

X-874

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

17-92-308

ХО ЧУНГ ЗУНГ

**УДК 530.145+535.14+
+539.186.22**

**КВАНТОВЫЕ ЭФФЕКТЫ
В РЕЗОНАТОРНОЙ ЭЛЕКТРОДИНАМИКЕ**

Специальность: 01.04.02 - теоретическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна 1992

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований и Физическом факультете МГУ

Научные руководители:

член-корреспондент РАН профессор Н.Н. Боголюбов (мл.)
доктор физико-математических наук А.С. Шумовский

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук А.В. Андреев
(МГУ, Москва)

доктор физико-математических наук В.И. Рупасов
(Институт спектроскопии РАН)

Ведущая организация:

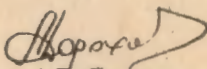
Физический институт Академии наук, г. Москва.

Защита диссертации состоится " _____ " 199 года на заседании Специализированного совета К047.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан " _____ " 199 года.

Ученый секретарь
Специализированного совета
кандидат физико-математических наук


А.Б. Дорохов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы.

В шестидесятых годах, когда Джейнс и Каммингс впервые предложили модель атома, взаимодействующего с конечным числом мод квантованного электромагнитного поля, задача в основном носила методологический характер. Двадцать лет спустя, благодаря развитию техники эксперимента, модель Джейнса-Каммингса (МДК) впервые была реализована с помощью высоковозбужденных ридберговских атомов, заключенных в резонаторах высокой добротности. Эти экспериментальные и предшествующие теоретические работы послужили началом нового направления в квантовой оптике – резонаторной квантовой электродинамике, в рамках которой исследуются тонкие эффекты квантовых флуктуаций и корреляций, возникающие в процессе взаимодействия атома с квантовым полем излучения. Сюда относятся проблемы подавления квантовых шумов, неразрушающих квантовых измерений, детектирования макроскопических “шредингеровских кошек” и т. д.. Важен также прикладной аспект, связанный, в частности, с созданием микрозеров – новых источников излучения с неклассическими статистическими свойствами.

Таким образом, исследование квантовых нелинейных явлений в резонаторной электродинамике является актуальным и важным как с точки зрения теоретического научного знания, так и практического применения.

Цель работы.

Исследование влияния начальных условий, наличия нелинейной (керровской) среды, коллективных эффектов и т. д. на динамические и статистические свойства атомной и полевой подсистем в процессах взаимодействия атома (или группы атомов) с квантованным полем излучения в резонаторе. Рассмотрение возможности появления новых квантовых эффектов в таких процессах.

Научная новизна и практическая ценность работы.

Впервые исследовано изменение структуры возобновлений квантовых осцилляций Раби в зависимости от начального состояния атома, когда поле при $t = 0$ находится в когерентном состоянии. Получено аналитическое решение для задачи о взаимодействии атома с полем в резонаторе, заполненном керровской средой. Впервые показана возможность усиления сжатия квантовых флуктуаций света двухуровневым атомом в резонаторе. Исследовано явление антигруппировки и субпуассоновской статистики фотонов. Предсказано наличие сверхтонкой структуры спектра флуоресценции. Впервые исследовано поведение квантовых флуктуаций фазы поля в резонаторе. Установлена их связь с явлением коллапса и возобновления Раби-осцилляций.

Многие из полученных в диссертации результатов обусловлены квантовым характером поля излучения и никак не могут быть выведены из полуклассической теории. Поэтому их экспериментальная проверка представляет безусловный интерес как еще одна возможность прямого установления области применения последней.

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации:

1. Показано, что эволюция из начального состояния, представляющего собой когерентное поле и атом в когерентной суперпозиции основного и возбужденного состояний, приводит к явлению коллапса и возобновления осцилляций Раби нового типа.
2. В задаче о взаимодействии двухуровневого атома с полем излучения в керровской среде впервые получено аналитическое решение, позволяющее уточнить известные ранее численные результаты.
3. Впервые показана возможность усиления сжатия квантовых флуктуаций света двухуровневым атомом в резонаторе. Определен оптимальный режим усиления.

4. Найдены условия, приводящие к генерации суб-пуассоновского излучения двухуровневым атомом в резонаторе.
5. В рамках определения Мандела исследовано явление антигруппировки фотонов. Показано, что указанное явление может возникнуть при воздействии на двухуровневой атом сильного поля в хаотическом состоянии. При этом эффекты сжатия и суб-пуассоновской статистики не возникают.
6. Исследована структура спектра флуоресценции в трехуровневом атоме, взаимодействующем с двумя модами поля. Показано, что увеличение интенсивности поля приводит к сокращению числа спектральных линий от девяти до семи. Показано наличие сверхтонкого расщепления спектральных линий, обусловленного квантовым характером поля.
7. В рамках квантового определения фазы поля, предложенного Поповым-Яруниным-Пеггом-Барнеттом, установлена связь между эволюцией распределения плотности вероятностей и флуктуаций фазы и явлением коллапса и возобновления осцилляций Раби. Изучено влияние отстройки от резонанса и выбора начального состояния атома на поведение фазы и ее флуктуаций.
8. Исследовано влияние конечной добротности резонатора на характер флуктуаций фазы. Показано, что несохранение числа возбуждений ведет к быстрой хаотизации распределения фазы.
9. Для системы из двух двухуровневых атомов найдено решение задачи Шредингера при учете отстройки от резонанса. Исследован процесс перераспределения возбуждения между атомами. Найден спектр флуоресценции. Показано, что в системе атомов двух сортов увеличивается число спектральных компонент. Дана оценка числа спектральных компонент в системе с произвольным числом атомов. Указана зависимость интенсивности флуоресценции от характера возбуждения атомов (симметричного или несимметричного). Найдено распределение плотности вероятностей фазы и связь флуктуаций фазы

с явлением коллапса и возобновления осцилляций Раби.

Апробация работы.

Результаты, полученные в диссертации, докладывались на Международной конференции по избранным проблемам статистической механики (Дубна, 1989), на Международном семинаре по сжатым и когерентным состояниям (Москва, 1990), на семинаре в Международном центре теоретической физики (Italy, 1991), и на Международном семинаре по квантовой оптике (Раубичи, 1992).

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 8 работ.

Объем работы.

Диссертация состоит из Введения, трех глав и Заключения. Она содержит 125 страниц машинописного текста, 26 рисунков, 2 таблицы и библиографический список из 221 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен краткий обзор литературы, связанной с рассматриваемыми в диссертации проблемами. Изложена цель исследования с обоснованием ее актуальности. Кратко изложено содержание работы.

В первой главе диссертации исследованы характеристики атомной подсистемы, а именно, влияние начальных условий, керровской среды и коллективных эффектов на динамику вероятностей населенностей атомных уровней. Глава состоит из четырех параграфов.

В §1.1 изложены вывод гамильтониана Джейнса-Каммингса и решение задачи на собственные значения. Кратко обсуждается существование явления коллапса и возобновления осцилляций Раби.

В §1.2 изучено влияние начальных условий на динамику населенностей уровней атома и корреляционной функции второго порядка

поля. Показано, что если при $t = 0$ поле находится в когерентном состоянии, а атом в собственном состоянии полуклассического гамильтониана, возобновления осцилляций Раби не только сильно подавляются, но и меняют свои структуры. Найдены положения новых сигналов возобновления. Показано, что максимальная амплитуда возобновлений в данном случае пропорциональна $1/\sqrt{\bar{n}}$, где \bar{n} – среднее число заполнения.

В §1.3 получены аналитические формулы для положения, ширины и максимальной высоты сигналов возобновления Раби-осцилляций в случае, когда резонатор заполнен керровской средой. Полученные результаты позволяют уточнить известные ранее численные расчеты.

В §1.4 найдено решение уравнения Шредингера для системы из двух двухуровневых атомов при учете отстройки от резонанса Δ . Приведено решение для случая атомов двух сортов при точном резонансе. Исследовано влияние $\Delta \neq 0$ на явление коллапса и возобновления осцилляций Раби. Показано, что при несимметричном возбуждении атомов вдали от резонанса, первоначальное возбуждение периодически обменивается между атомами но не передается полю.

Вторая глава диссертации посвящена изучению различных статистических и спектральных свойств поля в резонаторе. Глава состоит из четырех параграфов.

В §2.1 исследовано взаимодействие идеального сжатого света с двухуровневым атомом в резонаторе. Указано на возможность усиления начальной степени сжатия сразу после включения взаимодействия. Определен оптимальный режим усиления.

§2.2 посвящен исследованию появления субпуассоновской статистики и антигруппировки фотонов в МДК при различных начальных условиях. Критерий $Q < 0$, где Q – фактор Мандела, использован для определения субпуассоновости статистики и критерий $\frac{\partial}{\partial \tau} g^{(2)}(t, t + \tau)|_{\tau=0} > 0$, где $g^{(2)}(t, t + \tau)$ – двухвременная корреляционная функция, использован для определения антигруппировки фотонов. Показано, что субпуассоновская статистика не сопровождается антигруппировкой фотонов. Найдены условия генерации излучения с этими неклассическими свойствами. Показано, в частности, что в отличие от сжатия и субпуассоновости, антигруп-

пировка фотонов возникает и при воздействии на атом сильного хаотического поля. Исследовано влияние отстройки от резонанса на статистические свойства поля.

§2.3 посвящен изучению спектра флуоресценции в трехуровневой двухмодовой системе, где разрешаются только два перехода из трех и каждая пара атомных уровней связана со своей модой поля. Показано, что при начальном фоковском состоянии поля спектр флуоресценции состоит из девяти линий, которые сокращаются до семи при увеличении интенсивности поля. Детально рассмотрены случай двухфотонного резонанса, спектр спонтанного излучения и спектр спонтанного рассеяния Рамана. Предсказано наличие сверхтонкой структуры спектра флуоресценции, возникающей, когда поле излучения представляет собой суперпозицию фоковских состояний.

В §2.4 исследовано влияние коллективных эффектов на спектр флуоресценции. Показано, что в системе из двух двухуровневых атомов разных сортов, число спектральных линий может достигать 16, а в случае идентичных атомов при ненулевой отстройке от резонанса 9. Если $\Delta = 0$, максимальное число линий уменьшается до 8. Посчитаны положения и отношения между интенсивностями спектральных линий. Показано, что интенсивность флуоресценции в случае симметричного возбуждения атомов в два раза сильнее чем в случае несимметричного.

В третьей главе исследованы фазовые свойства поля в резонаторе с помощью эрмитового фазового формализма Попова-Ярунина-Пегга-Барнетта (ПЯПБ). Установлена связь между эволюцией флуктуаций фазы поля и явлением коллапса и возобновления осцилляций Раби. Глава состоит из пяти параграфов.

В §3.1 дан краткий исторический очерк о различных попытках создания квантового эрмитового оператора фазы. Изложены основные положения эрмитового фазового формализма.

§3.2 посвящен изучению фазовых свойств электромагнитного поля, взаимодействующего с двухуровневым атомом в резонаторе. Получены формулы для вычисления функции распределения, среднего значения и дисперсии фазы. Показано, что если при $t = 0$ поле находится в когерентном состоянии, то в результате взаи-

модействия начальный пик распределения фазы расщепляется на два пика, противоположно вращающихся в полярной системе координат. Когда они хорошо отделены друг от друга, наблюдаются коллапсы; когда они перекрываются, имеют место возобновления осцилляций Раби.

Сравнены фазовое распределение ПЯПБ (P) и фазовые распределения, полученные при интегрировании Q -функции (P_Q) и W -функции Вигнера (P_W) по радиальной переменной. Показано, что хотя P_Q шире чем P и P_W , и P_W может принимать отрицательные значения, в общих чертах они ведут себя подобным образом. Проведено сравнение дисперсий косинуса фазы с их двойниками из других подходов. Исследованы квантовые флуктуации фазы поля в МДК со связью, зависящей от интенсивности излучения. Показано, что в отличие от случая стандартной МДК, эволюция фазовых характеристик является точно периодической.

В §3.3 изучено влияние отстройки от резонанса Δ и фазы атомного диполя η на поведение фазы поля в резонаторе. Показано, что эти факторы приводят к асимметризации распределения фазы в процессе взаимодействия, что в свою очередь вызывает изменение во времени среднего значения фазы. Также показано, что как при увеличении Δ , так и при пробегании η от $\pi/2$ до 0, фаза поля меняется подобным образом. Дана интерпретация двухпиковой структуры функции распределения фазы с точки зрения формализма одетых состояний.

В §3.4 рассмотрено влияние высокой конечной добротности резонатора на фазу поля. Решение материального уравнения получено с помощью секулярного приближения. Показано, что утечка фотонов из резонатора приводит к быстрой хаотизации фазы поля.

§3.5 посвящен исследованию влияния коллективных эффектов на фазовые свойства поля. Установлено однозначное соответствие между пиками распределения фазы и собственными состояниями гамильтониана полной системы атом+поле. Сделанные выводы проиллюстрированы на примере системы из двух двухуровневых атомов. Показано, в частности, что здесь наблюдается такая же связь между квантовыми флуктуациями фазы и явлением коллапса и возобновления осцилляций Раби, как в случае одноатомной системы.

В заключении кратко сформулированы основные результаты диссертации, которые и выносятся на защиту.

Основные результаты диссертации опубликованы
в следующих работах

1. Ho Trung Dung, A.S. Shumovsky. Effects of atomic coherence on collapses and revivals in a coherent field. *Opt. Commun.*, 1991, v.83, p.220-226.
2. Ho Trung Dung, A.S. Shumovsky. Analytic approximation to the inversion of a two-level atom in a Kerr medium. *Phys. Lett. A*, 1991, v.160, p.437-442.
3. Ho Trung Dung, Fam Le Kien, E.I. Aliskenderov, A.S. Shumovsky. Time evolution of light squeezing in a Jaynes-Cummings model. *Phys. Lett. A*, 1989, v.136, p.489-493.
4. Ho Trung Dung, A.S. Shumovsky, N.N. Bogolubov Jr.. Antibunching and sub-poissonian photon statistics in the Jaynes-Cummings model. *JINR*, E17-92-83, Dubna, 1992, 18p. *Opt. Commun.*, 1992, in press.
5. Fam Le Kien, Ho Trung Dung, A.S. Shumovsky. Fluorescence spectrum of a three-level atom interacting with two cavity modes. *JINR*, E18-88-530, Dubna, 1988, 12p.
6. Ho Trung Dung, R. Tanaš, A.S. Shumovsky. Collapses, revivals, and phase properties of the field in Jaynes-Cummings type models. *Opt. Commun.*, 1990, v.79, p.462-468.
7. Ho Trung Dung, R. Tanaš, A.S. Shumovsky. Dynamical properties of the field phase in the Jaynes-Cummings model. *J. Mod. Opt.*, 1991, v.38, p.2069-2083.
8. Ho Trung Dung, Nguyen Dinh Huyen, A.S. Shumovsky. Phase properties of a coherent field interacting with two two-level atoms in a cavity. *Physica A*, 1992, v.182, p.467-488.

Рукопись поступила в издательский отдел

15 июля 1992 года.