

ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ЯДЕРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

На правах рукописи

УДК 530.145+539.124.6+539.189

Есеев Марат Каналбекович

**ЭКЗОТИЧЕСКИЕ АТОМЫ И ИОНЫ В ИНТЕНСИВНЫХ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЯХ**

Специальность: 01.04.16 – физика атомного ядра и элементарных
частиц

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Дубна 2014

Работа выполнена на кафедре теоретической физики ФГАОУ ВПО
«Северный Арктический федеральный университет имени М.В. Ломоносова»

Научные консультанты:

член-корр. РАН, доктор физико-математических наук, доктор физико-математических наук, профессор	И.Н. Мешков (советник дирекции ОИЯИ, Дубна) В.И. Матвеев (зав. каф. теоретической физики САФУ, Архангельск)
--	--

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, доцент	В.А. Астапенко (профессор каф. радиоэлектроники и прикладной информатики МФТИ, Москва)
доктор физико-математических наук, профессор	П.А. Головинский (профессор каф. инноватики и строительной физики ВГАСУ, Воронеж)
член-корр. РАН, доктор физико-математических наук	Н.Н. Колачевский (главный научный сотрудник ФИАН, Москва)

Ведущая организация:

Институт автоматизации и электрометрии
СО РАН, Новосибирск

Защита состоится “___” _____ 2014 г. в ___ ч. ___ мин. на заседании
диссертационного совета Д 720.001.01 в Лаборатории теоретической физики
им. Н.Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований, ул.
Жолио-Кюри 6, г. Дубна, Московская область, 141980.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИЯИ.

Автореферат разослан “___” _____ 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук

А.Б. Арбузов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Исследования в области физики экзотических атомов ведутся во многих мировых научно-исследовательских центрах. Недавние успехи по генерации и долговременному удержанию атомов антиводорода позволяют продвинуться в изучении антивещества, проверке СРТ-инвариантности, объяснению барионной асимметрии Вселенной. Сам термин - экзотические атомные и молекулярные системы (ЭАМС) – возник из-за того, что составляющими данных систем, кроме обычных электронов и нуклонов, могут быть и другие, более экзотические элементарные частицы. Достаточно отметить, что такие ЭАМС во множестве рождаются в верхних слоях атмосферы под действием космического излучения или на внутренних мишенях в ускорителях и накопителях. Отчасти название таких систем объясняется необычностью свойств ЭАМС и процессов с их участием. Иногда к таким системам относят обычные, но в экзотических состояниях – ридберговских, со слабосвязанным внешним электроном в отрицательных ионах и т.д. Особый как теоретический, так и практический интерес вызывает поведение атомно-молекулярных систем и их компонентов в интенсивных электромагнитных полях. Сама генерация и удержание ЭАМС в лабораторных условиях невозможна без использования электромагнитных ловушек и накопителей. В диссертации приведены экспериментальные и теоретические результаты по поиску оптимальных параметров накопления позитронов в ловушке Пеннинг-Малмберговского типа для последующей генерации атомов позитрония или антиводорода. Для генерации ЭАМС необходимо описание упругих и неупругих процессов взаимодействия потоков позитронов, антипротонов, электромагнитного излучения с атомами и молекулами. В работе рассмотрено замедление позитронов и антипротонов в среде и динамика образования и развала связанных систем с учетом возможных внешних воздействий в виде электромагнитных полей. Рассматривается тушение метастабильности антипротонного гелия, развал позитрония, ионизация мезоатома в столкновениях и при воздействии интенсивного электромагнитного поля ультракоротких импульсов. Прогресс в генерации и использовании ультракоротких импульсов электромагнитного поля позволяет использовать их для исследования различных систем, включая экзотические. Интенсивность поля таких импульсов сопоставима и превосходит внутриатомную, что позволяет исследовать роль внутриатомных сил, корреляции движений частиц, связанных кулоновскими силами. Малая продолжительность таких импульсов, приближающаяся к аттосекундному рубежу [1], дает возможность проследить за внутренней динамикой, скорость которой определяется характерным временем. В диссертации также рассматривается рассеяние и неупругие процессы возбуждения, излучения,

ионизации интенсивным электромагнитным полем ультракоротких импульсов различных малочастичных систем, включая экзотические (позитроний, мезоатом, различные ионы).

Физика антивещества стала развиваться с 1928 года, когда Поль Дирак предположил наличие античастиц, которые вскоре были обнаружены. Первой частицей, зафиксированной экспериментально в камере Вильсона К.Д. Андерсоном, стал позитрон в 1932 году. К середине XX века было открыто множество античастиц, включая антипротон и антинейтрон. Затем началось синтезирование экзотических ядер антидейтрона, антигелия и др. К концу XX века прогресс в экспериментальных и теоретических методах позволил создавать экзотические атомы в лабораториях: каонные и мюонные изотопы водорода и мезомолекулы, антипротонный гелий и первый атом антивещества – антиводород. Эксперименты в CERN в конце 2011 года на установке ALPHA продемонстрировали возможность удержать антиводород в магнитной ловушке с лазерным охлаждением в течение 17 минут [2]. Продолжают совершенствоваться методики накопления и удержания отдельных компонентов антивещества – античастиц. Наиболее известный экспериментальный центр позитронной физики под руководством К. Сурко находится в Калифорнийском университете в Сан-Диего. В настоящее время Сурко и его группа занимаются исследованиями процесса взаимодействия позитронов с атомами и молекулами [3]. В лаборатории университета уже строят крупнейшую в мире ловушку низкоэнергетических позитронов, способную хранить одновременно более триллиона частиц антивещества. Еще один центр на территории Соединенных Штатов располагается в университете Калифорнии в Риверсайде. Именно там, в 2007 году Д. Кэссиди и А. Миллсу удалось получить молекулярный позитроний [4], а также позитроний в ридберговских состояниях [5] с большим временем жизни при помощи ловушки, разработанной вышеупомянутым К. Сурко и лазерного излучения, исследуются оптические переходы в молекулярном позитронии [6]. В России в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) под руководством И.Н. Мешкова построен накопитель позитронов с электронным охлаждением LEPTA для генерации потоков ортопозитрония [7]. Один из составных элементов установки – электромагнитная ловушка, позволяющая накапливать и формировать пучки позитронов. В Германии в центре GSI в проекте FAIR на установке FLAIR планируются исследования физики антипротонов и ионов [8]. В целом ситуация в области генерации и исследования свойств экзотических атомов продолжает быстро изменяться [9]. Это подтверждают недавние результаты по исследованию внутриатомных переходов в антиводороде [10], эксперименты по действию гравитации на антивещество [11] с целью проверки применимости КЭД и СРТ-теоремы.

В последние годы бурный подъем переживает лазерная физика в области генерации ультракоротких импульсов электромагнитного поля (УКИ). Эти импульсы из-за их малой продолжительности, сопоставимой с атомным временем, могут проявить внутреннюю динамику атомных и молекулярных систем. Известны успехи в области фемтохимии, отмеченные в 1999 году Нобелевской премией (А. Зивэйл). Значительные успехи в области генерации и использования ультракоротких импульсов электромагнитного поля [12] стимулирует исследования поведения позитрония и других ЭАМС в полях ультракоротких импульсов [13]. Рост интереса к физике таких импульсов связан не только с современными тенденциями лазерной физики и возможностями генерации ультракоротких импульсов [14], но и со значительным прогрессом в технике ускорителей тяжелых ионов, поскольку поля, создаваемые релятивистскими и ультрарелятивистскими заряженными частицами схожи по своим свойствам к полю сжатого светового импульса электромагнитной волны. Например, в экспериментах [15] (см., также [16-19]) исследовалась двойная и однократная ионизация атома He ударом быстрого тяжелого многозарядного иона U^{92+} (энергия 1 ГэВ/нук.) и моделировался сверхинтенсивный (более 10^{19} Вт/см²), и сверхкороткий (~ 1 аттосек.) импульс. Получение все более коротких и мощных импульсов электромагнитного поля дает большие перспективы для планирования экспериментов по исследованию экстремальных состояний материи в области атомной и ядерной физики, физики плазмы, физики элементарных частиц. Активно исследуется поведение атомных и молекулярных систем в поле аттосекундных импульсов [20,21]. Обсуждаются возможности генерации йоктосекундных импульсов в кварк-глюонной плазме [22], рождение электрон-позитронных пар в поле сверхинтенсивных импульсов [23], лазерное ускорение заряженных частиц [24], изучение динамики нуклонов в ядре [25]. Процессы с участием отрицательных ионов (ОИ) имеют большое значение в различных технических приложениях [26]. Интерес к ОИ связан, прежде всего, с возможностью быстрого и управляемого высвобождения слабосвязанного электрона. Поведение ОИ в поле ультракоротких импульсов (УКИ) электромагнитного поля активно исследуется в последнее время. В работах [27, 28] рассматриваются вероятности отрыва слабосвязанного электрона от атомарных ОИ в поле УКИ.

Исследования возможностей генерации экзотических атомов и их взаимодействий с ультракороткими импульсами электромагнитного поля аттосекундной длительности, создаваемыми лазерами или пучками релятивистских многозарядных ионов могут быть востребованы для решения многих научных и прикладных задач в оптике и спектроскопии, физике плазмы, астрофизике, физике экзотических атомов, материаловедении. Это делает

выбранное направление исследований актуальным и востребованным для дальнейшего прогресса в вышеперечисленных областях.

Объект исследования: малочастичные системы с кулоновским взаимодействием, включая экзотические (позитроний, мезоатом, антипротонный гелий, водород и водородоподобные ионы, гелий, атомарные отрицательные ионы (ОИ) водорода и галогенов, молекулярные отрицательные ионы галогенов, молекулярный положительный ион и молекула водорода), и их компоненты (пучки электронов и позитронов) в интенсивных электромагнитных полях.

Предмет исследования: образование и распад экзотических атомных и молекулярных малочастичных систем, динамические процессы ионизации, переходов, переизлучения в интенсивных электромагнитных полях ультракоротких электромагнитных импульсов, которые могут быть созданы, в том числе, и пучками релятивистских тяжелых многозарядных ионов, с учетом корреляционных, интерференционных и ориентационных эффектов.

Цель и основные задачи исследования: Создание и развитие методов накопления позитронов и электронов в электромагнитных ловушках для формирования пучков и последующей генерации экзотических атомно-молекулярных систем. Исследование поведения таких систем в интенсивных электромагнитных полях ультракоротких импульсов путем развития непertурбативных методов квантовой теории, описывающих взаимодействие ультракоротких импульсов аттосекундной и меньшей длительности с атомными и молекулярными системами как фундаментальных квантово-электродинамических процессов на связанных электронах, позитронах, мюонах.

Для реализации поставленной цели решены следующие **основные задачи:**

- исследование динамики сгустка электронов и позитронов в ловушке и выявление роли вращающегося электрического поля в процессе сжатия, долговременного удержания и формирования пучка накапливаемых частиц;
- расчет и оптимизация параметров режима накопления электронов и позитронов с экспериментальной проверкой в «ловушке Сурко» накопителя ЛЕРТА для последующей генерации экзотических атомов;
- анализ процессов столкновений с участием экзотических атомов, приводящих к их распадам: «стряхивание» мюона в мезоатомах в процессе мюокатализа в кратных столкновениях в DT_μ смеси и при взаимодействии с последовательностью УКИ, тушение метастабильности антипротонного гелия примесями;
- развитие теории процессов возбуждения и развала связанных состояний малочастичных систем, включая экзотические, индуцированных

аттосекундными импульсами электромагнитного поля с учетом ориентационных эффектов и межчастичных корреляций;

- анализ процессов переизлучения УКИ электромагнитного поля при взаимодействии с малочастичными системами (включая экзотические) и выявление интерференционных, ориентационных эффектов, межчастичных корреляций при этом.

Основные результаты, полученные в работе

- предложена трехмерная (3-D) модель накопления электронов и позитронов в «ловушке Сурко», исследована динамика частиц в этой модели и объяснено влияние вращающегося поля и других параметров ловушки на процесс накопления, удержания и сжатия пучка позитронов;
- произведена проверка предложенной модели на результатах экспериментального исследования накопления электронов и позитронов в «ловушке Сурко» с вращающимся электрическим полем установки ЛЕРТА; оптимальные параметры накопления и удержания позитронов подтверждают основные критерии предложенной модели, что позволяет рассчитывать параметры физических установок для генерации атомов позитрония и антиводорода;
- разработан метод расчета скорости замедления позитронов с учетом аннигиляции в веществе в интенсивных электромагнитных полях;
- получены значения сечений «стряхивания» мюона в мезоатомах в результате неупругих процессов при кратных столкновениях и взаимодействиях с УКИ;
- уточнены значения сечений тушения метастабильности антипротонного гелия при столкновениях с примесями;
- разработан метод расчета вероятностей неупругих процессов и ионизации при взаимодействии аттосекундного лазерного импульса с малочастичными системами с кулоновским взаимодействием;
- разработан метод расчета вероятностей переизлучения при взаимодействии аттосекундного лазерного импульса с малочастичными системами с кулоновским взаимодействием;
- получены спектры переизлучения и ионизации при взаимодействии малочастичных систем с ультракороткими импульсами электромагнитного поля, выявлены корреляционные, ориентационные и интерференционные эффекты при этом взаимодействии;
- предложена возможность управления и контроля состояниями атомарных и молекулярных систем, включая экзотические с помощью УКИ.

Указанные результаты получены впервые, что определяет их **научную новизну**.

Научные положения, выносимые на защиту:

1. Трехмерная модель, описывающая динамику накапливаемых частиц в электромагнитной ловушке, позволяет сформулировать механизм, объясняющий наблюдаемый в экспериментах резонансный характер влияния вращающегося электрического поля на процесс накопления, удержания, сжатия и формирования пучка позитронов в ловушке с выделением роли связи продольных баунс-осцилляций и концентрации позитронов с частотой вращения поля.
2. Механизм замедления пучка заряженных частиц, влетевших в среду в широком интервале энергий, делает возможным простой расчет замедления позитронов при влете потока позитронов от радиоактивного источника в ловушку и охлаждение позитронов внутри ловушки при столкновениях с молекулами буферного газа с учетом аннигиляций.
3. Механизм «стряхивания» мюона в мезоатомах за счет кратных столкновений и реакций в DT-смеси существенно уменьшает коэффициент прилипания мюона и увеличивает количество циклов мюонного катализа.
4. Метод расчета вероятностей неупругих процессов на основе обобщения приближения внезапных возмущений, вызванных ультракороткими импульсами электромагнитного поля, делает возможной простую аналитическую оценку сечений и вероятностей неупругих процессов возбуждения, ионизации в ЭАМС с учетом ориентационных эффектов и межчастичных корреляций.
5. Метод квантовомеханического расчета позволяет в рамках приближения внезапных возмущений и КЭД описывать неупругие процессы переизлучения ультракоротких импульсов на связанных электронах и позитронах с учетом интерференционных, ориентационных эффектов и межчастичных корреляций в малочастичных системах с кулоновским взаимодействием.

Теоретико-методологическая основа исследования. Исходя из перечисленных задач, для их решения применялись непertурбативные методы теории приближения внезапных возмущений, метод потенциалов нулевого и конечного радиуса, теория возмущений, метод вторичного квантования в применении к теории излучения, вычислительные методы с использованием языков программирования C++ и MATHEMATICA. В силу специфики задач, широко использовались как традиционные, так и разработанные с участием автора методы, в частности теория переизлучения УКИ при взаимодействии с атомами и молекулами. Экспериментальные исследования, которые, с одной стороны, необходимо было выполнять для решения основной задачи данной работы, и которые, с другой стороны, необходимы для апробации корректности

основных результатов и выводов работы, основаны на методах накопления и удержания заряженной плазмы античастиц (позитронов) для формирования пучков и последующей генерации экзотических атомов позитрония.

Достоверность результатов и выводов диссертационной работы обеспечивается строгостью используемых математических методов и моделей, непротиворечивостью результатов и выводов, их согласованностью с современными представлениями классической электродинамики, квантовой теории, сопоставлением с теоретическим и экспериментальными результатами других исследователей, доступностью простых аналитических оценок и экспериментальными проверками, сделанными при непосредственном участии автора в ОИЯИ (г. Дубна) на установке LEPTA.

Практическая значимость исследования заключается, прежде всего, в том, что решена научная проблема поиска оптимальных параметров накопления заряженных частиц в ловушках Пеннинг-Малмберговского типа и представлено объяснение механизма действия вращающегося электрического поля. Проведенное исследование имеет важное значение для последующей генерации атомов позитрония и антиводорода. Предложенные в работе методы исследования взаимодействий УКИ с малочастичными системами с кулоновским взаимодействием, включая экзотические, позволяют с помощью УКИ электромагнитного поля не только контролировать, но и управлять внутренними процессами.

Результаты, полученные в ходе работы над диссертацией, нашли применение в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (Дубна, Россия) и могут быть использованы в таких научно-исследовательских институтах и лабораториях как Positron Lab (Риверсайд, США), Университет Сан Диего (США), ALPHA (ЦЕРН, Женева, Швейцария), FAIR (GSI, Дармштадт, Германия), Институт Пауля Шеррера (PSI, Швейцария).

Связь с плановыми работами. Работа выполнялась в рамках плановых научно – исследовательских работ кафедры теоретической физики Института естественных наук и биомедицины Северного Арктического федерального университета имени М.В. Ломоносова. Часть работ была выполнена при финансовой поддержке в виде грантов Российского фонда фундаментальных исследований (№ 08-02-90700 и № 09-02-90731) и ФЦП Министерства образования Российской Федерации "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России", соглашение № 14.А18.21.1302.

Апробация результатов исследования. Результаты работы докладывались на международных и всероссийских конференциях, съездах и симпозиумах: ASACUSA theory workshop (ЦЕРН, Женева, Швейцария, 2000), Int. RIKEN Conference Muon Catalyzed Fusion and Related Exotic Atoms – MuCF01 (Шимода, Япония, 2001), Зимней школе ПИЯФ (Санкт-Петербург,

Репино, 2003), международной конференции фундаментальная атомная спектроскопия (ФАС-18, Звенигород, 2007; ФАС-19, Архангельск, 2009; ФАС-20, Воронеж, 2013), Третьем Всероссийском совещании "Прецизионная физика и фундаментальные физические константы" (С. Петербург, 2010 г.), Международной конференции RuPAC (RuPAC 08, Звенигород, 2008; RuPAC 10, Протвино 2010; RuPAC 12, Санкт-Петербург 2012), Международных конференциях по электронному охлаждению COOL (COOL 09, Ланчжоу, Китай, 2009; COOL11, Алушта, Украина, 2011; COOL13, Женева, Швейцария, 2013), Международных семинарах по проблемам ускорителей заряженных частиц памяти В.П.Саранцева (Алушта, Украина, 2009, 2011), Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, XXXVII-ой конференции, 2010, XXXVIII-ой конференции, 2011, XL-ой конференции, 2013), International Topical SPARC Workshop and Lecture Days (Москва, 2011), XXIV-ом Съезде по спектроскопии (Москва, 2010), EMMI Workshop, Physics Prospects at FLAIR - The Facility for Low-Energy Antiproton and Ion Research (GSI, Дармштадт, Германия, 2012). Также результаты по материалам диссертационной работы докладывались на семинаре кафедры теоретической физики Северного (Арктического) федерального университета (Архангельск), семинаре Сектора электронного охлаждения Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ (Дубна), семинаре «Малочастичные системы» и семинаре «Теория ядра» Лаборатории теоретической физики ОИЯИ (Дубна), семинаре Отделения ядерной физики и астрофизики ФИАН (Москва), семинаре «Квантовая оптика» Института автоматики и электрометрии СО РАН (Новосибирск).

Публикации. Представленные в диссертации результаты опубликованы в 45 основных работах, в том числе 21 статья в рецензируемых периодических изданиях, рекомендуемых ВАК (перечень ВАК, Web of Science/Scopus). Кроме того опубликовано 5 статей в материалах специализированных конференций, индексируемых в базе данных Scopus, остальные работы представляют собой публикации в трудах конференций и сборниках, иных журналах, отчет по НИР, монографию по теме исследования. Список публикаций автора приведен в конце автореферата.

Личный вклад автора. Из работ по теме диссертации, выполненных в соавторстве, включены результаты, которые были получены лично автором или при его определяющем участии в постановке задач и разработке методов их решения. В части работ с представлением экспериментальных результатов по теме исследования автор участвовал в обсуждении, планировании и проведении экспериментов, а также в интерпретации и теоретической оценке их результатов. В работах 2001 года [A20, A21] автору принадлежат лишь разработка методов численных расчетов и результаты расчета тушения

метастабильности антипротонного гелия примесями. Под руководством автора подготовлена одна диссертация на соискание степени кандидата физико-математических наук.

Объем и структура диссертации. Диссертация содержит в себе две части по двум циклам работ автора, объединенные общей темой, вынесенной в название. Работа состоит из введения, шести глав и заключения, приложений и списка использованной литературы. Общий объем 248 страниц, включая 12 таблиц, 56 рисунков и список цитируемой литературы из 246 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации, дан краткий анализ проблем, решаемых в диссертации, и сформулированы цели и задачи исследования. Здесь приводятся новые результаты, вошедшие в работу, выдвигаются защищаемые положения, структура работы. Раскрыто основное содержание работы по главам. Обсуждаются практическая значимость и достоверность результатов исследования, приведены данные об их апробации и публикациях по теме работы.

В этой **части I** работы обсуждаются основные принципы физики экзотических атомов, их образование и распад и рассматриваются основные направления физических экспериментов с позитронными, мюонными и электронными пучками. Исследуется динамика сгустков позитронов и электронов в ловушках для последующей генерации экзотических атомов позитрония и антиводорода. Исследования распада мезоатомов и атомов антипротонного гелия в столкновениях позволяют выявить особенности этих процессов, что может помочь как в практических приложениях, так и в фундаментальном исследовании свойств экзотических атомов и антиматерии.

В первом разделе **первой главы** дан обзор методов накопления заряженной плазмы в различных ловушках (Пауля, Пеннинга, Пеннинга-Малмберга, модификации Сурко), кратко описаны эксперименты по накоплению позитронов, ионов. Во втором разделе представлены результаты по теоретическому исследованию динамики накопления позитронной и

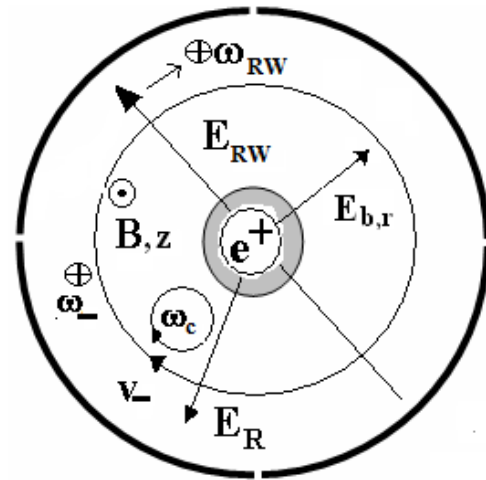


Рис. 1: Поперечный разрез ловушки. Схематичное изображение поперечных полей и дрейфов для позитронного сгустка

электронной плазмы в ловушке с вращающимся электрическим полем Пеннинг-Малмберговского типа на основе аналитического решения уравнений движения. На рис. 1 представлены поперечные по отношению к оси симметрии (ось z) ловушки поля: \mathbf{B} – магнитная индукция однородного продольного поля, \mathbf{E}_R – напряженность электрического поля пространственного заряда накапливаемых частиц, $\mathbf{E}_{b,r}$ – поперечная составляющая напряженности электрического поля, создаваемая потенциалами электродов ловушки), в которых движутся позитроны, \mathbf{E}_{RW} – вращающееся с частотой ω_{RW} электрическое поле («Rotating Wall», «вращающейся стенка» – RW) в области разрезных электродов в т.н. «ловушке Сурко». Роль вращающегося поля и его применение раскрыты ниже. В продольном направлении в открытых ловушках данного типа движение заряженных частиц с массой m и зарядом e ограничивает электростатическое поле на запирающих концевых электродах. Распределение потенциала можно аппроксимировать зависимостью $U(z, r) = U_0(z^2 - r^2/2)/(2d^2)$, где $d^2 = (Z_0^2 - R_0^2/2)/2$, $Z_0 = L_0/2$ определяются геометрическими размерами ловушки в области накопления (L_0 – длина и R_0 – радиус области). Решения уравнений содержит две составляющих: продольное движение (баунс-осцилляции) позитронов, влетевших в ловушку с начальной продольной фазой φ_0

$$z = z_0 \cos[\omega_z t + \varphi_0] \quad (1)$$

и поперечное движение – быстрое циклотронное вращение с радиусом r_+ и частотой $\omega_+ \approx \omega_c$ и медленное дрейфовое движение с радиусом r_- и магнетронной частотой (в области вне вращающегося поля)

$$\omega_- \approx (\omega_p^2 + \omega_z^2) / 2\omega_c \ll \omega_c. \quad (2)$$

Здесь $\omega_z = \sqrt{eU_0 / md^2}$ – баунс-частота, $\omega_p = \sqrt{4\pi ne^2 / m}$ – плазменная частота, n – концентрация накапливаемых частиц, $\omega_c = eB / mc$ – циклотронная частота. Уравнение (2) справедливо в сильном магнитном поле, когда концентрация пространственного заряда сгустка позитронов мала $B \gg c\sqrt{2\pi nm}$. В третьем разделе рассмотрено действие буферного газа на движение позитронов, буферный газ необходим для захвата частиц в область накопления. Здесь сформулирован механизм замедления потока заряженных частиц влетевших в среду в широком интервале энергий, позволяющий исследовать замедление и охлаждение позитронов при столкновении с молекулами буферного газа внутри ловушки. Действие буферного газа (для захвата позитронов используется обычно молекулярный азот N_2 , выбор этого газа обусловлен особенностями аннигиляций позитронов в требуемом при накоплении диапазоне энергий) в первом приближении можно свести к вязкому трению с силой $F_{fr} = -k \cdot v$, где k

– коэффициент трения, v – скорость частицы. Скорость потерь энергии E позитронов в упругих и неупругих столкновениях можно оценить как: $-dE/dt = \langle \Delta E \rangle \nu = F_{fr} v = kv^2$, где $\langle \Delta E \rangle$ – средняя потеря энергии за столкновение в каком-либо процессе, ν – частота столкновений: $\nu = \sigma n_N v$, где σ – сечение процесса, n_N – концентрация молекул N_2 . Используя известные сечения, получаем численные значения приведенного к массе коэффициента трения $K = k/m = \sigma n_N v \langle \Delta E \rangle / (2E)$ для упругих и неупругих процессов. В области сравнительно больших энергий (порядка энергии ионизации, диссоциации и возбуждения электронных уровней молекулы) потери энергии существенны и коэффициент K велик. В области малых энергий существенными становятся диссипации энергии позитронов на возбуждение колебательных и вращательных уровней в молекуле. При снижении энергии позитронов остается вклад в коэффициент трения только упругих столкновений с малыми передачами энергии при столкновении $\Delta E = 2mE/M$, где M – масса молекулы. Роль трения в поперечном движении позитронов в ловушке сводится к двум эффектам. К относительно быстрому уменьшению радиуса циклотронного движения и медленному увеличению радиуса магнетронного движения, ведущему к дрейфу позитронов на стенки ловушки и аннигиляции:

$$\xi(t) = x + iy = r_+ e^{-Kt} e^{i(\omega_+ t + \Phi)} + r_- e^{Kt(\omega_-/\omega_c)} e^{i(\omega_- t + \Phi)}. \quad (3)$$

Здесь x, y – координаты частицы, r_+, r_- – радиусы циклотронного и магнетронного движения, Φ – фаза позитронов при влете в ловушку. В продольном направлении происходит экспоненциальное затухание баунс-осцилляций (1) с показателем порядка K . Четвертый раздел содержит анализ действия вращающегося поля на дрейф частиц. Эффект вращающегося поля, используемый в модификации ловушки Пеннинга-Малмберга («ловушке Сурко») не имеет ясного теоретического объяснения в литературе, несмотря на широкое его использование для сжатия и увеличения времени удержания при накоплении ионов, позитронов и других заряженных частиц в ведущих научно-исследовательских центрах. Действие вращающегося поля можно представить как параметрическое возбуждение движения через введение мощности, передаваемой частице RW-полем:

$$P(t) = e\mathbf{E}_{RW} (\dot{\mathbf{r}}_+ + \dot{\mathbf{r}}_-) = eE_{RW} \times \\ \times \left(r_+ \omega_+ \sin \left[\{ \omega_{RW} - \omega_+ \} t + \Phi_{RW} \right] + r_- \omega_- \sin \left[\{ \omega_{RW} - \omega_- \} t + \Phi_{RW} \right] \right). \quad (4)$$

В пятом разделе предложена 3-D модель накопления, в рамках нее описывается механизм сжатия позитронного сгустка, влияние вращающегося поля с выделением роли связи продольных баунс-осцилляций позитронов с частотой вращающегося поля и концентрацией позитронов. Суть механизма сводится к следующему. Из анализа выражения (4) видно, что RW-поле способно

оказывать систематическое действие, не исчезающее при усреднении по времени, только в том случае, когда его частота совпадает с циклотронной или магнетронной частотами.

Магнетронный радиус, определяющий поперечное движение частицы, в условиях резонанса будет изменяться при влете частицы в область действия RW-поля как

$$r_-(t) = r_-(0) - (e/m) E_{RW} t \sin[\Phi_{RW}] / (\omega_+ - \omega_-). \quad (5)$$

Здесь $r_-(0)$ - начальный магнетронный радиус, Φ_{RW} - фаза влета при влете частицы в RW-поле. Само действие в этом случае может привести к уменьшению радиуса (5) при соответствующем значении фазы влета частицы в RW-поле. Таким образом, условие резонанса – совпадение частот RW-поля и магнетронного движения имеет вид:

$$f_{RW} = \frac{\omega_-}{2\pi} = \frac{\omega_p^2 + \omega_z^2}{4\pi\omega_B}. \quad (6)$$

Следует отметить, что действие RW-поля имеет резонансный характер, как в случае больших концентраций накопленных частиц ($\omega_p \gg \omega_z$), так и в случае малых концентраций ($\omega_p \ll \omega_z$). Для эффективного влияния RW-поля на поперечное движение частиц необходимо, чтобы частицы входили в поле в нужной фазе. За фазу влета позитронов в RW-поле отвечает продольное движение (1) с учетом затухания осцилляций. Поэтому необходимо согласование частоты вращающегося поля еще и с частотой продольных баунс-осцилляций ω_z . В итоге можно сделать вывод: уменьшение радиуса вращения позитрона и предотвращение его аннигиляции на стенках ловушки возможно при согласовании частоты поперечного магнетронного вращения с частотой RW-поля, т.е. при выполнении условия (6) и кратности частоты продольных баунс-осцилляций с частотой вращающегося поля $N\omega_z = \omega_{RW}$.

Вторая глава содержит исследование накопления позитронных и электронных сгустков в «ловушке Сурко» установки ЛЕРТА. В первом разделе приведено описание тороидального накопителя низкоэнергетичных частиц ЛЕРТА (ОИЯИ, Дубна) для генерации направленных пучков ортопозитрония. Представлены результаты по оптимальной толщине замедлителя позитронов из радиоактивного источника (^{22}Na) (твердый неон) для формирования монохроматического пучка на входе в ловушку. При этом позитроны, влетевшие в ловушку, должны быть локализованы в области накопления. К. Сурко предложил использовать буферный газ с градиентом давления вдоль ловушки. Модифицированная таким образом ловушка стала носить его имя. Позднее появился еще один метод увеличения эффективности накопления: увеличение времени жизни заряженной плазмы во вращающемся

электрическом поле. Эффект «вращающейся стенки» был обнаружен в экспериментах по накоплению плазменного сгустка ионов Mg^+ [29]. Затем аналогичные результаты были получены как для электронной, так и для позитронной плазмы [30], [31]. Метод вращающегося поля используется для генерации антиводорода в проекте ATHENA/ALPHA [32]. Успешное использование этого метода позволило приступить к исследованию свойств антивещества и экзотических атомно-молекулярных систем. Определяющим при накоплении здесь являются частота и направление вращения поля в плоскости, поперечной к оси ловушки. Зависимость эффективности накопления от параметров RW-поля носит резонансный характер. В наших экспериментах на установке LEPTA (Low Energy Particle Toroidal Accumulator, ОИЯИ, Дубна) используется ловушка Сурко с вращающимся электрическим полем. Накопленные в ней позитроны инжектируются в накопительное кольцо для дальнейших исследований физики элементарных частиц и экзотических атомов. Ловушка Сурко установки LEPTA имеет геометрию, представленную на рис. 3.

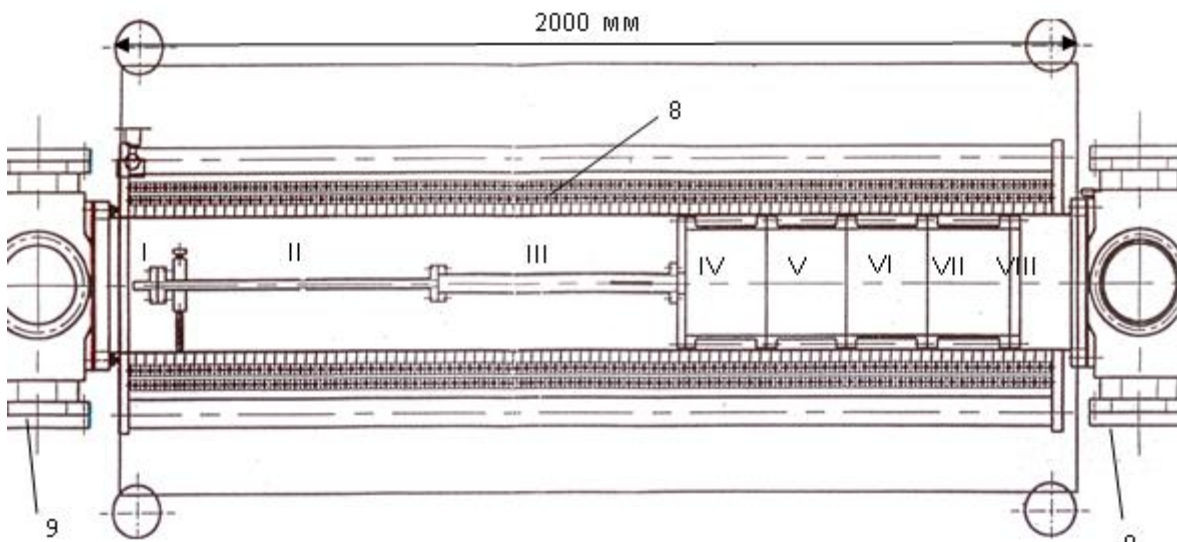


Рис. 3: Схема ловушки Сурко (продольный разрез). I - VIII – электроды, 8 – соленоид, 9 – вакуумные посты

Сборка электродов помещена в цилиндрическую вакуумную камеру. Камера расположена в соленоиде, создающем продольное магнитное поле. На торцах камеры расположены вакуумные насосы, которые создают дифференциальную откачку. Это необходимо как для удаления (до базового вакуума порядка 10^{-9} Торр) остаточного газа, сокращающего время жизни частиц в ловушке, так и для создания градиента давления буферного газа. Последнее достигается благодаря специальной геометрии электродов: восемь изолированных друг от друга цилиндрических электродов, различной длины и диаметра. Газ натекает в систему через отверстие в середине электрода II, а его откачка осуществляется с торцов электродов I и VIII, результате для накопления позитронов между

участками захвата (область I, II электродов) и участком накопления (область IV-VII электродов) создается перепад давления. Во втором разделе на основе разработанного автором физико-математического метода моделирования динамики позитронов в «ловушке Сурко» представлены результаты расчетов и численного моделирования накопления сгустка частиц в ловушке накопителя ЛЕРТА. При численном моделировании использовались результаты аналитических решений уравнения движения из главы 1. Численное решение уравнений движения позитронов в самосогласованном поле по методу Рунге-Кутты позволило учесть неоднородности в распределении по плотности и по скоростям позитронов, влетающих в ловушку, особенности геометрии ловушки и распределение электромагнитных полей в области накопления. Также был учтен диффузионный дрейф позитронов на стенки вакуумной камеры за счет столкновений с молекулами остаточного газа, влияние неоднородностей магнитного поля и аннигиляции позитронов при столкновениях с молекулами буферного и остаточного газа. В результате была найдена зависимость эффективности захвата позитронов ε_{RW} вращающимся полем в фазу, при которой их радиус вращения не увеличивался или уменьшался с учетом диффузии от частоты и амплитуды вращающегося поля. Процесс накопления с хорошей степенью точности описывается зависимостью числа накопленных в ловушке частиц от времени $N(t) = \varepsilon_{RW} \varepsilon \dot{N} \tau (1 - e^{-t/\tau})$. Здесь \dot{N} - поток частиц влетающих в ловушку из источника, ε - эффективность захвата частиц в область накопления из потока, τ - время жизни сгустка при удержании. В

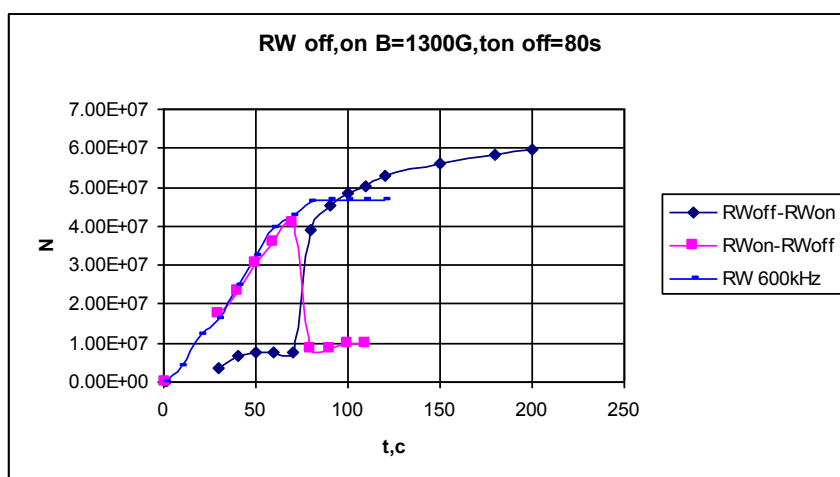


Рис. 4: Динамика процесс накопления при включении-выключении RW-поля. Кривая с квадратиками – после 80 секунд накопления с вращающимся полем поле было отключено. Кривая с ромбиками – через 80 секунд накопления без вращающегося поля поле было включено, кривая с прямоугольниками – RW-поля действовало во время всего накопления

третьем разделе результаты расчетов и численного моделирования сопоставляются с данными эксперимента по накоплению позитронной и электронной плазмы. Данные эксперимента (рис. 4) показывают, что именно RW-поле обеспечивает хорошую эффективность накопления: при его включении количество

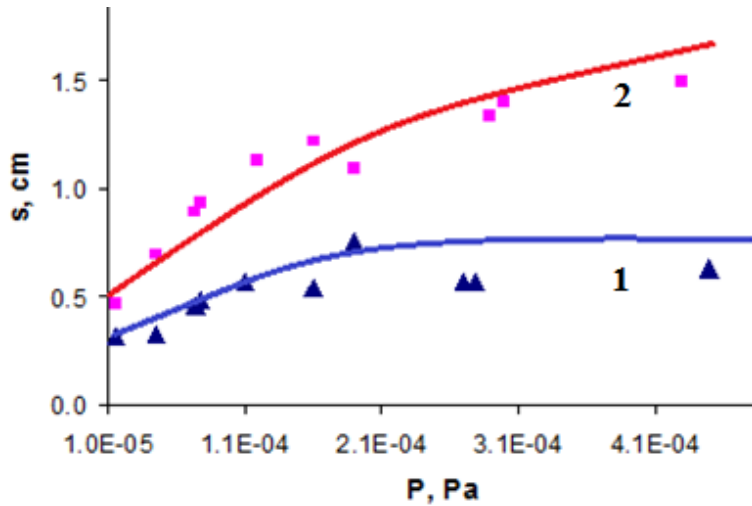


Рис. 5: Зависимость дисперсии гауссова профиля накопленного сгустка от давления буферного газа (азот). Экспериментальные данные обозначены: треугольниками без RW-поля, квадратики с RW-полем. Кривая 1 – расчет без RW-поля, 2 – с влиянием RW-поля с выполнением условия резонанса

накопленных частиц резко возрастает, и наоборот, уменьшается при выключении. Во время эксперимента инъекция частиц в область накопления не прекращалась. Также показательными являются снимки поперечных размеров сгустка накапливаемых частиц, сделанных с помощью CCD камеры. Из анализа снимков можно экспериментально получить оценку

поперечных размеров сгустка частиц, по которой видно, что с включением RW-поля в направлении дрейфа частиц в скрещенных $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ полях сгусток сжимается. При выключении RW-поля происходит его расширение. Приведем обработанные данные по размерам сгустка с учетом расширяющего действия буферного газа на рис. 5.

По экспериментальным и расчетным данным на рис. 5 можно сделать вывод, что с увеличением давления буферного газа поперечный размер сгустка растет, что говорит о увеличении диффузии на стенки за счет возрастания числа столкновений. При этом вращающееся поле способно при выполнении условий резонанса эффективно препятствовать этому процессу. Дополнительно для проверки механизма действия вращающегося поля в рамках продолженной 3-D модели были проведены следующие эксперименты. Для проверки связи резонансной частоты RW-поля с баунс-частотой ω_z проведен эксперимент, в котором изменялась длина области накопления (запирающее напряжение подавалось на VIII, затем на VII, VI, V - электроды). При укорочении длины накопления баунс-частота возрастает, и приходилось повышать частоту RW-поля. Изменение длин области накопления выявили прямую зависимость резонансной частоты от частоты продольных баунс-осцилляций с учетом кратности. Результаты работы по подбору оптимальных параметров накопления позволили осуществить инъекцию пучка накопленных позитронов из ловушки Сурко в накопительное кольцо установки LEPTA. Численные оценки дают хорошее совпадение частоты RW-поля с частотой ω_z . Приведем

также найденные оптимальные параметры накопления частиц в ловушке установки ЛЕРТА в табл. 1.

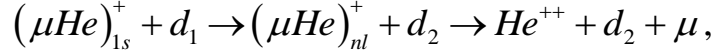
Таблица 1: Оптимальные параметры накопления в «ловушке Сурко» установки ЛЕРТА

Параметр	Интервал изменений	Пояснение
$B, \text{ Гс}$	$1000 \div 1200$	Продольное магнитное поле
$\omega_c, 10^{10} \text{ с}^{-1}$	$1.7 \div 2$	Циклотронная частота
$U_0, \text{ В}$	10	Глубина потенциальной ямы в области накопления с учетом поля пространственного заряда сгустка заряженных частиц
$P, \text{ Торр}, 10^{-6}$	$3 \div 5$	Давление в области накопления с учетом напуска буферного газа N_2
$E_{RW}, \text{ В/см}$	$0.1 \div 0.2$	Амплитуда RW-поля
$f_{RW}, \text{ кГц}$	$600 \div 1200$	Частота вращения RW-поля (зависит от длины области накопления и концентрации частиц), направление вращения должно совпадать с направлением магнетронного движения
$R_0, \text{ см}$	10	Радиус электродов IV-VIII в области накопления
$L_0, \text{ см}$	$16.5 \div 72$	Длина электродов в области накопления
$n, \text{ см}^{-3}$	$10^7 \div 10^8$	Концентрации накопленных частиц
$\omega_p, 10^8 \text{ с}^{-1}$	$1 \div 2$	Плазменная частота
$R, \text{ см}$	$0.25 \div 3$	Радиус поперечного среза накопленного сгустка
$L, \text{ см}$	$12 \div 65$	Длина накопленного сгустка

Приведенные оптимальные параметры электрических, магнитных полей, давления буферного газа при накоплении позитронов в ловушке установки указаны с учетом диапазона изменений в рамках проводимых экспериментов. Приведенные результаты первой и второй главы диссертации позволяют теоретически и экспериментально решить проблему оптимизации методов накопления позитронов в ловушках Пеннинг-Малмбергского типа для последующей генерации экзотических атомов позитрония, антиводорода и др.

В **третьей главе** в первом разделе дан обзор экспериментов по генерации и распадам экзотических атомов антиводорода, позитрония, антипротонного гелия, мезоатома (иона мюонного гелия). Во втором разделе обсуждается возможность применения известного метода приближения внезапных возмущения в задачах о столкновениях атомно-молекулярных систем с источниками интенсивного электромагнитного поля. В третьем разделе исследован механизм «стряхивания» мюона в мезоатомах $(\mu\text{He})^+$ за счет процессов типа «карамболь» при последовательных столкновениях в DT-смеси

с учетом влияния электронных оболочек молекул. Суть процесса сводится к тому, что при выстроенности рассеивающих центров относительно направления движения мезоатома резко увеличивается вероятность высвобождения мюона для последующих мюонно-каталитических реакций термоядерного синтеза в реакциях



где d_1 и d_2 - соответствующие ядра молекулы D_2 . Увеличение происходит за счет того, что учтены процессы, где в первом столкновении происходит возбуждение мезоатома, а во втором последовательном столкновении – ионизация мезоатома из возбужденного состояния. Определены сечения ионизации и вклад выстроенности рассеивающих центров при столкновениях типа «карамболь» с молекулами дейтерия и азота по теории возмущений для быстрых мезоатомов, генерирующихся за счет прилипания мюона в цикле мюонного катализа. Сечение стряхивания мюона за счет ионизации при учете кратных столкновений можно вычислить как

$$\sigma_i = \sigma_{i1} + \Delta\sigma / 2. \quad (7)$$

Здесь σ_{i1} – сечение ионизации мезоатома в борновском приближении на одном рассеивающем центре. В последнем слагаемом в выражении (7) делением на 2 учтено то, что поправка $\Delta\sigma$ относится сразу к двум рассеивающим центрам. Для оценки зависимости сечения ионизации с учетом поправки на эффект «карамболь» от угла выстроенности молекул удобно взять отношение

$$K = \frac{\sigma_i}{\sigma_{i1}} = 1 + \frac{\Delta\sigma}{2\sigma_{i1}}.$$

При расчете последнего слагаемого учтем, что телесный угол выстроенности межъядерных осей молекул $\Omega_L = 2\pi(1 - \cos\theta_m)$, где θ_m - угол раствора конуса, ограничивающий угол Ω_L . На рис. 6 приведены зависимость $K(\theta_m)$ для молекулы дейтерия и азота при различных скоростях столкновений (использована мезоатомная система единиц). По данным (рис. 6) видно, что сечение ионизации мезоатома с учетом поправки может практически вдвое превышать сечение при малых углах выстроенности. С ростом скорости столкновения угловая зависимость уменьшается.

Сравнение зависимостей для молекул D_2 и N_2 позволяет сделать вывод о том, что для азота (большой зарядом ядра) можно наблюдать сильную угловую зависимость при больших скоростях столкновения.

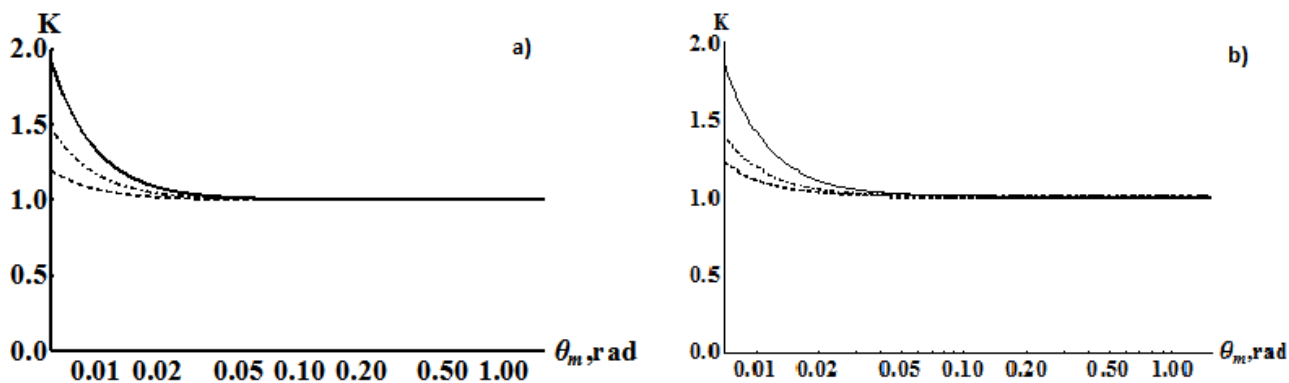


Рис. 6: Зависимость отношения сечений ионизации мезоатома с учетом кратности к сечению без учета кратности K от угла выстроенности для столкновений с молекулой дейтерия (а) и азота (б) при скорости столкновения v равной (а) 4 м.а.е. (сплошная кривая), 6 м.а.е. (штрих-пунктир)), 10 м.а.е. (пунктирная кривая) и (б) 20 м.а.е. (сплошная кривая), 30 м.а.е. (штрих-пунктир)), 40 м.а.е. (пунктирная кривая)

Для наглядного представления увеличения сечений стряхивания по предложенному механизму приведем сравнение с результатами экспериментов и теоретическими расчетами (рис. 7) при типичных энергиях мезоатома порядка 3-4 МэВ.

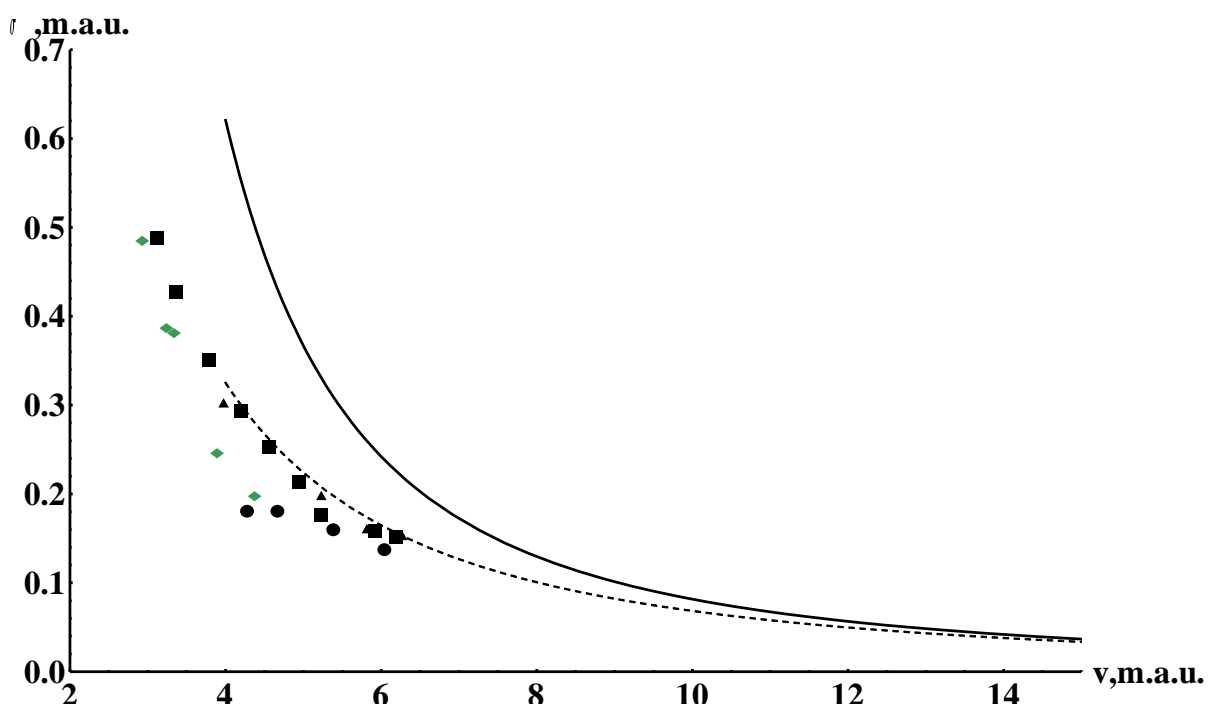


Рис. 7: Зависимость сечений стряхивания мюона и ионизации мезоатома в зависимости от скорости столкновения на дейтронах, рассчитанных с учетом кратности столкновения (сплошная линия) при выстроенности осей молекул в пределах $\theta_m = 10^{-3}$ в расчете на каждый атом. Пунктир – расчет сечения ионизации на изолированных атомах. Теоретические расчеты сечений на изолированных атомах стряхивания мюона из работы [33] – треугольники, [34] – квадратики. Экспериментальные данные [35] – кружки, [36] – ромбики

В четвертом разделе главы рассмотрено тушение метастабильности антипротонного гелия примесями. Определены сечения тушения метастабильности антипротонного гелия примесями инертных газов при столкновениях с молекулами примесей по различным моделям. Рассчитаны также сечения ионизации мюонного гелия при релятивистских скоростях столкновений мезоатома с выстроенными рассеивающими центрами в приближении внезапных возмущений за счет действия электромагнитного поля центров. При численном расчете, основанном на доработанном физико-математическом методе моделирования, дополнительно учтены колебательные степени свободы в сталкивающихся атомах антипротонного гелия и молекуле примеси. Были использованы две модели метастабильности антипротонного гелия – ионная и атомная. Все эти эксперименты проводились как в чистом гелии, так и в гелии с атомарными (благородные газы) и молекулярными (H_2 , N_2 , O_2) примесями. Результаты по тушению метастабильности примесями давали большие значения сечения тушения. Даже небольшое количество примеси давало сильное тушение метастабильности антипротонов и быструю их аннигиляцию. Сделан вывод о том, что большие сечения тушения объясняются сильным дальнедействующим взаимодействием между антипротонным гелием и атомами и молекулами примесей. Это возможно с привлечением ионной модели метастабильности антипротонов в гелии. Рассчитанные в рамках ионной модели сечения тушения метастабильных состояний атомами или молекулами примесей, содержащихся в гелии, близки к экспериментальным данным, тогда как модель Кондо, основанная на "атомкуле", дает гораздо меньшие значения.

Часть II: Взаимодействие обычных и экзотических атомно-молекулярных систем с полями ультракоротких электромагнитных импульсов

Здесь обсуждается поведение малочастичных систем с кулоновским взаимодействием в интенсивных электромагнитных полях ультракоротких импульсов. Предложенные в работе методы исследования взаимодействий ультракоротких импульсов электромагнитного поля с атомными и молекулярными системами, включая экзотические, позволяют выявить корреляционные, интерференционные, ориентационные эффекты, количественно получить спектры переизлучения и спектры при ионизации систем. Также предложенные в работе методы позволяют с помощью ультракоротких импульсов электромагнитного поля не только контролировать, но и управлять внутриатомными процессами в ЭАМС.

Четвёртая глава содержит исследование ионизации и возбуждения атомов и ионов УКИ. В первом разделе дан обзор методов генерации ультракоротких импульсов электромагнитного поля и методов расчета

неупругих процессов в атомах и молекулах под действием таких импульсов. Далее приведены результаты расчета сечений и вероятностей неупругих процессов возбуждения, ионизации атомно-молекулярных систем, включая экзотические при взаимодействии с УКИ. Расчет основан на использовании метода, в основе которого лежит теория внезапных возмущений. Метод сочетает в себе простоту и эффективность и позволяет вычислить не только вероятности возбуждения переходов и ионизации, но определить преимущественные направления вылета компонентов обычных и экзотических атомов при ионизации. Полученные результаты при этом допускают простое аналитическое представление. Ультракороткий импульс электромагнитного поля выбирается в виде гауссова импульса:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 \exp \left\{ -\alpha^2 \left(t - \frac{\mathbf{k}_0 \mathbf{r}}{\omega_0} \right)^2 \right\} \cos(\omega_0 t - \mathbf{k}_0 \mathbf{r}), \quad (8)$$

где \mathbf{k}_0 – волновой вектор, \mathbf{E}_0 – амплитуда напряженности поля в падающем ультракоротком электромагнитном импульсе, ω_0 – несущая частота налетающего ультракороткого импульса, $\alpha \approx 1/\tau$ – параметр затухания в гауссовом импульсе, τ – характерная продолжительность импульса (здесь используем атомную систему единиц). Во втором разделе приведено исследование корреляционных эффектов в атоме гелия. В соответствии с механизмом внезапной передачи импульса вероятность перехода атома гелия из начального состояния $|0\rangle$ в конечное $|n\rangle$ в результате столкновения с быстрым многозарядным ионом выражается через неупругий атомный форм-фактор и имеет вид

$$W_n(\mathbf{q}) = \left| \langle n | e^{-i\mathbf{q}(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)} | 0 \rangle \right|^2,$$

где \mathbf{q} – переданный импульс, \mathbf{r}_i – координаты атомных электронов. Полную вероятность неупругих процессов (одно-, двукратную ионизацию и возбуждения) можно рассчитать как

$$W_{el}(\mathbf{q}) = \left| \langle 0 | e^{-i\mathbf{q}(\mathbf{r}_1 + \mathbf{r}_2)} | 0 \rangle \right|^2$$

$$W_{inel}(\mathbf{q}) = 1 - W_{el}(\mathbf{q}). \quad (9)$$

Для учета электронных корреляций в атоме гелия использовались многопараметрические хиллераасовские волновые функции основного состояния. Результат сравнивался с расчетом по формуле (9) с использованием волновых функций без учета электронных корреляций (симметризованное произведение водородоподобных функций с зарядом $Z_{ef} = 2 - 5/16$). Сделан вывод о том, что учет электронных корреляций заметно увеличивают сечения и вероятности неупругих процессов при столкновении атома гелия с быстрыми заряженными частицами и воздействиях ультракоротких импульсов. В третьем

и четвертом разделе получены вероятности неупругих процессов, спектры ионизации атомарных отрицательных ионов, описываемых в приближении потенциалов нулевого и конечного радиуса, при взаимодействии с УКИ. Исследуется зависимость вероятности ионизации от числа осцилляций в импульсе. В пятом разделе рассмотрен развал атома позитрония в поле УКИ. Атом позитрония, представляющий из себя связанное состояние электрона и позитрона, является уникальным объектом исследования в квантовой электродинамике. Этот экзотический атом, состоящий из лептона и антилептона, позволяет получить новые сведения о природе электрослабого взаимодействия, процессах с участием античастиц, аннигиляции антивещества. Среди экзотических атомов позитроний был получен экспериментально первым и работы по его исследованию продолжаются в ряде лабораторий мира. Особый интерес вызывают процессы лазерного возбуждения атомов позитрония в ридберговские состояния, в которых атомы могут существовать достаточно долго. Нами получены выражения для вероятностей возбуждения и ионизации (развала) при взаимодействии атома позитрония с ультракоротким импульсом электромагнитного поля. При этом мы смогли точно учесть, как пространственную неоднородность поля импульса на размерах атома, так и импульсы испускаемых фотонов. Произведен расчет и сравнение вероятностей неупругих процессов (9) ионизации в атомах позитрония и водорода, вызванных аттосекундными (либо меньшей длительности) импульсами электромагнитного поля. Результаты приведены на рис. 8 и 9. Показано, что вероятность развала позитрония может значительно превосходить вероятность ионизации атома водорода. Причина, состоит в том, что атом позитрония, в силу больших размеров и меньшей энергии связи, более эффективно, чем атом водорода разрушается под действием ультракороткого импульса электромагнитного поля.

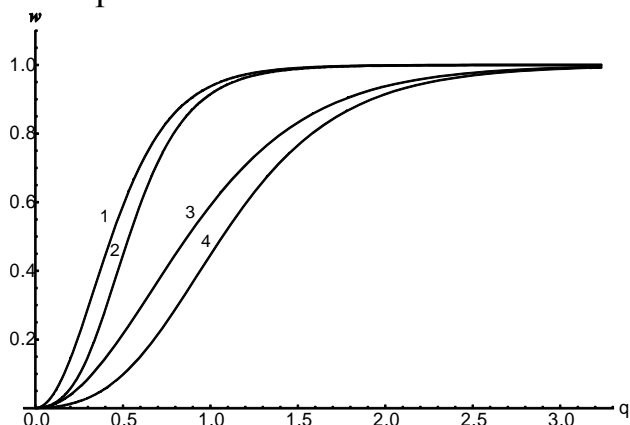


Рис. 8: Вероятности неупругих процессов в зависимости от переданного импульса q . Кривая 1 – вероятность всех неупругих процессов для атома Ps, кривая 2 – вероятность развала атома Ps, кривая 3 – вероятность всех неупругих процессов в атоме H, кривая 4 – вероятность ионизации атома H. Переданный импульс представлен в атомных единицах, все вероятности безразмерны

Импульс вылетевших электрона и позитрона при развале близок к переданному импульсу по величине и направлен противоположно друг другу. В шестом разделе представлены результаты расчета вероятности ионизации мезоатома последовательностью ультракоротких импульсов. Показано, что эта вероятность больше чем во взаимодействиях с изолированными импульсами. Причина здесь в проявлении аналогичного ранее рассмотренному эффекту типа карамболь в столкновениях. В первом взаимодействии мезоатом возбуждается, во втором ионизуется с большей вероятности из возбужденного состояния.

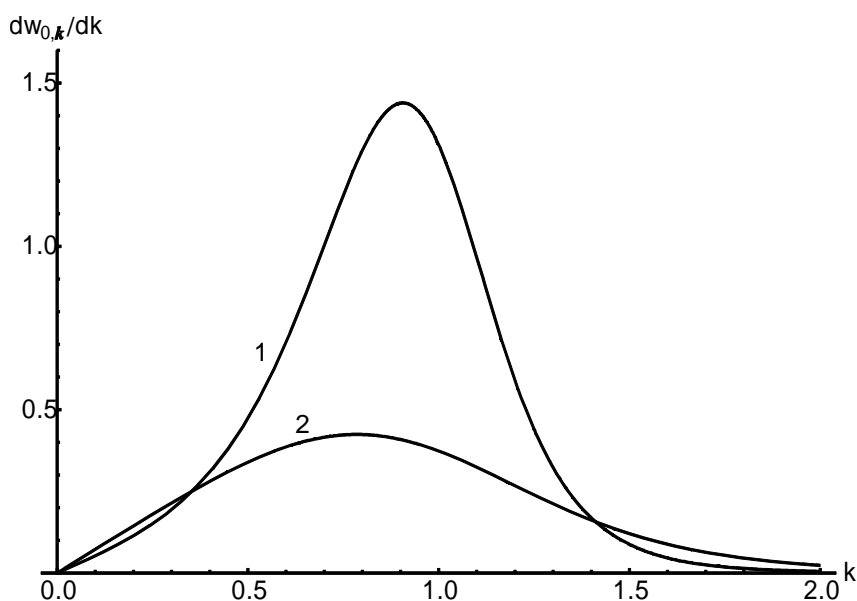


Рис. 9: Зависимость вероятности ионизации от абсолютной величины импульса вылетевшей частицы. Кривая 1 описывает спектр ионизации для позитрона (электрона) в атоме Ps, кривая 2 – распределение по импульсам для вылетевших из атома H электронов. Импульс, переданный атомной системе при взаимодействии $q = 1$ а.е., все величины на рисунке представлены в атомных единицах

В пятой главе исследуется переизлучение УКИ при взаимодействиях с атомами и ионами. В первом разделе дан краткий анализ различных методов и подходов расчета переизлучения и рассеяния УКИ на атомах, молекулах и ионах. Во втором разделе представлен метод, позволяющий в рамках приближения внезапных возмущений и КЭД описывать неупругие процессы переизлучения ультракоротких импульсов на связанных электронах и позитронах в атомно-молекулярных комплексах. При этом взаимодействие атома или иона с УКИ рассчитывается в приближении внезапных возмущения без ограничений на величину поля с учетом возможной пространственной неоднородности падающего импульса. Процесс рождения фотона при переизлучении определяется в первом порядке теории возмущения при условии малости взаимодействия поля излучения с излучателем. С помощью этого

метода произведен расчет спектров переизлучения различных атомов и ионов. В третьем разделе исследованы парциальные спектры атомов водорода и водородоподобных ионов. В четвертом разделе выявлена роль интерференции и межчастичных корреляций при переизлучении УКИ атомом гелия. В пятом разделе получены спектры переизлучения атомарных отрицательных ионов, где излучает слабосвязанный электрон. Произведено сопоставление угловых зависимостей направлений вылета фотона и связанной частицы при переизлучении и ионизации на примере взаимодействия УКИ с ОИ. Показано, что переизлучение идет в основном в направлении перпендикулярном \mathbf{E}_0 , соответствуя классической картине направленности излучения в дипольном приближении, а ионизация в направлении параллельном \mathbf{E}_0 , т.е. в направлении действия силы или переданного импульса. В шестом разделе представлены выводы спектра переизлучения для атома позитрония и его сравнение с ранее полученными в этой главе результатами. Приведем более подробно содержание этого раздела. Рассмотрим в спектре переизлучения фотона с вектором $\mathbf{k} = (\omega/c)\mathbf{n}$ слагаемые с $a = b$ и с $a \neq b$, соответственно. Представим спектр в единицу телесного угла $\Omega_{\mathbf{k}}$, зависящий от направления перерассеяния, в виде

$$\frac{d^2W}{d\Omega_{\mathbf{k}}d\omega} = \frac{d^2W_1}{d\Omega_{\mathbf{k}}d\omega} + \frac{d^2W_2}{d\Omega_{\mathbf{k}}d\omega}, \quad (10)$$

где

$$\frac{d^2W_1}{d\Omega_{\mathbf{k}}d\omega} = \frac{|f_0(\omega)|^2}{(2\pi)^2 c^3 \omega} \langle \phi_0 | \sum_a \{ [\mathbf{E}_0 \mathbf{n}]^2 + (\mathbf{E}_0 \mathbf{r}_a)^2 \frac{\omega^2}{\omega_0^2} [\mathbf{k}_0 \mathbf{n}]^2 \} | \phi_0 \rangle, \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \frac{d^2W_2}{d\Omega_{\mathbf{k}}d\omega} = & \frac{|f_0(\omega)|^2}{(2\pi)^2 c^3 \omega} \langle \phi_0 | \sum_{a,b(a \neq b)} e^{-i\mathbf{p}(\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b)} \{ [\mathbf{E}_0 \mathbf{n}]^2 + \\ & + i \frac{\omega}{\omega_0} ([\mathbf{E}_0 \mathbf{n}] [\mathbf{k}_0 \mathbf{n}]) \mathbf{E}_0 (\mathbf{r}_a - \mathbf{r}_b) + (\mathbf{E}_0 \mathbf{r}_a) (\mathbf{E}_0 \mathbf{r}_b) \frac{\omega^2}{\omega_0^2} [\mathbf{k}_0 \mathbf{n}]^2 \} | \phi_0 \rangle \end{aligned}, \quad (12)$$

Здесь a, b нумеруют излучатели в атоме позитрония – электрон и позитрон, положение которых задается радиусом вектором $\mathbf{r}_{a,b}$, $f_0(\omega)$, функция, возникающая вследствие гауссовой формы налетающего импульса (7) с волновым вектором $\mathbf{k}_0 = (\omega/c)\mathbf{n}_0$:

$$f_0(\omega) = \sqrt{\pi} / (2\alpha) \left(\exp \left\{ -\frac{(\omega - \omega_0)^2}{4\alpha^2} \right\} + \exp \left\{ -\frac{(\omega + \omega_0)^2}{4\alpha^2} \right\} \right).$$

По своему определению, спектр $d^2W_1 / (d\Omega_{\mathbf{k}}d\omega)$ представляет собой сумму двух спектров: спектра излучения фотона только электроном и спектра излучения только позитроном, тогда как спектр $d^2W_2 / (d\Omega_{\mathbf{k}}d\omega)$, очевидно,

обусловлен интерференцией амплитуд процесса излучения электроном и позитроном. Для выявления роли интерференции и других эффектов проведем сравнение энергетических спектров и сечений переизлучения для атомов водорода, гелия, отрицательного иона водорода. Сравнение энергетических спектров для атомов Ps, He, H и H^- приведены на рис. 10. Энергетические спектры позитрония получаются домножением вероятностей (10)-(12) на энергию фотона. Спектры нормированы на максимальное значение переизлучения атома Ps. Мы видим, что атом водорода переизлучает меньше всех. Отрицательный ион водорода переизлучает больше за счет больших поперечных размеров системы, на которой происходит рассеяние падающего импульса. Двухчастичные системы переизлучают еще больше за счет количества источников переизлучения. При этом атом гелия, несмотря на меньшие, чем у атома позитрония, размеры, переизлучает чуть больше энергии. Это свидетельствует о большем вкладе интерференционной части спектра $d\varepsilon_2 / d\omega$ в гелии.

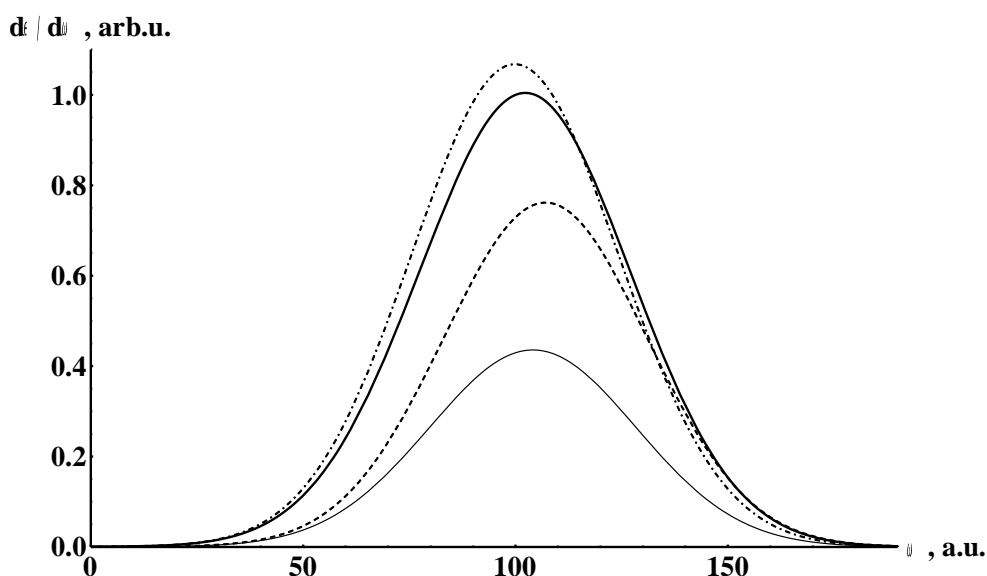


Рис. 10: Энергетический спектр переизлучения ультракороткого импульса аттосекундной длительности на различных атомных объектах. Тонкая сплошная линия – для атома H, пунктирная – анион H^- , жирная сплошная линия - атом Ps, штрихпунктир – атом He. В падающем импульсе (8) напряженность поля $E_0 = 2$ а.е., $\omega_0 = 100$ а.е.

Вклад интерференционных эффектов в полный спектр переизлучения ультракороткого импульса электромагнитного поля атомом позитрония удобно характеризовать отношением

$$\frac{d\sigma}{d\sigma_H} = \frac{d\sigma / d\omega}{d\sigma_H / d\omega} = 2 + \frac{3G(\omega^2 / c^2)}{4(1 + \omega^2 / c^2)}. \quad (13)$$

Аналогичное соотношение $d\sigma_{He} / d\sigma_H$ можно записать для гелия с заменой в (13) функции

$$G(b) = \frac{(1+b)}{4y^3} \left(\frac{4b(1+2b)}{1+4b} - \ln(1+4b) \right)$$

на функцию

$$J(\beta) = 8[5 + 2\beta[5 + 4\beta] / [15(1 + 2\beta^3)]]$$

и аргументов ω^2 / c^2 на $\omega^2 / [Z_{ef}c]^2$. На рис. 11 представлены зависимости

$d\sigma / d\sigma_H$, arb.u.

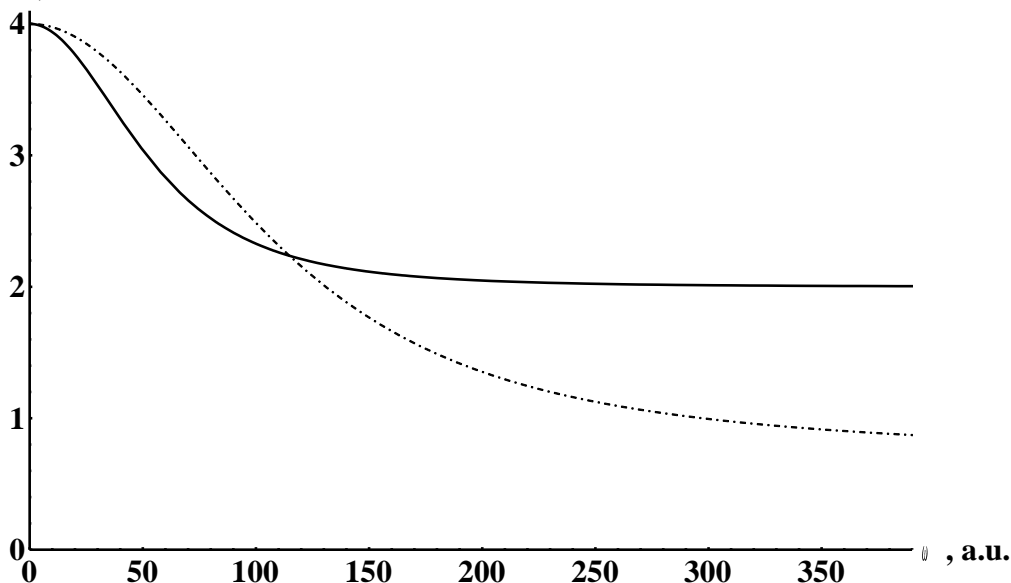


Рис 11: Отношения дифференциальных сечений переизлучения атома Ps (жирная сплошная линия) и атома He (штрихпунктир) по отношению к дифференциальному сечению для атома H

относительного вклада интерференционных эффектов в дифференциальное сечение перерасеяния от частоты испущенного фотона ω . Как видно из рис. 11, интерференционный вклад для атомов Ps и He уменьшается с ростом частоты излучаемого фотона, причем в широком интервале частот вклад интерференционных эффектов в дифференциальное сечение при низких частотах достигает 50%, уменьшаясь с ростом частоты до 10% лишь при достаточно больших $\omega \approx 120$ ат.ед. (при этом $\omega/c \approx 0,88$). Сечение перерасеяния ультракороткого импульса вследствие явления интерференции ведет себя в полном соответствии с классическим случаем. В области низких частот дифференциальное сечение перерасеяния двухчастичных (по числу излучателей) систем в четыре раза превышает значение дифференциального сечения для одночастичных систем, т.е. пропорционально квадрату числа излучателей. В области высоких частот, где интерференция отсутствует, сечения становятся пропорционально числу излучателей и кроме того зависят от размеров систем на которых происходит рассеяние. Поэтому отношение

сечений перерассеяния для гелия и водорода асимптотически выходит на значение, равное $2/Z_{ef}^2$. Также можно заметить, что в атомах Ps и He по-разному происходит интерференция между излучением электрона и позитрона и электрона и электрона в промежуточной области частот. Излучение от электронов в He лучше интерферирует, чем излучение от электрона и позитрона в Ps. Это, видимо, объясняется тем, что в атоме гелия излучающие частицы находятся ближе друг к другу, чем в атоме позитрония.

Таким образом, нами получены выражения для спектров и сечений переизлучения при взаимодействии атома позитрония с ультракоротким импульсом электромагнитного поля. При этом мы смогли точно учесть, как пространственную неоднородность поля импульса на размерах атома, так и импульсы испускаемых фотонов. Проведен расчет вероятности излучения одного фотона частицей и античастицей, составляющих атом позитрония. Произведен расчет и сравнение спектров и сечений переизлучения в атомах позитрония, водорода, гелия и отрицательного иона водорода, вызванных аттосекундными (либо меньшей длительности) импульсами электромагнитного поля. Проанализирована роль интерференционных эффектов и размеров систем при переизлучении подающего ультракороткого импульса на электроне и позитроне и двух электронах. Показано, что с ростом частоты переизлучения вклад интерференционных слагаемых в спектре и сечении перерассеяния падает аналогично случаю классической картины интерференции на двух щелях. Сравнение спектров переизлучения позитрония и водорода показывает, что в области малых частот позитроний за счет интерференции переизлучает почти в четыре раза больше, в области же больших частот, где вклад интерференции нивелируется, позитрон и электрон в атоме позитрония излучают как два атома водорода. В атоме гелия вклад интерференции в переизлучение больше, чем в атоме позитрония за счет более близкого расположения излучающих частиц.

Шестая глава посвящена исследованию ориентационных эффектов при взаимодействии молекулярных систем с аттосекундными импульсами. Выявлена зависимость процессов ионизации и переизлучения от ориентации межъядерной оси относительно направления налетающего УКИ. Представлены результаты расчетов спектров переизлучения и ионизации в молекулярных системах при взаимодействии с УКИ с целью выявления роли интерференции и ориентационных эффектов в соответствующих процессах. Проанализированы результаты расчета при взаимодействии УКИ с положительным молекулярным ионом водорода и молекулярными ОИ галогенов. Исследована связь между процессами переизлучения и ионизации с учетом ориентационных эффектов. Во втором разделе рассмотрены процессы отрыва слабосвязанного электрона полем ультракороткого импульса от отрицательного молекулярного иона. В

третьем разделе исследована роль интерференции и ориентационных эффектов при переизлучении УКИ молекулярным ионом водорода H_2^+ . В четвертом разделе представлены результаты расчета спектров переизлучения молекулярными анионами. После интегрирования по всем углам вылета фотона получен полный энергетический спектр излучения при фиксированном направлении ориентации оси иона

$$\frac{d\varepsilon_{u,g}}{d\omega} = \frac{2}{3\pi c^3} \frac{|f_0(\omega)|^2 E_0^2}{(1 \mp e^{-qR})} \times \left\{ 1 \mp e^{-qR} + \left(\frac{\omega}{c} \right)^2 \left(\frac{1}{6q^2} + \frac{R^2}{4} \cos^2 \theta_{RE} \mp (I_1 \sin^2 \theta_{RE} + I_2 \cos^2 \theta_{RE}) \right) \right\}, \quad (14)$$

где $I_{1,2}$ - интегралы перекрытия вычислены в эллиптических координатах и равны:

$$I_1 = e^{-qR} \frac{(1+qR)}{6q^2}, \quad I_2 = e^{-qR} \frac{(2+qR)(2+qR)}{12q^2}.$$

Параметр q определяется через энергию связи слабосвязанного электрона $q = \sqrt{2I}$. Отметим, что спектр зависит от R - расстояния между центрами двухатомного аниона и ориентации межъядерной оси относительно напряженности поля \mathbf{E}_0 , описываемой углом θ_{RE} между векторами \mathbf{E}_0 и \mathbf{R} . Приведем расчетные значения спектра (14) для двух ориентаций \mathbf{R} на примере антисимметричных и симметричных состояний молекулярного ОИ иода (см. рис. 12). Интегрируя (14) по всем частотам, можно получить энергию переизлучения в зависимости от ориентации \mathbf{R} . На основании этих результатов можно сделать следующие выводы и заключения. Полученные сечения перерасеяния ультракоротких импульсов электромагнитного поля на ОИ зависят от параметров импульса и значительно превышают сечения классического рассеяния свободным электроном плоской монохроматической волны. Сечения перерасеяния УКИ возрастают при уменьшении энергии электронного сродства в анионе. Это связано с тем, что слабосвязанный электрон испытывает большие ускорения в поле УКИ. Зависимость спектров переизлучения от энергии связи может помочь в уточнении энергии электронного сродства для ОИ. Спектры также зависят от симметрии состояний молекулярного ОИ. Спектры и энергии переизлучения существенным образом зависят от выстроенности межъядерной оси молекулярных анионов и от типа ОИ. Максимально переизлучение в случае параллельности напряженности внешнего электрического поля и межъядерной оси. Тоже можно сказать и о угловой зависимости вероятности ионизации.

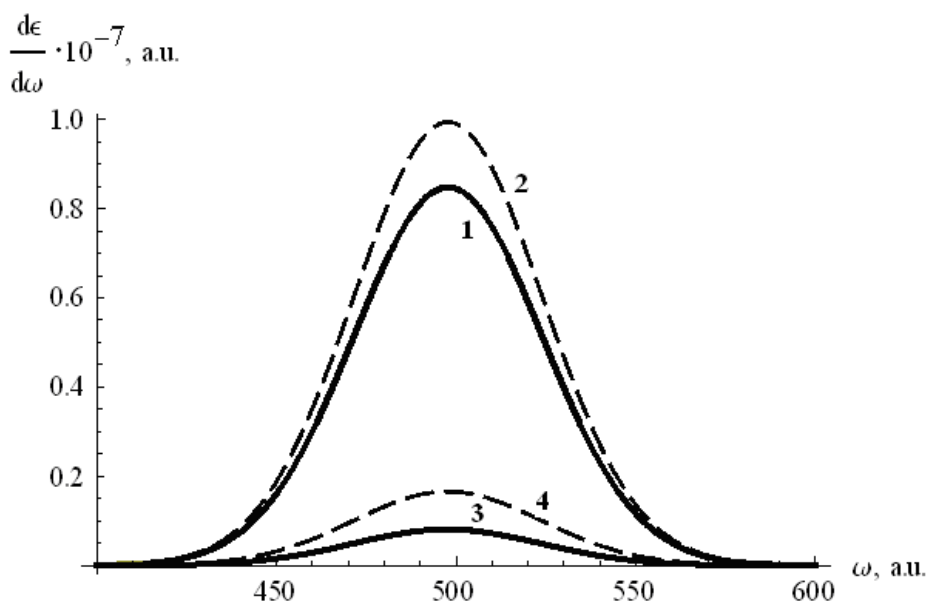


Рис. 12: Спектры переизлучения I_2^- при различных состояниях и выстроенностях молекулярного ОИ. Кривые 1,2 при ориентации межъядерной оси перпендикулярно, 3,4 – параллельно относительно направления падающего ультракороткого импульса электромагнитного поля \mathbf{k}_0 для антисимметричного и симметричного состояний ОИ (Σ_u – сплошная, Σ_g – штриховая линии). При расчете продолжительность импульса была взята в 1 аттосекунду, амплитуда напряженности поля в УКИ равнялась 3 а.е.

Очевидно, что дополнительное рассеяние на ядрах, выстроенных в направлении осцилляций электрона в поле УКИ, усиливает вероятность отрыва и переизлучения. Это может помочь контролировать степень выстроенности и облегчить управление ОИ в различных технических приложениях. Предложен механизм управления и контроля состояниями обычных и экзотических малочастичных систем с кулоновским взаимодействием с помощью ультракоротких импульсов электромагнитного поля. Механизм основан на использовании вышеизложенных методов описания неупругих процессов при взаимодействии ЭАМС с УКИ.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы, выносимые на защиту.

Автор пользуется возможностью выразить искреннюю благодарность чл.-корр. РАН И.Н. Мешкову и профессору В.И. Матвееву за многочисленные плодотворные дискуссии и консультации, к.ф.-м.н. С.Л. Яковенко, А.Г. Кобецу и А.Ю. Рудакову за полезные обсуждения и возможность участия автора в экспериментах, описанных во второй главе.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- A1. Есеев М.К., Матвеев В.И., Юлкова В.М. Ориентационные эффекты при отрыве слабосвязанного электрона от молекулярных анионов полем ультракороткого импульса // Письма в ЖТФ. – 2014. – Т.40, №2. С. 16-22.
- A2. Есеев М.К., Матвеев В.И. Неупругие процессы и эффекты интерференции при взаимодействии позитрония с ультракороткими импульсами электромагнитного поля // ЖЭТФ. – 2013. – Т. 144, №5. – С. 943-950.
- A3. Есеев М.К., Кобец А.Г., Мешков И.Н., Рудаков А.Ю., Яковенко С.Л. Исследование накопления заряженной плазмы в ловушке с вращающимся электрическим полем установки LEPTA // Физика плазмы. – 2013. – Т. 39. – С. 883–890.
- A4. Sidorin, A.A., Meshkov, I., Ahmanova, E., Eseev, M., Kobets, A., Lokhmatov, V., Pavlov, V., Yakovenko, S. The LEPTA facility for fundamental studies of positronium physics and positron spectroscopy // Materials Science Forum. – 2013. – V. 733. – P. 291-296.
- A5. Sidorin, A.A., Meshkov, I., Ahmanova, E., Eseev, M., Kobets, A., Lokhmatov, V., Pavlov, V., Yakovenko, S. Positron annihilation spectroscopy at LEPTA facility // Materials Science Forum. – 2013. – V. 733. – P. 322-325.
- A6. Есеев М.К., Матвеев В.И., Юлкова В.М. Взаимодействие аттосекундного импульса с отрицательными атомарными и молекулярными ионами. ЖТФ. – 2012. – Т. 82, №11. – С. 130-132.
- A7. Ахманова Е.В., Есеев М.К., Кобец А.Г., Мешков И.Н., Рудаков А.Ю., Сидорин А.А., Яковенко С.Л. Проект LEPTA: формирование и инжекция позитронного пучка// Письма в ЭЧАЯ. – 2012. – Т. 9 – С. 618-623.
- A8. Есеев М.К., Матвеев В.И., Юлкова В.М. Перерассеяние ультракороткого импульса на атомарных и молекулярных анионах в модели потенциалов нулевого радиуса // Оптика и спектроскопия. – 2011.– Т. 111. – С. 360-363.
- A9. Есеев М.К., Матвеев В.И., Юлкова В.М. Электронные спектры ионизации отрицательных ионов аттосекундными импульсами электромагнитного поля // Вестник Поморского университета. Серия «Естественные науки». – 2011. – № 3. – С. 90-94.
- A10. Ахманова Е.В., Быковский В.Ф., Есеев М.К., Кобец А.Г., Лохматов В.И., Мешков И.Н., Павлов В.Н., Пивин Р.В., Рудаков А.Ю., Яковенко С.Л. Развитие проекта LEPTA // Письма в ЭЧАЯ. – 2010. – Т. 7. – С. 814-820.
- A11. Рудаков А.Ю., Есеев М.К., Кобец А.Г., Мешков И.Н., Пивин Р.В., Соболева Л.В., Яковенко С.Л. Новое развитие экспериментальных исследований физики позитрония. // Вестник Поморского университета. Серия «Естественные науки». – 2010. – № 1. – С. 105–110.
- A12. Есеев М.К., Матвеев В.И. Взаимодействие ультракороткого импульса с молекулярным ионом водорода // Письма в ЖТФ. – 2009. – Т. 35, № 23. – С. 47–54.

- A13. Есеев М.К., Матвеев В.И., Абикулова Н.В. Спектры переизлучения при взаимодействии атомов с ультракороткими импульсами электромагнитного поля // Оптика и спектроскопия. – 2009. – Т. 106. – С. 231–236.
- A14. Есеев М.К., Матвеев В.И. Исследование аналитических волновых функций двухэлектронных систем в динамических взаимодействиях с многозарядными ионами и ультракороткими импульсами электромагнитного поля // ЖТФ. – 2008. – Т. 78, № 8. – С. 28–33.
- A15. Есеев М.К., Матвеев В.И. Исследование корреляционных эффектов при переизлучении атомом гелия ультракоротких импульсов электромагнитного поля // Оптика и спектроскопия. – 2008. – Т. 104. – С. 885–894.
- A16. Есеев М.К., Матвеев В.И. Динамические критерии корректности аналитических волновых функций двухэлектронных систем // Вестник Поморского университета. Серия «Естественные науки». – 2008. – № 1. – С. 77–90.
- A17. Есеев М.К., Крестников Д.А., Смирнов А.В., Мешков И.Н., Яковенко С.Л. Исследование резонансов частот вращающегося поля при накоплении позитронов в ловушке Сурко установки LEPTA // Вестник Поморского университета. Серия «Естественные науки». – 2008. – № 4. – С. 50–57.
- A18. Есеев М.К., Матвеев В.И., Абикулова Н.В. Парциальные спектры переизлучения при взаимодействии атомов с ультракороткими импульсами электромагнитного поля // Вестник Поморского университета. Серия «Естественные науки». – 2008. – № 3. – С. 43–49.
- A19. Есеев М.К. Расчет сечений тушения метастабильности антипротонов в гелии атомарными и молекулярными примесями // Вестник Поморского университета. Серия «Естественные и точные науки». – 2002. – № 2. – С. 46–51.
- A20. Men'shikov L.I., Eseev M. K. Ionic model of long-lived antiprotonic states in helium // Hyperfine Interactions. – 2001. – Т. 138, № 1–4. – С. 167–169.
- A21. Меньшиков Л.И., Есеев М.К. Некоторые вопросы физики экзотических атомов // Успехи физических наук. – 2001. – Т. 171 – С. 149–185.
- A22. Eseev M.K., Ahmanova E.V., Vititnev A.N., Kobets A.G., Meshkov I.N., Rudakov A.Yu., Sidorin A.A., Yakovenko S.L. Compression and Confinement of Positron Clouds in the Surko Trap of Lepta Facility // RuPAC 2012 Contributions to the Proceedings - 23rd Russian Particle Accelerator Conference. – SPb: JACoW. – 2012. – P. 319-321.
- A23. Kobets A.G., Ahmanova E.V., Eseev M.K., Lokhmatov V.I., Meshkov I.N., Pavlov V., Rudakov A.Yu., Sidorin A.A., Yakovenko S.L. LEPTA project: towards positronium // RuPAC 2012 Contributions to the Proceedings - 23rd Russian Particle Accelerator Conference. – SPb: JACoW. – 2012. – P. 316-318.
- A24. Kobets A.G., Ahmanova E.V., Eseev M.K., Karpinsky V., Lokhmatov V.I., Malakhov V.N., Meshkov I.N., Pavlov V., Rudakov A.Yu., Sidorin A.A., Yakovenko S.L. Advance in the LEPTA Project // RuPAC 2010

Contributions to the Proceedings - 22nd Russian Particle Accelerator Conference. – Protvino: JACoW. – 2010. – С. 166–168.

- A25. Eseev M.K., Meshkov I.N., Yakovenko S.L., Smirnov A.V., Krestnikov D.A. Dynamic positronic bunch in surko trap of LEPTA facility // RuPAC 2008 Contributions to the Proceedings - 21st Russian Particle Accelerator Conference. – Zvenigorod: JACoW. – 2008. – С. 385–387.
- A26. Bykovsky V., Meshkov I., Pavlov V., Pivin R., Rudakov A., Trubnikov G., Yakovenko S., Eseev M. Development of the positron injector for LEPTA facility // RuPAC 2008 Contributions to the Proceedings - 21st Russian Particle Accelerator Conference. – Zvenigorod: JACoW. – 2008. – С. 382–384.
- A27. Есеев М.К. Экзотические атомы, ионы и их компоненты в интенсивных электромагнитных полях: монография. – Архангельск: Изд-во САФУ, 2014. – 154 с.
- A28. Исследование процессов с экзотическими атомами и их компонентами в накопителях и ловушках с использованием интенсивных электромагнитных полей: отчет о НИР (итоговый) / САФУ имени М.В. Ломоносова ; рук. Есеев М.К.; исполн.: Юлкова В.М. [и др.]. – Архангельск, 2013. – 48 с. – № ГР 01201280747.
- A29. Есеев М.К., Матвеев В.И. Неупругие процессы при взаимодействии ультракоротких импульсов с экзотическими атомами // Сборник тезисов докладов конференции и школы молодых ученых по фундаментальной атомной спектроскопии ФАС - XX – Воронеж: Издательство ООО «Цифровая полиграфия», 2013. – С. 99-101.
- A30. Ахманова Е.В., Есеев М.К., Кобец А.Г., Мешков И.Н., Рудаков А.Ю., Сидорин А.А., Яковенко С.Л. Исследование механизма сжатия сгустка заряженной плазмы в ловушке Пеннинг-Малмбергского типа // Сборник трудов XL Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. – М: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2013. – С.181.
- A31. Eseev M.K., Matveev V.I., Ulkova V.M. The interaction of attosecond pulse with a negative atomic and molecular ions // Book of abstract 8th International Topical SPARC Workshop and Lecture Days: Troitsk., Institut Spectr. RAS, 2011. – С.83.
- A32. Eseev M.K., Kobets A.G., Meshkov I.N., Rudakov A.Y., Yakovenko S.L. Methods for optimization of the dynamics of the storage of positrons in the Surko trap // COOL'11 Contributions to the Proceedings Workshop on Beam Cooling and Related Topics. Alushta: JACoW. – 2011 – P 81-84.
- A33. Есеев М.К., Мешков И.Н., Кобец А.Г., Рудаков А.Ю., Яковенко С.Л. Исследование неустойчивостей заряженной плазмы в ловушке Пеннинг-Малмбергского типа с вращающимся электрическим полем установки LEPTA // Сборник трудов XXXVIII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. – М: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2011. – С.329.

- A34. Ahmanova V., Eseev M., Kobets A., Lokhmatov V., Meshkov I., Pavlov V., Rudakov A., Sidorin A., Yakovenko S. LEPTA project: towards positrons // COOL'11 Contributions to the Proceedings Workshop on Beam Cooling and Related Topics. Alushta: JACoW. – 2011. – P 111-113.
- A35. Есеев М.К., Матвеев В.И., Юлкова В.М. Ориентационные эффекты при взаимодействии ультракоротких импульсов электромагнитного поля с молекулами // Труды XXIV-го Съезда по спектроскопии. Том.1. – Троицк: «Тривант», 2010. Сборник тезисов. – Москва, 28 февраля – 5 марта 2010. – С. 138–139.
- A36. Есеев М.К., Кобец А.Г., Мешков И.Н., Рудаков Ю.А., Соболева Л.В., Яковенко С.Л. Развитие проекта LEPTA // Тезисы докладов Третьего Всероссийского совещания "Прецизионная физика и фундаментальные физические константы" (С. Петербург, Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе, 7-10 декабря 2010 г.). – С. 37.
- A37. Ахманова Е.В., Быковский В.Ф., Есеев М.К., Кобец А.Г., Мешков И.Н., Рудаков Ю.А., Яковенко С.Л. Исследование накопления позитронов в ловушке установки LEPTA для экспериментов по позитронной спектроскопии // Труды XXIV-го Съезда по спектроскопии. Том.2. – Троицк: «Тривант», 2010. – С. 324.
- A38. Ахманова Е.В., Быковский В.Ф., Есеев М.К., Кобец А.Г., Мешков И.Н., Пивин Р.В., Рудаков А.Ю., Сидорин А.А., Яковенко С.Л. Исследование накопления позитронов в ловушке с вращающимся электрическим полем установки LEPTA // Сборник трудов XXXVII Международной (Звенигородской) конференции по физике плазмы и УТС. – М: ЗАО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2010. С.312.
- A39. Есеев М.К., Юлкова В.М. Взаимодействие молекулярного иона водорода с ультракоротким импульсом электромагнитного поля // Труды 19-й Конференции по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС-19). – Архангельск: ПГУ. – 2009. – С. 109–110.
- A40. Meshkov I. N., Kobetz A. G., Eseev M. K. et al. Research Programme at the LEPTA Facility // 29 Meeting of the PAC for Nuclear Physics. – Dubna: JINR, 2009. – 33 p.
- A41. Есеев М.К., Матвеев В.И. Спектры переизлучения при взаимодействии атомов и молекул с ультракороткими импульсами электромагнитного поля // Труды 19-й Конференции по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС-19). – Архангельск: ПГУ. – 2009. – С. 25–26.
- A42. Есеев М.К. LEPTA в получении направленного пучка ортопозитрония // Вестник РФФИ. – 2009. – № 1–2 (61–62) – С. 43-49.
- A43. Есеев М.К., Кобец А.Г., Мешков И.Н. и др. Новое развитие экспериментальных исследований физики позитрония // Труды 19-й Конференции по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС-19). – Архангельск: ПГУ. – 2009. – С. 65–69.

- A44. Ahmanova E., Bykovsky V., Eseev M., Kaplin V., Karpinsky V., Kobets A., Lokhmatov V., Malakhov V., Meshkov I., Pavlov V., Pivin R., Rudakov A., Sidorin A.A., Yakovenko S. Advance in the LEPTA project // COOL'09 Contributions to the Proceedings Workshop on Beam Cooling and Related Topics. Lanzhou: JACoW. – 2009. – P. 146-149.
- A45. Есеев М.К., Матвеев В.И. Спектр излучения атома гелия при взаимодействии с ультракоротким импульсом электромагнитного поля с учетом межэлектронных корреляций // Труды 18-й Конференции по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС-18). – г. Звенигород, Московская обл., 22–26 октября 2007 г. – С. 33–34.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Krausz, F. Attosecond physics / F. Krausz, M. Ivanov // Rev. Mod. Phys. – 2009. – V. 81. – P. 163-234.
2. Confinement of antihydrogen for 1,000 seconds / G.B. Andresen et al. [The ALPHA Collaboration] // Nature Phys. 2011. – V. 7. – P. 558-564.
3. Gribakin, G.F. Positron-molecule Interactions: Resonant Attachment, Annihilation, and Bound States / G.F. Gribakin, J.A. Young, and C.M. Surko // Rev. Mod. Phys. – 2010. V. 82 – P. 2577-2607.
4. Cassidy, D.B. The production of molecular positronium // D.B. Cassidy, A.P. Mills // Nature. – 2007. – V. 449 – P. 195-197.
5. Cassidy, D.B. Efficient Production of Rydberg Positronium / D.B. Cassidy, T.H. Hisakado, H.W.K. Tom, and A.P. Mills // Phys. Rev. Lett. – 2012. – V. 108. – P. 043401 [5 pages].
6. Cassidy, D.B. Optical Spectroscopy of Molecular Positronium / D.B. Cassidy, T.H. Hisakado, H.W.K. Tom, and A.P. Mills // Phys. Rev. Lett. – 2012. – V. 108. – P. 133402 [5 pages].
7. Проект LEPTA: формирование и инжекция позитронного пучка / Е.В. Ахманова, М.К. Есеев, А.Г. Кобец и др. // Письма в ЭЧАЯ. 2012 – V. 9. – P. 618-623.
8. Welsch, C.P. An ultra-low-energy storage ring at FLAIR / C.P. Welsch, M. Grieser, J. Ullrich, A. Wolf // Nucl. Instrum. Meth. A. – 2005. – V. 546. – P. 405-417.
9. Surko, C.M. Anti-atoms Gotcha! / Clifford M. Surko // Nature Phys. – 2012 – V. 7. – P. 520-521.
10. Resonant quantum transitions in trapped antihydrogen atoms / C. Amole et al. // Nature. – 2012. – V. 483. – P. 439-443.
11. Description and first application of a new technique to measure the gravitational mass of antihydrogen / C. Amole et al. // Nature Commun. – 2013. – V. 4. – P. 1785 [9 pages].

12. Zhao, K. Tailoring a 67 attosecond pulse through advantageous phase-mismatch / Kun Zhao, Qi Zhang, Michael Chini, Yi Wu, Xiaowei Wang, and Zenghu Chang // Optics Lett. – 2012. – V. 37. – P. 3891-3893.
13. Borbely, S. Interaction of intense short laser pulses with positronium / S. Borbely, K. Tokesi, L. Nagy // Nucl. Instr. Meth. B. – 2009. – V. 267. – P. 386-389.
14. Brabec, T. Intense few-cycle laser fields: Frontiers of nonlinear optiction Spectroscopy / T. Brabec, F. Krausz // Rev. Mod. Phys. – 2000. – V. 72. – P. 545 – 591.
15. Ionization of Helium in the Attosecond Equivalent Light Pulse of 1 GeV/Nucleon U^{92+} Projectiles / R. Moshhammer et al. // Phys. Rev. Lett. 1997. – V. 79. – P. 3621-3624.
16. Atomic Fragmentation in Attosecond Ion induced Fields / J. Ullrich et al. // GSI Scientific Report 2002, 2003. – Is. 1. – P. 198-199.
17. Baltz, A.J. Exact Dirac Equation Calculation of Ionization and Pair Production Induced by Ultrarelativistic Heavy Ions / A.J. Baltz // Phys. Rev. Lett. – 1997. – V. 78. – P. 1231-1234.
18. Voitkiv, A.B. An approach for considering ionization of light atoms by relativistic projectiles generating strong electromagnetic fields / A.B. Voitkiv, B. Najjari, J. Ullrich // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2003. V. 36 – P. 2325-2340.
19. Baltz, A.J. Coulomb potential from a particle in uniform ultrarelativistic motion / A.J. Baltz // Phys. Rev. A. – 1995. – V. 52. – P. 4970-4971.
20. Dimitrovski, D. Ionization and recombination in attosecond electric field pulses / D. Dimitrovski, E.A. Solov'ev and J. S. Briggs // Phys. Rev. A. – 2005. – V. 72. – P. 043411 [11 pages].
21. Астапенко, В.А. Рассеяние ультракороткого импульса электромагнитного излучения на атоме в широком спектральном диапазоне / В.А. Астапенко // ЖЭТФ. – 2011. – Т. 139. – С. 228-234.
22. Ipp, A. Yoctosecond Photon Pulses from Quark-Gluon Plasmas / A. Ipp, С.Н. Keitel, and J. Evers // Phys. Rev. Lett. – 2009. V. 103. – P. 152301 [4 pages].
23. Streaking at high energies with electrons and positrons / A. Ipp et al. // Phys. Lett. B. – 2011. V. 702. – P. 383-387.
24. Беляев, В.С. Генерация быстрых заряженных частиц и сверхсильных магнитных полей при взаимодействии сверхкоротких интенсивных лазерных импульсов с твердотельными мишенями / В.С. Беляев, В.П. Крайнов, В.С. Лисица, А.П. Матафонов // УФН. – 2008. – Т. 178. – С. 823-847.
25. Weidenmuller, H.A. Nuclear Excitation by a Zeptosecond Multi-MeV Laser Pulse / H.A. Weidenmuller // Phys. Rev. Lett. – 2011. V. 106. – P. 122502 [4 pages].
26. Месси, Г. Отрицательные ионы / Г. Месси. – М.: Мир, 1979. – 754 с.
27. Grozdanov, T.P. Model for electron detachment from negative ions by ultrashort half-cycle electric-field pulses / T.P. Grozdanov, J. Jaćimović // Phys. Rev. A. – 2009. – V. 79. – P. 013413 [9 pages].

28. Головинский, П.А. Отрыв электронов от отрицательных ионов водорода и лития ультракоротким лазерным импульсом / П.А. Головинский, А.А. Дробышев // ЖТФ. – 2013. – Т. 83, №2. – Р. 8-14.
29. Steady-State Confinement of Non-neutral Plasmas by Rotating Electric Fields / X-P. Huang et al. // Phys. Rev. Lett. – 1997. – V. 78. – P. 875-878.
30. Greaves, R.G. Inward Transport and Compression of a Positron Plasma by a Rotating Electric Field / R.G. Greaves, C.M. Surko // Phys. Rev. Lett. – 2000. – V. 85. – P. 1883-1886.
31. Danielson, J.R. Radial compression and torque-balanced steady states of single-component plasmas in Penning-Malmberg traps / J.R. Danielson, and C.M. Surko // Phys. Plasmas. – 2006. – V. 13. – P. 055706 [10 pages].
32. Compression of Antiproton Clouds for Antihydrogen Trapping / G.B. Andresen, et al. // Phys. Rev. Lett. – 2008. – V. 100. – P. 203401 [5 pages].
33. Rice, G.B. Extended Tables for Planewave Born Approximation Calculation of Direct Coulomb Ionization of the K-Shell by Charged Particles / G.B. Rice, G. Basbas, and F.D. McDaniel // Atomic Data and Nuclear Data Tables. – 1977. – V. 20. – P. 503-511.
34. Пономарев, Л.И. Вероятность стряхивания мю-мезонов при торможении мезоатомов (μHe^+) в веществе / Л.И. Пономарев, Н.П. Попов, Л.И. Пресняков и др. // ЖЭТФ. – 1981. – Т. 80. – С. 1690-1699.
35. Dolder, K.T. Measurement of the Ionization Cross-Section of Helium Ions by Electron Impact / K. T. Dolder, M. F. A. Harrison, and P. C. Thonemann // Proc. R. Soc. Lond. A. – 1961 – V. 264 – P. 367-378.
36. Angel, G.C. Ionisation and charge transfer in fast $\text{H}^+\text{-He}^+$ collisions: further measurements of improved accuracy / G.C. Angel, K.F. Dunn, E.C. Sewell, and H.B. Gilbody // J. Phys. B: At. Mol. Phys. – 1978. – V. 11. – P. L49-L53.