

АКАДЕМИЯ НАУК СССР
СИБИРСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ

На правах рукописи
УДК 539.184

ШЕПЕЛЯНСКИЙ Дмитрий Львович
ТЕОРИЯ ДИФФУЗИОННОГО ФОТОЭФФЕКТА
В АТОМЕ ВОДОРОДА

01.04.02 - теоретическая и математическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

НОВОСИБИРСК — 1988

Работа выполнена в Институте ядерной физики Сибирского отделения Академии Наук СССР.

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

Дыхне Александр Михайлович — доктор физ.-мат. наук, член-корр. АН СССР, Филиал Института атомной энергии им. И.В. Курчатова, г. Троицк Московской обл.

Казанцев Александр Петрович — доктор физ.-мат. наук, Институт теоретической физики им. Л.Д. Ландау АН СССР, г. Черноголовка Московской обл.

Серебряков Василий Васильевич — доктор физ.-мат. наук, Институт математики СО АН СССР, г. Новосибирск

Ведущая организация: Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР, г. Москва

Защита диссертации состоится « 6 » декабря 1988 г. в « 10 » часов на заседании специализированного совета Д.002.24.01 при Институте ядерной физики СО АН СССР.

Адрес: 630090, г. Новосибирск, проспект академика Лаврентьева, 11.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИЯФ СО АН СССР

Автореферат разослан « 28 » октября 1988 г.

Ученый секретарь
специализированного Совета
доктор физ.-мат. наук

 В.С. Фадин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В последние годы большое количество работ посвящено созданию и исследованию свойств высоковозбужденных атомов. Поскольку у таких атомов внешний электрон сильно удален от ядра и относительно слабо взаимодействует с другими электронами, то свойства высоковозбужденных, или ридберговских, состояний любого атома во многих отношениях близки к свойствам атома водорода с большим главным квантовым числом. В этих состояниях радиационное время жизни достаточно велико, а благодаря большим дипольным матричным элементам атом эффективно взаимодействует даже со слабыми внешними полями. Эти свойства позволили создать высокочувствительный детектор инфракрасного и микроволнового излучения. Ридберговские атомы используются также для создания мазера, в метрологии и астрофизике, для разделения изотопов.

Создание перестраиваемых лазеров и развитие техники атомарных пучков позволило возбуждать атомы в состояния с заданными квантовыми числами. При этом в лабораторных экспериментах уже готовятся атомы с главным квантовым числом $n=500$. Однако, атомы с наибольшим n созданы не в лаборатории, а, как это ни неожиданно, просто существуют в межзвездной плазме. Так в астрономических наблюдениях было зарегистрировано самое высоковозбужденное состояние атома (углерода) с $n=732$. Такие наблюдения позволяют получать интересную информацию о характеристиках межзвездной плазмы.

Вследствие этого, значительный общефизический интерес представляет задача об ионизации высоковозбужденного атома в монохроматическом электромагнитном поле. Этот процесс представляет собой пример необычного фотоэффекта, в котором ионизация на частоте, много меньшей энергии ионизации ($\hbar\omega \ll I$),

идет гораздо быстрее однофотонной ($\hbar\omega > I$). Начало исследованиям в этой области положил эксперимент Байфильда и Коча (1974 г.), в котором наблюдалась сильная ионизация атома с главным квантовым числом $n \approx 66$ в линейно-поляризованном микроволновом поле с частотой $\omega/2\pi = 9.9$ ГГц. При этом величина поля ϵ была существенно меньше того значения при котором происходит ионизация в статическом поле $\epsilon_{st} = 0.13/n^4$, а для ионизации требовалось поглотить около 100 фотонов (используются атомные единицы).

Причина столь быстрой ионизации связана с возникновением динамического хаоса в соответствующей классической системе, в результате чего происходит диффузионное возбуждение и ионизация электрона. Сравнение данных численного моделирования классической динамики с результатами лабораторных экспериментов показало, что вероятность ионизации близка к своему классическому значению. Это привело ряд авторов к выводу о том, что за исключением мелких деталей процесс ионизации прекрасно описывается классической механикой, а квантовые эффекты несущественны.

На самом деле квантовые эффекты играют существенную роль. Причем, ввиду того, что ионизация происходит в результате возникновения динамического хаоса в классической системе, то вопрос об их влиянии при микроволновой ионизации атома оказывается связанным с фундаментальной проблемой квантового хаоса (динамикой квантовых систем стохастических в классическом пределе), которая в настоящее время привлекает к себе все большее внимание исследователей.

Цель работы состоит в исследовании процесса микроволновой ионизации высоковозбужденного атома, создании теории диффузионного фотоэффекта и анализе проявлений квантовых эффектов при диффузионном возбуждении в области динамического хаоса.

Научная новизна. Исследование простых моделей квантового хаоса позволило понять причину возникновения квантового ограничения диффузии, из-за которого в квантовой системе эффективно возбуждается, вообще говоря, конечное число уровней, в то время как в классической системе динамический хаос приводит к неограниченному диффузионному росту энергии. Установлена связь между числом возбужденных уровней и скоростью диффузии в классической системе.

Для ридберговского атома в монохроматическом поле найдена зависимость границы хаоса от частоты поля и квантовых чисел

начального состояния. В области классического хаоса для произвольной частоты $\omega l^3 > 1$ вычислена скорость диффузии по уровням и показано, что диффузионная ионизация идет значительно быстрее, чем однофотонная. Найдена зависимость функции распределения по уровням от времени.

Показано, что при микроволновой ионизации высоковозбужденного атома квантовые эффекты играют существенную роль при любых n и приводят, вообще говоря, к локализации диффузионного возбуждения и значительному уменьшению вероятности ионизации по сравнению с классическим значением. Получено выражение для длины локализации по энергии, найдено распределение вероятности по уровням и дана оценка для скорости ионизации в области локализации.

Для напряженности поля установлено существование границы делокализации, при превышении которой возбуждение в квантовой системе близко к классическому. Вместе с тем, показано, что даже в области делокализации квантовая динамика, в отличие от классической, является устойчивой.

Установлено, что введение второй несоразмерной частоты приводит к резкому увеличению длины локализации. Для трех частот с увеличением возмущения происходит переход от локализации к диффузионному возбуждению по энергии, аналогично тому, как в трехмерном твердом теле происходит переход Андерсона. Найдена граница делокализации для атома водорода в двухчастотном микроволновом поле.

Показано, что при взаимодействии атомов с самосогласованным полем в резонаторе хаос может иметь место при сколь угодно малой константе связи.

Практическая ценность. Анализ условий экспериментов Байфильда и Коча показал, что часть из них была выполнена при частоте поля много меньшей кеплеровской частоты ($\omega l^3 \ll 1$), когда процесс ионизации происходит при полях близких к статической границе ϵ_{st} , и не является диффузионным. Другая их часть, выполненная при частоте поля, сравнимой с кеплеровской частотой ($\omega l^3 = 0.5 \div 1.1$), находилась в области делокализации и поэтому в них наблюдалось согласно с численным моделированием классической динамики. Однако, дальнейшее увеличение квантового числа n или частоты приводит к попаданию в широкую область локализации и к резкому уменьшению вероятности ионизации. Указана область параметров, в которой можно наблюдать эффект квантовой локализации хаоса в лабораторных экспериментах. Проведение

ние экспериментов по наблюдению эффекта квантовой локализации хаоса при микроволновой ионизации ридберговских атомов планируется в группах Дж.Е. Байфильда (Питтсбург, США), П.М. Коча (Сони-Брук, США), Г. Вальтера (Мюнхен, ФРГ), И.М. Бетерова (Институт теплофизики СО АН СССР, Новосибирск).

Разработана методика численного моделирования классического и квантового процессов взаимодействия атома с микроволновым полем, которая позволяет проводить сравнение с лабораторными экспериментами.

Полученные результаты могут быть использованы при анализе условий локализации диффузионного возбуждения, возникающего в различных многоуровневых системах под действием монохроматического поля. Разрушение локализации может быть достигнуто путем введения дополнительных полей с несозмерными частотами.

Апробация диссертации. Результаты, полученные в диссертации, докладывались на совещаниях секции по фотопроцессам Совета по физике электронных и атомных столкновений АН СССР в Риге (1982г.) и в Ужгороде (1983г., 1984г., 1986г.), на Всесоюзных конференциях по теории атомов и атомных спектров в Тбилиси (1981г.) и в Минске (1983г.), на сессии Отделения общей физики и астрономии и Отделения ядерной физики АН СССР в Москве (1986г.), на Всесоюзной школе по нелинейным волнам в Горьком (1987г.), на Вавиловской конференции по нелинейной оптике в Новосибирске (1987г.), на Международной школе по когерентной оптике в Польше (Устронь, 1985г.), на Международной рабочей группе по нелинейным и турбулентным процессам в физике в Киеве (1987г.), на Советско-итальянском симпозиуме по статистической механике в Италии (Комо, 1987г.) и опубликованы в работах [1—20].

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения.

Во введении формулируются проблемы, рассматриваемые в диссертации, и кратко излагается содержание ее разделов.

В первой главе исследуется квантовая локализация хаоса в простых моделях. В § 1 описана модель квантового ротатора и обсуждаются основные режимы движения, наблюдавшиеся в численных экспериментах, для различных значений параметров.

Основной результат этих экспериментов состоит в том, что движение квантового ротатора при определенных условиях близко к хаотическому движению классической системы. Так, например, наблюдался рост энергии ротатора со временем с коэффициентом диффузии, близким к классическому. Вместе с тем, начиная с некоторого момента времени t^* , происходило уменьшение скорости диффузии и рост энергии почти полностью прекращался. Особенности квантовой динамики классически хаотической системы объясняются в § 2 на основе двух масштабов временной эволюции t_E и $t_D \sim t^*$. На первом и самом коротком из них, согласно теореме Эренфеста, волновой пакет движется по хаотической траектории и в течение времени t_E , пока он еще не расплылся, имеет место полное соответствие с классической динамикой. Однако, из-за экспоненциального разбегания траекторий в области хаоса этот масштаб времени оказывается очень коротким и растет лишь как логарифм некоторого характерного квазиклассического параметра q . Второй, значительно более длинный и потому более важный масштаб степенным образом увеличивается с q и определяет процессы диффузии и релаксации в квантовой динамике. Найдена зависимость масштаба t_D от параметров модели.

В § 3 для квантового ротатора построены операторные отображения. На основе анализа этих отображений показано, что квантовая динамика является устойчивой и поэтому КС-энтропия h , характеризующая неустойчивость, равна нулю (в классической системе $h > 0$). Вследствие этого в области развитого хаоса, когда мера островков устойчивости пренебрежимо мала, квантовые корреляции затухают не быстрее некоторой степени времени, в отличие от классических корреляций, затухавших со временем экспоненциально. Здесь же приведены простые физические соображения в пользу того, что во всех реальных системах с квантовым хаосом на больших временах отсутствует экспоненциальное убывание корреляций, а КС-энтропия равна нулю. Теоретические результаты § 3 подтверждаются численными данными приведенными в § 4. В этом же параграфе получена оценка для остаточного уровня корреляций. Кроме того, в нем показано, что устойчивость квантовой динамики приводит к ее обратимости во времени, даже если обращение сделано с небольшой неточностью. В этом квантовый случай кардинально отличается от классического, для которого уже ошибки округления в компьютере вызывают исчезновение обратимости в области хаоса.

В § 5 исследуется локализация собственных функций квазиэ-

нергии (СФКЭ). Явление локализации в некотором смысле аналогично локализации Андерсона в твердом теле. При этом номер невозмущенного уровня играет роль пространственной координаты (номер узла в решетке). Задача о нахождении длины локализации СФКЭ сведена к вычислению показателей Ляпунова (ПЛ) в некоторой вспомогательной классической гамильтоновой системе. На основе результатов § 2 получено, что длина локализации СФКЭ равна $l = D/2$, где D — классическая скорость диффузии. При помощи метода ПЛ это соотношение проверено для широкого диапазона параметров. Этот метод позволил также определить структуру СФКЭ на границе хаоса при критическом значении параметра и проверить оценку для длины локализации в этой области (§ 6). В § 7 обсуждается влияние флуктуаций СФКЭ на установившееся стационарное распределение вероятностей по уровням. Численно найдено, что эти флуктуации являются гауссовскими и характеризуются некоторой скоростью диффузии, влияющей на стационарное распределение.

Во второй главе описаны методы численного моделирования взаимодействия атома с микроволновым полем. Существенное продвижение в этом направлении было достигнуто благодаря специальной методике численных экспериментов и использованию современного суперкомпьютера CRAY, на котором был выполнен основной объем вычислений.

В § 8 рассмотрена динамика классических траекторий, показано, каким образом можно исключить особенность, возникающую при прохождении электрона вблизи ядра, и получены формулы, по которым строится распределение траекторий, соответствующее заданному квантовому состоянию. Методы моделирования квантовой динамики в невозмущенном базисе описаны в § 9. В § 10 получены уравнения для амплитуд вероятности в штурмовском базисе, который позволяет правильно учесть влияние непрерывного спектра. Здесь же приведены результаты различных проверок численных методов. Предложен простой метод вычисления гипергеометрической функции с большими значениями параметров.

В третьей главе рассмотрена микроволновая ионизация атома водорода в одномерном приближении. В линейно-поляризованном поле такое приближение справедливо для состояний электрона, вытянутых вдоль поля, когда одно параболическое квантовое число много больше другого, а магнитное квантовое число $m=0$. В этом случае атом можно считать одномерным, что значительно облегчает численное моделирование. Несмотря на существенное

упрощение, одномерная модель содержит в себе основные физические эффекты и позволяет понять картину ионизации в двумерной и трехмерной моделях, которые могут быть эффективно сведены к одномерной и для других состояний.

В § 11 на основе критерия перекрытия резонансов для классического одномерного атома найдена граница хаоса

$$\epsilon > \epsilon_{cr} = \frac{1}{49n^5\omega^{1/3}} \quad (\omega n^3 > 1).$$

Получено простое отображение Кеплера для изменения энергии электрона за один оборот вокруг ядра и показано, что локально оно сводится к стандартному отображению. Определена область применимости отображения Кеплера и путем численного решения точных уравнений движения продемонстрировано, что в этой области оно действительно хорошо описывает динамику электрона. В § 12 вычислена скорость диффузии электрона по энергии и дана оценка времени диффузионной ионизации. Из решения уравнения Фоккера — Планка — Колмогорова (ФПК) найдена аналитическая зависимость функции распределения по уровням от времени.

В § 13 на основе результатов главы I найдена длина локализации возбуждения в системе с заданной плотностью уровней под действием монохроматического поля с известным однофотонным матричным элементом. Такая система близка к многозонной модели возбуждения молекулы в лазерном поле. Результаты, полученные для такой системы, применяются затем для анализа возбуждения в одномерной квантовой модели атома водорода. Показано, что квантовые эффекты приводят к локализации диффузии. Эта экспоненциальная локализация однородна по энергии, а ее длина, выраженная в числе фотонов, равна $l_\phi = 3.33\epsilon^2/\omega^{10/3}$. Вследствие этого вероятность возбуждения в квантовой системе может быть намного меньше, чем в классической. В § 14 получено простое квантовое отображение Кеплера, которое приближенно описывает цепочку эквидистантных (по энергии) однофотонных пиков, возникающих в процессе возбуждения. Приводятся данные численных экспериментов, которые позволили провести проверку теории в широком диапазоне параметров. Так, например, мощность микроволнового поля менялась на 10 порядков.

В § 15 получено выражение для границы делокализации $\epsilon > \epsilon_{qu} = \omega^{7/6}/n \sqrt{6.6}$, выше которой процесс ионизации близок к классическому. В § 16 найдена зависимость вероятности ионизации от параметров и показано, что диффузионная скорость ионизации

намного превышает однофотонную $\Gamma_D/\Gamma_\Phi \sim n^{4/3} \gg 1$. Режим квантового возбуждения в области делокализации рассмотрен в § 17. Показано, что распределение по уровням близко к классическому и согласуется с решением уравнения ФПК. Тем не менее из-за устойчивости квантовой динамики эта диффузия, в отличие от классической, оказывается обратимой и при немного неточном обращении времени. Исследования, проведенные в § 18, показали, что при $\epsilon \ll 5\omega^{4/3}$ энергии ионизованных электронов определяются отображением Кеплера и приблизительно равномерно распределены в интервале от 0 до $2.6\epsilon/\omega^{2/3}$. При $\epsilon \gg 5\omega^{4/3}$ процесс ионизации атома может быть описан в рамках другой модели, которая объясняет появление в распределении резкого пика вблизи энергии $\frac{1}{2} \left(\frac{\epsilon}{\omega} \right)^2$.

Если энергия атомов, взаимодействующих с микроволновым полем в резонаторе, становится сравнимой с энергией поля, то последнее должно рассматриваться самосогласованным образом. В качестве примера рассмотрено взаимодействие трехуровневых атомов с двумя модами классического электромагнитного поля (§ 19). При этом считается, что дипольные переходы возможны между всеми тремя уровнями. Такая ситуация реализуется, например, для трех уровней одномерной модели атома. Показано, что при точном резонансе с частотами поля динамика является хаотической при сколь угодно малой плотности атомов. В случае малой отстройки от резонанса найдено критическое значение плотности, при которой возникает хаос.

В четвертой главе исследуется влияние трехмерности атома на процесс ионизации. Показано, что резкое увеличение числа возбужденных состояний не разрушает локализацию, описание которой может быть проведено в рамках эффективной одномерной модели атома. Причина этого связана с медленностью движения вдоль невозмущенной энергетической поверхности, обусловленной кулоновским вырождением.

В § 20 установлено, что хаотическое возбуждение имеет место только для состояний с орбитальным моментом $l \leq \left(\frac{2}{\omega} \right)^{1/3}$. В этой области для двумерных классических траекторий в линейно-поляризованном поле получено отображение за один оборот электрона вокруг ядра. Его анализ позволил установить существование нового приближенного интеграла движения. При этом происходит рас-

цепление движений поперек и вдоль энергетической поверхности. Последнее происходит в новом «хаотическом» времени, зависящем от поперечного движения. Найден закон, по которому происходит расплывание внутри оболочки. В § 21 получено выражение для длины локализации в двумерном случае и показано, что она слабо отличается от одномерной. Таким образом, хотя в процессе возбуждения вся оболочка оказывается заполненной, это не сказывается на локализации по энергии. Вследствие этого граница делокализации определяется оценкой, близкой к одномерной. Эта граница, однако, существенно понижается при введении достаточно сильного постоянного электрического поля снимающего вырождение: $\epsilon > \omega^{5/3} \sqrt{n/6n_2}$, где n_2 — параболическое квантовое число в начальном состоянии, $n_2 < n/2$. Существенную роль при исследовании двумерной динамики сыграли численные эксперименты, которые помогли создать правильную теорию. Для эллиптически-поляризованного поля магнитное квантовое число перестает быть интегралом движения, однако, и в этом случае из-за вырождения существует приближенный интеграл и локализация оказывается эффективно одномерной (§ 22).

В § 23 обсуждаются результаты имеющихся к настоящему времени экспериментов по микроволновой ионизации высоковозбужденных атомов. Показано, что эксперименты попадающие в область диффузионной ионизации ($\omega n^3 \gg 1$), одновременно попадали в область делокализации, и поэтому в них наблюдалось согласие с численным моделированием классической динамики. Указаны условия, при которых можно экспериментально наблюдать эффект квантовой локализации хаоса. Дано сравнение границы хаоса, границы делокализации и квантовой границы устойчивости между собой и определены области параметров, где каждая из них является доминирующей. В этом же параграфе обсуждается влияние конечного времени жизни атома, тепловое излучение и квантованность поля на локализацию и показано, что их влияние оказывается малым.

В § 24 проведен анализ взаимодействия высоковозбужденного атома с полем, частота которого много меньше кеплеровской ($\omega \ll n^{-3}$). Показано, что из-за кулоновского вырождения классическое движение электрона становится хаотическим при достаточно низкой частоте ($\epsilon \gg (\omega n^3)^{1/5}/2n^4$). При этом, однако, скорость диффузии по энергии экспоненциально мала.

В пятой главе исследуется локализация хаоса в том случае,

когда возмущение содержит две или три частоты. Показано, что в двухчастотном случае длина локализации экспоненциально растет с квазиклассическим параметром. При наличии трех частот все определяется квантовой границей устойчивости. При малом внешнем поле применима квантовая теория возмущений и имеет место локализация. С увеличением поля, когда параметр теории возмущений становится порядка единицы, в системе возникает неограниченная диффузия. Обсуждается связь этих эффектов с двумерной и трехмерной локализацией Андерсона и рассмотрено их проявление при ионизации высоковозбужденного атома.

Вначале исследуется возбуждение квантового ротатора в двухчастотном поле (§ 25). Согласно данным численных экспериментов диффузионный масштаб t_D растет экспоненциально с увеличением параметра квазиклассичности. Получена оценка для t_D . Численное исследование локализации в двумерной модели Ллойда с помощью метода ПЛ (§ 26) показало, что в согласии с теорией слабой локализации длина локализации экспоненциально растет со скоростью диффузии. В этом же параграфе численно найден спектр ПЛ для двумерной и трехмерной моделей Андерсона. Для трехмерной модели при большом возмущении спектр является линейным, что согласуется с результатами, полученными в теории твердого тела. В § 27 представлены результаты численных экспериментов для модели одномерного ротатора с тремя несоразмерными частотами. Показано, что в ней при превышении квантовой границы устойчивости происходит переход от локализации к неограниченной диффузии и исследована область вблизи окрестности перехода. Этот переход характеризуется критическим индексом, который согласуется с предсказанием теории ренормгруппы.

Результаты, полученные для простых моделей, применяются затем к микроволновой ионизации атома водорода в двухчастотном поле (§ 28). Найдена область параметров, в которой вероятность ионизации намного превышает вероятность в одночастотном случае при одинаковой мощности поля: $\frac{\omega^{5/3}}{2} \ll \varepsilon \ll \frac{\omega^{7/6}}{3n}$ (здесь считается, что напряженности полей и их частоты одного порядка). В § 29 найдены условия, при которых одномерная локализация будет иметь место в многомерных системах.

В заключении сформулированы основные результаты, полученные в диссертации:

1. Построена теория диффузионного фотоэффекта, объясняющая основные физические особенности ионизации высоковозбуж-

денного атома водорода в монохроматическом электромагнитном поле. Показано, что этот процесс представляет пример необычного фотоэффекта, в котором ионизация на частоте, много меньшей энергии ионизации ($\hbar\omega \ll I$), идет гораздо быстрее однофотонной ($\hbar\omega > I$). Найден интервал частот и полей, в котором имеет место диффузионный фотоэффект.

2. Детально объяснен механизм столь быстрой ионизации, связанный с возникновением хаоса в классической системе. Найдена зависимость критической напряженности поля, при которой возникает хаос, от орбитального момента, поляризации и частоты. Для того, чтобы процесс ионизации являлся диффузионным, последняя должна быть больше кеплеровской частоты или сравнима с ней ($\omega n^3 > 1$).

3. В области классического хаоса вычислена скорость диффузии по уровням и найдена зависимость функции распределения от времени.

4. Показано, что при любом номере уровня $n \gg 1$ квантовые эффекты играют, вообще говоря, существенную роль и приводят к локализации диффузионного возбуждения и значительному уменьшению вероятности ионизации по сравнению с классической. Найдена зависимость длины локализации от напряженности и частоты микроволнового поля.

5. Установлено, что локализация является экспоненциальной и однородной по числу поглощенных фотонов. При этом распределение вероятности по уровням имеет вид эквидистантных по энергии пиков. Их амплитуды удовлетворительно описываются квантовым отображением Кеплера. Дана оценка для скорости ионизации в области локализации.

6. Найдено значение напряженности поля, определяющее границу делокализации, выше которой процесс возбуждения близок к классическому.

7. Методом обращения времени показано, что даже в области делокализации квантовая динамика является устойчивой и этим она качественно отличается от классической.

8. Для трехмерного атома получено отображение Кеплера, описывающее динамику электрона за один оборот вокруг ядра. На его основе найден приближенный интеграл движения и установлен закон возбуждения внутри оболочки с заданным главным квантовым числом. Показано, что эта динамика близка к классической и не влияет на локализацию по энергии. Найдена зависимость длины локализации от значения приближенного интеграла.

9. Для атома в двухчастотном микроволновом поле найдена граница делокализации и установлено, что она резко понижается по сравнению с одночастотным случаем. Определена область параметров, в которой двухчастотное поле приводит к значительно более сильному возбуждению, чем одночастотное с той же мощностью излучения.

10. Указаны условия, при которых эффект локализации диффузии может наблюдаться в лабораторных экспериментах.

11. Разработана методика численных экспериментов, которая позволяет моделировать классическую и квантовую динамику и проводить сравнение с лабораторными экспериментами.

12. Для одномерной квантовой системы в поле периодического по времени возмущения показано, что в области хаоса с однородной диффузией длина локализации собственных функций квазиэнергии равна $l=D/2$, где D —скорость классической диффузии, измеряемая в числе уровней возбужденных за один период поля.

13. Установлено, что при возбуждении такой системы в двухчастотном поле длина локализации растет экспоненциально со скоростью диффузии.

14. Для трехчастотного возмущения показано, что при превышении квантовой границы устойчивости происходит переход от локализованных состояний к неограниченной диффузии. Окрестность перехода характеризуется критическим индексом, значение которого близко к величине предсказываемой теорией ренормгруппы для перехода Андерсона в трехмерном твердом теле.

15. Исследовано взаимодействие трехуровневых атомов с двумя модами классического самосогласованного электромагнитного поля в резонаторе. Рассмотрен случай, когда дипольные переходы возможны между всеми тремя уровнями. Показано, что при точном резонансе с частотами поля динамика является хаотической при сколь угодно малой плотности атомов. Найдена зависимость критической плотности от резонансной отстройки.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. *Шепелянский Д.Л.* Квазиклассическое приближение для стохастических квантовых систем. — ДАН СССР, 1981, т.256, № 3, с.586—590.
2. *Шепелянский Д.Л.* О динамической стохастичности в нелинейных квантовых системах. — ТМФ, 1981, т.49, № 1, с.117—121.

3. *Chirikov B.V., Izrailev F.M., Shepelyansky D.L.* Dynamical Stochasticity in Classical and Quantum Mechanics. — Sov. Scient. Rev., 1981, v.2C, p.209—267.
4. *Шепелянский Д.Л.* Стохастизация высоковозбужденного атома в поле низкочастотной электромагнитной волны. — Оптика и спектроскопия, 1982, т.52, № 6, с.1102—1105.
5. *Shepelyansky D.L.* Some Statistical Properties of Simple Classically Stochastic Quantum Systems. — Physica D, 1983, v.8, N 2, p.208—222.
6. *Делоне Н.Б., Крайнов В.П., Шепелянский Д.Л.* Высоковозбужденный атом в электромагнитном поле. — УФН, 1983, т.140, № 3, с.355—392.
7. *Делоне Н.Б., Крайнов В.П., Шепелянский Д.Л.* Нелинейная ионизация высоковозбужденных атомов. — Изв. АН СССР, сер. физ., 1983, т.47, № 8, с.1565—1572.
8. *Шепелянский Д.Л.* Квантовое ограничение диффузии при возбуждении ридберговского атома в переменном поле. — Новосибирск, 1983, 36 с. — (Препринт/Институт ядерной физики СО АН СССР, 83-61); — Proc. Int. Conf. on Quantum Chaos 1983, Plenum Press, 1985, p.187—204.
9. *Casati G., Chirikov B.V., Shepelyansky D.L.* Quantum Limitations for Chaotic Excitation of the Hydrogen Atom in a Monochromatic Field. — Phys. Rev. Lett., 1984, v.53, N 27, p.2525—2528.
10. *Чуриков Б.В., Шепелянский Д.Л.* Локализация динамического хаоса в квантовых системах. — Радиофизика, 1986, т.29, № 9, с.1041—1049.
11. *Shepelyansky D.L.* Localization of Quasienergy Eigenfunctions in Action Space. — Phys. Rev. Lett., 1986, v.56, N 7, p.677—680.
12. *Casati G., Chirikov B.V., Guarneri I., Shepelyansky D.L.* Dynamical Stability of Quantum «Chaotic» Motion in Hydrogen Atom. — Phys. Rev. Lett., 1986, v.56, N 23, p.2437—2440.
13. *Casati G., Chirikov B.V., Guarneri I., Shepelyansky D.L.* New Photoelectric Ionization Peak in the Hydrogen Atom. — Phys. Rev. Lett., 1986, v.57, N 7, p.823—826.
14. *Shepelyansky D.L.* Chaos and Interaction of Atoms with Self-Consistent Fields in the Case of Small Coupling Constants. — Phys. Rev. Lett., 1986, v.57, N 15, p.1815—1818.
15. *Израйлев Ф.М., Чуриков Б.В., Шепелянский Д.Л.* Квантовый хаос: локализация и эргодичность. — Новосибирск, 1986, 40 с. — (Препринт/Институт ядерной физики СО АН СССР,

86-166).

16. *Casati G., Chirikov B.V., Guarneri I., Shepelyansky D.L.* Relevance of Classical Chaos in Quantum Mechanics: the Hydrogen Atom in a Monochromatic Field.—*Phys. Rep.*, 1987, v.154, N 2, p.77—123.
17. *Шепелянский Д.Л.* Квантовый хаос: диффузионный фотоэффект в атоме водорода.—*УФН*, 1987, т.152, № 1, с.168—171.
18. *Shepelyansky D.L.* Localization of Diffusive Excitation in Multi-Level Systems.—*Physica D*, 1987, v.28, N 1&2, p.103—114.
19. *Casati G., Guarneri I., Shepelyansky D.L.* Exponential Photonic Localization for the Hydrogen Atom in a Monochromatic Field.—*Phys. Rev. A*, 1987, v.36, N 5, p.3501—3504.
20. *Casati G., Chirikov B.V., Guarneri I., Shepelyansky D.L.* Localization of Diffusive Excitation in the Two-Dimensional Hydrogen Atom in a Monochromatic Field.—*Phys. Rev. Lett.*, 1987, v.59, N 26, p.2927—2930.

Подписано в печать 31.05 88 г. МН 08361
Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 1,7 печ.л., 1,4 уч.-изд.л.
Тираж 100 экз. Бесплатно. Заказ № 78

*Набрано в автоматизированной системе на базе фото-
наборного автомата ФА1000 и ЭВМ «Электроника» и
отпечатано на роталпринте Института ядерной физики
СО АН СССР,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.*