

ЮДСОН

Владимир Исаакович

КИНЕТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ
И НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМСпециальность: 01.04.02 - теоретическая и математическая
физика.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наукДУБНА
1989

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 530.145: 535.14

ЮДСОН

Владимир Исаакович

КИНЕТИКА И СПЕКТРОСКОПИЯ НИЗКОРАЗМЕРНЫХ
И НЕОДНОРОДНЫХ СИСТЕМ

Специальность: 01.04.02 - теоретическая и математическая
физика.

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

ДУБНА
1989

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ
ДУБНА

Работа выполнена в Институте спектроскопии АН СССР

Официальные оппоненты:

член-корреспондент АН СССР

доктор физико-математических наук

профессор

Овчинников А.А.

доктор физико-математических наук

подручный научный сотрудник

Мананов С.В.

доктор физико-математических наук

и.о. науч. сектора

Шумовский А.С.

Ведущая организация: Ленинградское отделение Математического института им. В.А. Стеклова АН СССР

Защита диссертации состоится "___" _____ 1989 г.

в "___" часов на заседании Специализированного совета

Д047.01.01 при Лаборатории теоретической физики

Объединенного института ядерных исследований (г. Дубна,

Московская обл.).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан "___" _____ 1989 г.

Ученый секретарь

Специализированного совета

кандидат физико-математических наук

Журавлев В.И.

Актуальность темы. Кинетические свойства физических систем гораздо богаче и разнообразнее, чем свойства их статистически равновесных состояний. Соответственно, при переходе к описанию нестационарных явлений значительно возрастает сложность теории. В связи с этим, особый интерес при исследовании кинетики систем с большим числом взаимодействующих степеней свободы (мод) представляет рассмотрение моделей с пониженной пространственной размерностью ($d < 3$). Как и в случае статистически равновесных систем, в таких моделях зачастую удается достигнуть сравнительно более полного теоретического описания. Одной из естественных физических реализаций эффективно одномерных ($d = 1$) систем являются протяженные сверхизлучательные среды, многомодовые лазеры волноводы; эффективно двумерными ($d = 2$) могут считаться тонкие пленки (базовый объект микро- и оптоэлектроники), границы раздела сред. Значительный интерес в этих низкоразмерных системах вызывает кинетика оптических и транспортных явлений. Нелинейность или пространственная неоднородность приводят к проблеме взаимодействия большого числа степеней свободы, отвечающих электромагнитному полю и возбуждениям среды. Теоретико-полевой подход к этим проблемам представляется интересным и естественным приложением современного аппарата теоретической и математической физики. Таким образом, является весьма актуальным теоретическое исследование кинетики оптических и транспортных явлений в низкоразмерных системах с большим числом взаимодействующих степеней свободы. Разнообразным аспектам данной проблемы посвящены работы автора, результаты которых систематизированы в диссертации.

Основная цель работы состоит в теоретическом исследовании кинетики оптических явлений и процессов переноса в эффективно одномерных и двумерных системах с большим числом взаимодействующих степеней свободы.

Научная новизна. Результаты работы составляют основу нового научного направления в статистической физике неравновесных явлений: кинетической теории оптических и транспортных процессов в низкоразмерных и неоднородных системах с большим числом взаимодействующих степеней свободы.

В работе впервые:

- I. На основе полученного представления для оператора временной эволюции интегрируемой квантовой системы построено точное описание динамики эффективно одномерных интегрируемых моделей резонансной квантовой оптики.
- II. Построено квантовое описание кинетики генерации многомодового поля в эффективно одномерном резонаторе, исследованы статистические свойства спектра генерации многомодовых лазеров.
- III. С помощью принципа симметрии кинетических коэффициентов получены эффективные граничные условия и решена Френелевская задача на границе раздела сред с пространственной дисперсией.
- IV. Разработан теоретико-полевой подход к описанию кинетики некогерентного переноса (случайных блуждений) в неупорядоченной двумерной среде с дальними корреляциями беспорядка.

Научная значимость и практическая ценность. Выполненные работы служат более глубокому пониманию физических процессов, обусловленных взаимодействием многомодового поля с резонансной средой. Идеи и результаты, изложенные в диссертации, получили признание и используются в исследованиях, ведущихся в других научных учреждениях страны (ЛОМИ, ФИАН, ЛГУ и др.) и за рубежом, вошли в монографии и обзоры, применяются для интерпретации результатов экспериментальных исследований.

На защиту выносятся следующие основные положения и результаты исследования:

1. Найдено разложение оператора временной эволюции интегрируемой квантовой системы, собственные состояния которой описываются набором струн, по обобщенным состояниям единственной (бесструнной) конфигурации. На основе этого представления построено точное описание динамики эффективно одномерных интегрируемых моделей резонансной квантовой оптики.
2. Трехмерная задача о многофотонном резонансном рассеянии света двухуровневым атомом сведена к эффективно одномерной, что позволило рассмотреть ее с помощью развитого формализма. Точно описано многочастичное состояние рассеянного поля.

3. Исследована квантовая кинетика генерации многомодового поля в эффективно одномерном резонаторе бегущей волны. Найдены функции распределения фотонов по лазерным модам. Показано, что флуктуации чисел фотонов в отдельных модах являются большими и долгоживущими, а спектр многомодового поля имеет сильно изрезанную структуру.
4. Показано, что кинетика флуктуаций в спектре генерации многомодового поля в одномерном резонаторе стоячей волны существенно зависит от степени заполнения резонатора активной средой. Найдены условия возникновения в спектре генерации крупномасштабной модуляционной структуры.
5. Исследован ряд вопросов кинетики двумерных систем. Показано, что принцип симметрии кинетических коэффициентов устанавливает связь между феноменологическими параметрами материального уравнения на границе гиротропной среды. Найдены поправки к формулам Френеля, обусловленные наличием в материальном уравнении пространственных производных. Исследовано взаимодействие света с оптическими фонами тонких диэлектрических пленок на проводящей подложке. Найдена зависимость излучательной способности от толщины пленки, угла и поляризации излучения.
6. Разработан теоретико-полевой подход к описанию кинетики некогерентного переноса (случайных блуждений) в неупорядоченной двумерной среде с дальними корреляциями беспорядка. С помощью ренормгруппового анализа показано, что даже слабый беспорядок существенно меняет макроскопические значения кинетических коэффициентов (диффузии, подвижности). Обнаружена ренорм-инвариантность эффективного заряда в системе с потенциальным беспорядком. Показано, как в общем случае ренормируется эффективная температура и модифицируется соотношение Эйнштейна.

Расширенная формулировка защищаемых положений и результатов исследования приведена в заключительном разделе автореферата.

О личном вкладе автора. Все приведенные в диссертации результаты получены лично соискателем либо при его непосредственном участии.

Апробация работы и публикации. Результаты работы докладывались на Всесоюзном семинаре "Квантовая теория солитонов" (Ленинград, 1984), X и XII Всесоюзных конференциях по когерентной и нелинейной оптике (Киев, 1980; Москва, 1985), II Советско-финском симпозиуме по квантовой электронике (Хельсинки, 1985), XIII Всесоюзном совещании по теории полупроводников (Ереван, 1987), Советско-американском симпозиуме по двумерным электронным системам (Москва, 1988), а также на семинарах в Институте спектроскопии, Институте физических проблем, Ленинградском отделении Математического института, Физическом институте АН СССР, Лаборатории теоретической физики ОИЯИ, Московском государственном университете.

Основные результаты диссертации опубликованы в 20 работах; список которых помещен в конце автореферата.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и списка цитированной литературы (143 наименований). Работа изложена на 206 страницах машинописного текста, содержит 15 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во Введении обоснована актуальность и определена цель исследования, кратко изложено содержание диссертации. В конце Введения сформулированы защищаемые положения. Обзор литературы, обсуждение истории вопроса и постановка задач даются во вводных параграфах каждой главы.

В первой главе рассматривается динамика одномерной системы "квантовое электромагнитное поле + двухуровневые атомы".

Классический вариант этой модели применялся для описания распространения света в нелинейной резонансной среде (явления самоиндуцированной прозрачности и др.). Успешный теоретический анализ классической модели в значительной степени связан с применением методов теории интегрируемых классических систем. Анализ квантовой модели производится в диссертации с помощью мето-

дов теории квантовых интегрируемых систем. В отличие от известной одномерной ("нульмерной") модели Джейнса-Каммингса, в исследуемой (одномерной) модели учитывается бесконечное число степеней свободы (мод) электромагнитного поля:

$$H = \int dx \left\{ -i \varepsilon^{\dagger}(x) \partial_x \varepsilon(x) - \sqrt{\gamma} \left[\varepsilon^{\dagger}(x) S^{\dagger}(x) + S^{\dagger}(x) \varepsilon(x) \right] \right\} \quad (1)$$

где бозонные операторы $\varepsilon(x)$ и спиновые операторы $S^{\dagger}(x) = \sum_a S_a^{\dagger} \delta(x-r_a)$ описывают фотоны и двухуровневые атомы с координатами $\{r_a\}$. К аналогичной одномерной модели эффективно сводится и задача в обычном - трехмерном - пространстве о взаимодействии электромагнитного поля с сосредоточенной системой атомов. В § 1.2 приводятся необходимые сведения о рассматриваемых моделях, в том числе полный набор их собственных состояний и соответствующих собственных энергий, найденных в работах /1, 2/ с помощью анзаца Бете.

Известный подход к динамике интегрируемых моделей связан с квантовым методом обратной задачи и состоит в решении квантовых уравнений Гельфанда-Левитана. В моделях со струнными решениями (к этому классу относятся и рассматриваемые системы) эти уравнения представляют собой довольно сложную систему операторных интегральных соотношений. В работе /3/ был предложен способ описания временной эволюции состояний, позволяющий избежать трудностей, связанных с учетом многочисленных струнных конфигураций. Результатам исследования является следующее представление для состояния

$$|\Psi(t)\rangle = \exp[-iHt] |\Psi_0\rangle = \int_{\Gamma} d\vec{\lambda} |\vec{\lambda}\rangle \exp[-iE(\vec{\lambda})t] \langle \vec{\lambda} | \Psi_0 \rangle \quad (2)$$

Здесь $|\vec{\lambda}\rangle \equiv |\lambda_1, \lambda_2, \dots\rangle$ - обобщенное многочастичное бетевское состояние бесструнной конфигурации с энергией $E(\vec{\lambda})$, $|\vec{\lambda}\rangle$ - определенное вспомогательное состояние (не бетевское). Важно, что в (2) отсутствует суммирование по струнным конфигурациям и, таким образом, состояние $|\Psi(t)\rangle$, как и в случае моделей не имеющих струнных решений, определяется единственным интегралом по контуру Γ (здесь комплексному). Обобщенные бетевские состояния (с произвольными комплексными значениями быстрот

$\{\vec{\lambda}\}$ вводятся в § 1.3; для них доказывалась справедливость в слабом смысле ряда соотношений, имеющих место для обычных бетевских состояний. В § 1.4 получено общее представление (2) для произвольного состояния рассматриваемых моделей /3,4/. Приложения полученных результатов к физическим задачам, таким, как сверхизлучательный распад атомного возбуждения и одномерного рассеяния фотонов системой атомов, рассмотрены в § 1.5. Получены явные выражения для точных многофотонных волновых функций, описывающих состояния излученного (рассеянного) электромагнитного поля. Их структура демонстрирует возникновение фотон-фотонных корреляций, обусловленных нелинейностью (ограниченностью спектра возбуждений) атомной подсистемы.

Вторая глава посвящена описанию кинетики многофотонного рассеяния света двухуровневым атомом (резонансная флуоресценция). Сведение этой трехмерной задачи к эффективно одномерной позволяет рассмотреть ее как динамическую задачу теории интегрируемых систем. Применяя формализм первой главы к решению квантовой задачи Коши для многочастичного уравнения Шредингера системы "атом+поле" удается найти /5/ точную полевую многофотонную матрицу плотности (или волновую функцию), содержащую информацию о всех корреляционных свойствах рассеянного излучения. В § 2.2 рассмотрена общая постановка многочастичной трехмерной задачи рассеяния /6/ и сведение ее к одномерной задаче, исследованной в первой главе. Получено *out*-состояние излучения в случае, когда падающее поле содержит определенное число фотонов. В § 2.3 исследуется случай, когда падающее поле находится в когерентном состоянии. При этом рассеянное поле описывается чистым состоянием с нулевой энтропией. В § 2.4 находится матрица плотности рассеянного излучения для произвольного (в том числе смешанного) состояния падающего поля. Вычисляется энтропия рассеянного излучения при слабом отличии состояния падающего поля от когерентного /5/.

В третьей и четвертой главах исследуется эффективно одномерная система "атомы + поле", заключенная в резонаторе с определенными граничными условиями и взаимодействующая с "тепловыми резервуарами", которая приводит к процессам накачки и релаксации. Рассматривается процесс генерации поля при создании возбуждения в атомной подсистеме. Эта задача имеет определенное ана-

логии с проблемой распада нестабильного вакуума и образования конденсата бозонов. Предметом исследования является кинетика флуктуаций возникающего фотонного поля. Динамическое описание столь сложной системы (включающей тепловые резервуары) не представляется возможным; описание интересующей нас подсистемы "атомы + многомодовое поле" проводится в рамках квантового кинетического уравнения для функции распределения фотонов $P(\vec{n}, t)$ ($\vec{n} = \{n_\ell\}$, $\ell = 0, \pm 1, \dots$ - индекс моды) по собственным модам поля в резонаторе. В главе 3 рассматривается одномерный резонатор с периодическими граничными условиями, который соответствует лазеру бегущей волны. В § 3.2 уравнение для функции распределения фотонов $P(\vec{n}, t)$ ($\vec{n} = \{n_\ell\}$, $\ell = 0, \pm 1, \dots$ - индекс моды) по собственным модам поля в резонаторе решается на начальной линейной стадии генерации, когда малы эффекты насыщения усиления (см. Рис.1). В § 3.3 для описания дальнейших стадий генерации, когда число фотонов в каждой моде становится большим, совершается переход к многомерному уравнению Фоккера-Планка для $P(\vec{n}, t)$ и вводится соответствующая ему система уравнений Ланжевена для переменных $\{n_\ell(t)\}$, содержащая стохастические ланжевенновские силы $\{F_\ell(t)\} = \vec{F}(t)$. Функция распределения $P(\vec{n}, t)$ представляется следующим континуальным интегралом:

$$P(\vec{n}, t) = \int D\vec{F}(t) W[\vec{F}] \delta[\vec{n} - \vec{n}(t; \vec{F}; t_0, \vec{n}^0)] P(\vec{n}^0, t_0) D\vec{n}^0 \tag{3}$$

где $W[\vec{F}]$ - вероятность конкретной реализации $\{\vec{F}(t)\}$, $\vec{n}(t; \vec{F}; \vec{n}^0; t_0)$ - формальное решение ланжевенновской системы, соответствующее данной реализации $\{\vec{F}(t)\}$ и начальным условиям $\vec{n}(t_0) = \vec{n}^0$. Выбирая момент времени t_0 на линейном этапе генерации, мы подставляем в (3) найденную выше (§3.2) функцию $P(\vec{n}^0, t_0)$. В этом же параграфе рассматривается динамика генерации, то есть решения полученной системы уравнений для $\{n_\ell(t)\}$ при неучете стохастических ланжевенновских сил $\{F_\ell(t)\}$. Эти решения представляют собой пучок классических траекторий в конфигурационном пространстве переменных \vec{n} , отвечающих разбросу начальных условий с весом $P(\vec{n}^0, t_0)$ (см. Рис.2). Временная эволюция функции $P(\vec{n}, t)$ в этом динамическом приближении описана в § 3.4. Найден интервал времен ("динамический этап", см.

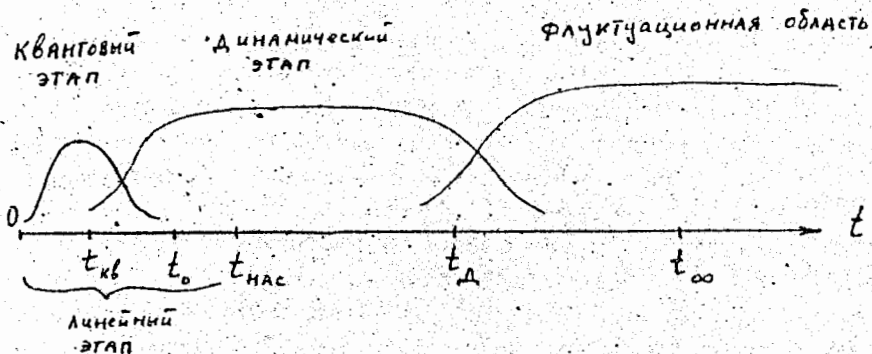


Рис. 1

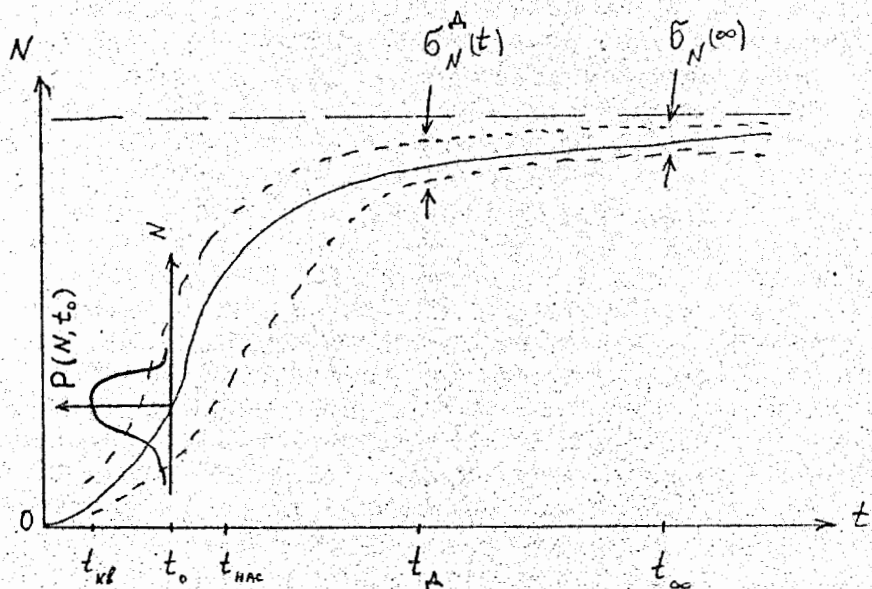


Рис. 2

рис.1,2) на котором такой подход дает хорошее приближение для функции распределения $P(\bar{n}, t)$. На последующих стадиях эволюции системы (флуктуационный этап, рис.1) необходим учет случайных сил $\bar{F}(t)$, то есть вклада в интеграл (3) траекторий $\bar{n}(t)$, отклоняющихся от классических (§§3.5,3.6). Малым параметром теории является $1/L \ll 1$, где L - число возбуждаемых в системе мод поля. Таким образом на всех этапах эволюции системы найдены функции распределения чисел фотонов в отдельных модах $P_e(n_e, t)$ и суммарного числа фотонов $P(N, t)$. В отличие от случая одномодового лазера (пуассоновская статистика), распределение числа фотонов $P_e(n_e, t)$ в отдельной моде многомодового лазера является "тепловым":

$$P_e(n_e, t) = \frac{1}{\bar{n}_e(t)} \exp\left[-\frac{n_e}{\bar{n}_e(t)}\right], \quad (4)$$

где $\bar{n}_e(t)$ - среднее число фотонов в данной моде - определяется решением динамических уравнений (классическая траектория). Распределение $P(N, t)$ является гауссовым. Дисперсия его убывает во времени по степенному закону (скейлинг на динамическом этапе), выходя при достаточно больших временах (флуктуационный этап) на стационарное значение, рис.2). Существенно, что статистический разброс (по реализациям) числа фотонов в отдельной моде велик: $V\langle(\Delta n_e)^2\rangle = \bar{n}_e$. Корреляции же между флуктуациями в отдельных модах оказываются относительно малыми:

$\langle\Delta n_e \Delta n_{e'}\rangle / \bar{n}_e \bar{n}_{e'} \approx 1/L \ll 1$. Поэтому спектр излучения многомодового лазера не описывается плавной функцией частоты, а представляет собой сильно изрезанную структуру (§§3.6, 3.7). Эти квантовые флуктуации устанавливают, в частности, ненулевой порог чувствительности метода внутррезонаторной лазерной спектроскопии (§3.8). Содержание главы основано на работах /7-9/. В главе 4 аналогичный круг задач рассматривается для случая, когда граничным условием для электромагнитного поля является его обращение в нуль, что соответствует резонатору с модами поля в виде стоячих волн. Из-за пространственной неоднородности поля кинетика такой системы оказывается чувствительной к размеру и расположению атомной среды. В §§4.2 и 4.3 рассмотрены, соответственно, стационарное состояние и переходный процесс в случае, когда атомная среда заполняет весь резонатор, флуктуации фото-

нов в отдельных модах в этом случае заметно подавляются.

В § 4.4 исследован противоположный случай тонкой атомной среды, при котором свойства системы оказываются близкими к описанным в главе 3. В § 4.5 рассмотрен вопрос о крупномасштабной периодической структуре спектра излучения, обусловленной пространственно-неоднородными диссипативными элементами. Результаты главы опубликованы в /10,11/. Теоретические представления, изложенные в главах 3,4 подтверждаются результатами экспериментальных исследований.

В глава 5 и 6 рассматривается ряд вопросов, связанных с кинетикой взаимодействия электромагнитного поля с двумерными системами (пленками и границами раздела сред). Пространственная неоднородность (в трехмерном пространстве) этих систем не позволяет свести задачу об их взаимодействии с полем (исходно многомодовую) к совокупности независимых задач о взаимодействии всего двух степеней свободы (как это происходит в неограниченной однородной среде, где попарно взаимодействуют световая и экситонная моды с одинаковыми значениями волновых векторов). В главе 5 рассматриваются граничные задачи кристаллооптики в области "слабой" пространственной дисперсии, когда $\lambda \gg a$ (λ - длина волны макроскопического поля, a - период решетки). В этом случае наличие в системе коротковолновых мод может быть учтено введением эффективных граничных условий для макроскопического поля \vec{E} /12/. В § 5.1 рассматривается общего вида линейное материальное соотношение $\vec{D} = \vec{D}(\vec{E})$, содержащее слагаемые первого порядка по a/λ типа $\delta_1(\vec{r}) \text{rot} \vec{E}(\vec{r})$ и $\text{rot} [\delta_2(\vec{r}) \vec{E}(\vec{r})]$, где $\delta_{1,2} \sim a$. В § 5.2 показано, что эти слагаемые приводят в формулах Френеля к поправкам порядка $\delta_{1,2}/\lambda$, обуславливающим изменение поляризации отражающегося света /13/. В § 5.3 исследован обсуждавшийся, но не решенный ранее вопрос о взаимной зависимости параметров материального соотношения. Показано /14/, что симметрия кинетических коэффициентов устанавливает связь $\delta_1 = \delta_2 = \delta/2$, где δ - величина, определяемая для неограниченной среды. В шестой главе описаны процессы излучения и поглощения света колебательными модами тонких диэлектрических пленок на проводящей подложке /15/. С этой целью в § 6.2 найдены и классифицированы собственные (кулоновские) моды системы в пренебрежении запаздыванием ($c \rightarrow \infty$). В § 6.3 исследовано

взаимодействие этих мод с поперечным полем, определен вклад каждой из мод в излучательную способность пленки и его зависимость от толщины пленки, угла и поляризации излучения. Исследовано также влияние неидеальности подложки (§6.4). Интерпретирован ряд экспериментальных результатов.

В главе 7 рассматривается некогерентный перенос (случайные блуждения) в неупорядоченной двумерной среде. Задача о случайных блуждениях возникает в таких физических ситуациях как перенос излучения и миграция экситонов в молекулярных кристаллах, прыжковая проводимость в полупроводниках и т.д. Вычисление физических величин, усредненных по реализациям беспорядка, производится с помощью эффективной теории поля. Таким образом, здесь как и в ряде других рассматриваемых в диссертации задачах, естественно возникает проблема взаимодействия большого числа степеней свободы. Исследуемая проблема в континуальном пределе описывается уравнением Фоккера-Планка для функции распределения блуждающей частицы:

$$\left\{ \partial_t + \vec{\nabla} \cdot [\vec{v}(\vec{r}) - \mu_0 \vec{E} - D_0 \vec{\nabla}] \right\} P(\vec{r}, t) = 0 \quad (5)$$

где D_0 и μ_0 - затравочные значения коэффициента диффузии и подвижности.

Неупорядоченность среды состоит в наличии стационарного случайного гауссовского поля скоростей $\vec{v}(\vec{r})$ с нулевым средним и коррелятором

$$\langle v_\alpha(\vec{r}) v_\beta(\vec{r}') \rangle = \chi_0 F_{\alpha\beta}(\vec{r} - \vec{r}') \quad (6)$$

где фурье-компонента тензора $F_{\alpha\beta}(\vec{k})$ для рассмотренных случаев имеет вид: 1) $\delta_{\alpha\beta}$ - изотропный беспорядок; 2) $\delta_{\alpha\beta} - k_\alpha k_\beta / k^2$ - соленоидальный беспорядок; 3) $k_\alpha k_\beta / k^2$ - потенциальный беспорядок. Все физические величины системы выражаются (до усреднения по реализациям \vec{v}) через функции Грина уравнения (5). В § 7.2 с использованием представления гриновской функции в виде континуального интеграла по комплексным полям $\vec{\varphi}(\vec{r}), \psi(\vec{r})$ производится усреднение (метод реплик) по реализациям случайного поля $\vec{v}(\vec{r})$. Действие возникающей эффективной теории поля имеет вид: $\mathcal{J} = \mathcal{J}_0 + \mathcal{J}_{int}$, где

$$J_0 = \int \bar{\psi}(\vec{r}) [i\omega - \mu \vec{E} \cdot \vec{\nabla} + D \nabla^2] \psi(\vec{r}) d\vec{r}$$

$$J_{int} = \frac{i\gamma}{2} \int (\partial_\alpha \bar{\psi} \psi)_{\vec{r}} F_{\alpha\beta}(\vec{r} - \vec{r}') (\partial_\beta \bar{\psi} \psi)_{\vec{r}'} d\vec{r} d\vec{r}' \quad (7)$$

При помощи ренормгруппового (РГ) анализа (с точностью до двух петель) в § 7.3 находятся перенормированные значения параметров D , μ и γ (с затравочными значениями D_0 , μ_0 и γ_0), а также эффективного заряда теории — безразмерного параметра беспорядка $g \equiv \gamma / (4\pi D^2)$. Разложение по петлям совпадает с разложением по g . В рассматриваемых моделях даже слабый беспорядок существенно меняет макроскопические значения кинетических коэффициентов, приводя к суб- и супердиффузионным режимам переноса в моделях 3 и 2, соответственно. В § 7.4 описан формализм стохастических "гидродинамических" уравнений, удобный для вычисления корреляционных функций и функций отклика. В § 7.5 показано, как перенормируется эффективная температура и модифицируется соотношение Эйнштейна в моделях с непотенциальным беспорядком 1 и 2. В § 7.6 указываются физические причины ренорм-инвариантности эффективного заряда g (т.е. тождественного равенства нулю функции Гелл-Манна-Лоу) в модели с потенциальным беспорядком 3. В § 7.7 прослеживается связь потенциальной модели с решеточными моделями прыжковой проводимости. В § 7.8 дана качественная интерпретация полученных результатов. Содержание главы основано на работах /18-20/.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключительном разделе диссертации сформулированы основные результаты исследования и положения, которые выносятся на защиту.

1. Развита методика описания динамики интегрируемых квантовых систем, собственные состояния которых соответствуют комплексам связанных квазичастиц — струнам. В основе подхода — найденное представление произвольного физического состояния в виде суперпозиции обобщенных бетевских состояний единственной (бесструнной) конфигурации. Построено точное описание динамики эффективно одномерных интегрируемых моделей резонансной квантовой

оптики. Непосредственно в терминах задачи Коши для многочастичного уравнения Шредингера описаны процессы коллективного спонтанного излучения и рассеяния фотонов на атомах, получены многофотонные волновые функции, определяющие корреляционные свойства электромагнитного поля.

2. Трехмерная задача о многофотонном резонансном рассеянии света двухуровневым атомом сведена к эффективно одномерной, что позволило рассмотреть ее с помощью развитого формализма. Получено точное выражение для конечного состояния электромагнитного поля. Найдена многочастичная матрица плотности рассеянного излучения. Показано, что когда состояние падающего поля не является когерентным, рассеянное поле находится в смешанном состоянии. Вычислена скорость возрастания энтропии рассеянного излучения с ростом отклонения состояния падающего поля от когерентного.

3. Исследована квантовая кинетика генерации многомодового поля в эффективно одномерном резонаторе. Построена теория статистических свойств спектра генерации многомодового лазера бегущей волны с однородной шириной контура усиления. Найдены функции распределения фотонов по лазерным модам и временная зависимость флуктуаций фотонных чисел заполнения. Показано, что в отличие от одномодового лазера, в многомодовом лазере распределение фотонов в отдельных модах является бозе-эйнштейновским на всех этапах развития генерации. Распределение суммарного числа фотонов является гауссовым, причем дисперсия этого распределения убывает во времени по степенному закону ($\sim t^{-3/2}$), достигая при достаточно больших временах стационарного значения. Показано, что флуктуации в отдельных модах являются большими и долгоживущими, а спектр многомодового поля имеет сильно изрезанную структуру (что подтверждается экспериментальными исследованиями). Установлен теоретический (квантовый) порог чувствительности метода внутривибрационной лазерной спектроскопии.

4. Установлено, что кинетика флуктуации в спектре генерации многомодового поля в одномерном резонаторе стоячей волны существенно зависит от степени заполнения резонатора активной средой. Показано, что в случае тонкой активной среды статистические свойства многомодового лазера стоячей волны близки к описанным в п.3; в случае же, когда активная среда занимает

большую часть резонатора, флуктуации фотонов в отдельных модах подавляются. Предсказана возможность (экспериментально подтвердившаяся) и найдены условия возникновения в спектре генерации крупномасштабной модуляционной структуры, обусловленной пространственно-неоднородным распределением диссипативных элементов.

5. Исследован ряд вопросов кинетики электромагнитных процессов в эффективно двумерных системах и на границах раздела сред. Показано, что принцип симметрии кинетических коэффициентов устанавливает связь между параметрами феноменологического материального уравнения на границе гиротропной среды. Эти параметры оказываются выраженными через характеристики неограниченной среды, что устраняет неопределенность в постановке граничных условий. Найдены поправки к формулам Френеля, обусловленные наличием в материальном уравнении пространственных производных и показано, что эти поправки физически отличимы от поправок, которые могут быть вызваны наличием переходного слоя. Описаны процессы излучения и поглощения света колебательными модами тонких диэлектрических пленок на проводящей подложке: найдены и классифицированы кулоновские моды системы и исследовано их взаимодействие с поперечным полем, определен вклад каждой из мод в излучательную способность пленки и его зависимость от толщины пленки, угла и поляризации излучения. Выполненный анализ позволил интерпретировать и количественно описать результаты серии экспериментальных исследований.

6. Разработан теоретико-полевой подход к описанию кинетики некогерентного переноса (случайных блуждений) в неупорядоченной двумерной среде с дальними корреляциями беспорядка. С помощью ренормгруппового анализа показано, что даже слабый беспорядок существенно меняет макроскопические значения кинетических коэффициентов (диффузии, подвижности). Предсказана возможность суб- и супердиффузионного режимов переноса. Для системы с потенциальным беспорядком указаны физические причины ренорм-инвариантности эффективного заряда - параметра беспорядка (т.е. равенства нулю функции Гелл-Манна-Лоу) и установлена степенная зависимость кинетических коэффициентов от масштаба. Показано, как в общем случае ренормируется эффективная температура и модифицируется соотношение Эйнштейна.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Рупасов В.И., Юдсон В.И. К точной теории сверхизлучения Дике: бетеvские волновые функции в модели с дискретными атомами // ЖЭТФ. - 1984. - Т.86, № 3. - С.819-825.
2. Рупасов В.И., Юдсон В.И. Точная теория кооперативного спонтанного излучения сосредоточенной системы двухуровневых атомов: метод подстановки Бете // ЖЭТФ. - 1984. - Т.87, № 5. - С.1617-1630.
3. Юдсон В.И. К динамике интегрируемых квантовых систем // ЖЭТФ. - 1985. - Т.88, № 5. - С.1757-1770.
4. Yudson V.I. Dynamics of integrable one-dimensional system "photons + two-level atoms" // Phys. Lett. - 1988. - V.129A, №1. - P.17-20.
5. Yudson V.I. Density matrix and entropy of scattered light in the resonance fluorescence // Phys. Lett. - 1988. - V.129A, №7. - P.359-362.
6. Рупасов В.И., Юдсон В.И. Многочастичная задача рассеяния в интегрируемой квантовой модели Блоха-Максвелла // Препринт ИСАН СССР. - 1987. - № 26. - С.1-23.
7. Мироненко В.Р., Юдсон В.И. Квантовая статистика многомодовой генерации и шума в методе внутрирезонаторной лазерной спектроскопии // ЖЭТФ. - 1980. - Т.79, № 4. - С.1174-1191.
8. Мироненко В.Р., Юдсон В.И. Естественные шумы и изрезанность спектра генерации многомодового твердотельного лазера // Квант. электроника. - 1982. - Т.9, № 3. - С.483-488.
9. Mironenko V.R., Yudson V.I. Quantum noise in intracavity laser spectroscopy // Opt. Commun. - 1980. - V.34, №3. - P.397-403.
10. Мироненко В.Р., Юдсон В.И. Естественные флуктуации в многомодовом лазере столчей волны // Квант. электроника. - 1982. - Т.9, № 11. - С.2234-2243.
11. Mironenko V.R., Yudson V.I. Strong dependence of multimode laser generation on spatial localization of gain and losses // Opt. Commun. - 1982. - V.41, №2. - P.126-130.

12. Агранович В.М., Юдсон В.И. К вопросу о граничных условиях в средах с пространственной дисперсией. - Современные проблемы оптики и ядерной физики. - Киев: Наукова Думка, 1974. - С.78-89.
13. Agranovich V.M., Yudson V.I. Transition layer effects in gyrotropic and nongyrotropic media. - Opt. Commun. - 1972. - V.5. - P.422-424.
14. Agranovich V.M., Yudson V.I. On phenomenological electrodynamics of gyrotropic media // Opt. Commun. - 1973. - V.9. - P.58-60.
15. Виноградов Е.А., Жижин Г.Н., Юдсон В.И. Термостимулированное излучение поверхностных поляритонов // Поверхностные поляритоны / под ред. В.М.Аграновича, Д.Л.Миллса. - М.: Наука, 1985. - С.105-131.
16. Виноградов Е.А., Жижин Г.Н., Лескова Т.А., Мельник Н.Н., Юдсон В.И. Колебательные состояния тонких кристаллических пленок полярных полупроводников // ЖЭТФ. - 1980. - Т.78, № 3. - С.1030-1049.
17. Виноградов Е.А., Грачев В.Л., Грушевой Г.В., Жижин Г.Н., Юдсон В.И. Влияние проводимости металлической подложки на оптические свойства тонких диэлектрических пленок // ЖЭТФ. - 1978. - Т.75, № 5. - С.1919-1925.
18. Кравцов В.Е., Лернер И.В., Юдсон В.И. Классическая диффузия в средах со слабым беспорядком // ЖЭТФ. - 1986. - Т.91, № 2. - С.569-586.
19. Kravtsov V.E., Lerner I.V., Yudson V.I. Random walks in media with constrained disorder // J.Phys. - 1985. - V.A18. - P.L703-L707.
20. Kravtsov V.E., Lerner I.V., Yudson V.I. The Einstein relation and exact Gell-Mann-Low function for random walks in media with random drifts // Phys.Lett. - 1986. - V.119A, №5. - P.203-206.