

На правах рукописи

Буренков Иван Александрович

**Интерференционные эффекты в задачах о взаимодействии
электронных волновых пакетов и атомных систем с
сильными классическими и неклассическими световыми
полями**

Специальность: 01.04.08 – Физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2011

Работа выполнена на *Кафедре атомной физики, физики плазмы и микроэлектроники Физического факультета Московского государственного университета имени М. В. Ломоносова.*

Научный руководитель: *доктор физико-математических наук,
профессор
Тихонова Ольга Владимировна*

Официальные оппоненты: *доктор физико-математических наук
профессор
Гореславский Сергей Павлович
(Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»)
доктор физико-математических наук
профессор
Кулик Сергей Павлович
(Московский государственный университет имени М.
В. Ломоносова)*

Ведущая организация: *Московский физико-технический институт (государственный университет)*

Защита состоится 15 февраля 2012 года в 15 часов 00 минут на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций *Д.501.001.45* при *Московском государственном университете имени М. В. Ломоносова* по адресу: *119991, Россия, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 5 (19-й корпус, НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова), аудитория 2-15.*

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке *НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына МГУ имени М. В. Ломоносова.*

Автореферат разослан 15 декабря 2011 года.

Ученый секретарь

совета по защите докторских и кандидатских диссертаций *Д.501.001.45*,
кандидат физико-математических наук

Возник О. М.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Одно из актуальных направлений современной лазерной физики - генерация мощных ультракоротких лазерных импульсов и их взаимодействие с атомными и наноструктурными системами. Быстрый прогресс в развитии источников мощного лазерного излучения привел к возможности генерации интенсивных лазерных импульсов предельно короткой длительности в несколько периодов оптического поля [1]. Такие импульсы могут быть использованы для наблюдения и контроля динамики атомно-молекулярных квантовых систем и различных физических процессов с высоким временным и пространственным разрешением [2, 3, 4]. Одно из возможных направлений получения в реальном времени информации о структуре и динамике ядерной подсистемы в молекулах заключается в наблюдении картин дифракции, возникающих при ионизации молекулы интенсивным ультракоротким лазерным импульсом и проявляющихся в импульсных распределениях электронов в континууме [5], в электронных энергетических спектрах надпороговой ионизации [6], а также в спектре генерации гармоник высокого порядка [7, 8]. Таким образом, одним из интересных применений таких импульсов является их использование для исследования и контроля динамики различных квантовых систем и физических процессов с предельно высоким пространственным и временным разрешением.

Еще одной актуальной проблемой физики взаимодействия сверхсильных лазерных полей с атомно-молекулярными системами является задача о вынужденном поглощении и испускании свободным электроном квантов лазерного поля в процессе рассеяния на потенциальном центре. Впервые это явление, получившее название вынужденного тормозного эффекта (ВТЭ), было рассмотрено в работе [9], где была построена аналитическая теория, описывающая процесс поглощения и испускания квантов внешнего монохроматического поля электроном в приближении плоской волны при его рассеянии на потенциальном центре. В настоящее время, в условиях быстрого развития экспериментальных возможностей, воздействующее на вещество лазерное излучение может характеризоваться сверхатомной интенсивностью и ультракороткой длительностью вплоть до нескольких оптических периодов. Взаимодействие с такими мощными ультракороткими лазерными импульсами приводит к специфике и новым свойствам уже известных процессов и явлений. В частности, при взаимодействии ультракороткого импульса с наноструктурами и кластерами обнаружен интенсивный нагрев плазмы, образованной в процессе ионизации. Одним из возможных механизмов, объясняющих такой нагрев электронов в кластерах, является вынужденный тормозной эффект, однако, в рамках традиционного понимания ВТЭ трудно объяснить появление электронов таких высоких энергий [10]. Необходимо учиты-

вать особенности ВТЭ, обусловленные ультракороткой длительностью лазерного воздействия. При этом, обмен энергией электрона с полем имеет место в течение ультракороткого интервала времени, определяемого длительностью лазерного импульса. Кроме того, электроны, возникающие в континууме в процессе ионизации атомов кластера интенсивным ультракоротким лазерным импульсом, характеризуются широкими в импульсном представлении волновыми пакетами, качественно отличными от плоской волны. Поэтому проблема взаимодействия мощных ультракоротких импульсов с различными квантовыми системами является крайне актуальной на сегодняшний день.

Еще одним интересным направлением исследований является ВТЭ в случае квантованного электромагнитного поля. В конце прошлого столетия появилась возможность экспериментального создания существенно неклассических состояний электромагнитного поля, таких как «сжатые» состояния [11]. Обнаружено существенное отличие в протекании различных физических процессов в таких полях по сравнению со случаем классического света [12, 13]. В последнее время в экспериментальных работах представлено большое число результатов по успешной генерации интенсивных неклассических световых полей, которые качественно отличаются от классического или когерентного состояния поля [14, 15]. Наибольший интерес представляют «когерентно-сжатые» состояния поля [16] и особенно состояния «сжатого вакуума» [11, 17, 18]. В таких состояниях поля ожидается значительное увеличение эффективности многофотонных процессов по сравнению с другими типами полевых состояний. Именно поэтому вынужденный тормозной эффект в неклассических полях может привести к новым эффектам и важен для различных практических применений.

В последнее время все больший интерес представляют многочастичные задачи, описывающие системы кубитов, управляемые внешними полями [19]. При этом одной из возможных перспектив является использование в качестве кубитов ридберговских атомов. Обычно связь атомов в задачах квантовой оптики осуществляется посредством общего резервуара (микрорезонатора, ловушки), а когерентный контроль системы производится за счет взаимодействия с внешним лазерным импульсом [20]. Однако, более широкие возможности возникают в случае дальнедействующего взаимодействия атомов друг с другом, что легко обеспечить для высоко возбужденных ридберговских состояний [21]. При этом использование внешнего управляющего поля может привести к значительной ионизации атомной системы. Одним из наиболее перспективных решений этой проблемы является использование сильного поля, реализующего режим подавления ионизации ридберговских атомов по интерференционному механизму [22, 23].

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является теоретическое исследование взаимодействия сверх-интенсивных ультракоротких лазерных импульсов и неклассических световых полей с атомно-молекулярными и наноструктурными системами и анализ особенностей обмена энергией между полевой и электронной подсистемами, обусловленных широким распределением электронов по энергии и возникающими в следствие этого квантовым интерференционным эффектами.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Решена задача об упругом рассеянии широкого в импульсном представлении электронного волнового пакета на родительском двухцентровом молекулярном остове при произвольной его ориентации. В первом борновском приближении по потенциальной энергии получено аналитическое выражение для дифференциального сечения рассеяния.
2. Рассмотрен вынужденный тормозной эффект и исследованы процессы вынужденного поглощения и испускания квантов поля электронным волновым пакетом при его рассеянии на родительском ионе в поле интенсивного лазерного импульса, в том числе, ультракороткой длительности. Проведено исследование возможности эффективного нагрева электронов в таких полях в плазме и наноструктурах типа атомных кластеров.
3. В первом борновском приближении решена задача о рассеянии электронов на короткодействующем и кулоновском потенциалах в присутствии интенсивного неклассического света, получены аналитические выражения позволяющие вычислить спектр поглощения и испускания квантов такого поля электроном даже в случае взаимодействия с очень большим числом полевых состояний, например, если поле находится в состоянии «сжатого вакуума» .
4. Рассмотрен многоквантовый эффект Маркуза в случае квантованных полей и исследованы возможности усиления поля или эффективного нагрева электронов внешним неклассическим полем по сравнению с классическим светом.
5. Решена задача о динамике двух взаимодействующих друг с другом ридберговских атомов в сильном лазерном поле и проанализирована возможность лазерного управления связанными атомными кубитами, а также создания и экспериментального наблюдения перепутанных состояний такой системы.

Научная новизна

- В представленной работе впервые рассмотрены интерференционные эффекты, возникающие при рассеянии широкого в импульсном представлении электронного волнового пакета на потенциальном центре в отсутствие и в присутствии сильного лазерного поля и

обнаружено формирование качественно новых угловых и энергетических распределений рассеянного электрона, обусловленных квантовой интерференцией.

- На основе проведенных исследований впервые объяснена физическая природа «аномалий» в угловых диаграммах вылета электрона, обнаруженных в лабораторных экспериментах и прямых численных расчетах по ионизации атомных и молекулярных систем ультракороткими лазерными импульсами.
- Впервые в рамках аналитической теории продемонстрировано, что возникающие при рассеянии широкого в импульсном представлении электронного волнового пакета интерференционные эффекты приводят к значительному изменению конечной картины рассеяния, и содержат информацию не только о ядерной подсистеме молекулы, но и о начальном электронном волновом пакете.
- Обнаружено существенное увеличение эффективности нагрева электронов в наноструктурах и кластерах в процессе вынужденного поглощения в поле интенсивного лазерного импульса, обусловленное широким импульсным распределением электронного волнового пакета, а также предложены методы контроля энергетического спектра электронов в процессе рассеяния в поле ультракороткого лазерного импульса.
- Впервые показана возможность эффективного поглощения квантов поля в случае рассеяния вперед в условиях «быстрого» многократного рассеяния широкого в импульсном представлении электронного волнового пакета на потенциальном центре.
- Впервые продемонстрировано увеличение выхода электронов с большими энергиями в процессе вынужденного тормозного эффекта в случае «сжатых» неклассических полей по сравнению с классическим светом.
- Впервые получено аналитическое обобщение эффекта Маркуза на случай квантованных полей и многофотонного поглощения и продемонстрирована возможность усиления поля независимо от ориентации начального импульса электрона в случае малого числа квантов в системе.
- Впервые обнаружен эффект интерференционного подавления ионизации в сильном лазерном поле атомных двухкубитных состояний с сильной связью и предложены методы создания перепутанных состояний в системе.

Практическая значимость

Полученные результаты имеют фундаментальную научную значимость с точки зрения выявления новых эффектов, которые впервые позволили объяснить результаты численных и физических экспериментов и выявить новые возможные подходы к описанию процессов взаимодействия атомно-молекулярных систем с интенсивными ультракороткими лазерными импульсами. Полученные результаты имеют принципиальную важность для осуществления лазерного контроля и управления динамикой молекулярных систем с фемтосекундным временным и субангстремным пространственным разрешением. Кроме того, представленные в диссертации результаты позволили объяснить возникновение электронов высоких энергий при ионизации наноструктур интенсивными лазерными импульсами. Обнаруженный эффективный нагрев кластеров и наномишеней сильным полем представляет большой интерес для проблемы управляемого термоядерного синтеза и ряда других практических приложений. Еще одним из методов увеличения эффективности обмена энергией между электронной подсистемой и полем, предложенных в диссертации, является использование неклассических «сжатых» световых полей. Также в диссертации предложены практические методы создания и экспериментального наблюдения перепутанных состояний в связанных многочастичных системах.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения

1. Обнаружение и аналитическое описание интерференционных эффектов, возникающих при рассеянии широкого в импульсном представлении электронного волнового пакета на родительском ионе и приводящих к качественно новым угловым распределениям электронов после рассеяния.
2. Объяснение «аномалий», обнаруженных в угловых диаграммах вылета электронов в лабораторных экспериментах и прямых численных расчетах по ионизации атомов и молекул ультракороткими лазерными импульсами.
3. Аналитическое выражение, описывающее сечение рассеяния электронного волнового пакета на молекулярном или атомном родительском ионе в условиях квантовой интерференции, позволяющее получить информацию как о параметрах ядерной подсистемы молекулы, так и о свойствах электронного волнового пакета, что открывает возможность лазерного контроля динамики молекулярных систем с фемтосекундным временным разрешением.
4. Аналитическая теория вынужденного тормозного эффекта в интенсивных ультракоротких лазерных импульсах, когда рассеивающийся на потенциальном центре электрон характеризуется широким импульсным распределением, в том числе существенно превыша-

ющим энергию кванта поля.

5. Методы управления энергетическим спектром и эффективным нагревом электронов в кластере при взаимодействии с ультракоротким лазерным импульсом, обусловленные интерференцией различных каналов многофотонного вынужденного тормозного испускания и поглощения.
6. Существенное увеличение возможных значений энергии приобретаемой электроном в случае вынужденного тормозного эффекта в неклассических «сжатых» световых полях.
7. Аналитическое обобщение эффекта Маркуза на случай многофотонного поглощения и испускания в квантованных полях и возникающие в этих условиях особенности обмена энергией между электроном и полем.
8. Обнаружение режима интерференционной стабилизации при ионизации связанных атомных кубитов в сильном лазерном поле.
9. Методы создания перепутанных состояний в системе двух взаимодействующих атомов в сильном поле.

Апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на научных семинарах отдела микроэлектроники НИИЯФ МГУ, семинара по физике многофотонных процессов ИОФ РАН (руководитель – проф. М.В.Федоров). Основные положения и результаты диссертации были представлены на 15 международных конференциях и симпозиумах:

1. XIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов» Москва (11-14.04.2007).
2. International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, Minsk, (31.05-04.06.2007)
3. International Workshop “Attosecond Physics”, Dresden Germany, (1-5.08.2007)
4. Symposium “Novel light sources and applications”, Obergurgl, Austria, (3-9.02.2008)
5. 17th International Laser Physics Workshop (LPHYS’08), Norway, Trondheim, (30.06-04.07.2008)
6. 15th GSI Student Program, Germany, Darmstadt, (07.08-28.09.2008)
7. 11th International Conference on Multiphoton Processes, Germany, Heidelberg, (18-23.09.2008)
8. 16-th central European Workshop of Quantum Optics, Turku, Finland, (23-27.05.2009)

9. 18th International Laser Physics Workshop, Barcelona, (13-17.07.2009)
10. XXIV International Conference of Physics Students, Split, Croatia, (10-18.08.2009)
11. 17-th Central European Workshop on Quantum Optics, (CEWQO-2010), St. Andrews, Scotland, (6-11.06.2010)
12. 19th International Laser Physics Workshop, Foz do Iguaçu, Brazil, (5-9.07.2010)
13. XXV International Conference of Physics Students, Graz, Austria, (17-23.08.2010)
14. International Conference on Foundations of Probability and Physics-6, (FPP-6), Linnaeus University, Vaxjo, Sweden, (13-16.06.2011)
15. 20th International Laser Physics Workshop, Sarajevo, (11-15.07.2011)

Публикации

По материалам диссертации опубликовано 26 печатных работ, в том числе 8 статей в рецензируемых российских и зарубежных журналах [A1, A2, A3, A4, A5, A6, A7, A8] и 18 тезисов международных конференций [A9, A10, A11, A12, A13, A14, A15, A16, A17, A18, A19, A20, A21, A22, A23, A24, A25, A26].

Личный вклад автора

Личный вклад автора в работы, вошедшие в диссертацию, является определяющим при разработке теоретических моделей, аналитического и численного анализа, реализации численного решения и интерпретации полученных результатов.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из пяти глав. **Глава 1** содержит обзор литературы, посвященной задачам, которые рассматриваются в диссертации. В **главе 2** решается задача о перерасеянии широкого в импульсном представлении электронного волнового пакета на родительском молекулярном ионе в отсутствие лазерного опля и исследуется возникающая интерференция в угловых распределениях электрона, содержащая информацию как о ядерной подсистеме молекулы, так и об электронном волновом пакете. В **главе 3** получено решение задачи о рассеянии электронных волновых пакетов на потенциальном центре в присутствии классического лазерного поля, в том числе ультракороткой длительности, и обнаружен эффективный нагрев электронов, обусловленный интерференцией различных каналов вынужденного тормозного поглощения и испускания, играющий важную роль в процессе ионизации кластеров и наноструктур ультракороткими лазерными импульсами. **Глава 4** посвящена обобщению вынужденного тормозного эффекта и эффекта Маркуза на случай взаимодействия с неклассическими состояниями

электромагнитного поля, причем наибольший интерес представляет случай взаимодействия с состоянием «сжатого вакуума». В этом случае также обнаружено увеличение числа высокоэнергичных электронов за счет эффективного обмена энергией между электронной и полевой подсистемами. Кроме того продемонстрирована возможность усиления поля независимо от ориентации начального импульса электрона, то есть даже в системах типа плазмы, когда импульсы электронов описываются некоторой функцией распределения. В **главе 5** решена задача о динамике двух взаимодействующих друг с другом ридберговских атомов в сильном лазерном поле, обнаружен режим интерференционного подавления ионизации в такой системе, а также проанализирована возможность лазерного управления такими связанными атомными кубитами, создания и экспериментального наблюдения перепутанных состояний в такой системе. Основные результаты работы представлены в **Заключении**.

Содержание работы

Во Введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

Первая глава состоит из четырех разделов, в которых приведен обзор литературы по направлениям исследований, проведенных в настоящей диссертационной работе, представлено актуальное состояние развитых на данный момент моделей и методов теоретического описания взаимодействия атомно-молекулярных и наноструктурных систем с сильными внешними электромагнитными полями и сформулирован ряд проблем, требующих дальнейшего исследования.

Во второй главе рассмотрен процесс рассеяния широкого в импульсном представлении электронного волнового пакета на родительском молекулярном или атомном ионе. Такая задача возникает при рассмотрении процесса ионизации в сильных полях ультракороткой длительности. В случае когда напряженность поля в лазерном импульсе близка к внутриатомной в результате ионизации в континууме формируется электронный волновой пакет имеющий пространственную локализацию сравнимую с шириной начального связанного состояния, при этом в энергетическом представлении его ширина может значительно превосходить энергию соответствующую несущей частоте лазерного импульса. В данной главе в рамках модели перерассеяния была рассмотрена только стадия рассеяния электронного волнового пакета в континууме на родительском молекулярном ионе. В качестве рассматриваемой системы выбрана двумерная модель молекулярного иона H_2^+ .

В разделе 2.1 представлено аналитическое решение задачи рассеяния электронного вол-

нового пакета на двуймном потенциале. С начальным условием в виде суперпозиции плоских волн $\psi_0 = \int C_p^{(0)} e^{\frac{i}{\hbar} \vec{p} \vec{r}} d^2 \vec{p}$, где

$$C_p^{(0)} = \frac{b}{\hbar \sqrt{\pi}} e^{\frac{-b^2}{2\hbar^2} (\vec{p} - \vec{p}_0)^2} e^{\frac{i}{\hbar} \vec{r}_0 (\vec{p} - \vec{p}_0)}, \quad (1)$$

что соответствует гауссову волновому пакету. Начальная координата центра масс такого волнового пакета была выбрана порядка амплитуды классических колебаний электрона в поле электромагнитной волны, при этом большая ширина пакета в импульсном представлении соответствует случаю ионизации интенсивным ультракоротким лазерным импульсом, что приводит к существенному отличию от плоской волны. Решение задачи рассеяния проводилось в рамках борновского приближения с учетом когерентной суперпозиции большого числа плоских волн в начальном электронном волновом пакете.

В разделе 2.2 представлены основные результаты, полученные на основе рассмотренной теоретической модели и проведено сравнение с результатами численного эксперимента. В *подразделе 2.2.1* получены результаты для I и II борновского приближения в случае, когда электрон представлен в виде плоской волны, и продемонстрирована несостоятельность такого приближения при описании углового распределения возникающего при ионизации интенсивным лазерным импульсом. В *подразделе 2.2.2* получено выражение для амплитуды рассеяния в первом борновском приближении в случае широкого в импульсном представлении электронного волнового пакета и представлены соответствующие угловые распределения для различных начальных ширин волнового пакета. При этом продемонстрировано, что для рассеянной части ЭВП дифракционная картина значительно размывается, что может привести к потере информации о ядерной подсистеме родительского иона. Однако, в *подразделе 2.2.3* показано, что в случае широких (в импульсном представлении) электронных волновых пакетов не представляется возможным отделить падающий электронный волновой пакет от рассеянного. В этих условиях полная вероятность вылета электрона под углом θ для двумерной геометрии может быть записана в виде:

$$\frac{d\sigma}{d\theta} = \int p dp |C_p^{(0)} + C_p^{(1)}|^2 = \int p dp \left\{ |C_p^{(0)}|^2 + |C_p^{(1)}|^2 + \underline{2\Re [C_p^{(0)*} C_p^{(1)}]} \right\} \quad (2)$$

где $C_p^{(1)}(p, \theta)$ амплитуда рассеяния электронного волнового пакета в первом борновском приближении, а $C_p^{(0)}(p, \theta)$ - начальное двумерное импульсное распределение электрона до рассеяния, а последний член в правой части равенства (2) определяет интерференцию прошедшей и падающей волны, кроме того интерференционный член играет определяющую роль в формировании углового распределения электрона и позволяет извлечь информацию не только о ядерной подсистеме молекулы, но и свойствах электронного волнового пакета. Поведение интер-

ференционного члена может быть рассчитано из следующего выражения (случай параллельной геометрии):

$$J_{interf}^{parallel}(\theta) = \frac{2ze^2mb^2}{\hbar} \int dk e^{-b^2(k^2+k_0^2)/2} e^{b^2kk_0 \cos(\theta)} \times \\ \times \int_0^{2\pi} d\tilde{\theta} \frac{\alpha \cos \left[\frac{kR}{2} (\cos(\theta) - \cos(\tilde{\theta})) \right]}{\sqrt{1 + 4k^2\alpha^2 \sin^2 \left(\frac{\theta - \tilde{\theta}}{2} \right)}} \sin \left[kr_0 (\cos(\theta) - \cos(\tilde{\theta})) \right] e^{b^2kk_0 \cos(\tilde{\theta})} \quad (3)$$

и качественно описано следующим приближенным выражением:

$$J_{interf}^{parallel} \sim e^{-b^2k_0^2\theta^2/2} \cos \left(\frac{k_0R}{2} (1 - \cos \theta) \right) \sin (k_0r_0\theta^2/2) \quad (4)$$

Другими словами этот член содержит в себе информацию о ядерной подсистеме ($\sim \cos(\frac{kR}{2}(1 - \cos \theta))$) и, сверх того, информацию о параметрах электронного волнового пакета ($\sim e^{-b^2k_0^2\theta^2/2} \sin(k_0r_0\theta^2/2)$ сформировавшемся в процессе ионизации лазерным импульсом, что может позволить извлечь информацию о динамике системы с фемтосекундным временным разрешением. Кроме того, этот член оказывается пропорционален первому порядку малости по потенциалу взаимодействия и поэтому имеет определяющее значение по сравнению с сигналом рассеяния $\left| C_p^{(1)} \right|^2$ на углах, определяемых шириной начального импульсного распределения.

Отмеченный эффект интерференции имеет место и в случае рассеяния электронного волнового пакета на одноцентровом потенциале, что приводит к сильно немонотонной угловой диаграмме вылета электрона при рассеянии на одноцентровом потенциале в отличие от традиционной спадающей угловой зависимости, вытекающей из первого борновского приближения для плоской волны.

В *подразделе 2.2.4* проведено сравнение результатов полученного аналитического решения с результатами численного счета.

На рис.1(а) в линейном масштабе представлено сравнение углового распределения для перерассеивающегося электрона, полученное в численном расчете, и угловая зависимость интерференционного слагаемого для тех же условий. При этом k_0 соответствует средней энергии электронного волнового пакета, оцененного из данных численного счета (рис.2 в [A4]) для канала перерассеяния, а начальное положение пакета r_0 было выбрано порядка амплитуды колебаний свободного электрона в поле волны при использованных в расчете лазерных параметрах. Из сравнения данных видно, что интерференционное слагаемое прекрасно описывает положение нескольких первых максимумов и минимумов реального распределения, полученного в численном интегрировании задачи. Этот факт убедительно доказывает, что возникновение частых

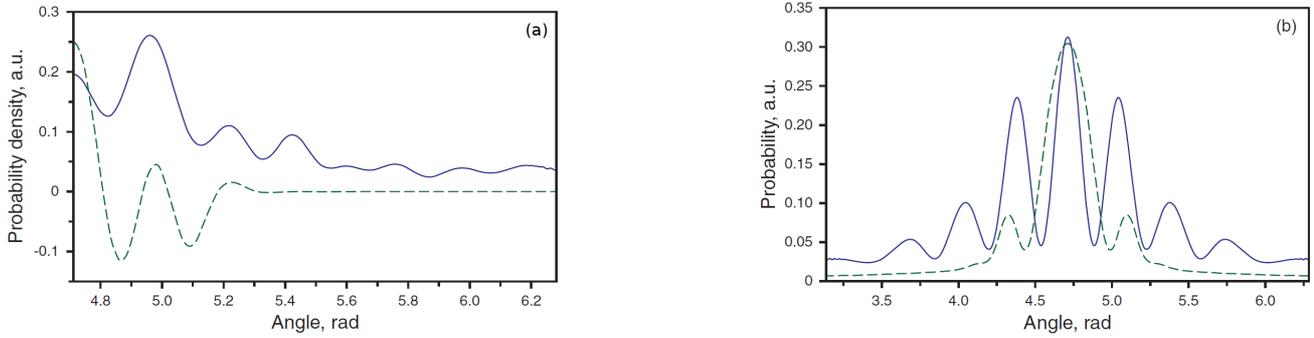


Рис. 1. Сравнение углового распределения, полученного в рамках точного численного расчета (а) для $R = 4.8 \text{ \AA}$ ионизованного одноцикловым лазерным импульсом с пиковой интенсивностью $6 \times 10^{14} \text{ Вт/см}^2$ и угловой зависимости интерференционного члена перерассеявшегося электрона, полученного аналитически по формуле (3) (b) углового распределения, полученного в точном численном расчете для ионизации двумерного атома ($R = 0$) одноцикловым импульсом с 1.55 эВ и интенсивностью $6 \times 10^{14} \text{ Вт/см}^2$ (сплошная линия) и результат разработанного аналитического подхода рассчитанный по формуле (2) (штриховая линия) (в (2) k_0 соответствует $E_0 = 40 \text{ эВ}$, $r_0 = 40 \text{ а.е.}$)

осцилляций в угловом распределении перерассеянного электрона обусловлено эффектами интерференции падающих и рассеянных волн в электронном волновом пакете. Таким образом, именно вышеописанные интерференционные эффекты, а не двухцентровая структура потенциала взаимодействия электрона с остаточным молекулярным ионом играют ключевую роль в формировании «дифракционных» немонотонностей, наблюдаемых в угловых распределениях.

Действительно, в случае ионизации атома ультракоротким лазерным импульсом угловое распределение для перерассеявшегося на атомном остове электрона также оказывается резко немонотонным. Единственным механизмом, ответственным за наблюдаемую быстроосциллирующую угловую зависимость является отмеченная интерференция волн в электронном волновом пакете в процессе перерассеяния, а разработанный аналитический подход хорошо описывает результат точных численных расчетов [A2] на малых углах (Рис. 1(b))

В третьей главе рассмотрена задача о вынужденном тормозном поглощении и испускании квантов поля электроном при рассеянии на потенциальном центре в сильном лазерном поле в случае, когда электрон характеризуется широким начальным импульсным распределением, а лазерный импульс может иметь ультракороткую длительность. Как уже говорилось, при ионизации атомно-молекулярных систем интенсивным ультракоротким лазерным импульсом в континууме формируются широкие в импульсном представлении электронные волновые пакеты. Дальнейшая их динамика в присутствии поля сопровождается вынужденным поглощением и испусканием квантов поля, причем так как ширина пакета может значительно превосходить

величину кванта поля это может привести к возникновению целого ряда новых эффектов по сравнению со случаем плоской волны, обусловленных квантовой интерференцией.

В разделе 3.1 представлено аналитическое решение для задачи о вынужденном тормозном эффекте в случае электронных волновых пакетов и ультракоротких лазерных импульсов, а также предложено рассмотрение данного эффекта для различных режимов. Для начального условия (1) в первом борновском приближении это приводит к следующему уравнению для квантовой амплитуды рассеяния:

$$i\hbar\dot{C}_{p_f}^{(1)} = \sum_n \frac{1}{(2\pi\hbar)^2} \int C_{p_i}^{(0)} U_{p_f p_i} J_n \left(\frac{e\vec{\varepsilon}_0 (\vec{p}_i - \vec{p}_f)}{\hbar m \omega^2} \right) e^{\frac{-i}{\hbar}(E_f - E_i - n\hbar\omega)t} d\vec{p}_i. \quad (5)$$

В отличие от результата теории Бункина-Федорова в случае электронного волнового пакета различные каналы испускания и поглощения дают вклад в широкий диапазон энергий, что приводит к их интерференции и значительному изменению конечного импульсного и углового распределения электронов.

В разделе 3.2 рассмотрена возможность эффективного нагрева электрона в плазме, возникающей в процессе ионизации наноструктур в случае, когда время рассеяния гораздо больше чем период внешнего поля и представлены результаты полученные для такого режима. С учетом большой энергетической ширины рассеянного волнового пакета, как и в **главе 2**, не представляется возможным отделить его от падающего. Как следствие, плотность вероятности для двумерного импульсного распределения электрона в результате рассеяния в первом порядке теории возмущений принимает вид:

$$|C_f(\theta_f, p_f)|^2 = \left| C_p^{(0)} + \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_p^{(1)n} \right|^2$$

$$= |C_p^{(0)}|^2 + \sum_n |C_p^{(1)n}|^2 + 2\Re e \left[\underbrace{C_p^{(0)*} \sum_n C_p^{(1)n}}_{I_1} + \sum_{\substack{n,k \\ n \neq k}} C_p^{(1)k*} C_p^{(1)n} \right]. \quad (6)$$

Из выражения (6) следует, что возникает два типа интерференционных эффектов: между падающей и рассеянными волнами I_1 и между рассеянными волнами, отвечающими процессам разного порядка многофотонности I_2 .

На рисунке 2 представлены интегральный по углам спектр и двумерное импульсное распределение электрона в случае более сильного поля, соответствующего характерной величине параметра многоквантовости $N_{pp'} = 8,76$. В левом столбце представлены результаты с учетом всех возникающих интерференционных эффектов и, отвечающие сохранению когерентности

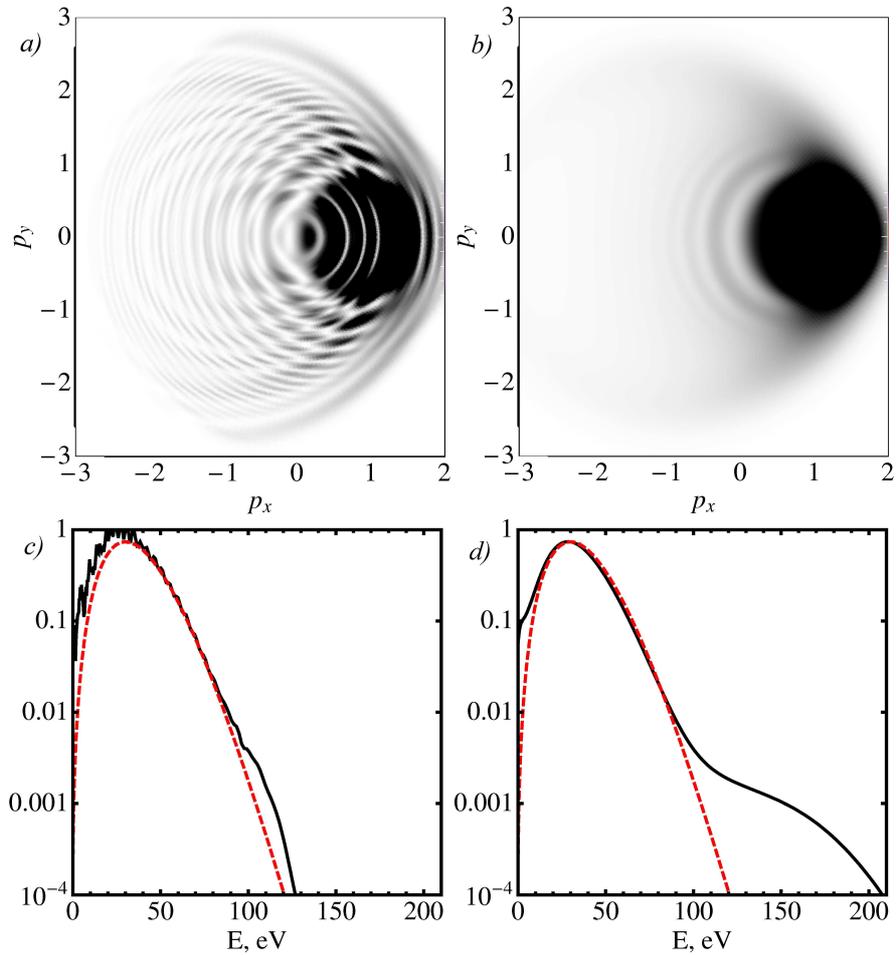


Рис. 2. Двумерное импульсное распределение для электрона после рассеяния (а) и интегральный по углам энергетический спектр (с) в начальный момент времени (штриховая линия) и по окончании рассеяния (сплошная линия); b),d) - те же данные, но полученные в случае усреднения по равномерному распределению ионов в кластере ($E = 30$ эВ, $r_0 = -120$ а.е., $\hbar\omega = 5$ эВ, $\varepsilon_0 = 0.2$ а.е., $b = 2$ а.е.)

процесса рассеяния, что имеет место в случае перерассеяния электронного волнового пакета на родительском ионе. Наличие интерференции приводит к сильной изрезанности двумерного импульсного распределения. Кроме того, возникает заметная доля электронов с энергией более 100 эВ, что существенно превышает оценки, выполненные исходя из значения параметра многоквантовости полученного в теории Бункина-Федорова. Таким образом большая ширина начального импульсного распределения электрона приводит к появлению более высокоэнергичных электронов по сравнению со случаем плоской волны.

Отметим, что в ряде случаев когерентность процесса рассеяния нарушается. Это может иметь место, например, при рассеянии сформированного в процессе ионизации электронного волнового пакета на соседних ионах в наноструктурах (кластерах). Полученные для этого случая двумерные импульсные распределения и интегральный по углам энергетический спектр электрона представлены в правом столбце рисунка 2. Как видно из конечного спектрального

распределения, в случае усреднения возникает хорошо заметный высокоэнергетический “хвост”, который при перерасеянии подавлен деструктивной интерференцией каналов, отвечающих поглощению различного числа квантов поля. Возникновение медленно спадающей высокоэнергетической части в энергетическом распределении электронов связано с проявлением каналов отвечающих за большое число поглощенных квантов поля и приводит к более эффективному разогреву электронов, имеющему важное значение в случае ионизации кластеров ультракороткими лазерными импульсами.

В разделе 3.3 рассмотрен режим для вынужденного тормозного эффекта, когда время рассеяния меньше или порядка периода внешнего лазерного поля. Такая ситуация в случае изначально пространственно узких электронных волновых пакетов наиболее легко достигается уменьшением частоты лазерного поля.

В этом случае решение уравнения (5) можно записать в следующем виде:

$$C_{p_f}^{(1)} = -\frac{i}{\hbar} U_{p_0 p_f} \int_{-\infty}^t dt \psi_{\text{св}}(\vec{a}_e \cos(\omega t), t) e^{\frac{i}{\hbar} [E_{p_f} t - \vec{p}_f \vec{a}_e \cos(\omega t)]}, \quad (7)$$

где член $\psi_{\text{св}}(\vec{a}_e \cos(\omega t), t)$ в интеграле (7) имеет следующий физический смысл: он описывает движение свободного расплывающегося электронного волнового пакета с начальным средним импульсом \vec{p}_0 и координатой \vec{r}_0 , центр которого осциллирует во внешнем лазерном поле с амплитудой $\vec{a}_e = \frac{e\vec{\epsilon}_0}{m\omega^2}$, совпадающей с соответствующим классическим значением. Если координата \vec{r}_0 отсчитывается от потенциального центра рассеяния, то момент времени t^* , в который действительная часть показателя экспоненты обращается в нуль, фактически отвечает моменту рассеяния, а квадрат модуля подынтегрального выражения имеет физический смысл вероятности нахождения электрона на рассеивающем центре.

На рисунке 3 представлено двумерное импульсное распределение в случае сильного поля. Видно, что основная часть волнового пакета продолжает движение в направлении $\theta = 0$ с той же средней энергией, хотя профиль импульсного распределения в этом направлении уширяется по сравнению с исходным, а энергетический спектр характеризуется протяженным высокоэнергетичным плато, обусловленным рассеянием электрона на различные углы вплоть до π и простирающимся до энергии более 700 эВ. При этом вероятность поглощения электроном различной по величине энергии остается на протяжении всего “плато” практически постоянной, а отсечка энергетического спектра соответствует поглощению ≈ 350 фотонов, что почти на порядок превышает характерную величину параметра многоквантовости, равную в этом случае $N_{pp_0} \simeq 55$. Фактически такое распределение в виде «окружности» возникает из-за сильной интерференции различных каналов и тяготеет к классическому механизму поглощения энергии.

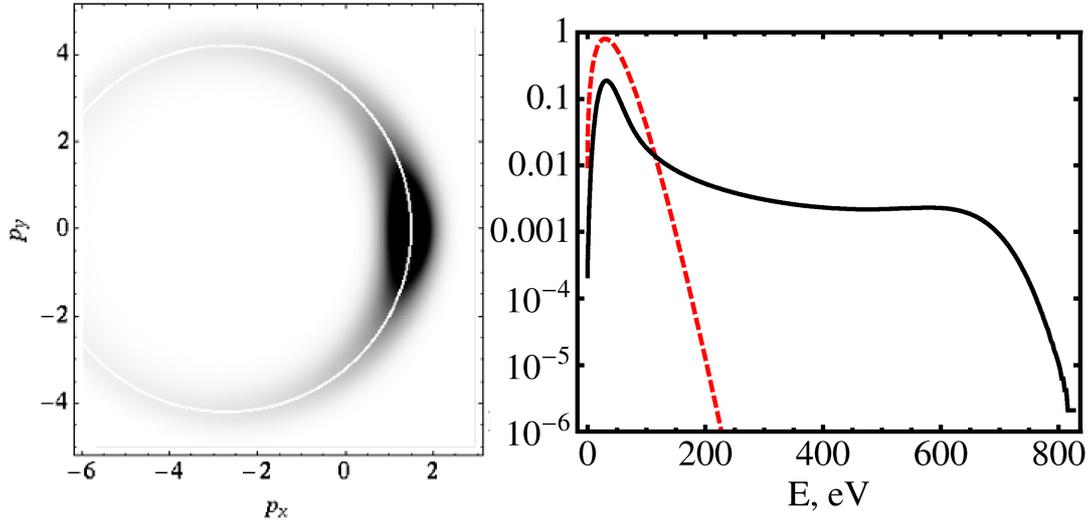


Рис. 3. Двумерное импульсное распределение и спектр электрона до рассеяния (штрихом) после первого рассеяния (черным) в случае сильного поля, белая окружность, фитирующая распределение, смещена относительно начала координат на величину пондеромоторного импульса соответствующего, в данном случае, максимальной амплитуде внешнего поля ($\varepsilon_0 = 0.2$ а.е., $E = 30$ эВ, $r_0 = -50$ а.е., $\hbar\omega = 2$ эВ, $b = 2$ а.е.)

В [разделе 3.4](#) получено обобщение аналитических результатов на случай взаимодействия с ультракоротким лазерным импульсом, как для случая плоской волны, так и электронного волнового пакета. На основе полученных результатов предложен метод контроля конечного спектра электрона за счет задержки лазерного импульса относительно момента рассеяния.

Дальнейшее увеличение энергии электронов в процессе вынужденного тормозного рассеяния может быть достигнуто за счет использования неклассических «сжатых» состояний поля, этот случай рассмотрен в [главе 4](#).

В [разделе 4.1](#) представлено аналитическое решение задачи рассеяния электрона на потенциальном центре в присутствии одной моды внешнего квантованного поля и получены выражения, позволяющие рассчитывать вероятности процессов отвечающих поглощению разного числа квантов такого поля электроном в процессе рассеяния, для различных начальных состояний электромагнитного поля. Одну моду квантованного электромагнитного поля можно описать с помощью гамильтониана полевого осциллятора, тогда задача о взаимодействии между электроном и одной модой электромагнитного поля в присутствии потенциального центра в координатном представлении описывается следующим нестационарным уравнением Шредингера:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left[\frac{\left(\hat{\vec{p}} - \frac{e}{c} \hat{\vec{A}} \right)^2}{2m} + \frac{\hbar\omega}{2} \left(\varepsilon^2 - \frac{\partial^2}{\partial \varepsilon^2} \right) + U(r) \right] \psi. \quad (8)$$

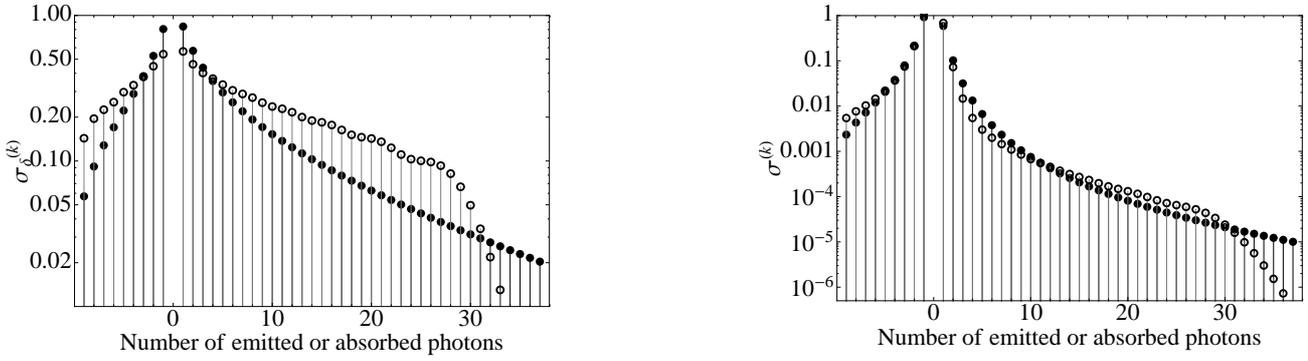


Рис. 4. Сечения каналов различной многофотонности (в атомных единицах) для вынужденного тормозного поглощения и испускания для дельта-потенциала и кулоновского потенциала представлены слева и справа соответственно, для сжатого вакуума (закрашенные кружочки) и классического поля (незакрашенные кружочки) для $E = 50$ эВ, $\hbar\omega = 5$ эВ и параметра многофотонности $N_{p_0} \approx 10.76$. Следует отметить, что для канала с испусканием $k = -9, -8$ фотонов борновское приближение может быть неприменимо.

Тогда в первом борновском приближении можно получить следующее выражение для дифференциального сечения процессов различной многофотонности:

$$\frac{d\sigma^{\pm k}}{d\Omega} = \frac{8\pi z^2 \hbar^4}{a_0^2} \frac{p}{p_0} \frac{\sum_{n=0}^{\infty} |C_{p_0, n}^{(0)}|^2 |\langle F_{p, n \pm k} | F_{p_0, n} \rangle|^2}{(p^2 + p_0^2 - 2pp_0 \cos \theta)^2} \Bigg|_{\frac{p^2 - p_0^2}{2m} + \hbar\omega\sqrt{\delta_\omega}(\beta_p^2 - \beta_{p_0}^2 \pm k) = 0}, \quad (9)$$

где $\beta_p = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \alpha^{3/2} a_0 (\vec{p}/\hbar \cdot \vec{e}_z) \left[\frac{\lambda/2}{L} \right]^{3/2}$ и $\delta_\omega = 1 + \frac{2e^2 A_0^2}{2mc^2\omega} \approx 1$ в нерелятивистском случае, а проекция между полевыми состояниями может быть вычислена в следующем виде:

$$\langle F_{p, n \pm k} | F_{p_0, n} \rangle = \frac{e^{-\frac{1}{2}(\beta_p - \beta_{p_0})^2} |\beta_p - \beta_{p_0}|^{|k|} \sqrt{n!(k+n)!} {}_1F_1(-\min(n, k+n); |k| + 1; |\beta_p - \beta_{p_0}|^2)}{\Gamma(|k| + 1)\Gamma(\min(n, k+n) + 1)} \quad (10)$$

В разделе 4.2 представлены основные результаты полученные на основе аналитической модели. В подразделе 4.2.1 представлен предельный переход к полуклассическому решению и получена связь между основными выражениями для полуклассического подхода и случая, когда поле проквантованно. Подраздел 4.2.2 посвящен случаю, когда электрон взаимодействует с полем в состояний «сжатого вакуума». Дифференциальное сечение, вычисленное для различных многофотонных каналов и представленное на рисунке 4 для когерентного состояния (незакрашенные кружочку) характеризуется монотонным уменьшением с характерной отсечкой. В случае состояния «сжатого вакуума» начальное распределение по фоковским состояниям качественно отличается от когерентного. В этом случае очень большое число состояний отвечающих

большим квантовым числом n дает вклад в сумму (9) и обеспечивает максимальное значение матричного элемента для многофотонных процессов высокого порядка. Другими словами, для каждого k -го многофотонного канала в (9) входит состояние с точным числом фотонов n таким, что обеспечивается максимальное значение матричного элемента для этого канала и ненулевую населенность $|C_n^{(0)}|^2$ такого состояния. В этом случае дифференциальное сечение вычисленное в зависимости от порядка многофотонности k (числа испущенных или поглощенных квантов) приводит к достаточно монотонному поведению как для случая дельта-потенциала, так и для кулоновского потенциала (рис. 4 закрашенные кружки). Наблюдаемое монотонное уменьшение вероятности с ростом многофотонности и отсутствие выраженной отсечки для процессов поглощения является непосредственным следствием большого числа фоковских состояний входящих в «сжатый вакуум» (эффективно \bar{n}^2) и медленное убывание их амплитуд с ростом номера n . Таким образом «сжатый вакуум» обеспечивает большую вероятность поглощения большого числа фотонов рассеянным электроном по сравнению с классическим полем, приводящую к отсутствию отсечки по энергии и расширению спектра электрона в область гораздо больших энергий по сравнению со случаем классических полей.

В *подразделе 4.2.3* представлены результаты полученные в случае полностью квантового описания эффекта Маркуза с учетом многофотонного поглощения и испускания. Показано, что с учетом квантовости электромагнитного поля можно увеличить угловой интервал в котором преобладают процессы испускания квантов и даже полностью изменить угловую зависимость коэффициента усиления поля. Меняя параметры поля можно добиться постоянства или даже инвертировать и увеличить коэффициент усиления поля в зависимости от начальной ориентации импульса электрона, обеспечив таким образом положительное значение скорости испускания фотонов для любой начальной ориентации импульса электрона.

В главе 5 рассмотрена задача о взаимодействии системы двух тесно связанных ридберговских атомов с внешним интенсивным лазерным полем. В случае реализации кубитов на высоковозбужденных ридберговских атомных состояниях и лазерного управления ими возникает проблема ионизации атомов этим лазерным полем. Одно из возможных решений - использование механизма интерференционной стабилизации в сильном лазерном поле - исследовано в этой главе. В разделе 5.1 представлена аналитическая модель позволяющая получить решение поставленной задачи, причем взаимодействие атомов друг с другом и с лазерным полем в рамках рассмотренной модели учтены точно. При решении задачи каждый из атомов рассматривался в модели “ n дискретных уровней + континуум”, причем для анализа роли взаимодействия, а также рамановских переходов Λ -типа между дискретными состояниями через континуум четность связанных состояний полагалась одинаковой и обеспечивающей ненулевое значение матричных

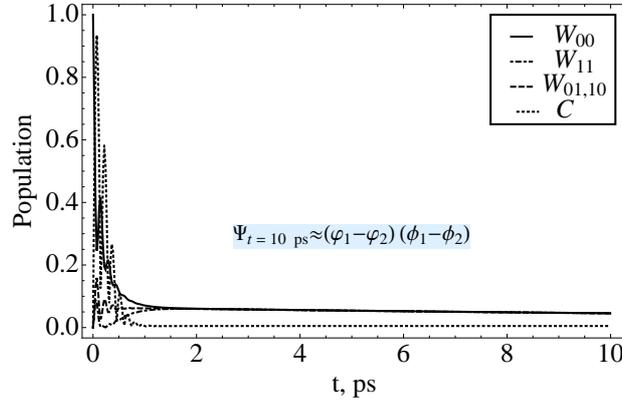


Рис. 5. Эволюция системы двух взаимодействующих двухуровневых атомов в сильном поле, если в начальный момент времени атомы находятся в основном состоянии ($W = 30\Delta$, $\Gamma = 10\Delta$)

элементов оператора взаимодействия между ними.а

Тогда в приближении адиабатического исключения континуума можно получить следующее уравнение для квантовых амплитуд дискретных состояний атомов:

$$i\dot{C}_{n_A n_B} = (E_{n_A} + E_{n_B}) C_{n_A n_B} - i\Gamma \sum_k (C_{n_A k} + C_{k n_B}) + W \sum_{k, k'} C_{k k'}, \quad (11)$$

В [разделе 5.2](#) получены решения для уравнения (11) в терминах симметризованных состояний и с учетом спина в виде квазиэнергетических функций и энергий в случае, когда учтено всего два дискретных состояния в каждом атоме. Получены приближенные выражения для квазиэнергий и квазиэнергетических состояний в различных предельных случаях по интенсивности внешнего поля и силе межатомного взаимодействия.

Обнаружено возникновение интерференционной стабилизации в системе в случае сильных полей (рис. 5). Продемонстрировано, что возникающее в системе стабильное состояние является факторизованным по переменным отдельных атомов, но переходит в перепутанное состояние в режиме динамики без поля, но с учетом взаимодействия атомов друг с другом.

В [разделе 5.3](#) рассмотрена возможность создания перепутанных состояний в такой системе и предложен метод экспериментального приготовления таких состояний в случае взаимодействия с сильным лазерным полем. Кроме того получено обобщение на случай большего числа дискретных состояний и рассмотрена их динамика.

В Заключение представлены основные результаты и выводы диссертации. Объяснены результаты прямых численных расчетов по ионизации квантовых систем ультракоротким лазерным импульсом и продемонстрировано, что эффект интерференции различных частей волнового пакета в процессе рассеяния электрона на атомно-молекулярном остове ответственен

за формирование качественно новых угловых и импульсных распределений электрона в континууме. Предложены методы по извлечению информации о динамике молекулы и свойствах электронного волнового пакета с фемтосекундным разрешением по времени.

Обнаружен эффективный нагрев электронов в кластере в процессе ионизации ультракоротким лазерным импульсом, обусловленный интерференцией различных каналов ВТЭ. Показана возможность эффективного поглощения квантов поля в случае рассеяния вперед в условиях “быстрого” многократного рассеяния широкого в импульсном представлении электронного волнового пакета на потенциальном центре.

Исследован и получен полуклассический предел для вынужденного тормозного эффекта в квантованном поле, обнаружено существенное увеличение эффективности протекания многофотонных процессов высокого порядка в «сжатом вакууме» по сравнению с классическим полем той же интенсивности. Получено обобщение эффекта Маркуза на случай квантованного поля и поглощения и испускания более одного кванта внешнего поля, показано что в случае малого числа фотонов в моде возможно получить усиление поля независимо от начальной ориентации импульса электрона.

Решена задача об эволюции системы двух эффективно взаимодействующих ридберговских атомов в сильном лазерном поле. Продемонстрирована возможность наблюдения эффекта стабилизации в такой многочастичной системе и исследована возможность создания перепутанных двухчастичных состояний.

Список публикаций

- A1. Burenkov I. A., Tikhonova O. V. Interference effects in electron-molecular scattering and diffraction imaging of molecular dynamics // Proc. of SPIE. 2007. Vol. 6726, no. 1. Pp. 67261C1–6.
- A2. Burenkov I., Popov A., Tikhonova O., Volkova E. Ionization of atoms and molecules by a few-cycle laser pulse and interference effects in the rescattering process // Journal of Modern Optics. 2008. Vol. 55, no. 16. Pp. 2527–2539.
- A3. Буренков И.А., Тихонова О.В. Интерференционные эффекты в теории многофотонного вынужденного обратного тормозного эффекта для широких в импульсном представлении электронных волновых пакетов // ВМУ. Серия 3. ФИЗИКА. АСТРОНОМИЯ. 2009. Т. 64. С. 42–46.
- A4. Буренков И.А., Волкова Е.А., Попов А.М., Тихонова О.В. Динамика молекулярных си-

стем в поле ультракоротких лазерных импульсов и интерференционные эффекты, возникающие в процессе перерасеяния // ЖЭТФ. 2009. Т. 136. С. 5–17.

- A5. Буренков И.А., Тихонова О.В. Многофотонный вынужденный обратный тормозной эффект для широких в импульсном представлении электронных волновых пакетов в поле ультракороткого лазерного импульса // ЖЭТФ. 2010. Т. 137. С. 1070–1089.
- A6. Burenkov I., Popov A., Tikhonova O., Volkova E. New features of interaction of atomic and molecular systems with intense ultrashort laser pulses // Laser Physics Letters. 2010. Vol. 7, no. 6. Pp. 409–434.
- A7. Burenkov I. A., Tikhonova O. V. Features of multiphoton-stimulated bremsstrahlung in a quantized field // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2010. Vol. 43, no. 23. P. 235401.
- A8. Буренков И.А., Тихонова О.В. Эффекты сильного поля в системе двух взаимодействующих ридберговских атомов // Письма в ЖЭТФ. 2011. Т. 93. С. 346–352.
- A9. Буренков И.А., Тихонова О.В. Рассеяние электронного волнового пакета на молекуле и определение динамики ядерных степеней свободы // Международный молодежный научный форум “Ломоносов-2007”, XIV Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых “Ломоносов”, Москва, Россия. 2007.
- A10. Burenkov I., Tikhonova O. Interference effects in electron-molecule scattering and diffraction imaging of molecular dynamics // International Conference on Coherent and Nonlinear Optics, Minsk, Belarus. 2007. Pp. I03–4.
- A11. Burenkov I., Tikhonova O. Interference effects in diffraction imaging of nuclear dynamics in molecules // International Workshop “Attosecond Physics”, Dresden, Germany. 2007.
- A12. Burenkov I., Popov A., Tikhonova O., Volkova E. Ionization of atoms and molecules by a few-cycle laser pulse and interference effects in the rescattering process // Novel light sources and applications, Obergurgl, Austria. 2008. P. P.25.
- A13. Burenkov I., Tikhonova O. Interference effects in the laser-stimulated Bremsstrahlung for wide in momentum representation electron wave packets // 17th International Laser Physics Workshop (LPHYS'08), Norway, Trondheim. 2008. P. 155.

- A14. Burenkov I., Popov A., Tikhonova O., Volkova E. Interference features of the field-induced ionization and rescattering in atomic systems in few-cycle laser pulses // 17th International Laser Physics Workshop (LPHYS'08), Norway, Trondheim. 2008. P. 127.
- A15. Burenkov I., Rosmej O. X-ray spectroscopy investigation of laser-produced dense plasma // 15th GSI Student Program, Germany, Darmstadt. 2008. Pp. 25–29.
- A16. Burenkov I., Tikhonova O. Heating of Nanoclusters by Intense Ultrashort Laser Pulses and Interference Effects in the Laser-Stimulated Bremsstrahlung // 11th International Conference on Multiphoton Processes, Germany, Heidelberg. 2008. P. Mo06.
- A17. Burenkov I., Popov A., Tikhonova O., Volkova E. Interference features of electron-atomic core rescattering during strong field atomic ionization in a few-cycle laser pulses // 11th International Conference on Multiphoton Processes, Germany, Heidelberg. 2008. P. Fr47.
- A18. Burenkov I., Tikhonova O. Features of laser stimulated Bremsstrahlung in quantum field // 16th Central European Workshop of Quantum Optics, Turku, Finland. 2009. P. 103.
- A19. Burenkov I., Popov A., Tikhonova O., Volkova E. Different channels of radiation emission by ionized electron during its rescattering in a strong laser field // 16th Central European Workshop of Quantum Optics, Turku, Finland. 2009. P. 166.
- A20. Burenkov I., Tikhonova O. Different regimes of the laser-stimulated Bremsstrahlung in intense ultrashort laser pulses // 18th International Laser Physics Workshop, Barcelona, Spain. 2009. P. 154.
- A21. Burenkov I., Tikhonova O. Heating of nanoclusters by intense ultrashort laser pulses and laser-stimulated Bremsstrahlung // XXIV International Conference of Physics Students, Split, Croatia. 2009.
- A22. Burenkov I., Tikhonova O. Entanglement and ionization suppression in two-atomic system in a strong classical field // 17-th Central European Workshop on Quantum Optics, St. Andrews, Scotland. 2010. P. Wed.5.
- A23. Burenkov I., Tikhonova O. Ionization suppression and quantum correlations in a system of two coupled atoms in a strong laser field // 19th International Laser Physics Workshop, Foz do Iguaçu, Brazil. 2010.
- A24. Burenkov I., Tikhonova O. Two-atom quantum entanglement in a strong classical field // XXV International Conference of Physics Students, Graz, Austria. 2010.

- A25. Burenkov I., Tikhonova O. Entanglement and ionization suppression in a system of two interacting atomic q-bits driven by a strong laser field // International Conference on Foundations of Probability and Physics-6, (FPP-6), Linnaeus University, Vaxjo, Sweden. 2011.
- A26. Burenkov I., Tikhonova O. Ionization suppression and entanglement in a system of two interacting Rydberg atoms driven by strong laser field // 20th International Laser Physics Workshop, Sarajevo. 2011.

Цитированная литература

1. Agostini P., DiMauro L. F. The physics of attosecond light pulses // Reports on Progress in Physics. 2004. Vol. 67, no. 6. Pp. 813–855.
2. Lein M. Molecular imaging using recolliding electrons // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2007. Vol. 40. Pp. R135–R151.
3. Niikura H., Légaré F., Hasbani R., Bandrauk A. D., Ivanov M. Y., Villeneuve D. M., Corkum P. B. Sub-laser-cycle electron pulses for probing molecular dynamics // Nature. 2002. Vol. 417. Pp. 917–922.
4. Ergler T., Rudenko A., Feuerstein B., Zrost K., Schröter C. D., Moshhammer R., Ullrich J. Spatiotemporal Imaging of Ultrafast Molecular Motion: Collapse and Revival of the D_2^+ Nuclear Wave Packet // Phys. Rev. Lett. 2006. — Nov. Vol. 97. Pp. 193001–4.
5. Spanner M., Smirnova O., Corkum P. B., Ivanov M. Y. Reading diffraction images in strong field ionization of diatomic molecules // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2004. Vol. 37. Pp. L243–L255.
6. Lein M., Marangos J. P., Knight P. L. Electron diffraction in above-threshold ionization of molecules // Phys. Rev. A. 2002. — Nov. Vol. 66. Pp. 051404–051407.
7. Lein M., Hay N., Velotta R., Marangos J. P., Knight P. L. Role of the Intramolecular Phase in High-Harmonic Generation // Phys. Rev. Lett. 2002. — Apr. Vol. 88. P. 183903.
8. Gonoskov I. A., Ryabikin M. Y., Sergeev A. M. High-order harmonic generation in light molecules: moving-nuclei semiclassical simulations // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. 2006. Vol. 39, no. 13. Pp. S445–S457.

9. Бункин Ф.В., Федоров М.В. Тормозной эффект в сильном поле излучения // ЖЭТФ. 1965. Т. 49. С. 1215–1221.
10. Wallbank B., Holmes J. K. Laser-assisted elastic electron-atom collisions // Phys. Rev. A. 1993. — Oct. Vol. 48. Pp. R2515–R2518.
11. Быков В.П. Основные особенности сжатого света // Успехи физических наук. 1991. Vol. 161, no. 10. Pp. 145–173.
12. Popov A., Tikhonova O. The ionization of atoms in an intense nonclassical electromagnetic field // Journal of Experimental and Theoretical Physics. 2002. Vol. 95. Pp. 844–850.
13. Масалов А.В. Сжатый свет в процессах многофотонного взаимодействия // Оптика и спектроскопия. 1991. Т. 70. С. 648–652.
14. Slusher R. E., Yurke B., Grangier P., LaPorta A., Walls D. F., Reid M. Squeezed-light generation by four-wave mixing near an atomic resonance // J. Opt. Soc. Am. B. 1987. — Oct. Vol. 4, no. 10. Pp. 1453–1464.
15. Brattke S., Varcoe B. T. H., Walther H. Generation of Photon Number States on Demand via Cavity Quantum Electrodynamics // Phys. Rev. Lett. 2001. — Apr. Vol. 86. Pp. 3534–3537.
16. Schleich W., Wheeler J. A. Oscillations in photon distribution of squeezed states // J. Opt. Soc. Am. B. 1987. — Oct. Vol. 4, no. 10. Pp. 1715–1722.
17. Dutta B., Mukunda N., Simon R., Subramaniam A. Squeezed states, photon-number distributions, and U(1) invariance // J. Opt. Soc. Am. B. 1993. — Feb. Vol. 10, no. 2. Pp. 253–264.
18. Iskhakov T., Chekhova M. V., Leuchs G. Generation and Direct Detection of Broadband Mesoscopic Polarization-Squeezed Vacuum // Phys. Rev. Lett. 2009. — May. Vol. 102. Pp. 183602–183605.
19. Килин С.Я. Квантовая информация // Успехи физических наук. 1999. Т. 169, № 5. С. 507–527.
20. Mazzola L., Maniscalco S., Piilo J., Suominen K.-A., Garraway B. M. Sudden death and sudden birth of entanglement in common structured reservoirs // Phys. Rev. A. 2009. — Apr. Vol. 79. P. 042302.
21. Tretyakov D., Beterov I., Entin V., Ryabtsev I. Cold atoms in optical lattices as qubits for a quantum computer // Russian Microelectronics. 2006. Vol. 35. Pp. 74–77.

22. Fedorov M. V., Movsesian A. M. Field-induced effects of narrowing of photoelectron spectra and stabilisation of Rydberg atoms // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*. 1988. Vol. 21, no. 7. P. L155.
23. Poluéktov N., Fedorov M. Phase control of the degree of ionization of Rydberg atoms by a strong laser field // *Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 2000. Vol. 90. Pp. 794–804.

Подписано в печать 07.12.2011

Формат 60x88 1/16. Объем 1 п.л.

Тираж 100 экз. Заказ 1818.

Отпечатано в отделе полиграфии ООО Ресурс
119192, г. Москва, Мичуринский проспект, д. 21, к. 4