

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

4-18

УДК 530.145 535.14
539.186.22

17-87-257

ЧАН КУАНГ

НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ
В СИСТЕМЕ ДВУХ- И ТРЕХУРОВНЕВЫХ АТОМОВ,
ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ
С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

Специальность: 01.04.02 – теоретическая
и математическая физика

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Дубна, 1987

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

член-корреспондент АН СССР
профессор

Н.Н.Боголюбов (мл.)

доктор физико-математических наук
старший научный сотрудник

А.С.Шумовский

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

Ю.М.Голубев

кандидат физико-математических наук
старший научный сотрудник

И.К.Кудрявцев

Ведущее научно-исследовательское учреждение: Харьковский
государственный университет.

Защита диссертации состоится " " _____ 1987 г.
на заседании Специализированного совета К 047.01.01 Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований,
Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке
Объединенного института ядерных исследований.

Автореферат разослан " " _____ 1987 г.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук

А.Е. Дорохов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие техники эксперимента, происходящее в последнее десятилетие, привело к открытию ряда новых нелинейных эффектов в различных средах, которые представляют огромное научное и практическое значение. Особое место занимают недавно открытые нелинейные эффекты, не имеющие классического аналога и связанные с квантовой природой света. В нелинейных явлениях находят отражение новые свойства материальной среды и света, которые играют фундаментальную роль в расширении научного познания.

Таким образом, теоретическое исследование квантовых нелинейных явлений в системе двух- и трехуровневых атомов с электромагнитным полем является актуальным и важным как с точки зрения теоретического научного познания, так и практического применения.

Цель работы – построить последовательную квантовую теорию взаимодействия электромагнитного поля с системой двух- и трехуровневых излучателей в модели Дикке и исследовать спектральные и статистические нелинейные свойства такой системы.

Научная новизна и практическая ценность работ

В диссертации дана последовательная квантовая теория коллективного взаимодействия системы двух- и трехуровневых атомов с сильными внешними электромагнитными полями и с полем излучения. Найдено квантовое преобразование, переводящее систему двух- и трехуровневых атомов в систему атомов, "одетых" сильными внешними электромагнитными полями.

На основе этого подхода исследованы нелинейные спектральные и статистические эффекты в коллективной резонансной флуоресценции, коллективном двойном оптическом резонансе, коллективном рассеянии Рамана и предсказан ряд интересных свойств таких систем, в том числе и квантовые свойства, которые не имеют классического аналога. Предложены некоторые схемы генерации и усиления сжатого состояния света и указаны условия получения интенсивного света с большой степенью сжатия, что является важным с точки зрения практического применения.

ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВЫДВИГАЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ,
ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ:

1. Развита теория коллективной резонансной флуоресценции, в рамках которой исследованы коллективные спектральные и статистические свойства триплета резонансной флуоресценции. Предсказано явление антикорреляции между центральной и крайними спектральными компонентами для коллективной резонансной флуоресценции.

2. Показано сильное нарушение классического неравенства Коши-Шварца для корреляции между крайними спектральными компонентами резонансной флуоресценции. Показана макроскопичность этого квантового эффекта.

3. Впервые построена теория коллективного двойного оптического резонанса. Получено аналитическое стационарное решение для матрицы плотности системы трехуровневых атомов в сильных резонансных полях. Исследованы распределения атомов по энергетическим уровням и коллективные спектральные свойства поля флуоресценции. Показана бистабильность поведения спектральной картины. Предсказано существование скачкообразного поведения системы в статистическом пределе $N \rightarrow \infty$, подобного неравновесному переходу первого рода.

4. Исследованы статистические распределения спектральных компонент поля флуоресценции коллективного двойного оптического резонанса. Предсказаны корреляции и антикорреляции между спектральными компонентами, а также сильное нарушение классического неравенства Коши - Шварца для некоторых спектральных компонент.

5. Построена теория коллективного рассеяния Рамана в одном и в двух внешних сильных полях. Получены аналитические выражения для матрицы плотности атомной системы. Предсказан эффект коллективной "ловушки" атомов. Исследованы спектральные и статистические свойства спектральных компонент рэлеевской и стоксовой линий. Показано существование корреляции и антикорреляции между спектрами. Показано, что в статистическом пределе $N \rightarrow \infty$ в системе имеется неравновесный фазовый переход первого рода.

6. Предсказано существование сжатия света в смеси двух крайних спектральных компонент триплета коллективной резонансной флуоресценции в случае сильного внешнего поля. Построена схема генерации сжатого состояния света в смеси двух резонаторных мод с частотами вблизи двух крайних спектральных компонент резонансной флуоресценции. Показана возможность получения предельной степени сжатия света по этой схеме.

7. Предложена схема генерации сжатого состояния света через двухфотонные переходы в системе сильно возбужденных трехуровневых атомов. Определено условие для получения оптимального значения степени сжатия в такой схеме. Обсуждена возможность усиления степени сжатия света в нелинейной среде и найдено условие получения оптимального усиления сжатия.

8. Исследовано сжатие света в процессе невырожденного смешивания четырех волн в системе трехуровневых атомов в резонаторе. Показана возможность и определено условие получения интенсивного света с предельной степенью сжатия.

Апробация работ. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, кафедры квантовой статистики и теории поля Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова. Часть результатов докладывалась на Всесоюзных семинарах по статистической физике (Дубна, 1986 г., 1987 г.) и на УИ Международной школе по когерентной оптике (Устрон, Польша, 1985 г.)

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 15 работ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Она содержит 147 страниц машинописного текста, 45 рисунков, библиографический список включает 147 ссылок.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведен краткий обзор рассматриваемых проблем, дано обоснование их актуальности, научной и практической ценности работы, кратко изложены материал диссертации и основные результаты.

В первой главе диссертации исследованы нелинейные коллективные эффекты в коллективной резонансной флуоресценции. Глава состоит из пяти параграфов.

В первом параграфе приведено каноническое преобразование, которое переводит систему атомов в систему "одетых" атомов. Найдены стандартная матрица плотности атомной системы и формулы для атомных статистических моментов. Второй параграф посвящен коллективным эффектам в спектре резонансной флуоресценции, найдены аналитические формулы распределения стационарного спектра и проанализирована бистабильность спектральной картины. В третьем параграфе получены аналитические формулы для степени когерентности второго порядка для спектральных компонент. Исследована статистика фотонов спектральных компонент в зависимости от параметров системы. Четвертый параграф посвящен исследованию кросс-корреляции между спектральными компонентами. Предсказана

антикорреляция между центральной и крайними спектральными компонентами в коллективном случае. В пятом параграфе рассмотрено нарушение классического неравенства Коши - Шварца в коллективной резонансной флуоресценции. Показано, что в коллективном случае существует сильное нарушение неравенства Коши - Шварца для корреляции крайних спектральных компонент. Показана макроскопичность этого квантового эффекта.

Вторая глава диссертации посвящена впервые построенной теории коллективного двойного оптического резонанса. Глава состоит из 7 параграфов (§§ 6-12).

В § 6 введен модельный гамильтониан системы трехуровневых атомов, взаимодействующих с двумя внешними полями и с полем излучения в бозонном представлении атомных переменных. Найдено каноническое преобразование, переводящее систему трехуровневых атомов в систему "одетых" атомов. В § 7 найдена стационарная матрица плотности системы атомов. Восьмой параграф посвящен рассмотрению стационарного распределения атомов по энергетическим уровням. Предсказано, что в статистическом пределе $N \rightarrow \infty$ имеется скачкообразное поведение в распределении населенности атомов, подобное неравновесному фазовому переходу первого рода. В § 9 получены аналитические формулы спектральной картины коллективного двойного оптического резонанса. Показана бистабильность в поведении спектральной картины в зависимости от параметров системы. В § 10 исследована фотонная статистика спектральных компонент. Показано, что только четыре крайние спектральные компоненты могут иметь субпуассоновскую статистику. В § 11 получены аналитические формулы, выражающие кросс-корреляцию между спектральными компонентами. Найдены условия обнаружения корреляции и антикорреляции между спектральными компонентами. В § 12 предсказано существование сильного нарушения классического неравенства Коши - Шварца для корреляции между некоторыми спектральными компонентами. Показано, что нарушение классического неравенства Коши - Шварца является квантовым макроскопическим эффектом.

Третья глава диссертации посвящена построению теории коллективного рассеяния Рамана в одном и в двух сильных внешних полях. Глава состоит из пяти параграфов (§§ 13-17).

В § 13 написано уравнение для матрицы плотности системы трехуровневых атомов, взаимодействующих с сильным внешним полем и с полем излучения. Найдена стационарная матрица плотности атомной системы в секулярном приближении и формулы для статистических моментов. В § 14 исследовано распределение населенности атомов на энергетических уровнях и предсказан эффект коллективной "ловушки атомов". В § 15 получены аналитические формулы для интенсивностей и ширин спектральных

компонент стоксовой и ралеевской линий. Исследованы коллективные эффекты в спектре рассеянного света. Показано скачкообразное поведение интенсивности поля флуоресценции в статистическом пределе $N \rightarrow \infty$. В § 16 получены аналитические формулы для корреляционных функций интенсивностей спектральных компонент и показаны коллективные особенности в статистике фотонов спектральных компонент. Найдено условие существования корреляции и антикорреляции между спектральными компонентами и между стоксовой и ралеевской линиями. В § 17 рассмотрено коллективное рассеяние Рамана в двух точно резонансных внешних полях. Получены аналитические формулы спектрального распределения рассеянного света. Показано влияние коллективных эффектов на спектральную картину.

В четвертой главе рассматривается генерация сжатого света через нелинейные процессы в системе двух-и трехуровневых атомов. Глава состоит из пяти параграфов (§§ 18-22).

В § 18 даны основные понятия неклассических состояний света, в том числе и сжатого состояния. В § 19 исследовано сжатие в коллективной резонансной флуоресценции. Предсказано сильное сжатие в смеси двух крайних спектральных компонент, которое отсутствует для отдельной спектральной компоненты и для полного поля флуоресценции. В § 20 предложена схема генерации сжатого света в смеси двух резонаторных мод, взаимодействующих с сильно возбужденными атомами. Показана возможность получения сильного света с почти стопроцентным сжатием по этой схеме. В § 21 предложена схема генерации сжатого состояния света через двухфотонные переходы в системе сильно возбужденных трехуровневых атомов. Определено условие получения оптимального сжатия. Обсуждена возможность усиления степени сжатия в нелинейной среде и найдено условие получения оптимального усиления сжатия. В § 22 рассмотрено сжатие света в процессе невырожденного смешивания четырех волн в системе трехуровневых атомов в резонаторе. Показана возможность и определены условия получения сильного света с большой степенью сжатия, что является важным с точки зрения практического применения.

В заключении дано краткое обсуждение основных результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Double optical resonance in a system of atoms. Phys. Lett. A, 1985, v. 112, p. 323-326.

2. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Generation of squeezed states of light via four-photon processes in systems of three-level atoms. Phys. Lett. A, 1986, v. II6, p. I75-I79.
3. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Squeezing in Collective resonance fluorescence. Phys. Lett. A, 1986, v. II8, p. 315-318.
4. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Collective effects in Raman scattering of intense optical waves. J.Phys.B, 1987, v. 20, p. 629-637.
5. Bogolubov N.N., Jr., Aleiskenderov E.A., Shumovsky A.S., Tran Quang. Statistical properties of photons in Collective resonance fluorescence. JINR,E4-86-347, Dubna, 1986; J.Phys. B, 1987, v.20, to be published.
6. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Squeezing in a Mixture of two modes interacting with strongly driven two-level atoms. JINR,E4-86-688, Dubna, 1986; Opt. Commun., 1987, to be published.
7. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Collective spectral properties of Raman scattering. JINR,E4-86-684, Dubna, 1986; Physica A, 1987, to be published.
8. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Photon statistics in collective double optical resonant processes. JINR, E4-86-32I, Dubna, 1986.
9. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Correlations of photons in Collective Raman scattering. JINR, E4-86-703, Dubna, 1986.
10. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Squeezing of light via nondegenerate four-wave mixing in a system of three-level atoms. JINR,EI7-86-766, Dubna, 1986.
11. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Violation of the Cauchy - Schwarz inequality in Collective resonance fluorescence. JINR,EI7-87-25, Dubna, 1987.
12. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Nonclassical effects in Collective double optical resonance. JINR, EI7-87-26, Dubna, 1987.
13. Боголюбов Н.Н. (мл.), Чан Куанг, Шумовский А.С. Усиление сжатия света в оптической нелинейной системе. ОИЯИ, P4-85-772, Дубна, 1985.

14. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Statistical properties of photons in Collective resonant Raman Scattering. Rapid Commun. JINR, 1986, No.20-86, p.21-26.
15. Bogolubov N.N., Jr., Shumovsky A.S., Tran Quang. Collective effects in the resonance fluorescence spectrum. Commun. JINR,E4-85-36I, Dubna, 1985.

Рукопись поступила в издательский отдел
16 апреля 1987 года.