

На правах рукописи

Тепер Наталья Игоревна

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЭКЗОТИЧЕСКИХ
АТОМНЫХ СОСТОЯНИЙ В ЛАЗЕРНЫХ ПОЛЯХ

01.04.21 – Лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Саратов 2011

Работа выполнена в ГОУ ВПО «Саратовский государственный университет им. Н.Г. Чернышевского»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
профессор Дербов Владимир Леонардович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Березин Валентин Иванович,

доктор физико-математических наук,
профессор Паршков Олег Михайлович

Ведущая организация: Самарский государственный университет

Защита состоится 15 февраля 2011 г. в 15:30 на заседании диссертационного совета Д212.243.05 при Саратовском государственном университете им. Н.Г.Чернышевского (410012, г. Саратов, ул. Астраханская, 83, корпус 3, ауд. 34)

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке им. В.А.Артисевич Саратовского государственного университета

Автореферат разослан « ____ » января 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

В.Л. Дербов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность

Локализованные волновые пакеты ридберговских состояний атомов соответствуют классической, планетарной модели атома, они характеризуются аномально большими атомными размерами, высокими значениями квантовых чисел во всех степенях свободы, движение локализованного волнового пакета является аналогом движения по классической кеплеровской траектории. Такие атомные системы сочетают одновременно классические и квантовые свойства, что делает их исследование актуальным для решения проблем перехода от квантового описания к классическому, в том числе при создании квантоворазмерных наноструктур. Отличаясь высокой чувствительностью к воздействию внешних полей, они являются примером управляемых состояний атома. Произведение неопределенностей координаты и импульса для локализованного волнового пакета близко к минимальному значению, поэтому такой объект можно рассматривать как хорошее приближение когерентного состояния атома.

Благодаря своим особым свойствам такие атомные системы находят применение для решения ряда научных задач. Например, для установления связей между орбитами классически хаотических систем и движением квантового волнового пакета, сжатия электромагнитного поля в резонаторе, управления поведением электрона. В том числе, как показывают недавние исследования, методы, используемые для возбуждения ридберговских состояний и управления ими, могут применяться к атомам антивещества для решения обратной задачи - снятия возбуждения и перевода позитрона на более низкие уровни. С ридберговскими волновыми пакетами связывается одно из направлений развития технологии квантовой информации: рассматривается возможность кодирования многих бит информации во множестве уровней ридберговского атома, в виде волнового пакета, и осуществление логических

схем между битами, которые таким образом закодированы.

Отличными по структуре, но сходными по некоторым свойствам с ридберговскими волновыми пакетами объектами являются метастабильные состояния антипротонного гелия. Атом антипротонного гелия представляет собой систему трех тел: ядра атома гелия, внутреннего электрона и антипротона. Динамика антипротонного гелия соответствует движению антипротона вокруг общего центра масс с ионом гелия, поэтому данный квантовый объект уникальным образом сочетает свойства атомов и двухатомных молекул в одной системе, для которой в литературе употребляется термин «атомкула». Ее метастабильные состояния являются антипротонным аналогом планетарного атома, характеризуются большими атомными размерами, высокими значениями главного, орбитального и магнитного квантовых чисел.

Метастабильные состояния антипротонов в гелии представляют значительный интерес как средство аккумуляции антиматерии в виде нейтральных атомов. Такие состояния имеют большое значение для задач фундаментальной физики вследствие возможности их использования для измерения основных констант антипротона. Эти измерения и связанное с ними теоретическое и экспериментальное изучение антипротонных атомов, так называемых атомкул, создают базу для решения наиболее значимых проблем теоретической физики, таких как проверка СРТ-инвариантности, гравитационных свойств античастиц, квантово-электродинамических поправок.

Особые свойства рассматриваемых систем привлекли к ним внимание многочисленных исследователей: были предложены различные подходы к теоретическому исследованию структуры локализованных волновых пакетов и способы их экспериментального получения. Достижения в данной области значительно расширили возможности изучения динамики заселенностей рассматриваемых систем, но с другой стороны были ограничены рядом проблем. Значительные трудности связаны со сложностью создания локализованных волновых пакетов, экспериментальное получение которых требует применения особых комбинаций специально подобранных полей. Другая проблема

связана непосредственно с переходом от описания эволюции волнового пакета в терминах квантовой механики, предлагаемого в многочисленных работах с использованием волновых функций разнообразных форм, к возможности исследования его макроскопических параметров, требуемого для установления связи между классическим и квантовым подведением пакета, сопоставления его классических и квантовых свойств, нахождения режимов их совпадения и различия, определения, при каких условиях в большей мере проявляются классические свойства, а при каких квантовые, точек перехода одних в другие.

Интенсивное изучение метастабильных состояний антипротонного гелия в течение ряда лет выполнялось различными исследователями в рамках международных научных проектов. В результате стала доступной важная информация об образовании и распаде метастабильных атомкул. Были предложены подходы, позволяющие получить надежные оценки энергий, дипольных моментов переходов, радиационных времен жизни, разработан лазерный когерентный метод контроля заселенностей метастабильных состояний антипротона в гелии. Проблема, связанная с исследованием заселенностей, вызвана спецификой их распределения в каскадах метастабильных уровней, соответствующих наиболее удаленным орбитам антипротона в гелии. Такие состояния требуют особого подхода для их изучения и контроля, так как обычная методика регистрации продуктов аннигиляции является невозможной вследствие депопуляции этих состояний задолго до достижения аннигиляционных пределов.

Цель диссертационной работы

Целью диссертационной работы является выяснение механизма формирования и возможности управления поведением экзотических атомных систем: ридберговского атома и атома антипротонного гелия, под действием лазерного поля.

Для реализации поставленной цели решаются следующие основные задачи:

- Численное моделирование динамики заселенностей в атоме водорода под действием лазерного импульса с круговой поляризацией при различных значениях амплитуды, продолжительности и частоты для описания механизма переноса заселенности в системе, определения условий формирования волновых пакетов ридберговских состояний и возможностей применения для этого существующих лазеров.
- Проверка возможности применения модифицированного обобщенного метода моментов (МОММ) (Дербов В.Л., Мельников Л.А., Новиков А.Д. Квантовая электроника. 1987. Т. 14. № 12. С. 2529-2539) для описания динамики волнового пакета ридберговских состояний под действием постоянного магнитного и циркулярно-поляризованного микроволнового внешних полей.
- Обобщение многоимпульсного когерентного лазерного метода (Дербов В.Л., Мельников Л.А., Уманский И.М., Виницкий С.И. Оптика и спектроскопия. 1998. Т. 84. № 4. С. 533-539) для контроля заселенностей метастабильных состояний $\bar{p}He^+$ одновременно в трех каскадах, на основе инверсии π -импульсами.

Методы исследования

Математическое моделирование проводилось путем решения уравнения Шредингера, описывающего взаимодействие атома водорода с лазерным импульсом. В результате разложения волновой функции системы по собственным функциям дискретного и непрерывно спектра была получена система уравнений для амплитуд вероятностей, которые решались численно. Для описания временной эволюции локализованного волнового пакета численно решалась система уравнений для параметров пакета, полученная на основе

модифицированного обобщенного метода моментов. Исследование динамики заселенности в атоме антипротонного гелия выполнялось на основе численного решения уравнений для матрицы плотности системы метастабильных уровней, учитывая действие лазерных импульсов и характер релаксации атома.

Научная новизна

1. Формирование волновых пакетов ридберговских состояний с различной степенью локализации впервые изучено в условиях возбуждения под действием одного и нескольких ультракоротких импульсов с круговой поляризацией с учетом переходов между состояниями дискретного и непрерывного спектра.

2. Произведена оценка применимости дипольного приближения для описания переходов между основным состоянием, возбужденными уровнями и состояниями непрерывного спектра под действием титан-сапфирового лазерного комплекса.

3. Рассмотрена возможность использования импульса фемтосекундного тераваттного титан-сапфирового лазера для формирования волновых пакетов состояний с высокими значениями главного, орбитального и магнитного квантовых чисел, на основе модели, включающей все эффективно задействованные переходы и ионизационные потери в системе.

4. В отличие от других работ по теории ридберговских пакетов, учтены ионизационные потери заселенности за счет введения феноменологической ширины уровней, моделирующих сплошной спектр. Благодаря этому продемонстрирована значительная роль потерь ионизации в процессе воздействия на атом водорода импульса титан-сапфирового лазера.

5. Определены спектральные характеристики излучения атома водорода под действием импульса титан-сапфирового лазера.

6. Модифицированный обобщенный метод моментов впервые исполь-

зован для описания временной эволюции ридберговского пакета во внешнем потенциальном минимуме, созданном постоянным магнитным и циркулярно-поляризованным микроволновым полями.

7. На основе численного моделирования показана возможность применения лазерных импульсов для контроля заселенностей уровней одновременно в трех каскадах метастабильных состояний антипротона в гелии посредством связывания межкаскадных инфракрасных переходов и инверсии заселенностей взаимодействующих уровней.

8. Выполнено численное исследование воздействия одиночного лазерного импульса большой спектральной ширины на заселенность уровней антипротонного гелия для различных параметров поля.

Достоверность результатов диссертации

Достоверность результатов диссертации обеспечивается использованием строгих математических методов и прямых численных расчетов, оценкой применимости приближений, тестированием используемой математической модели при различных параметрах, с помощью сравнения результатов исследования с результатами, полученными другими авторами.

Научная и практическая ценность

Полученные результаты численного моделирования и их физическая интерпретация позволяют глубже понять сущность процессов, возникающих в атоме водорода и антипротонного гелия под действием лазерных импульсов различной продолжительности, интенсивности и частоты. Проведенные исследования служат обоснованием применения обобщенного модифицированного метода моментов для описания временной эволюции локализованного волнового пакета под действием циркулярно-поляризованного микроволнового и постоянного магнитного полей.

Результаты диссертации могут быть использованы в качестве теоретической базы для экспериментального получения волновых пакетов ридберговских атомов под действием одного или нескольких лазерных импульсов, для разработки технологии управления поведением электрона, формирования состояний электрона с определенными свойствами, расширения сферы применения тераваттных лазерных комплексов. Выполненные исследования воздействия на атом лазерного поля высокой интенсивности могут способствовать развитию нового класса задач и направлений в области нелинейной динамики.

Применение обобщенного модифицированного метода моментов для описания движения локализованного волнового пакета по эллиптической орбите под действием циркулярно-поляризованного микроволнового и постоянного магнитного полей позволяет контролировать изменение его параметров с течением времени, подбирать условия оптимальные для эволюции пакета.

Техника контроля заселенностей в атоме антипротонного гелия, основанная на лазерном когерентном методе может использоваться для дальнейших экспериментальных исследований метастабильных уровней, позволит получать состояния антипротонного гелия с заданными параметрами, замедлять процесс аннигиляции.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения

1. Математическая модель взаимодействия атома водорода с ультракоротким импульсом, включающая большое число состояний дискретного и непрерывного спектра, с различными значениями квантовых чисел, учитывающая необратимость ионизационных потерь посредством добавления в систему искусственного поглощения, расчеты на основе которой подтверждают значительные ионизационные потери, существенную роль «горизонтальных» переходов, допустимость дипольного приближения при описании

переходов из основного состояния.

2. Результаты численного исследования динамики заселенности в атоме водорода под действием лазерных импульсов различной продолжительности, амплитуды и частоты, подтверждающие ее сложный характер, и демонстрирующие наличие множественных переходов между состояниями дискретного и непрерывного спектра, в том числе «горизонтальных», в результате которых происходит формирование локализованного волнового пакета, включающего состояния с высокими значениями главного, орбитального и магнитного квантовых чисел.

3. Достаточная точность модифицированного обобщенного метода моментов обеспечивает его применимость для решения задачи описания временной эволюции локализованных волновых пакетов под действием циркулярно-поляризованного микроволнового и постоянного магнитного полей.

4. Математическая модель, позволяющая исследовать заселенность антипротонного гелия одновременно в нескольких каскадах метастабильных уровней и результаты численного исследования динамики заселенностей в атоме антипротонного гелия метастабильных состояний принадлежащих трём различным каскадам.

Личный вклад автора

Результаты, составившие основу диссертации, получены лично автором. Им построены оптимальные математические модели, выводился ряд исходных уравнений, выполнялось численное моделирование на их основе и физическая интерпретация результатов.

Апробация работы

Результаты работы докладывались на следующих научных конференциях:

1. 14th International School for Young Scientist and Student on Optics, Laser Physics & Biophysics SFM-2010, Saratov, 2010.
2. 13th Annual International School for Young Scientist and Student on Optics, Laser Physics & Biophysics SFM-2009, Saratov, 2009.
3. Conference on Ultrafast and Nonlinear Optics UFNO'2009, Burgas, Bulgaria, 2009.
4. International Conference on Physics of Optical Materials and Devices ICOM2009, Herceg Novi, Montenegro, 2009.
5. Young Optical Scientists Conference, Bauman Moscow State Technical University Moscow, 2009.
6. VIII Young Scientist Conference on Radiophysics and Electronics, Biophysics YSC-2008, Kharkov, Ukraine, 2008.
7. 12th Annual International School for Young Scientist and Student on Optics, Laser Physics & Biophysics SFM-2008, Saratov, 2008.
8. 12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, Odessa, Ukraine, 2008.
9. VIII International Young Scientists' Conference on Applied Physics, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine, 2008.
10. VII Young Scientist Conference on Radiophysics and Electronics YSC-2007, Kharkov, Ukraine, 2007.
11. 11th Annual International School for Young Scientist and Student on Optics, Laser Physics & Biophysics SFM-2007, Saratov, 2007.
12. VI Young Scientist Conference on Radiophysics and Electronics YSC-2006, Kharkov, Ukraine, 2006.
13. 10th Annual International School for Young Scientist and Student on Optics, Laser Physics & Biophysics SFM-2006, Saratov, 2006.

- 14.7th Annual International School for Young Scientist and Student on Optics, Laser Physics & Biophysics SFM-2003, Saratov, Russia, 2003.
15. International School for Young Scientist and Student on Optics, Laser Physics & Biophysics SFM-2000, Saratov, 2000.
16. International School for Young Scientist and Student on Optics, Laser Physics & Biophysics SFM-99, Saratov, Russia, 1999.
17. International School for Young Scientist and Student on Optics, Laser Physics & Biophysics SFM-98, Saratov, 1998.

Публикации

По теме диссертационной работы имеется 23 публикации, из них 4 публикации в реферируемых научных журналах, в том числе 2 публикации в научных журналах, рекомендованных ВАК РФ при защите диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук по тематике работы.

Структура работы

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 114 наименований. Общий объем диссертации 122 страницы текста (в том числе 38 рисунков).

Краткое содержание работы

Во введении обозначен предмет исследования, обоснована актуальность темы, дан сжатый анализ состояния проблемы к моменту начала исследований, сформулированы цели и задачи работы, основные положения, выносимые на защиту, охарактеризованы новизна полученных в диссертации результатов, их научное и практическое значение, апробация работы, публи-

кации по ее теме, личное участие автора в выполнении работы, ее объем и структура, а также кратко изложено содержание диссертации.

В главе 1 исследуется возможность формирования локализованных волновых пакетов ридберговских атомов под действием ультракоротких лазерных импульсов. В качестве характеристики таких состояний электрона рассматриваются их свойства, условия образования и возможности практического применения, приводится краткий обзор используемых в литературе методов их теоретического описания и экспериментального получения.

Описание взаимодействия атома водорода с ультракоротким лазерным импульсом основано на математической модели, включающей состояния дискретного и непрерывного спектра. Так же как и в ряде работ других авторов, используется представление континуума набором дискретных состояний. Волновая функция такой системы может быть представлена выражением

$$\Psi(\mathbf{r}, t) = \sum_n \sum_{l,m} C_{nl}(t) R_{nl} Y_{l,m} + \sum_k \sum_{l,m} C_{kl}(t) R_{kl} Y_{l,m} w_k \quad (1)$$

где $C_{nl}(t)$ и $C_{kl}(t)$ - амплитуды заселенностей дискретных уровней и состояний непрерывного спектра, R_{nl}, R_{kl} - радиальные функции дискретных уровней и состояний непрерывного спектра, $Y_{l,m}$ - сферическая функция, $w_k = k^2 \Delta k$ - вес квадратуры, n, l и m - главное, орбитальное и магнитное квантовые числа.

Для исследования системы (1) использовалось дипольное приближение. Применимость такого подхода для описания переходов из основного состояния на возбужденные уровни дискретного и непрерывного спектра подтверждается результатами сравнения, полученного на основе численного моделирования распределения заселенностей после действия лазерного импульса, полученного с использованием дипольного приближения и без него.

Особенностью рассматриваемой задачи, отличающей ее от других существующих моделей, является учет необратимости ионизации в атоме, осно-

ванный на использовании искусственного поглощения электронов, которое вводится добавлением в уравнения для амплитуд заселенностей феноменологической ширины уровня непрерывного спектра:

$$\Gamma_k = \Delta E_k \alpha, \quad (2)$$

где E_k - энергия состояния континуума для данного k , $\alpha = 1$ - константа, определяющая ширину уровня для состояния непрерывного спектра. Ширина уровня равна разности энергий между двумя соседними состояниями $\Delta E_k = E_{k+1} - E_k$. В нашем исследовании α задавалась равной 1.

Другой характерной чертой работы является выполнение моделирования для поля с круговой поляризацией. В этом случае, вследствие правил отбора, разрешенными являются только переходы, повышающие значения орбитального и магнитного квантовых чисел на единицу, таким образом, использование поля с круговой поляризацией позволяет эффективнее увеличивать l и m , что способствует более выраженной локализации волнового пакета.

Исследование системы выполнялось на основе численного решения уравнений для амплитуд заселенностей состояний дискретного и непрерывного спектра

$$\begin{aligned} \frac{dC_{nl}(t)}{dt} = & i \sum_k \sum_{l'=l\pm 1} d_{nl}^{k,l\pm 1} \text{Exp}[\pm i(-\frac{1}{n^2} - E_k)t] E(t) \cdot C_{k,l\pm 1}(t) w_k + \\ & + i \sum_{n'} \sum_{l'=l\pm 1} d_{nl}^{n',l\pm 1} \text{Exp}[i(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{n'^2})t] E(t) \cdot C_{n',l\pm 1}(t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\frac{dC_{kl}(t)}{dt} = -\frac{\Gamma_k}{2} C_{kl}(t) + i \sum_n \sum_{l'=l\pm 1} d_{kl}^{n,l\pm 1} \text{Exp}[\pm i(-\frac{1}{n^2} - E_k)t] E(t) \cdot C_{n,l\pm 1}(t) \quad (4)$$

где $d_{nl}^{n',l\pm 1}$, $d_{nl}^{k,l\pm 1}$, $d_{kl}^{n,l\pm 1}$ - дипольные матричные элементы переходов, $E(t)$ - напряженность электрического поля. Огибающая импульса задавалась гауссовой формы $E(t) = E_0 \cdot \text{Exp}[-(2(t - t_0)/T)^2] \sin(\omega t)$, где T - продолжительность импульса, E_0 - амплитуда импульса, ω - его частота, t_0 - соответствует максимальной величине поля.

Численное моделирование выполнялось для различных значений продолжительности, интенсивности и несущей частоты импульса, в том числе соответствующих параметрам импульса титан-сапфирового лазера, а также лазерного комплекса с несущей частотой в оптическом диапазоне. Предполагалось, что в начальный момент времени атомы находятся в основном состоянии. Сравнение результатов численного моделирования, выполненного без учета континуума, а затем с учетом, подтвердило оправданность включения в модель, описывающую систему, переходов в состояния непрерывного спектра. Полученные результаты демонстрируют динамику заселенности под действием лазерного поля и формирование волновых пакетов различной степени локализации.

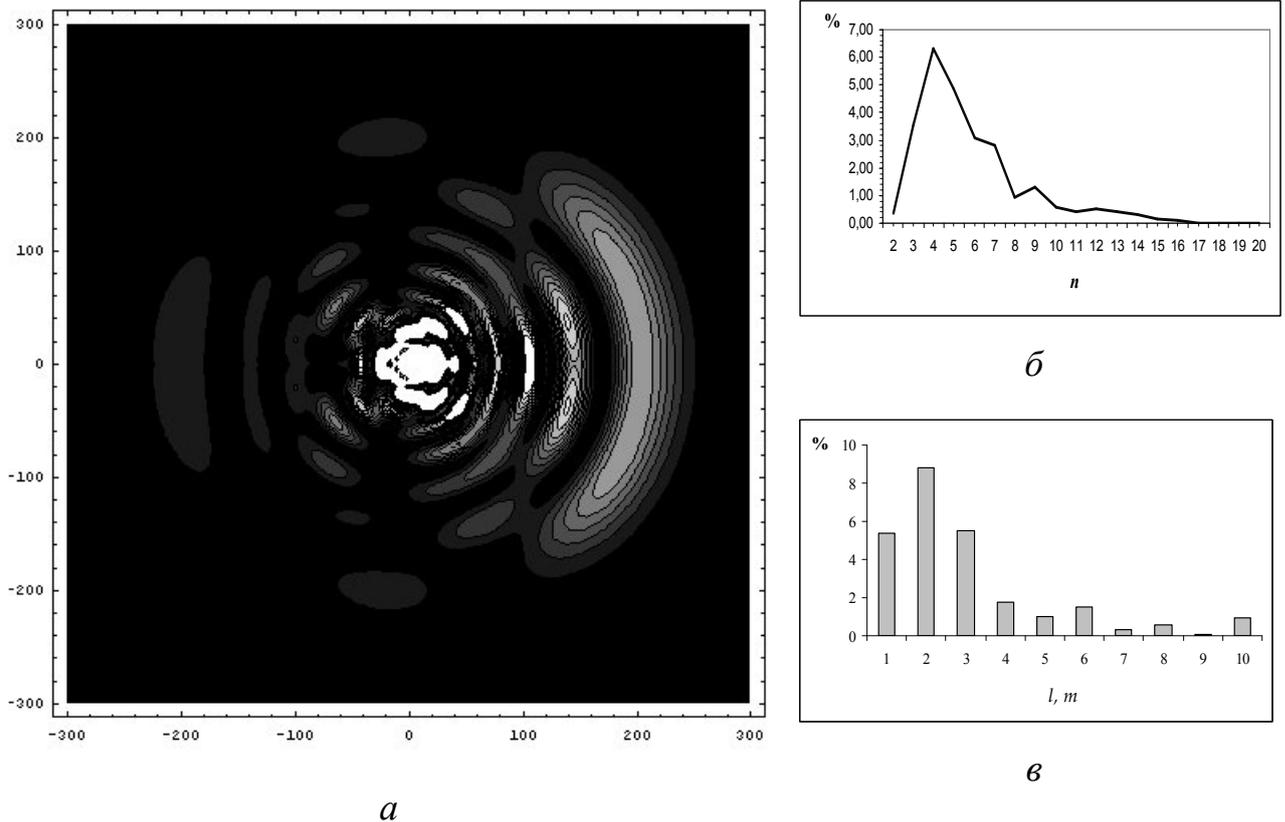


Рис. 1. Распределение плотности вероятности в атоме водорода под действием импульса титан-сапфирового лазера продолжительностью 48 фс, с длиной волны 780 нм и амплитудой $4,59 \times 10^8$ В/см (*a*), распределение заселенностей в процентах по n (*б*), распределение заселенностей в процентах по l и m (*в*).

Полученное состояние, как видно из рисунка, характеризуется частичной локализацией по угловой и радиальной переменной. Основная часть заселенности ($\approx 72\%$) теряется в результате ионизации. Оставшаяся часть распределяется между дискретными уровнями с различными значениями главного, орбитального и магнитного квантовых чисел. В результате исследования было установлено, что существенно на динамику заселенностей в системе влияют переходы между дискретными уровнями, между состояниями дискретного и непрерывного спектра, «горизонтальные» переходы между состояниями с одинаковыми значениями главного квантового числа. Дальнейшее исследование показало, что действие цуга импульсов позволяет повышать значения квантовых чисел во всех степенях свободы.

Снизить величину ионизационных потерь возможно, если для формирования волнового пакета использовать более короткие импульсы с несущей частотой в оптическом диапазоне. Действие такого импульса представлено на рис. 2.

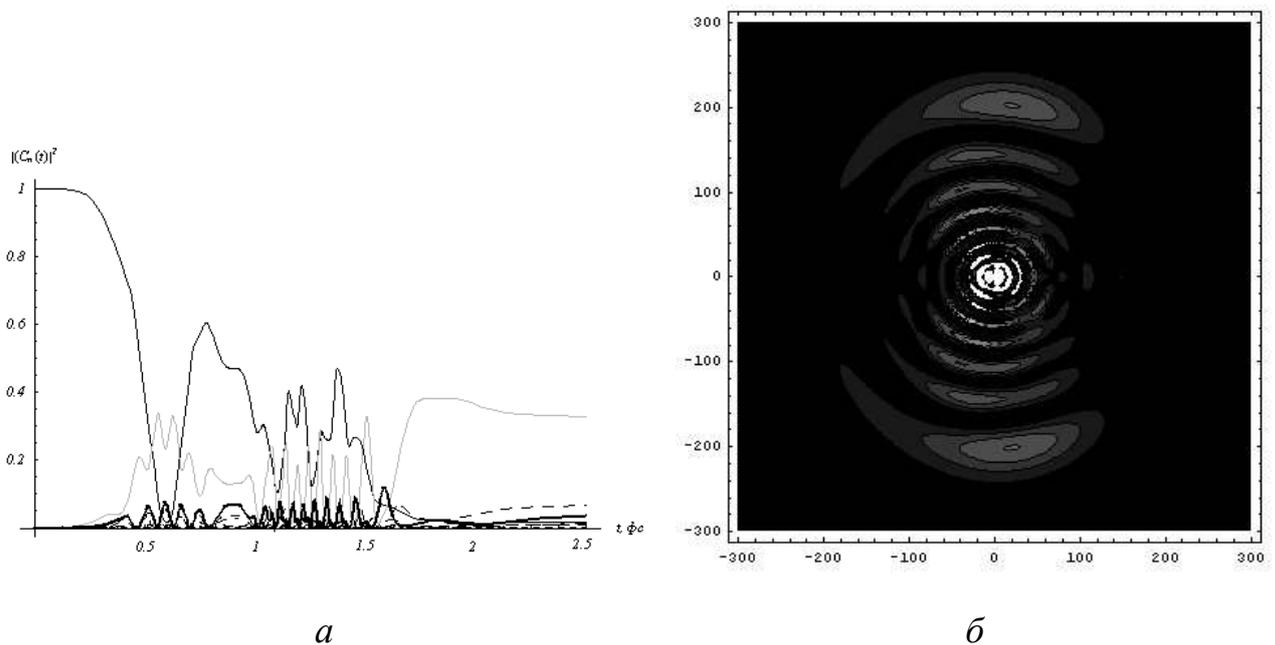


Рис. 2. Динамика заселенностей в результате действия импульса продолжительностью 2 фс, с длиной волны 532 нм и амплитудой $3,57 \times 10^9$ В/см; сплошная линия соответствует основному состоянию, серая – состоянию с $n = 2$, прерывистые линии – состояниям с $n = 3 \div 6$, $l = 1$, жирная линия – со-

стоянию с $n = 3$, $l = 2$ (а). Распределение плотности вероятности после действия импульса (б).

При этом существенно заселяются только состояния с низкими значениями орбитального и магнитного квантовых чисел, ионизационные потери составляют 32%. Последовательность импульсов такой же продолжительности и частоты, но меньшей интенсивности также позволяет получать волновые пакеты, включающие состояния с высокими значениями l и m , при значительно более низких ионизационных потерях.

На основе полученных амплитуд заселенностей состояний дискретного и непрерывного спектра волнового пакета, представленного на рис. 1, рассчитывается среднее значение дипольного момента и его компонента Фурье, для определения интенсивности генерации терагерцевого излучения в атоме водорода под действием импульса титан-сапфирового лазера.

Во **второй главе** представлена техника применения модифицированного обобщенного метода моментов (МОММ) для описания временной эволюции локализованных волновых пакетов ридберговских атомов под действием циркулярно-поляризованного микроволнового и постоянного магнитного полей. Обзор методов, применяемых для описания временной эволюции локализованного волнового пакета под действием внешних полей, показывает, что, как правило, в их основе лежит анализ гамильтониана системы, точек равновесия и нахождение условий, соответствующих устойчивому движению волнового пакета по классической кеплеровской орбите. Используемый в данной работе подход основан на переходе от гамильтониана системы к параксиальному волновому уравнению, решение которого ищется в виде гауссовой функции с параметрами, зависящими от времени. Уравнения для этих параметров, характеризующих волновой пакет как целое: положения его центра, его размеров, ориентации в пространстве, получаются из условий ортогональности невязки

$\hat{H}\psi = \left[4i \frac{\partial}{\partial z} + \nabla_{\perp}^2 + U(x, y) \right] \psi$ функциям ортонормиро-

ванного базиса $|m, n\rangle \equiv |m\rangle_x |n\rangle_y$,

$$\langle mn | \hat{H} \psi \rangle = 0, \quad mn = 00, 01, 10, 11, 20, 02 \quad (5)$$

где $\psi = A \exp[-(\eta \cdot x'^2 + \beta \cdot y'^2 + i \cdot \xi \cdot x''^2 + i \cdot \varepsilon \cdot y''^2)]$ - функция, описывающая эллиптический гауссов пакет в координатах, связанных с главными осями амплитуды и фазы; базис выбирается в виде обобщенных гауссовых мод со смещением

$$\begin{aligned} |0\rangle_x &= N_x \exp[-\eta x'^2 - i \xi x''^2]; & |1\rangle_y &= y' \sqrt{4\beta} |0\rangle_y; \\ |0\rangle_y &= N_y \exp[-\beta y'^2 - i \varepsilon y''^2]; & |2\rangle_x &= \frac{1-4\eta x'^2}{\sqrt{2}} |0\rangle_x; \\ |1\rangle_x &= x' \sqrt{4\eta} |0\rangle_x; & |2\rangle_y &= \frac{1-4\beta y'^2}{\sqrt{2}} |0\rangle_y \end{aligned}$$

Представлено численное решение полученных аналитическим путем уравнений для параметров волнового пакета

$$\frac{dI}{dt} = I \left(\xi + \varepsilon - \frac{\langle 20 | U'' | 00 \rangle}{2\sqrt{2}} - \frac{\langle 02 | U'' | 00 \rangle}{2\sqrt{2}} - \frac{\langle 00 | U'' | 00 \rangle}{2} \right); \quad (6)$$

$$\frac{d\eta}{dt} = \eta [2(\xi \cos^2 \delta + \varepsilon \sin^2 \delta) - \frac{1}{\sqrt{2}} \langle 20 | U'' | 00 \rangle];$$

$$\frac{d\beta}{dt} = \beta [2(\xi \sin^2 \delta + \varepsilon \cos^2 \delta) - \frac{1}{\sqrt{2}} \langle 02 | U'' | 00 \rangle];$$

$$\begin{aligned} \frac{d\xi}{dt} &= \xi^2 - \eta^2 \cos^2 \delta - \beta^2 \sin^2 \delta + \frac{1}{\sqrt{2}} [\eta \langle 20 | U' | 00 \rangle \cos^2 \delta + \\ &\quad \beta \langle 02 | U' | 00 \rangle \sin^2 \delta] + \frac{\sqrt{\eta\beta}}{2} \langle 11 | U' | 00 \rangle \sin 2\delta; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\varepsilon}{dt} &= \varepsilon^2 - \eta^2 \sin^2 \delta - \beta^2 \cos^2 \delta + \frac{1}{\sqrt{2}} [\eta \langle 20 | U' | 00 \rangle \sin^2 \delta + \\ &\quad \beta \langle 02 | U' | 00 \rangle \cos^2 \delta] + \frac{\sqrt{\eta\beta}}{2} \langle 11 | U' | 00 \rangle \sin 2\delta; \end{aligned}$$

$$\frac{d\varphi}{dt} = \sin 2\delta \frac{\eta + \beta}{2(\eta - \beta)} (\varepsilon - \xi) + \frac{\sqrt{\eta\beta}}{2(\eta - \beta)} \langle 11 | U'' | 00 \rangle;$$

$$\begin{aligned} \frac{d\theta}{dt} &= \sin 2\delta \frac{\beta^2 - \eta^2}{2(\xi - \varepsilon)} - \frac{\sqrt{\eta\beta}}{2(\xi - \varepsilon)} \cos 2\delta \langle 11 | U' | 00 \rangle - \\ &\quad \frac{\sin 2\delta}{2\sqrt{2(\xi - \varepsilon)}} [\beta \langle 02 | U' | 00 \rangle - \eta \langle 20 | U' | 00 \rangle]; \\ \frac{dx_I}{dt} &= \alpha \cos \theta + \gamma \sin \theta + \frac{\sin \varphi}{4\sqrt{\beta}} \langle 01 | U'' | 00 \rangle - \frac{\cos \varphi}{4\sqrt{\eta}} \langle 10 | U'' | 00 \rangle; \\ \frac{dy_I}{dt} &= \alpha \sin \theta - \gamma \cos \theta - \frac{\cos \varphi}{4\sqrt{\beta}} \langle 01 | U'' | 00 \rangle - \frac{\sin \varphi}{4\sqrt{\eta}} \langle 10 | U'' | 00 \rangle; \\ \frac{d\alpha}{dt} &= -\gamma \frac{d\theta}{dz} + \frac{\sqrt{\eta}}{4} \cos \delta \langle 10 | U' | 00 \rangle - \frac{\sqrt{\beta}}{4} \sin \delta \langle 01 | U' | 00 \rangle - \\ &\quad \frac{\xi}{4\sqrt{\beta}} \sin \delta \langle 01 | U'' | 00 \rangle + \frac{\xi}{4\sqrt{\eta}} \cos \delta \langle 10 | U'' | 00 \rangle; \\ \frac{d\gamma}{dt} &= \alpha \frac{d\theta}{dz} - \frac{\sqrt{\eta}}{4} \sin \delta \langle 10 | U' | 00 \rangle - \frac{\sqrt{\beta}}{4} \cos \delta \langle 01 | U' | 00 \rangle - \\ &\quad \frac{\varepsilon}{4\sqrt{\beta}} \cos \delta \langle 01 | U'' | 00 \rangle - \frac{\varepsilon}{4\sqrt{\eta}} \sin \delta \langle 10 | U'' | 00 \rangle, \end{aligned}$$

где $I = |A|^2$, $\alpha = \xi((x_p - x_I) \cos \theta + (y_p - y_I) \sin \theta)$, $\gamma = \varepsilon((x_p - x_I) \sin \theta - (y_p - y_I) \cos \theta)$, $\delta = \varphi - \theta$, $\langle nm | U' | kl \rangle$, $\langle nm | U'' | kl \rangle$ - матричные элементы действительной и мнимой части функции $U(x, y)$, которая определяется из выражения для потенциальной энергии гамильтониана

$$U(x, y) = \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2}} + 2i\omega_c \left(x \frac{\partial \psi}{\partial y} - y \frac{\partial \psi}{\partial x} \right) - \omega_c^2 (x^2 + y^2) + 4\sqrt{2}F(x \cos \omega_f t + y \sin \omega_f t).$$

Уравнения (6) решались численно для различных начальных параметров. Пример траектории центра волнового пакета, полученной описанным методом, показан на рис. 3.

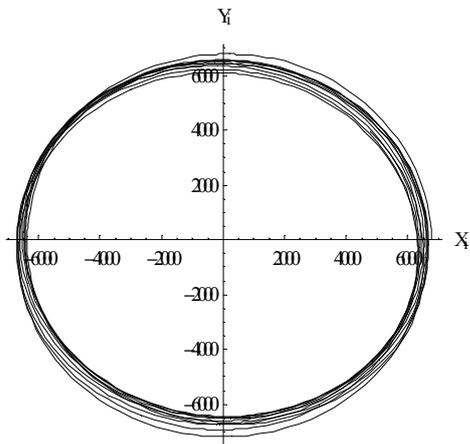


Рис. 3. Траектория движения центра волнового пакета с координатами (X_i, Y_i) , измеряемыми в атомных единицах, при параметрах внешних полей $\omega_c = 0,1272340426 \times 10^{-4}$ а.е., $\omega_f = 6,36170213 \times 10^{-6}$ а.е., $F = 0,3889537145 \times 10^{-6}$ а.е.

При заданных параметрах поля траектория волнового пакета близка к круговой (рис. 3), а его центр движется во внешнем минимуме эффективного потенциала. Первоначально пакет задается практически круглой формы, с течением форма пакета становится эллиптической в плоскости x - y , он совершает осцилляции, расширяясь и затем, сжимаясь, и через некоторое время может распадаться. Параметры внешних полей, обеспечивающие такой тип движения, были подобраны эмпирически. Для оценки точности полученных результатов, проводилось моделирование при параметрах, используемых другими авторами, которое показало, что характер динамики в системе, совпадает с результатами их исследований. Таким образом, наша модель, основанная на использовании обобщенного модифицированного метода моментов, продемонстрировала возможность моделировать долговременную динамику пакета с достаточной гибкостью, обеспечиваемой большим числом вариационных параметров, имеющих непосредственный физический смысл. Такой подход особенно полезен при исследовании перехода от квантового описания к классическому.

Третья глава посвящена технике исследования метастабильных состояний атома антипротонного гелия при помощи лазерного когерентного метода. В начале главы дается краткий обзор результатов теоретического и экспериментального изучения атомкул, рассматриваются типичные схемы переходов. Особенностью распада метастабильных состояний антипротона в гелии являются радиационные переходы внутри каскада $(n, l) \rightarrow (n-1, l-1)$. Каждый каскад, характеризуемый $\nu = n - l - 1$, ограничен снизу короткоживущим аннигиляционным уровнем, а сверху состояниями, которые быстро опустошаются за счет внешних факторов. Рассматривалась возможность изучения заселенностей каскадов с $\nu = 1, 0$, соответствующих наиболее удаленным орбитам антипротона в гелии, посредством воздействия последовательности π -импульсов, связывающих «горизонтальные» межкаскадные переходы, и в результате применения одиночного короткого импульса достаточно большой спектральной ширины, возбуждающего одновременно несколько

переходов в различных каскадах.

Используемая модель переноса заселенностей в системе под действием лазерных импульсов основана на технике лазерного когерентного метода. Она включает уравнения для матрицы плотности, описывающие взаимодействие многоуровневой системы с многочастотным импульсным излучением.

$$\dot{\hat{\rho}} = -\frac{i}{\hbar}[\hat{H}\hat{\rho}] - \frac{1}{2}(\hat{\Gamma}\hat{\rho} + \hat{\rho}\hat{\Gamma}) + \hat{\Lambda}, \quad (6)$$

где $\hat{\rho}$ - оператор плотности с матричными элементами $\rho_{ik} = \langle i|\hat{\rho}|k\rangle$, матрица гамильтониана \hat{H} такой системы имеет вид

$H_{ij} = \hbar\omega_i\delta_{ij} + V_{ij}(t)$, где $\hbar\omega_i$ - энергия i -го уровня, $V_{ij}(t)$ - матричные элементы, описывающие взаимодействие переходов с лазерным полем.

Упрощенная феноменологическая модель релаксации атома задается матрицей $\Gamma_{ij} = \gamma_i\delta_{ij}$, где γ_i - скорость релаксации i -го уровня.

Матрица $\Lambda_{ij} = \delta_{ij}\rho_{i+1,j+1}\gamma_{i+1}$, описывает перенос заселенностей в результате спонтанных переходов вниз по каскаду. Так как доминирующая роль принадлежит радиационным переходам из данного состояния на следующее вниз по каскаду, учитываются только эти переходы, а излучательные переходы между каскадами исключены.

На основе данной модели получены результаты численного исследования динамики заселенностей в каскадах уровней антипротонного гелия под действием одного и нескольких импульсов с различной продолжительностью, интенсивностью и несущей частотой, демонстрирующие методику управления заселенностью метастабильных уровней одновременно в трех каскадах. Действие одиночного импульса большой спектральной ширины показано на рис. 4. Можно видеть, что взаимодействие с импульсом вызывает переходы между уровнями $(37,34)\rightarrow(36,33)$, $(37,35)\rightarrow(36,34)$, $(37,36)\rightarrow(36,35)$ и перенос заселенности состояний принадлежащих каскадам с $v = 2, 1, 0$.

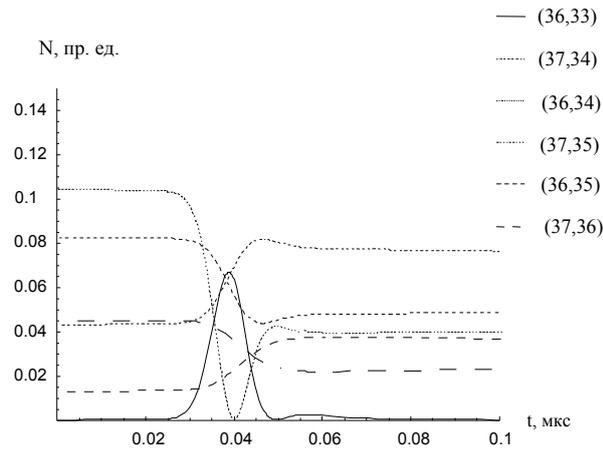


Рис. 4. Кинетика распада атома антипротонного гелия под действием импульса продолжительностью 10 нс, резонансного к переходу $(37,34) \rightarrow (36,33)$.

В Заключении резюмируются основные результаты и оцениваются перспективы работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты проведенного исследования можно сформулировать следующим образом:

1. На основе численного решения временного уравнения Шредингера в базисе собственных функций дискретного и непрерывного спектра атома водорода продемонстрирована возможность формирования ридберговских волновых пакетов с различной степенью локализации под действием лазерного импульса. Исследование выполнялось в рамках модели, включающей от 20 до 101 уровней атома водорода и область континуума, представленную в виде ограниченного, но достаточно большого набора дискретных состояний. Результаты показали применимость дипольного приближения для описания переходов между основным состоянием, возбужденными состояниями дискретного спектра, состояниями континуума.

2. Предварительные расчеты, выполненные на основе модели, включающей основное состояние и состояния дискретного и непрерывного спектра со значениями орбитального и магнитного квантовых чисел, равными

единице, позволили грубо определить характер взаимодействия, участвующие в нем уровни и условия, необходимые для переноса заселенности из основного состояния. Добавление в предлагаемую модель состояний с высокими значениями орбитального и магнитного квантовых чисел и учет переходов между ними позволили исследовать процесс формирования волновых пакетов различной степени локализации под действием одного или нескольких импульсов с круговой поляризацией.

3. Исходя из требований к амплитуде и продолжительности импульса, была рассмотрена возможность применения титан-сапфирового лазера для получения волновых пакетов ридберговских атомов, включающих состояния с высокими значениями орбитального и магнитного квантовых чисел. Исследование на основе модели, включающей все эффективно задействованные переходы между уровнями дискретного и непрерывного спектра, а также обеспечивающей учет ионизационных потерь, заданных при помощи феноменологической ширины уровня состояний непрерывного спектра, установило, что под действием импульса титан-сапфирового лазера может происходить формирование частично локализованного волнового пакета, включающего состояния с высокими значениями квантовых чисел во всех степенях свободы, хотя, вследствие низкой частоты лазерного поля, значительную долю в результирующей суперпозиции состояний составляют низковозбужденные уровни.

4. Проведенное исследование подтвердило существенную роль «горизонтальных» переходов, при которых не изменяется главное квантовое число, в распределении заселенностей под действием титан-сапфирового лазера, и также высокую вероятность ионизации атома.

5. Для описания долговременного поведения уже созданного локализованного состояния ридберговского электрона в атоме водорода был предложен приближенный метод описания временной эволюции волнового пакета под действием циркулярно-поляризованного микроволнового и постоянного магнитного полей. На основе модифицированного обобщенного метода мо-

ментов удалось построить математическую модель долговременной динамики пакета в виде системы обыкновенных дифференциальных уравнений для зависящих от времени параметров, характеризующих положение, форму, размеры и ориентацию пакета, аппроксимируемого обобщенной функцией Гаусса. Работоспособность модели проверена на устойчивых режимах, подобных классическому движению электрона по боровской орбите. Результаты свидетельствуют о возможности успешного применения МОММ для приближенного описания временной эволюции пакета, контроля изменений его формы и других характеристик.

6. С помощью численного моделирования были сделаны новые шаги в разработке методов управления заселенностью метастабильных уровней антипротонного гелия при помощи лазерных импульсов. Предложена техника определения заселенностей метастабильных уровней в каскадах с $v = 1,0$ при помощи межкаскадных переходов на уровни каскада с $v = 2$, а, затем, в результате переходов по данному каскаду, на короткоживущее аннигиляционное состояние, производящее всплеск во временном спектре задержанной аннигиляции, пропорциональный заселенности соответствующего уровня. Результаты исследования подтвердили возможность использования последовательности π -импульсов с несущей частотой поля настроенной в резонанс с каждым отдельным переходом для инверсии заселенностей уровней при существующих скоростях релаксации и матричных элементах дипольного момента переходов. Существующие лазерные комплексы обеспечивают достижение параметров лазерного поля необходимых для связывания таких инфракрасных «горизонтальных» переходов. Были определены временные ограничения на продолжительность инвертирующего импульса в случае связывания переходов на короткоживущее состояние, было показано, что при продолжительности импульса 10 нс половина заселенности теряется во время действия импульса вследствие быстрой утечки с аннигиляционного уровня, что сказывается на форме выходного сигнала аннигиляции.

7. Рассмотрена возможность применения одиночного импульса боль-

шой спектральной ширины для связывания переходов и контроля заселенности уровней антипротонного гелия одновременно в трех каскадах. В этом случае система лазеров, настроенных в резонанс к отдельным переходам, может быть заменена одним, что позволяет облегчить экспериментальное исследование атомкул. Было показано, что такой импульс при достаточно высокой интенсивности воздействует одновременно на уровни с одинаковыми значениями n одновременно в трех каскадах, производя различную степень инверсии заселенностей взаимодействующих состояний. Если нижним состоянием перехода является аннигиляционное состояние, выбор достаточно короткого импульса позволяет инвертировать заселенность короткоживущего уровня, и таким образом избежать аннигиляции. Комбинация рассмотренных техник дает возможность посредством лазерных импульсов получать состояния антипротонного гелия с заданными параметрами, в том числе соответствующих наиболее удаленным орбитам антипротона в гелии и, таким образом, замедлять процесс аннигиляции.

Основное содержание работы изложено в следующих публикациях:

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК РФ

1. Тепер Н.И., Дербов В.Л. Динамика заселенностей в атоме водорода под действием ультракороткого импульса лазерного излучения // Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика. 2008. Т. 16. № 1. С. 115-123.
2. Дербов В.Л., Серов В.В., Тепер Н.И. Исследование излучения атома водорода под действием импульса титан-сапфирового лазера // Компьютерная оптика. 2010. Т. 34. № 2. С. 156-161.

Публикации в других изданиях

3. Derbov V.L., Teper N.I. Investigation of localized wave packets of Rydberg atoms // Telecommunications and Radio Engineering. 2009. V. 68(6), P. 541-548.
4. Derbov V.L., Teper N.I. Forming of Rydberg wave packet under the action of the pulse of Ti:sapphire laser // Proceeding of SPIE. 2009. V. 7501. P. 75010I.

5. Дербов В.Л., Тепер Н.И. Формирование локализованных волновых пакетов в атоме водорода под действием ультракоротких лазерных импульсов. // Проблемы оптической физики и биофотоники: Материалы 13-ой Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике. - Саратов: Изд-во «Новый ветер», 2009. С. 121-125.

6. Тепер Н.И., Дербов В.Л. Водородоподобный атом в поле титан-сапфирового лазера // Проблемы оптической физики: Материалы 12-ой Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофотонике. Саратов: СГУ, 2009. С. 124-126.

7. Derbov V.L., Teper N.I. Dynamics of populations in hydrogen atom under the action of ultra-short laser pulse // Радиофизика и электроника. Харьков: ИРЭ НАН Украины. 2008. Т. 13. № 2. С. 263-270.

8. Derbov V.L., Teper N.I. Numerical modeling of dynamics of populations in hydrogen atom under the action of ultra-short laser pulses // Proceedings of 12th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory, June 29 – July 02, 2008, Odessa, Ukraine. 2008. P. 268-270.

9. Derbov V.L., Teper N.I. The formation of angularly and radially localized Rydberg wave packet in hydrogen atom under the action of sequence of ultra-short laser pulses // Proceedings of the Eighth International Young Scientists' Conference on Applied Physics: June, 11-13, 2008, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Ukraine. 2008. P.26-28.

10. Тепер Н.И., Дербов В.Л. Исследование локализованных пакетов ридберговских атомов // Радиофизика и электроника. Харьков: ИРЭ НАН Украины. 2008. Т. 13. № 1. С. 105-109.

11. Тепер Н.И., Дербов В.Л. Исследование динамики заселенностей в атоме водорода под действием лазерного излучения // Проблемы оптической физики: Материалы 11-ой Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофизике. Саратов: СГУ, 2008. С. 112-118.

12. Teper N.I., Derbov V.L. Laser excitation of localized wave packets of Ryd-

berg states // Proceeding of SPIE Laser Physics and Photonic, Spectroscopy and Molecules Modeling. 2007. Vol. 6537. P. 65370N.

13.Тепер Н.И., Дербов В.Л. Лазерное возбуждение локализованных волновых пакетов ридберговских атомов // Проблемы оптической физики: Материалы 10-ой Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике и биофизике. Саратов: СГУ, 2007. С. 123-127.

14.Derbov V.L., Bychenkov A.I., Teper N.I., Serov V.V. Some new approaches to modeling wave packets of Rydberg states // Proc. SPIE Laser Physics and Photonic, Spectroscopy and Molecules Modeling. 2004. V. 5476. P. 175-179.

15. Дербов В.Л., Быченков А.И., Серов В.В. Тепер Н.И. Новые подходы к моделированию волновых пакетов ридберговских состояний // Проблемы оптической физики. Саратов: СГУ, 2004. С. 338-343.

16.Derbov V.L., Melnikov L.A., Teper N.I., Umanskii I.M., Vinitsky S.I. Excitation of antiprotonic helium by a single laser pulse of variable intensity // Proceeding of SPIE. 2001. V. 4243. P. 131-138.

17.Тепер Н.И., Дербов В.Л., Мельников Л.А., Уманский И.М. Численное исследование заселенностей в $p\text{He}^+$ под действием лазерных импульсов // Материалы Международной молодежной научной школы по оптике, лазерной физике. Саратов: СГУ, 2000. С. 45-47.

18.Derbov V.L., Melnikov L.A., Teper N.I., Umanskii I.M. Numerical modeling of some peculiarities of multi-pulse excitation of antiprotonic helium // Proc. SPIE. 2000. V. 4002. P. 273-279.

19.Derbov V.L., Melnikov L.A., Teper N.I., Umanskii I.M. Coherent laser pulse technique for study and control of metastable antiprotonic helium // Proceeding of SPIE. 1999. V. 3726. P. 265-269.

20.Derbov V.L., Teper N.I. Forming of Rydberg wave packet under the action of the pulse of Ti:sapphire laser // International Conference of Ultrafast and Nonlinear Optics, September 14-18, 2009, Burgas, Bulgaria. 2009. P. 38.

21. Derbov V.L., Teper N.I. Application of Ti:sapphire laser for excitation of localized wave packets // 2nd International Conference on Physics of Optical Materials and Devices, August 26-30, 2009, Herceg Novi, Montenegro. 2009. P. 182.

22. Дербов В.Л., Тепер Н.И. Исследование динамики заселенностей в атоме водорода под действием импульса титан-сапфирового лазера // VIII Харьковская конференция молодых ученых «Радиофизика и электроника», 25-27 ноября 2008: Материалы конференции. Харьков: ИРЭ НАН Украины, 2008. С.109.

23. Дербов В.Л., Тепер Н.И. Исследование динамики заселенностей в атоме водорода под действием лазерного излучения // VII Харьковская конференция молодых ученых «Радиофизика и электроника», 12-14 декабря 2007: Материалы конференции. Харьков: ИРЭ НАН Украины, 2007. С.109.