

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Ф-20

УДК 530.145+535.14+539.186.22

17-85-93

Фам Ле Киен

**ДИНАМИКА СИСТЕМ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ  
С КОНЕЧНЫМ ЧИСЛОМ УРОВНЕЙ**

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

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

Дубна 1985

Работа выполнена в Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований

Научные руководители:

член-корреспондент АН СССР  
доктор физико-математических наук

БОГОЛЮБОВ Н.Н. (мл.)  
ШУМОВСКИЙ А.С.

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук  
доктор физико-математических наук

ПОПОВ В.Н.  
БАРАБАНЕНКОВ Ю.Н.

Ведущее научно-исследовательское учреждение:

Харьковский физико-технический институт АН УССР,  
г. Харьков

Автореферат разослан " " 1985 г.

Защита диссертации состоится " " 1985 г. на заседании специализированного Совета КО47.01.01 Лаборатории теоретической физики Объединенного института ядерных исследований, г. Дубна, Московской области.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Объединенного института ядерных исследований.

Ученый секретарь Совета  
кандидат физико-математических наук

В.И.ЖУРАВЛЕВ

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

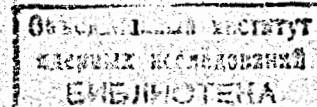
### Актуальность темы

В последнее время заметно возрос интерес к исследованию проблемы динамики систем, взаимодействующих с электромагнитным полем. Это обусловлено целым рядом причин, главные из которых сводятся к следующему.

Во-первых, благодаря появлению мощных источников когерентного излучения в широком диапазоне частот, прежде всего лазеров с перестраиваемой частотой, происходит стремительное развитие как теоретических, так и экспериментальных исследований широкого круга явлений, связанных с резонансным взаимодействием вещества с излучением. Примерами могут служить оптическая нутация, затухание свободной поляризации, фотонное эхо, самоиндуцированная прозрачность, насыщение поглощения, многофотонные резонансы и т.д. Большое внимание уделяется изучению явления кооперативного спонтанного излучения (сверхизлучения) и связанных с ним нелинейных эффектов.

Во-вторых, простейшую модельную задачу, описывающую макроскопическую систему двухуровневых излучателей, резонансно-взаимодействующих с электромагнитным полем удалось точно решить в смысле вычисления термодинамических характеристик. Точные решения динамических задач также были найдены для отдельного двухуровневого атома, взаимодействующего с одной резонансной модой квантованного поля излучения. Как известно, число точно решаемых задач весьма невелико, тогда как именно такие задачи, как правило, оказывают определяющее воздействие на развитие теории. Изучение даже упрощенных, но точно решаемых моделей, позволяет построить адекватное описание целого ряда физических процессов и предсказать ряд принципиально новых явлений.

В-третьих, в различных областях физики изучаются проблемы исследования динамики систем, взаимодействующих с различными бозонными полями, сходные по математической структуре. В квантовой оптике и радиофизике роль бозонного поля играет электромагнитное поле - фотоны. В физике твердого тела это различные квазичастицы - фононы, магноны и т.д. В квантовой теории затухания и релаксационных процессов исследуется кинетика малой системы, взаимодействующей с большим термостатом, который можно заменить неким бозонным полем с бесконечно большим числом степеней свободы. Аналогичная ситуация имеет место и в других областях физики: в теории сверхпроводимости, сверхтекучести, в теории плазмы, сегнетоэлектриков, магнетизме и т.д. Эти проблемы по своей математической структуре образуют определенный класс задач, тесно связанных друг с другом. Поэтому методы исследования, разработанные в одной области, могут успешно применяться и в других областях.



Таким образом, проблема описания динамики систем излучателей, взаимодействующих с электромагнитным полем, является актуальной и важной как с точки зрения общей теории, так и для практических приложений в нелинейной оптике и других областях физики.

Цель работы состоит в исследовании динамики систем излучателей с конечным числом уровней, взаимодействующих с электромагнитным полем, изучении статистических характеристик таких систем на основе строгих методов, рассмотрении возможных квантовых нелинейных эффектов в таких системах.

#### Научная новизна и практическая ценность работы

В диссертации дано последовательное и строгое описание динамики систем излучателей, взаимодействующих с электромагнитным полем. Впервые построены точные иерархии кинетических уравнений для таких систем. Получены микроскопические выражения для кинетических коэффициентов.

Новым вкладом является исследование сверхизлучательной генерации в системе двухуровневых излучателей при неоднородном уширении линии на основе точной иерархии кинетических уравнений.

Построено кинетическое уравнение для системы свободно движущихся двухуровневых излучателей и получены оценки для времени релаксации.

Развит метод операторных уравнений для исследования двухфотонного процесса в трехуровневой системе.

Впервые получены квантово-электродинамические выражения для двухфотонных частот Раби, установлены соотношения между статистическими характеристиками фотонов и населенностями уровней в трехуровневой системе. Найдены явные выражения для временной зависимости операторов населенностей уровней, чисел фотонов, операторов переходов и фотонных амплитуд.

В диссертации предсказано и описано явление автозвуха в трехуровневой системе.

#### ДЛЯ ЗАЩИТЫ ВЫДВИГАЮТСЯ СЛЕДУЮЩИЕ ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ В ДИССЕРТАЦИИ

1. На основе метода исключения бозонных переменных построены точные иерархии кинетических уравнений для двухуровневых систем, взаимодействующих с электромагнитными полями, с использованием формализма как индивидуальных, так и коллективных переменных для подсистемы излучателей.

2. Получены обобщенные кинетические уравнения типа "Master Equation" для средних динамических величин и матрицы плотности подсистемы

излучателей, позволяющие описывать процессы коллективного, в том числе спонтанного и вынужденного, излучения при учете неоднородного уширения линии.

3. Найдена зависимость кинетических коэффициентов от микроскопических параметров системы. Показано, что индивидуальный сдвиг частот и коэффициенты, описывающие процессы излучения и поглощения, зависят от начального поля, в то время как коллективный сдвиг от начального поля не зависит.

4. Рассмотрена проблема сверхизлучательной генерации в системе двухуровневых излучателей. Получены уравнения для инверсной населенности, позволяющие описывать процесс коллективного спонтанного излучения и форму импульса при учете неоднородного уширения линии. Найдены аналитические решения для различных этапов излучения. Описано влияние неоднородного уширения линии на форму и другие параметры сверхизлучательного импульса. Показано, что неоднородное уширение линии приводит к асимметрии формы импульса, увеличению его длительности и времени задержки, уменьшению максимальной интенсивности.

5. Построено кинетическое уравнение для системы свободно движущихся двухуровневых излучателей. Определены релаксационные характеристики системы и найдена зависимость от начального поля.

6. Исследована динамика двухфотонного резонансного процесса в трехуровневой системе. Получена замкнутая система операторных уравнений для динамических величин и найдено точное решение такой системы. С его помощью строго исследована динамика населенностей уровней и чисел фотонов при различных начальных состояниях. Найдены квантовоэлектродинамические выражения для двухфотонных частот Раби и новый нелинейный интеграл движения. Показано существование мягкой ветви этих частот. Получены выражения для вероятностей различных однофотонных и двухфотонных переходов в системе.

7. Предсказано и описано явление автозвуха (чередования возобновлений и ослаблений осцилляций динамических величин) в трехуровневой системе, инициируемое начальной когерентной накачкой девозбужденной атомной системы. Особенностью автозвуха является двойная периодичность осцилляций числа фотонов сигнальной моды и населенности соответствующего уровня. Показаны проявления конкуренции между модами и возможность подавления одного перехода другим.

8. Установлены и строго исследованы соотношения между статистическими характеристиками фотонов и населенностями атомных уровней. Найдены характеристические функции, функции распределения, статистические моменты фотонов и также функции корреляции между модами для широкого класса начальных условий.

9. Получены точные выражения для операторов переходов и фотонных амплитуд. Строго исследована динамика системы при учете расстройки мод в случае двухфотонного резонанса. Показано, что такая расстройка приводит к расщеплению мягкой ветви частот нелинейных двухфотонных осцилляций Раби.

Апробация работы. 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 II и III Международных симпозиумах по избранным проблемам статистической механики (Дубна, 1981 г. и 1984 г.).

Публикации. Основные результаты опубликованы в работах /1-10/.

Объем работы. Диссертация содержит 144 страницы печатного текста, библиографический список из 127 наименований литературных источников, 7 рисунков.

#### СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

Во введении приведен краткий обзор рассматриваемых проблем, дано обоснование их актуальности и важности, кратко изложен материал диссертации, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассматривается проблема описания динамики макроскопической системы двухуровневых излучателей, взаимодействующих с электромагнитным полем. Глава состоит из четырех параграфов.

В первом параграфе рассматривается структура модели, описывающей макроскопическую систему двухуровневых излучателей, взаимодействующих с электромагнитным полем. Второй параграф посвящен развитию метода Н.Н.Боголюбова и Н.Н.Боголюбова (мл.) исключения бозонных переменных и получению точных иерархий динамических уравнений для системы двухуровневых излучателей, взаимодействующих с электромагнитным полем в формализме индивидуальных переменных. В третьем параграфе рассматривается коллективное описание динамики системы. Четвертый параграф посвящен выводу и исследованию основных уравнений теории коллективного излучения. На основе точных иерархий уравнений, построенных в §§ 2-3, получены обобщенные кинетические уравнения типа Master Equation для средних динамических величин и матрицы плотности подсистемы излучателей. Эти уравнения позволяют описывать процессы коллективного, в том числе спонтанного и вынужденного, излучения при учете неоднородного

уширения линии. Кроме того, здесь получены выражения для кинетических коэффициентов. Показано, что индивидуальный сдвиг частот и коэффициенты, описывающие процессы излучения и поглощения, зависят от начального поля, в то время как коллективный сдвиг от начального поля не зависит.

Вторая глава диссертации посвящена исследованию интенсивности сверхизлучательной генерации в системе двухуровневых излучателей и оценке времени релаксации. Глава состоит из четырех параграфов (§§ 5-8).

В § 5 получено уравнение для инверсии населенностей, описывающее процесс коллективного спонтанного излучения и форму импульса при учете неоднородного уширения линии. Оно имеет следующий вид

$$\frac{d}{dt} \langle R_z(t) \rangle = -\frac{1}{\tau_0} \left\{ \frac{\alpha N}{2} + \langle R_z(t) \rangle + \mu \left[ \frac{N^2}{4} - \langle R_z(t) \rangle^2 \right] \right\} e^{-t/T} \quad (1)$$

Здесь  $\langle R_z \rangle$  - средняя инверсия населенностей,  $N$  - число излучателей,  $T$  - неоднородное время жизни излучателей,  $\tau_0$  - время спонтанного распада,  $\mu$  - геометрический фактор,  $\alpha$  - параметр, учитывающий вклад антирезонансных членов в гамильтониане системы при неоднородном уширении линии. В § 6 рассмотрено приближенное решение уравнения (1). Получено выражение для  $\langle R_z(t) \rangle$  через цилиндрические функции

$$\langle R_z(t) \rangle = \frac{\tau_0}{\mu} e^{t/T} \left\{ \frac{1}{2} \left( \frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{T} \right) - \frac{v'(t)}{v(t)} \right\} \quad (2)$$

где

$$v(t) = \left( \frac{T}{D} \right)^{1/3} \sqrt{\frac{t}{T} D - E} Z_{1/3} \left( \frac{2}{3} \frac{T}{D} \left[ \frac{t}{T} D - E \right]^{3/2} \right) \quad (3)$$

Здесь  $E, D$  - параметры системы, и

$$Z_{1/3}(x) = C_1 J_{1/3}(x) + C_2 N_{1/3}(x) \quad (4)$$

где  $J_\alpha(x), N_\alpha(x)$  - функции Бесселя I-го и 2-го рода соответственно.

Показано, что из (1) следует известное уравнение Релера-Эберли.

В § 7 описано влияние неоднородного уширения линии на форму и другие параметры сверхизлучательного импульса. Показано, что такое уширение приводит к асимметрии формы импульса, к увеличению его длительности и времени задержки, к уменьшению максимальной интенсивности. Получены следующие оценки

$$\tau_N^* \approx \tau_N \frac{T}{T-t_m}, \quad t_m^* \approx T \ln \frac{T}{T-t_m}, \quad I_m^* \approx I_m \frac{T-t_m}{T}, \quad (5)$$

где  $\tau_N^*, t_m^*, I_m^*(\tau_N, t_m, I_m)$  - длительность импульса, время задержки и максимальная интенсивность, соответственно, при учете (без учета) неоднородного уширения линии. Найдены критерии применимости изложенного описания

$$\frac{2\tau_N}{T-t_m} \ll 1, \quad N\mu \gg 1, \quad L \ll c\tau_N. \quad (6)$$

В § 8 в приближении низкой плотности исследованы кинетические свойства системы свободно движущихся двухуровневых излучателей. Рассмотрение одночастичной функции распределения позволяет определить релаксационные характеристики системы. В случае системы с одной рабочей частотой  $\Omega$  при условии  $\hbar\Omega \ll mc^2$  для времен релаксации  $\tau_+, \tau_-$  получены выражения

$$\tau_{\pm} = 3\beta\hbar^2 c^2 p / \left\{ 2m\Omega^2 d^2 \ln \left[ \frac{\exp(\mp\beta\hbar c k_2) - 1}{\exp(\mp\beta\hbar c k_1) - 1} \right] \right\}, \quad (7)$$

где

$$K_{1,2} = \frac{\Omega}{c \pm p/m}, \quad (8)$$

$m, p$  - масса и импульс излучателя соответственно,  $c$  - скорость света,  $d$  - величина дипольного момента перехода,  $\beta^{-1}$  - температура. Найдены предельные значения для  $\tau_{\pm}$  в двух случаях: низкой и высокой температуры. Полученные оценки представляют интерес в связи с проблемой выбора рабочего режима в сверхизлучательных лазерах рентгеновского и гамма-диапазонов. Они хорошо согласуются с ранее известными результатами.

Третья глава диссертации посвящена исследованию двухфотонного процесса в трехуровневой системе. Глава состоит из шести параграфов (§§ 9-14).

В § 9 рассмотрен модельный гамильтониан, описывающий двухфотонный резонансный процесс в трехуровневой системе в дипольном приближении и приближении вращающейся волны

$$\hat{H} = \sum_{j=1}^2 \hbar\Omega_j \hat{R}_{jj} + \sum_{\alpha=1}^2 \hbar\omega_{\alpha} \hat{a}_{\alpha}^{\dagger} \hat{a}_{\alpha} + \hbar \sum_{\alpha=1}^2 g_{\alpha} (\hat{a}_{\alpha} \hat{R}_{3\alpha} + \hat{a}_{\alpha}^{\dagger} \hat{R}_{\alpha 3}). \quad (9)$$

Здесь оператор  $\hat{R}_{ij} \equiv |i\rangle\langle j|$  описывает: при  $i \neq j$  - переход атома из уровня  $j$  в уровень  $i$ , а при  $i=j$  - населенность уровня  $i$  с соответствующей энергией  $\hbar\Omega_j$ . Операторы  $\hat{a}_{\alpha}, \hat{a}_{\alpha}^{\dagger}$  описывают уничтожение и рождение фотона в моде  $\alpha$  с соответствующей резонансной частотой  $\omega_{\alpha} = \Omega_3 - \Omega_{\alpha}$ . Система имеет общий верхний уровень.

В § 10 показано, что такая модель точно интегрируема. С использованием специальных свойств операторов  $\hat{R}_{ij}$  - генераторов группы  $SU(3)$

$$\hat{R}_{ij} \hat{R}_{kl} = \hat{R}_{il} \delta_{kj} \quad (10)$$

получена замкнутая система линейных дифференциальных операторных уравнений для динамических величин. Точное решение такой системы уравнений имеет вид

$$\begin{aligned} \hat{R}_{11}(t) &= \hat{N}_1(t) - \hat{N}_1(0) + \hat{R}_{11}(0) = \\ &= \hat{\mu}(\cos \hat{\lambda}t - 1) + \hat{\beta} \sin \hat{\lambda}t + \\ &+ \hat{\lambda}_1^2 [\hat{u}(\cos 2\hat{\lambda}t - 1) + \hat{v} \sin 2\hat{\lambda}t] + \hat{R}_{11}(0), \\ \hat{R}_{22}(t) &= \hat{N}_2(t) - \hat{N}_2(0) + \hat{R}_{22}(0) = \\ &= -\hat{\mu}(\cos \hat{\lambda}t - 1) - \hat{\beta} \sin \hat{\lambda}t + \\ &+ \hat{\lambda}_2^2 [\hat{u}(\cos 2\hat{\lambda}t - 1) + \hat{v} \sin 2\hat{\lambda}t] + \hat{R}_{22}(0), \\ \hat{R}_{33}(t) &= -\hat{\lambda}^2 [\hat{u}(\cos 2\hat{\lambda}t - 1) + \hat{v} \sin 2\hat{\lambda}t] + \hat{R}_{33}(0), \end{aligned} \quad (11)$$

где  $\hat{\lambda}, 2\hat{\lambda}$  - квантовоэлектродинамические выражения двухфотонных частот Раби

$$\begin{aligned} \hat{\lambda} &= \sqrt{\hat{\lambda}_1^2 + \hat{\lambda}_2^2}, \\ \hat{\lambda}_{\alpha} &= g_{\alpha} \sqrt{\hat{M}_{\alpha} + 1}, \\ \hat{M}_{\alpha} &= \hat{N}_{\alpha} - \hat{R}_{\alpha\alpha}. \end{aligned} \quad (12)$$

Амплитудные операторы  $\hat{\mu}, \hat{\beta}, \hat{u}, \hat{v}$  определяются начальными условиями:  $\hat{R}_{jj}(0), \hat{R}_{jj}(0)$ . Отметим, что существование мягкой ветви  $\hat{\lambda}$  двухфотонных частот Раби является характерной особенностью трехуровневой системы.

Найден новый нелинейный интеграл движения в рассматриваемой системе

$$\widehat{K} = g_1 g_2 (\widehat{a}_1 \widehat{a}_2^+ \widehat{R}_{21} + \widehat{a}_1^+ \widehat{a}_2 \widehat{R}_{12}) - \widehat{\lambda}_1^2 \widehat{R}_{12} - \widehat{\lambda}_2^2 \widehat{R}_{11} \quad (13)$$

В § II, I2 исследуется динамика системы на основе точного решения (II). В § II рассмотрен случай начального состояния с определенными числами заполнения. Найден выражения для вероятностей различных переходов в системе. В § I2 рассмотрен случай произвольного начального состояния поля. Предсказана возможность явления автозвуха (чередования возобновлений и ослаблений осцилляций динамических величин) в трехуровневой системе, инициируемая начальной когерентной накачкой де возбужденной атомной системы. Особенностью автозвуха является двойная периодичность осцилляций числа фотонов сигнальной моды и населенности соответствующего уровня. Показаны проявления конкуренции между модами и возможность подавления одного перехода другим.

В § I3 установлены и строго исследованы соотношения между статистическими характеристиками фотонов и населенностями атомных уровней. Получены операторные соотношения

$$\begin{aligned} \widehat{N}_\alpha^m(t) &= \{(\widehat{M}_\alpha + 1)^m - \widehat{M}_\alpha^m\} \widehat{R}_{\alpha\alpha}(t) + \widehat{M}_\alpha^m \\ \widehat{N}_1^k(t) \widehat{N}_2^l(t) &= \widehat{M}_1^k \widehat{M}_2^l + \widehat{M}_1^k \{(\widehat{M}_2 + 1)^l - \widehat{M}_2^l\} \widehat{R}_{22}(t) \\ &\quad + \widehat{M}_2^l \{(\widehat{M}_1 + 1)^k - \widehat{M}_1^k\} \widehat{R}_{11}(t), \\ \widehat{X}_\alpha(\xi) &= \exp(i\xi \widehat{M}_\alpha) \{[\exp(i\xi) - 1] \widehat{R}_{\alpha\alpha}(t) + 1\}, \\ \widehat{X}(\xi_1, \xi_2) &= \exp(i\xi_1 \widehat{M}_1 + i\xi_2 \widehat{M}_2) \\ &\quad \{[\exp(i\xi_1) - 1] \widehat{R}_{11}(t) + [\exp(i\xi_2) - 1] \widehat{R}_{22}(t) + 1\}, \end{aligned} \quad (14)$$

позволяющие определить статистические моменты  $\langle \widehat{N}_\alpha^m(t) \rangle$ , функции корреляции  $\langle \widehat{N}_1^k(t) \widehat{N}_2^l(t) \rangle$ , характеристические функции  $\widehat{X}_\alpha(\xi)$  и  $\widehat{X}(\xi_1, \xi_2)$ . С помощью этих формул удалось получить функции распределения фотонов и другие статистические характеристики для широкого класса начальных состояний

В § I4 найдено точное решение операторных уравнений для операторов переходов и фотонных амплитуд. Строго исследована динамика системы при учете расстройки мод в случае двухфотонного резонанса. Показано, что учет расстройки мод приводит к расщеплению мягкой ветви  $\widehat{\lambda}$  частот нелинейных двухфотонных осцилляций Раби на две другие -  $\widehat{\lambda}_+$  и

$\widehat{\lambda}_-$ :

$$\widehat{\lambda}_\pm = \widehat{\lambda} \pm \Delta/\omega, \quad \widehat{\lambda} = \sqrt{\widehat{\lambda}_1^2 + \widehat{\lambda}_2^2 + \Delta^2/4} \quad (15)$$

В заклучении дано краткое обсуждение основных результатов работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Боголюбов Н.Н. (мл.), Фам Ле Киен, Шумовский А.С. О кинетическом уравнении для двухуровневой системы, взаимодействующей с электромагнитным полем.- ТМФ, 1982, т. 52, № 3, с. 423-430.
2. Боголюбов Н.Н. (мл.), Фам Ле Киен, Шумовский А.С. Динамика системы двухуровневых излучателей, взаимодействующих с электромагнитным полем.- В кн.: П Международный симпозиум по избранным проблемам статистической механики, Дубна, 1981.- ОИЯИ, Д17-81-758, с. 49-53, Дубна, (1982).
3. Боголюбов Н.Н. (мл.), Фам Ле Киен, Шумовский А.С. Динамика двухуровневой системы и оценка времени релаксации.- ТМФ, 1982, т. 53, № 1, с. 108-113.
4. Боголюбов Н.Н. (мл.), Фам Ле Киен, Шумовский А.С. Об интенсивности сверхизлучательной генерации в двухуровневых системах.- ТМФ, 1984, т. 60, № 2, с. 254-261.
5. Боголюбов Н.Н. (мл.), Фам Ле Киен, Шумовский А.С. Динамическая теория сверхизлучательных процессов.- в кн.: Ш Международный симпозиум по избранным проблемам статистической механики, Дубна, 1984, ОИЯИ, Д17-84-850, т. I, Дубна (1985).
6. Bogolubov N.N. (Jr.), Fam Le Kien, Shumovsky A.S. Two-photon process in three-level system. (Двухфотонный процесс в трехуровневой системе).- Phys. Lett., 1984, v. 101A, No 4, p. 201-203.
7. Bogolubov N.N. (Jr.), Fam Le Kien, Shumovsky A.S. Dynamics of two-photon process in three-level system (Динамика двухфотонного процесса в трехуровневой системе).- ОИЯИ, 1984, В17-84-292, 10 с.
8. Bogolubov N.N. (Jr.), Fam Le Kien, Shumovsky A.S. Exact results for a model of a three-level atom (Точные результаты для одной модели трехуровневого атома).- ОИЯИ, 1984, В17-84-637, 6 с.
9. Боголюбов Н.Н. (мл.), Фам Ле Киен, Шумовский А.С. Исследование двухфотонного процесса в трехуровневой системе и явление автозвуха - в сборнике аннотаций Ш-го международного симпозиума по избранным проблемам статистической механики, Дубна, 1984. ОИЯИ Д17-84-407, с. 23, Дубна (1984).

10. Bogolubov N.N.(Jr.), Fam Le Kien, Shumovsky A.S. Photon-statistics and atomic dynamics in a three-level plus two-mode model (Статистика фотонов и динамика атома в трехуровневой двухмодовой модели). ОИЯИ, 1984, Е17-84-673, 6 с.

Рукопись поступила в издательский отдел  
11 февраля 1985 года.