// Phys. Rev. Lett. - 1986. - V.57. - p.13.
- [24] Варшалович Д. А., Москалёв А. Н., Херсонский В. К., Квантовая теория углового момента/ Ленинград: Наука. - 1975.