

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 530.145 + 535.14 + 539.186.22

A50

17-88-70

АЛИСКЕНДЕРОВ
Эльшан Инаят оглы

**КВАНТОВЫЕ И КОЛЛЕКТИВНЫЕ ЭФФЕКТЫ
В ИЗЛУЧАЮЩИХ СИСТЕМАХ
С КОНЕЧНЫМ ЧИСЛОМ УРОВНЕЙ**

**Специальность: 01.04.02 - теоретическая
и математическая физика**

**Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук**

Дубна, 1988

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики
Объединенного института ядерных исследований.

Научные руководители:

доктор физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник
кандидат физико-математических наук
ведущий научный сотрудник

А. С. Шумовский

К. А. Рустамов

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук
профессор

Д. А. Вдовин

доктор физико-математических наук
ведущий научный сотрудник

Д. М. Голубев

Ведущая организация: Московский государственный университет
им. М. В. Ломоносова

Защита диссертации состоится "13" апреля 1988 г.
на заседании Специализированного совета КО47.01.01 в Лаборатории
теоретической физики Объединенного института ядерных исследований,
г. Дубна Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "11" марта 1988 г.

Ученый секретарь Совета
кандидат физико-математических наук


А. Е. Дорохов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Квантовая электродинамика, представляющая собой теорию электромагнитных взаимодействий, позволила объяснить и предсказать весьма широкий круг явлений, связанных с поведением электронов и фотонов. В последние годы благодаря созданию высокостабильных лазерных источников когерентного излучения и детекторов фотонов с большой чувствительностью открылась возможность прямого экспериментального исследования флуктуационных свойств электромагнитного поля, вследствие чего наблюдались новые квантовые эффекты, такие как разгруппировка фотонов, сжатие света и т.п., не имеющие классических аналогов. Отметим, что данные эффекты ранее были предсказаны при исследовании простых модельных задач взаимодействия "атом+поле" в приближении конечного числа уровней и конечного числа мод. Модельные системы с конечными числами уровней могут сильно отличаться друг от друга по физической природе. Несмотря на это обстоятельство, они описываются на основе единого подхода. Изучение модельных задач, описывающих системы "атом+поле" и допускающих точные решения равновесной и динамической задач, представляет не только методологический интерес, но и имеет широкие перспективы практического применения в связи с открывающимися возможностями снижать естественные шумы света в точных оптических измерениях и в системах оптической передачи и обработки информации. Вышесказанное обуславливает актуальность темы настоящей диссертации "Квантовые и коллективные эффекты в излучающих системах с конечным числом уровней".

Цель работы состоит в исследовании квантовых и коллективных свойств в системах "атом+поле" в приближении конечного числа уровней и конечного числа мод и в рассмотрении возможности появления новых квантовых эффектов в таких системах.

Научная новизна и практическая ценность работы

На основе подхода, связанного с интегрированием операторных уравнений движения, исследовано влияние фотонной мультипликативности на параметры, определяющие статистику фотонов, степень сжатия электромагнитного поля и когерентное пленение населенности уровней. Произведен учет влияния конечной добротности резонатора на спектры мно-

гофотонного поглощения и излучения. Изучены особенности коллективного поведения систем с различным числом атомов. Найдены условия получения предельно допустимого сжатия с учетом свойств реальных резонаторов и указана возможность создания сверхизлучательного генератора с субпуассоновской статистикой фотонов.

Для защиты выдвигаются следующие основные результаты, полученные в диссертации:

1. На основе исследования системы уравнений Гейзенберга и формализма одетых состояний изучены характеристики трехуровневых атомов в зависимости от показателя мультипликативности фотонной генерации. В частности, указана зависимость отношения населенностей уровней при когерентном пленении от среднего числа фотонов и фотонной мультипликативности перехода.

2. При исследовании сжатия света в многофотонной модели Джейнса-Каммингса показано, что в случае начального когерентного состояния поля максимальное сжатие реализуется для значения показателя фотонной мультипликативности, равного трем.

3. Впервые установлена зависимость частоты и ширины линий излучения и поглощения для двухуровневого атома с многофотонными переходами в зависимости от добротности резонатора и показателя фотонной мультипликативности.

4. Для системы из двух двухуровневых атомов с многофотонными переходами найдена явная зависимость интенсивности коллективного спонтанного излучения от фотонной мультипликативности m , причем импульс "сверхизлучательного" процесса асимметричен относительно времени задержки.

5. Для схемы генерации сжатого состояния в смеси крайних мод спектра резонансной флуоресценции исследована зависимость степени сжатия от ширины линий резонатора и найдено условие получения предельного сжатия, устанавливающее зависимость между параметрами атомной системы, поля накачки и резонатора.

6. Для системы двухуровневых атомов (модель Дикке) на решетке исследована зависимость параметров равновесного фазового перехода от температуры кристалла, учитывающая упругие процессы. Показано, что наличие колебаний решетки приводит к уменьшению величины спонтанной поляризации и к понижению критической температуры.

Апробация работ. Основные результаты диссертации неоднократно докладывались на семинарах Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, кафедры физики твердого тела Азербайджанского государственного университета им. С.М.Кирова, лаборатории теоретической физики Института физики Академии наук Азербайджанской ССР.

Часть результатов докладывалась на тематических семинарах по проблемам квантовой оптики (Дубна, 1986 г., 1987 г.), на IV Международном симпозиуме по избранным проблемам статистической механики (Дубна, 1987 г.) и на Международной конференции по избранным проблемам статистической физики (Львов, 1987 г.).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 8 работ^{/1-8/}.

Объем работ. Диссертация содержит 114 страниц машинописного текста, библиографический список из 134 наименований литературных источников, 24 рисунка и 1 таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, трех глав основного текста и списка цитируемой литературы.

Во введении дан краткий обзор рассматриваемых в диссертации проблем с обоснованием их актуальности и изложением цели исследования. Здесь также сформулированы основные результаты, выносимые на защиту, и указана композиция работы.

В первой главе диссертации, состоящей из пяти параграфов, рассмотрено многофотонное обобщение модели Джейнса-Каммингса для трехуровневого атома с Λ -конфигурацией переходов. Исследуемый здесь гамильтониан в дипольном приближении и приближении вращающейся волны имеет вид

$$H = \sum_{j=1}^2 \hbar \Omega_j R_{jj} + \sum_{\alpha=1}^2 \hbar \omega_{\alpha} a_{\alpha}^{\dagger} a_{\alpha} + \sum_{\alpha=1}^2 \hbar g_{\alpha} (a_{\alpha}^{m_{\alpha}} R_{s_{\alpha}} + a_{\alpha}^{+m_{\alpha}} R_{d_{\alpha}}), \quad (I)$$

где R_{ij} - операторы населенностей уровней ($i=j$) и переходов с уровня j на уровень i ($i \neq j$); a_{α} (a_{α}^{\dagger}) - оператор уничтожения (рождения) фотона с частотой ω_{α} в моде α ; g_{α} - константа связи; $\hbar \Omega_j$ - энергия связи уровня j ; m_{α} - фотонные мультипликативности переходов.

На основе точного решения операторных уравнений движения, использования метода характеристического оператора и формализма одетых состояний исследуются зависимости средних значений различных операторных конструкций от показателя фотонной мультипликативности. Для явления когерентного пленения населенностей найдены зависимости отношения населенности плененных уровней и разности атомных фаз от фотонных мультипликативностей переходов в следующем виде (§ 5)

$$\zeta_{12} = \frac{g^2 \bar{n}_2}{g^2 \bar{n}_1} , \quad \varphi_{12} = m_2 \theta_2 - m_1 \theta_1 , \quad (2)$$

где \bar{n}_1 и \bar{n}_2 есть среднее число фотонов в модах 1 и 2, θ_1 и θ_2 - фазы поля в модах 1 и 2, соответственно. Здесь же показано, что когерентное пленение населенностей имеет место, если атом первоначально находится в состоянии, состоящем из когерентной суперпозиции нижних уровней, а поле - в когерентном состоянии Глаубера.

Во второй главе, состоящей из двух параграфов, изучено влияние фотонной мультипликативности на характеристики процессов, описываемых двухуровневой моделью Джейнса-Каммингса с многофотонными переходами, гамильтониан которой является частным случаем (1) при $g_2 = 0$ и $\alpha = 1$.

Показано, что в указанной системе может быть получено сжатое состояние электромагнитного поля со степенью сжатия, превышающей 50%. Максимальное сжатие достигается при показателе фотонной мультипликативности процесса $m = 3$. Сжатое состояние генерируется непосредственно после включения взаимодействия атома с полем излучения, что представляет большой интерес с точки зрения экспериментального наблюдения. Для эволюции параметра, характеризующего сжатие в квадратичной компоненте поля излучения, найдено поведение, показанное на рис.1. Таким образом, характерной особенностью процесса является

периодическое возникновение сжатого состояния. Величина периода определяется начальными условиями и параметрами системы.

Для процесса в реальном резонаторе (§ 2) описание системы проводится на основе уравнения для матрицы плотности

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = -i[H, \rho] - \kappa(a^\dagger a \rho - 2a \rho a^\dagger + \rho a^\dagger a), \quad (3)$$

где $\kappa = (2\omega/Q)$ - эффективность резонатора (Q - добротность резонатора) на

частоте ω . Исследованы случаи низкой ($\kappa^2 m^2 \gg 4g^2 m!$) и высокой ($\kappa^2 m^2 \ll 4g^2 m!$) добротностей резонатора. Показано, что в первом случае в спектре поглощения имеется только один пик с резонансной частотой ω_0 , тогда как во втором случае имеется два пика с частотами $\omega_0 \pm g\sqrt{m!}$. Дублетное расщепление линии поглощения

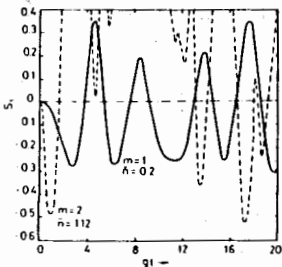


Рис. 1.

обусловлено самоиндуцированными осцилляциями Раби. Показано, что ширина линий поглощения пропорциональна показателю фотонной мультипликативности.

Спектр излучения изучен для больших времен $\Gamma t \gg 1$, где Γ - ширина линии детектора. В случае резонатора с высокой добротностью спектр излучения представляет собой дублет с частотами $\omega \pm g\sqrt{m!}$ ($\omega = \omega_0/m$) и имеет ширину $\Gamma + \kappa(3m/2 - 1)$, обратно пропорциональную добротности резонатора. В случае расстройки от резонанса Δ ($\Delta^2 \gg 4g^2 m!$) в спектре излучения имеется две несимметричные линии с частотами $\omega + \Delta$ и ω и ширинами $\Gamma + \kappa(m-1)$ и $\Gamma + \kappa(2m-1)$, соответственно.

В третьей главе, состоящей из трех параграфов, исследованы некоторые коллективные свойства двухуровневых систем, взаимодействующих с полем излучения.

В первом параграфе для двух двухуровневых атомов с многофотонными переходами исследована эволюция параметров системы. Для интенсивности излучения найдено выражение

$$I(t) = \frac{d}{dt} \langle N(t) \rangle = 2m \frac{g^2 m!}{\Omega_R} \sin(2\Omega_R t) \left\{ 1 + 2 \frac{(2m)!/m! - m!}{(2m)!/m! + m!} \sin^2(\Omega_R t) \right\}, \quad (4)$$

где Ω_R - частота Раби. Как видно из (4), максимальная интенсивность растет с увеличением m -показателя фотонной мультипликативности перехода. Кроме того, выражение (4) описывает импульс, асимметричный относительно времени задержки t_D :

$$t_D = t_R \arccos \left(D - \sqrt{D^2 + \frac{1}{2}} \right) / \pi, \quad (5)$$

где

$$D = \frac{1}{2} \frac{(2m)!/m!}{(2m)!/m! - m!}; \quad t_R = \frac{\pi}{g\sqrt{2[m! + (2m)!/m!]}}$$

Нужно отметить, что обычный сверхизлучательный импульс, предсказываемый теорией, симметричен относительно t_D .

В § 2 рассмотрена генерация сжатого состояния электромагнитного поля в смеси крайних линий триплета резонансной флуоресценции в резонаторе с конечной добротностью и конечной шириной линии. Для степени сжатия как функции параметров системы и поля накачки χ ($\chi = \text{ctg}^2(\frac{1}{2} \arctg(2G/\Delta))$), G - частота Раби накачки, Δ - параметр расстройки, параметров резонатора η_1, η_2 ($\eta_\alpha = g_\alpha/\kappa_\alpha$) и числа частиц N найдено поведение, представленное на рис.2.

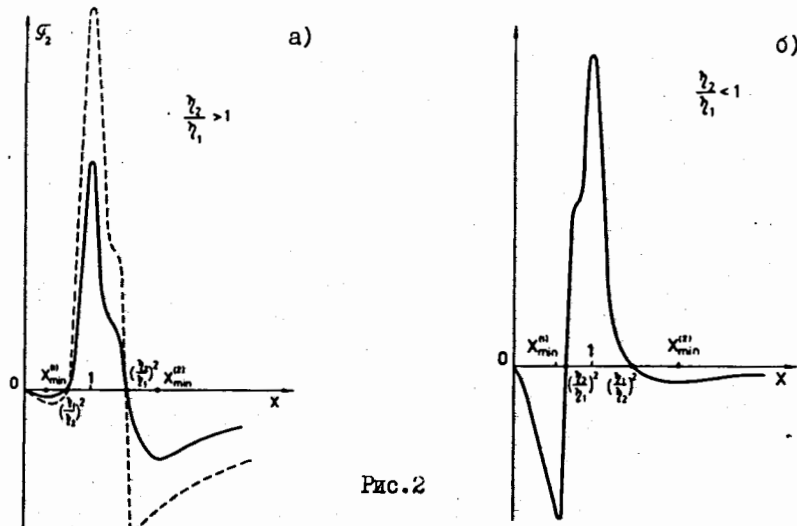


Рис. 2

Условие абсолютного минимума функции F_2 приводит к соотношению (случай а)

$$x \geq (\eta_2/\eta_1)^2, \quad \eta_2 > \eta_1, \quad (6)$$

(случай б)

$$x \leq (\eta_2/\eta_1)^2, \quad \eta_2 < \eta_1. \quad (7)$$

Соотношения (6), (7) являются критериями оптимального выбора параметров системы и резонатора для достижения наибольшего сжатия.

С учетом конечной ширины линий резонатора найдено значение нормально-упорядоченной дисперсии квадратурной компоненты поля E_1 вида

$$\langle :(\Delta E_1)^2: \rangle = \frac{\sqrt{x}}{(\sqrt{x}+1)^3} \cdot \frac{1}{2N} \cdot \frac{N \cdot x^{N+2} - (N+2)x^{N+1} + (N+2)x - N}{(x-1)(x^{N+1}-1)}, \quad (8)$$

$$\times \left\{ \frac{\Gamma_+ + \Gamma_-}{(\Gamma_+ + \Gamma_-)^2 + \delta^2} - \sqrt{x} \frac{\Gamma_+ - \Gamma_-}{(\Gamma_+ - \Gamma_-)^2 + \delta^2} \right\},$$

где Γ_+ и Γ_- - спектральные ширины крайних линий спектра, а Γ - спектральная ширина фильтра. Отсюда при $N \rightarrow \infty$ имеем $\min \langle :(\Delta E_1)^2: \rangle = -1/4$; это означает, что сжатие достигает предельного значения (100%).

В третьем параграфе изучено влияние упругих процессов на равновесные свойства модели Дикке на кристалле. Показано, что учет таких процессов приводит к перенормировке параметра диполь-фотонной связи вида

$$\lambda \rightarrow \bar{\lambda} = \lambda e^{-2W}, \quad (9)$$

где W - фактор Дебая-Уоллера,

$$W = W(\theta) = \frac{3}{2} \frac{\hbar^2 k^2 \theta^2}{M \theta_D^3} \int_0^{\theta_D/\theta} \left(\frac{1}{e^z - 1} + \frac{1}{2} \right) z dz.$$

Здесь k - длина вектора рассеяния, M - масса атома и θ_D - температура Дебая. Показано, что наличие упругих процессов ведет к уменьшению величины спонтанной поляризации и понижению критической температуры. Кроме того, стандартное условие сильной связи вида $\lambda > \hbar \omega$ заменяется неравенством

$$W_0 < \frac{1}{2} \ln \frac{\lambda}{\hbar \omega}, \quad \text{где } W_0 = \lim_{\theta \rightarrow 0} W(\theta), \quad (10)$$

накладываемым дополнительные ограничения на выбор параметров λ и ω .

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Shumovsky A.S., Aliskenderov E.I., Fam Le Kien. Exactly solvable three-level two-mode model with multiphoton transitions. (Точно решаемая трехуровневая двухмодовая модель с многофотонными переходами). - J.Phys.A: Math.Gen., 1985, v.18, No.16, p.L1031-L1036.
2. Shumovsky A.S., Aliskenderov E.I., Fam Le Kien, Nguyen Dinh Vinh. On a Jaynes-Cummings type model with multiphoton transitions. (Об одной модели типа Джейнса-Каммингса с многофотонными переходами). - J.Phys.A: Math.Gen., 1986, v.19, No.17, p.3607-3617.
3. Shumovsky A.S., Aliskenderov E.I., Fam Le Kien. Coherent trapping of populations in a three-level two-mode model with multiphoton transitions. (Когерентное пленение населенностей в трехуровневой двухмодовой модели с многофотонными переходами). - Phys.Lett., 1987, v.120A, No.8, p.401-406.
4. Shumovsky A.S., Fam Le Kien, Aliskenderov E.I. Squeezing in the multiphoton Jaynes-Cummings model. (Сжатие света в многофотонной модели Джейнса-Каммингса). - Phys.Lett., 1987, v.124A, No.6/7, p.351-354.
5. Aliskenderov E.I., Rustomov K.A., Shumovsky A.S., Tran Quang. On the Jaynes-Cummings model with multiphoton transitions in a cavity. (Модель Джейнса-Каммингса с многофотонными переходами в резонаторе). - J.Phys.A: Math.Gen., 1987, v.20, p.6265-6270.

6. Shumovsky A.S., Fam Le Kien, Aliskenderov E.I. Collective spontaneous emission from a system of two atoms with multiphoton transitions in a cavity. (Коллективное спонтанное излучение в системе из двух атомов с многофотонными переходами, находящихся в резонаторе). - J.Physique (Paris), 1987, v.48, No.11, p.1933-1937.
7. Bogolubov N.N., Jr., Aliskenderov E.I., Shumovsky A.S., Tran Quang. Statistical properties of photons in collective resonance fluorescence. (Статистика фотонов в коллективной резонансной флуоресценции). - J.Phys.B: At.Mol.Phys., 1987, v.20, p.1885-1890.
8. Aliskenderov E.I., Shumovsky A.S. Elastic processes in the Dicke model on crystal. (Учет упругих процессов в модели Дикке на кристалле). - JINR, E17-86-72, Dubna, 6 p.

Рукопись поступила в издательский отдел
26 января 1988 года.