

На правах рукописи



МАКАРОВ Дмитрий Николаевич

**Неупругие процессы при взаимодействии
полей тяжёлых ионов и ультракоротких
импульсов электромагнитного поля с
атомными системами**

01.04.02. - Теоретическая физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург - 2018

Работа выполнена в центре теоретической физики
и на кафедре фундаментальной и прикладной физики ФГАОУ ВО
«Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломносова»

Научный консультант - **Матвеев Виктор Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник центра теоретической физики ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова», г. Архангельск.

Официальные оппоненты:

Астапенко Валерий Александрович, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник кафедры радиотехники и прикладной информатики ФГАОУ ВО «Московский физико-технический институт (государственный университет)», Московская область, г. Долгопрудный.

Ипатов Андрей Николаевич, доктор физико-математических наук, профессор кафедры физики и технологии наногетероструктур ФГБУ ВО и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академический университет Российской Академии наук», г. Санкт-Петербург.

Нефедов Андрей Владимирович, доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник ФГБУ «Петербургский институт ядерной физики им. Б.П. Константинова», г. Санкт-Петербург.

Ведущая организация - Лаборатория теоретической физики им. Н.Н. Боголюбова «Объединённый институт ядерных исследований», Московская область, г. Дубна.

Защита состоится «26» сентября 2018 года в 16:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.29, созданного на базе ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», по адресу: Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая д. 29.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» www.spbstu.ru.

Автореферат разослан « _____ » _____ 2018 года

Учёный секретарь диссертационного
совета Д 212.229.29, доцент, к.ф.-м.н.



Ермакова Н.Ю.

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Во многих случаях для теоретических и экспериментальных исследований интерес представляют разнообразные процессы, сопровождающие взаимодействие электромагнитных полей, в том числе полей заряженных частиц, с различного рода одноатомными и многоатомными объектами. Рост интереса к физике ультракоротких импульсов связан не только с современными тенденциями на создание более мощных лазеров и методов генерации ультракоротких импульсов, но и с прогрессом в технике ускорителей тяжелых ионов, поскольку поля, создаваемые релятивистскими и ультрарелятивистскими заряженными частицами, близки по своим свойствам к полю световой волны [1]-[5]. Например, в экспериментах [6] поле иона урана U^{92+} с энергией 1 ГэВ/нуклон интерпретировалось как сверхинтенсивный импульс ($I > 10^{19}$ Вт/см²), длительностью $\tau \sim 10^{-18}$ сек. Аналогично исследованию взаимодействия полей высокозарядных ионов с многоатомными системами, актуальна задача по исследованию взаимодействию ультракоротких импульсов электромагнитного поля (аттосекундные импульсы) с такими системами. Такие процессы могут дополнить рентгеноструктурный анализ возможностями спектроскопии с высоким временным разрешением, связанной, в том числе, с аттосекундной спектроскопией и аттосекундной метрологией. Обычно аттосекундная физика использует в качестве мишеней сравнительно простые объекты и расширение (на наноструктуры, многоатомные системы, динамические системы) объектов исследования представляется необходимым и лежащим в русле развития теорий в физике ультракоротких процессов.

Столкновительные эксперименты с участием релятивистских и ультрарелятивистских многозарядных ионов представляют собой дополнительную возможность исследования поведения вещества в сверхсильных ультракоротких электромагнитных полях. Сечения неупругих процессов в столкновениях такого типа довольно велики и поэтому такие исследования интересны и в прикладном плане. Значительный прогресс в технике эксперимента достигнутый в последнее время в области исследований столкновений релятивистских и ультрарелятивистских тяжелых ионов с атомами, молекулами и ядрами связан с использованием ускорителей тяжелых ионов в ряде научных центров России и за рубежом. В экспериментах исследуют столкновения тяжёлых ионов, как теоретически, так и экспериментально, например, в Германии (GSI-Darmstadt, TSR

- Heidelberg), ЦЕРНе, Америке (RHIC - BNL), Канаде (TRIUMF), Китае (INR - Langou), Швеции (CRYRING - Stocholm), Франции (GANIL), Японии (RIKEN - Saitama) и в России (Объединенном институте ядерных исследований). Современное развитие теории торможения быстрых заряженных частиц во многом направлено на описание ситуаций, связанных с усложнением структуры, как снарядов, так и мишеней [7]-[9]. Выбор быстрых высокозарядных структурных ионов в качестве снарядов и использование многоатомных мишеней приводят к качественно новой физической картине столкновений. Это приводит появлению эффектов, отсутствующих или пренебрежимо малых в случаях полностью ободранных ионов и одноатомных мишеней. Кроме того, при использовании многоатомных мишеней, таких как многоатомные молекулы, кластеры и наночастицы, в процессы потерь энергии и обдирки вносят заметный вклад эффекты многократных столкновений, последовательное описание которых возможно лишь непertурбативными методами [10]. Поэтому в случаях столкновений с многоатомными мишенями, в процессы потерь энергии и сечений обдирки ионов вносят вклад эффекты ориентации молекулы-мишени относительно направления движения снаряда. Для учета влияния, на процессы многократной обдирки тяжёлых ионов, ориентационных молекулярных эффектов, необходимо развитие новых, непertурбативных теорий, не связанных с теорией возмущений. Известно, что теория возмущений применима, если выполнено неравенство $Z/v \ll 1$, где Z — заряд иона, v — относительная скорость столкновения, здесь и везде ниже используются атомные единицы. При использовании же ионов высоких зарядов $Z \gg 1$ теория возмущений неприменима, поскольку даже при $v \gg 1$ часто оказывается, что $Z/v \geq 1$.

Известно, что помимо обдирки иона на различных мишенях важной характеристикой прохождения иона через вещество является ионизационные потери энергии и флуктуации ионизационных потерь энергии (straggling) [11]-[15]. Эти характеристики, при прохождении лёгких ионов через вещество, изучены достаточно хорошо, но при прохождении тяжёлых ионов возникают трудности, связанные с непertурбативным рассмотрением таких процессов [14]. Поэтому необходимы такие непertурбативные теории, которые дополняют известную теорию Бете-Блоха для потерь энергии и теорию Титейка для флуктуации энергетических потерь. Следует сказать, что если согласие теории и эксперимента для потерь энергии, в случае тяжёлых ионов, составляет несколько десятков

процентов, то в случае флуктуации энергетических потерь эти отличия могут достигать нескольких сотен и даже тысячи процентов [14]. Поэтому исследование этих характеристик актуально в настоящее время. Кроме того, теорий, удовлетворительно описывающих потери энергии и флуктуации потерь энергии при скоростях иона сравнимых с атомными, нет в настоящее время и обычно пользуются полуэмпирическими формулами [13]. Также следует сказать о поляризационной поправке к теории торможения быстрых заряженных частиц (поправка Баркаса), которая в настоящее время изучена достаточно хорошо для лёгких ионов и скоростей иона много больше атомных $v \gg 1$ [13, 16]. Для скоростей сравнимыми с атомными $v \sim 1$ эта поправка изучена плохо. Хотя есть теории и подходы, которые могут считать эту поправку при $v \sim 1$, но они основаны на сложных численных расчётах для простейших атомов [13]. Поэтому поиск этой поправки в случае скоростей иона $v \sim 1$ и сложных атомов без использования численных расчётов актуален в настоящее время и этим занимаются большое количество исследователей в России и за рубежом. Следует сказать, что исследование неупругих процессов при взаимодействии аттосекундных и меньших длительности импульсов осложняет тот факт, что дипольное приближение уже не корректно применять. Кроме того, если поля достаточно сильные необходимо учитывать и магнитную составляющую электромагнитного импульса. Точное решение уравнения Шредингера, для таких импульсов, является актуальной задачей и может привести к появлению ранее не изученных закономерностей в неупругих процессах.

Цель работы заключается в развитии теорий по расчётам неупругих процессов при взаимодействии полей тяжёлых ионов и импульсов электромагнитного поля с многоатомными и динамическими системами. Проведении на основе развитых подходов расчётов неупругих процессов, активно исследуемых в настоящее время теоретически и экспериментально.

Задачи работы :

1. Развитие непертурбативной теории многократной обдирки (ионизации) снарядов при столкновениях быстрых тяжёлых структурных ионов с нейтральными молекулами и наночастицами. Проведении на основе развитой теории расчётов неупругих процессов.
2. Развитие теории по расчёту потерь энергии и флуктуации потерь энергии

при прохождении структурного высокозарядного иона через вещество, используя приближение эйконала.

3. На основе модельных методов развить теорию по расчёту потерь энергии, флуктуации потерь энергии, а также поляризационной поправки для высокозарядных ионов и скоростей иона близким к атомным.
4. На основе непertурбативных подходах развить теорию по расчёту спектров переизлучения ультракороткого импульса электромагнитного поля многоатомными системами.
5. Изучить взаимодействие двухмодовых квантованных электромагнитных полей с атомами вещества.
6. Развитие теории по расчёту спектров переизлучения и сечений ионизации при взаимодействии ультракоротких импульсов электромагнитного поля и полей ионов с динамическими мишенями.

Научная новизна заключается в развитии теорий по расчётам неупругих процессов при взаимодействии полей тяжёлых ионов и ультракоротких импульсов электромагнитного поля с многоатомными и динамическими системами, а также получение, по возможности, основных закономерностей в аналитическом виде:

1. На основе приближения эйконала развита теория по расчётам сечений многократной ионизации (степень ионизации от 1 до 4) быстрых тяжёлых высокозарядных структурных ионов при столкновениях с многоатомными системами, с учетом всевозможных возбуждений и ионизации, как снаряда, так и мишени. Развита непertурбативная теория потерь энергии быстрыми тяжёлыми высокозарядными структурными ионами при столкновениях со сложными молекулами и наночастицами, с учетом всевозможных возбуждений и ионизации, как снаряда, так и мишени. Показано, что эффект кратности столкновений приводит к значительному увеличению обдирки ионного пучка, что можно использовать в ускорительных комплексах.
2. Развита непertурбативная теория расчетов потерь энергии на сложных атомах. Показано, что учет введённых непertурбативных оболочечных поправок приводит к заметному улучшению согласия с экспериментом по срав-

нению с расчетами по формуле Бете-Блоха со стандартными поправками. Показано, что теория Бете-Блоха появляется в частном случае нашей теории. Также установлено, что непertурбативная оболочечная поправка может давать вклад до 50% к теории Бете-Блоха. Развита метод расчёта выхода кластеров при ионном распылении твёрдого тела.

3. Развита непertурбативная теория расчетов флуктуации потерь энергии на сложных атомах. Введена поправка к известной теории Титейка по расчёту флуктуаций потерь энергии. Показано, что теория Титейка является частным случаем нашего подхода. На основе анализа полученных выражений показано, что вклад нашей поправки к теории Титейка может быть в несколько раз больше (до десяти раз!) результатов рассчитываемых по формуле Титейка, что подтверждено экспериментами. Также проведены расчёты флуктуации потерь энергии с учётом размеров иона, установлено, что размер иона может давать существенный вклад к теории, где размер иона не учитывается, что также подтверждает эксперимент.
4. На основе модельных методов развиты теории для расчёта поляризационной поправки, потерь энергии и флуктуации потерь энергии при столкновении структурного иона любой зарядности с атомами вещества при скоростях иона близкими к атомным $v \sim 1$. Показано, что при $v \gg 1$ полученные выражения переходят в известные ранее теории.
5. На основе непertурбативных подходах развита теория по расчёту спектров переизлучения ультракоротких импульсов электромагнитного поля многоатомными регулярными структурами, а также структурами совершающими тепловые колебания атомов. Кроме того, получены простые аналитические выражения по расчёту спектров переизлучения многоэлектронными атомами. Показано, что учет квантованных электромагнитных полей приводит к интенсивной генерации квантово-запутанных фотонов.
6. Развита теория по расчёту спектров переизлучения ультракоротких импульсов электромагнитного поля на динамических мишенях, таких как сталкивающийся атом водорода с протоном, релаксирующий атом, оже-переходы. Развита подход распространён на столкновения ионов с динамическими мишенями, где рассчитываются сечения ионизации.

Достоверность и научная обоснованность полученных результатов и выводов обеспечивается надёжностью применяемых методов расчёта, тщательным тестированием применяемых алгоритмов и программ, а также сравнением с результатами расчётов других авторов и экспериментами.

Методология и методы исследований. Методологической основой диссертационной работы являлись известные приближения квантовой физики и квантовой электродинамики - приближение эйконала, приближение внезапных возмущений, теория возмущений, метод вторичного квантования в применении к теории излучения. Кроме того, в диссертационной работе использовались модельные методы, основанные на точном решении уравнения Шредингера. Также, некоторые численные расчёты проводились используя языки программирования C++ и MATHEMATICA.

Научная и практическая ценность работы. Проведено распространение новых непертурбативных теории атомных столкновений, специализированных для описания неупругих процессов при взаимодействии релятивистских и ультрарелятивистских структурных ионов с изолированными атомами, на случаи столкновений с двух- и многоатомными системами. Получены выражения и теория по расчёту нового эффекта - эффект кратности столкновений. Показано, что этот эффект можно использовать в ускорительных комплексах для существенного увеличения обдирки ионного пучка. На основе приближения эйконала развита теория по расчёту ионизационных потерь энергии и флуктуации потерь энергии, получены выражения в виде поправок к общепринятым теориям. Полученные поправки дают большой вклад по отношению к известным теориям и хорошее согласие с экспериментом. На основе модельных методов развиты теории для расчёта поляризационной поправки, потерь энергии и флуктуации потерь энергии при столкновении структурного иона любой зарядности с атомами вещества при скоростях иона близкими к атомным $v \sim 1$ и v больше атомных. Впервые получены выражения для спектров переизлучения ультракороткого импульса электромагнитного поля многоатомными регулярными структурами с учётом тепловых колебаний атомов. Показано, что учет квантованных электромагнитных полей приводит к интенсивной генерации квантово-запутанных фотонов. Проведены исследования по взаимодействию ультракоротких импульсов электромагнитных полей и полей иона с динамическими системами. Решено уравнение Шредингера при взаимодействии

аттосекундных и меньших длительности импульсов с многоэлектронными атомами. Показано, что магнитная составляющая электромагнитного поля может давать существенный вклад в неупругие процессы и процессы рассеяния при достаточно сильных электромагнитных полях.

Результаты полученные в ходе выполнения диссертации планируется использовать в ОИЯИ (Дубна, Россия) для проекта NICA. Также полученные результаты могут быть использованы на ускорителях тяжёлых ионов в других научных лабораториях. Кроме того, результаты могут быть использованы в таких отраслях как: радиационные повреждения, ядерные реакторы, спектроскопия с высоким временным разрешением. Результаты таких исследований представляют интерес для многих конкретных областей физической электроники, атомной и ядерной физики.

Связь с плановыми работами.

Работа выполнялась в рамках плановых научно-исследовательских работ кафедры фундаментальной и прикладной физики Высшей школы естественных наук и технологий Северного (Арктического) федерального университета им. М.В. Ломоносова. Работа была выполнена в рамках проектов, где руководителем являлся автор диссертации - грант Президента Р.Ф., (№МК-3592.2011.2, 2011-2012 г.); стипендия Президента РФ молодым учёным и аспирантам (№СП-2046.2012.1, 2012-2014 г.); грант РФФИ (№13-02-07017 Д, 2013 г.), грант САФУ им. М.В. Ломоносова (лот №2.1.5, 2014 г.); стипендия Президента РФ молодым учёным и аспирантам (№СП-1800.2015.1, 2015-2017 г.); грант Президента Р.Ф., (№МК-6289.2018.2, 2018-2019 г.). Кроме того, работа выполнялась в рамках других проектов, где автор диссертации являлся исполнителем - гранты РФФИ(№08-02-00711-а, №08-02-98801-р-север-а, №15-02-01894 А), ФЦП Министерства образования Российской Федерации "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России"(соглашение №14.А18.21.1302.), проектная часть государственного задания (заявка №1726).

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Теория и методы расчёта сечений многократной ионизации (степень ионизации от 1 до 4) и потерь энергии при столкновениях быстрых тяжелых высокозарядных структурных ионов с многоатомными системами.
2. Теория и расчет вклада эффекта кратности столкновений и ориентации многоатомной мишени относительно направления движения снаряда в про-

цессы потерь энергии, например, молекулой XeF_4 и нанотрубкой C_{300} . Показать, что эффект кратности столкновений приводит к значительным изменениям эффективного торможения при изменении ориентации мишени, при хаотической же ориентации этот эффект малозначителен.

3. Теория и расчет потерь энергии на сложных атомах, позволяющий учитывать непертурбативные оболочечные поправки, где теория Бете-Блоха является частным случаем нашего подхода. Показать, что учет непертурбативных оболочечных поправок приводит к заметному улучшению согласия с экспериментом по сравнению с расчетами по формуле Бете-Блоха со стандартными поправками.
4. Теория и расчет флуктуации потерь энергии на сложных атомах. Показано, что вклад нашей поправки к теории Титейка может быть в несколько раз больше (до десяти раз и более) результатов рассчитываемых по формуле Титейка и привести сравнение с экспериментальными данными. Показать, что учёт размеров иона может давать существенный вклад к теории, где размер иона не учитывается, что также подтвердить экспериментами.
5. Модельные методы, на основе которых получены выражения для: поляризационной поправки, потерь энергии и флуктуации потерь энергии при столкновении структурного иона любой зарядности с атомами вещества при скоростях иона близкими к атомным $v \sim 1$, также что при $v \gg 1$ полученные выражения переходят в известные ранее теории.
6. Теория по расчёту спектров переизлучения ультракоротких импульсов электромагнитного поля многоатомными регулярными структурами, а также структурами совершающими тепловые колебания атомов.
7. Показать, что учет квантованных электромагнитных полей приводит к интенсивной генерации квантово-запутанных фотонов.
8. Теория и расчёт спектров переизлучения ультракоротких импульсов электромагнитного поля и сечений ионизаций при столкновении с ионами на динамических мишенях.

Апробация работы и публикации.

Результаты, вошедшие в диссертационную работу, многократно докладывались и обсуждались на семинарах теоретического сектора отдела мощных лазеров Института общей физики РАН имени А. М. Прохорова (г. Москва), семинарах центра теоретической физики Северного(Арктического) федерального университета (г. Архангельск), семинарах Объединённого института ядерных исследований (г. Дубна), семинаре Саратовского государственного университета им. Н.Г. Чернышевского, семинаре каф. теор. физ и астрономии Российского педагогического государственного университета им. А.И. Герцена (г. Санкт-Петербург), семинаре каф. теор. физ. Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого. Материалы диссертации обсуждались на всероссийских и международных конференциях, наиболее важные из которых: XIX- конференция и школа по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС - XIX, 22 - 29 июня 2009 г., Архангельск - Соловки), XX международная конференция "Взаимодействие ионов с поверхностью"(ВИП - 2011, 25 - 29 августа 2011 г., Звенигород), XX- конференция по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС - XX, 23 - 27 сентября 2013 г., Воронеж), XXII международная конференция "Взаимодействие ионов с поверхностью"(ВИП - 2015, 20 - 24 августа 2015 г., Москва), 12th European Conference on Atoms Molecules and Photons (ЕСАМР 12, Frankfurt am Main, Germany, September 5th to 9th, 2016) , The International Conference on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces (MPS-2016, Moscow, Russia, August 23 until August 26, 2016), XXV съезд по спектроскопии (г. Троицк, Москва, 3-7 октября 2016г.).

Публикации.

По материалам диссертации опубликовано 51 печатных работ из них 33 работы в рецензируемых журналах из списка ВАК, из которых: 10 - Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики (JETP Letters), 8 - Журнал экспериментальной и теоретической физики (JETP), 4 - Письма в журнал технической физики (JTP Letters), 3 - Журнал технической физики (JTP), 2 - EPJ Web of Conferences, 1 - Physical Review A, 1 - Annalen der Physik, 1 - Chinese Physics C, 1 - Оптика и спектроскопия (Optics and Spectroscopy), 1 - Теоретическая и математическая физика (TMP), 1 - Вестник поморского гос. университета им. М.В. Ломоносова, а также в материалах всероссийских и международных конференций. Кроме того, опубликованы 2 монографии по теме исследования, 2 отчёта по НИР и 2 препринта. Полный список публикаций приведён в конце

автореферата и диссертации [A1 - A51].

Личный вклад автора по теме диссертации является определяющим и заключается в выборе направления и постановке задач исследования. 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. Также автором были самостоятельно разработаны алгоритмы и программы с использованием языков программирования C++ и МАТНЕМАТИСА, произведены численные расчёты.

Структура и объём работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения и содержит 327 страниц, 49 рисунков, 4 таблицы и 7 приложений. Список литературы включает 208 наименования.

Краткое содержание работы

В введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи, представлена научная новизна и практическая значимость полученных результатов. Приведены основные положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации работы и личном вкладе автора, структура и объём диссертации.

В первой главе развита непertурбативная теория расчётов эффекта кратности столкновения, а именно - многократной обдирки структурных тяжёлых ионов при столкновениях с двухатомными молекулами, а также потерь энергии таких ионов на многоатомных системах. Глава состоит из четырёх разделов.

В разделе (1.1) предлагается теория и метод расчёта в эйкональном приближении сечений ионизации одноэлектронного тяжёлого снаряда при столкновении с двухатомной молекулой [A1, A2, A3]. В качестве примера рассмотрен случай $Fe^{25+} + N_2$, где потенциал действующий на электрон снаряда со стороны молекулы выбирался в методе нейтральных атомов [17]. Расчёт сечения ионизации проводился в дипольном подходе. На основании численных расчётов показано, что существует эффект кратности столкновения, когда снаряд, возбуждённый в результате столкновения с первым ядром молекулы, не успевает перейти в основное состояние и претерпевает столкновение со вторым ядром молекулы, находясь в возбуждённом состоянии. Не трудно убедиться, что, если

направление движения снаряда близко по ориентации с осью молекулы, то в сечения возбуждения и ионизации снаряда заметную поправку может вносить учет двух последовательных столкновений иона с атомными остовами, входящими в состав одной молекулы. Действительно, если ввести $\delta_1(\theta) = \frac{\sigma(\theta) - \sigma(\pi/2)}{\sigma(\pi/2)}$ ($\sigma(\theta)$ - сечение ионизации как функция от угла между векторами скорости и вектором соединяющий два центра молекулы) то, как видно из рисунка 1 при расчёте, поправка $\delta_1(\theta)$ значительно изменяется при изменении ориентации оси молекулы.

В разделе (1.2) развита теория по расчёту сечения многократной ионизации [А5, А6]. Были рассчитаны сечения многократной обдирки ионов железа Fe^{q+} ($q = 25, 24, 26$) при столкновениях с молекулами азота N_2 для энергий налетающих ионов 10, 100 и 1000 MeV/у (МэВ/нуклон). Например, результаты расчетов величины $\delta(\theta)$ - относительной поправки к сечениям однократной, двукратной и тройной обдирки снаряда для столкновений литийподобного иона Fe^{23+} с молекулами N_2 для энергий налетающего иона 100 MeV/у в зависимости от угла ориентации молекулы представлены на рисунке 2

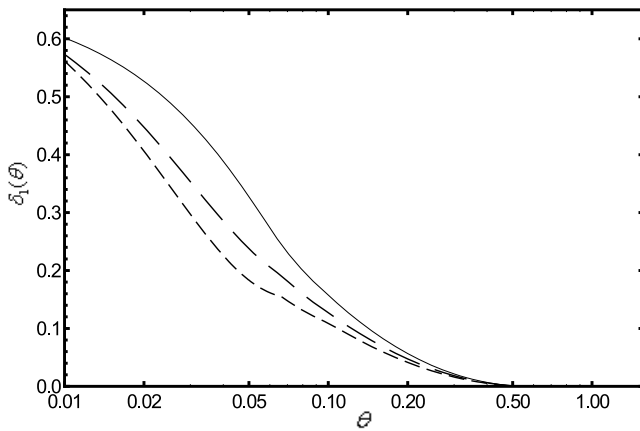


Рис. 1. Зависимость относительной поправки $\delta_1(\theta)$ от угла ориентации θ (в радианах) для столкновений $Fe^{25+} + N_2$ при трёх значениях энергии: мелкий пунктир - $E=1000\text{MeV/n}$, пунктир - $E=100\text{MeV/n}$, сплошная - $E=20\text{MeV/n}$.

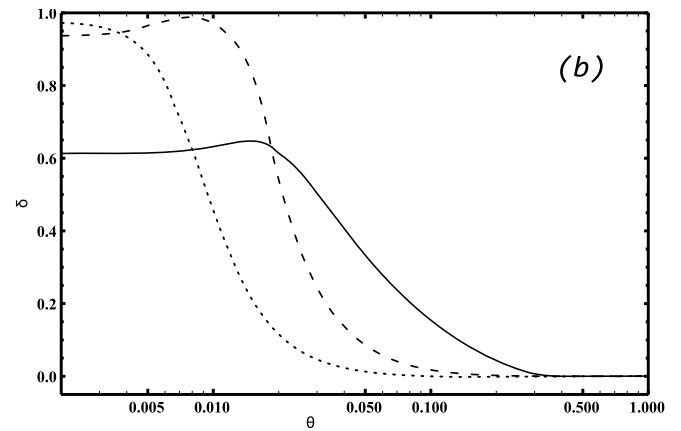


Рис. 2. На этих рисунках сплошная линия - значения поправки $\delta(\theta)$ для однократной обдирки, длинный пунктир для двукратной обдирки, короткий пунктир для трехкратной обдирки

В разделе (1.3) представлена непертурбативная теория потерь энергии иона на сложных молекулах [А3] за счет возбуждения и ионизации электронов иона. Показано, что потери на молекуле состоят из суммы потерь на каждой комбинации пар атомов, входящих в состав молекулы. В качестве примеров рассмотрены потери энергии ионами железа при столкновениях с молекулой XeF_4

и нанотрубкой C_{300} , показано, что эффект кратности столкновений приводит к значительным изменениям эффективного торможения при изменении ориентации мишени (изменения до 10 раз!), при хаотической ориентации этот эффект малозначителен.

Ранее считалось, что обдирка ионных пучков на твердом теле не сильно зависит от выбора этого тела. В разделе (1.4) показано [A33], что используя эффект кратности столкновения можно существенно увеличить обдирку ионного пучка используя наноструктурированные мишени. Этот эффект может быть использован в ускорительных комплексах, для обдирки тяжелых ионов, что является интересным и перспективным направлением.

Во второй главе представлена теория и расчёт ионизационных потерь энергии при столкновении быстрых заряженных частиц с атомами, где введена непертурбативная оболочечная поправка [A4, A7, A8, A9]. Показано, что учет непертурбативных оболочечных поправок приводит к заметному улучшению согласия с экспериментом по сравнению с расчетами по формуле Бете-Блоха со стандартными поправками. Показано, что теория Бете-Блоха появляется в частном случае нашего подхода. Также установлено, что непертурбативная оболочечная поправка может давать вклад до 50% к теории Бете-Блоха. Также развита теория ионизационных потерь энергии в модельном подходе и теория ионного распыления твёрдых тел в виде кластеров [A19, A22, A27].

В разделе (2.1) развита теория расчёта поправки Блоха на свободных электронах в приближении эйконала [A7, A9].

В разделе (2.2) найдена погрешность приближения при расчёте поправки Блоха на свободных электронах [A9]. Показано, что использование приближения эйконала является естественным путем получения поправки Блоха, допускающим корректный предельный переход от рассеяния ограниченных в пространстве волн к рассеянию неограниченных волн. Оценены погрешности такого перехода и области изменения переданных импульсов и углов рассеяния, вносящих основной вклад в поправку Блоха. Показано в общем виде, что на реальных атомах будет существовать некоторая коррекция к поправке Блоха.

В разделе (2.3) развита теория расчёта потерь энергии иона при столкновении с атомом водорода в приближении эйконала, где показано, какую погрешность несут сделанные предположения при выводе поправки Блоха [A4, A9].

В разделе (2.4) представлены результаты численных расчётов потерь энергии иона при столкновении с атомом водорода в приближении эйконала [A4]. Также приведено сравнение с результатами теории Бете-Блоха, где показано, что расчёт предложенным методом может давать существенный вклад по отношению к теории Бете-Блоха, до 50 %. Если представить потери энергии в виде $\kappa = 4\pi L^{Eik}$, то

$$L^{Eik} = 4\pi\eta^2 (L^{Bete} + \Delta L^{Bloch} + \Delta L), \quad (1)$$

ΔL - наша поправка. Например, представим результаты расчётов значения относительной непертурбативной поправки $\delta = \Delta L / (L^{Bete} + \Delta L^{Bloch})$ в зависимости от скорости столкновения, рисунок 3.

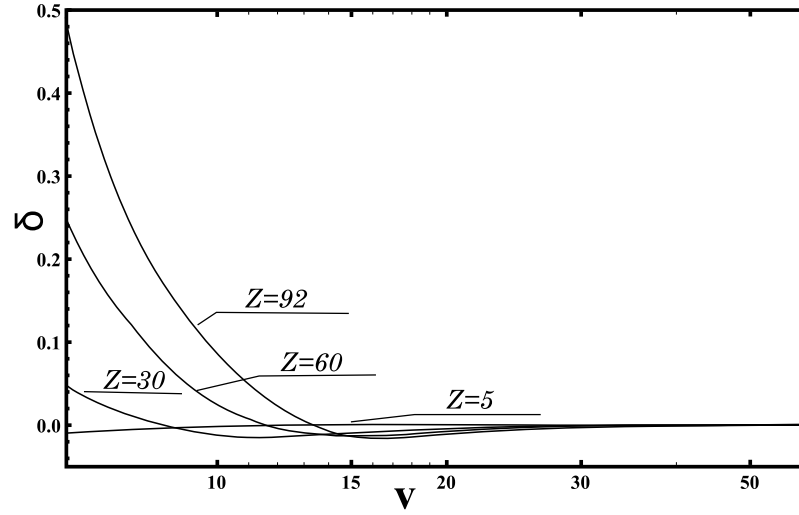


Рис. 3. Зависимость относительной непертурбативной поправки δ от относительной скорости столкновения v для четырёх значений заряда частицы Z при столкновении с атомом водорода. Значения v в атомных единицах отложены на горизонтальной шкале, а безразмерные δ - на вертикальной. На горизонтальной оси использован логарифмический масштаб.

В разделе (2.5) проведены оценки полученных выражений и найдена аналитическая аппроксимация для расчёта нашей поправки ΔL [A8], где

$$\Delta L = \gamma + K_0(2x) + \ln(x), \quad (2)$$

где $\gamma = 0,5772$ - постоянная Эйлера, $x = (2\beta)^{1/2} Z/v^2$, $\beta = 0,141$, так, что $x = 0,531Z/v^2$.

В разделе (2.6) развита теория непертурбативной оболочечной поправки для сложного атома, на основании которой получена формула, для потерь энер-

гии, в аналитическом виде [A8]. Итоговое выражение имеет вид

$$\Delta L = \frac{1}{N_a} \sum_{n,l} N_{n,l} \Delta L_{n,l}, \quad (3)$$

где $N_{n,l}$ - число атомных электронов в состояниях с квантовыми числами n, l , в формуле (3) суммирование производится только по заполненным состояниям и $\sum_{n,l} N_{n,l}$ равна N_a - общему числу электронов в данном атоме (напомним, речь идет о числах заполнения $N_{n,l}$ для атома находящегося в основном состоянии до столкновения). Значения оболочечных поправок $\Delta L_{n,l}$ рассчитываются по формуле которую удобно переписать так:

$$\Delta L_{n,l} = \gamma + K_0 \left(2 \frac{(2\beta_n)^{1/2} Z_a^{(n,l)} Z}{v^2} \right) + \ln \left(\frac{(2\beta_n)^{1/2} Z_a^{(n,l)} Z}{v^2} \right), \quad (4)$$

где $Z_a^{(n,l)}$ - эффективный заряд ядра атома для электрона, находящегося в состоянии $|n, l\rangle$ при фиксированных состояниях остальных атомных электронов. Коэффициенты β_n рассчитаны численно и равны

$$\begin{aligned} \beta_{n=1} &= 0.141, \beta_{n=2} = 0,00309, \beta_{n=3} = 0,000778, \\ \beta_{n=4} &= 0.000252, \beta_{n=5} = 0.000103. \end{aligned} \quad (5)$$

Также проведено сравнение с экспериментом и показано, что поправка ΔL существенно улучшает согласие с экспериментальными данными.

В разделе главы (2.7) развита теория ионизационных потерь энергии в модельном подходе [A19, A27]. Рассмотрены потери энергии быстрых заряженных частиц при столкновениях с осциллятором в дипольном приближении. В этом приближении задача решается точно и находятся потери энергии осциллятора из начального состояния в виде суммы одномерных интегралов. Показано, что можно при $v \gg 1$ получить теорию Бете для атома, при малости возмущений, а в случае сильных полей поправку к теории Бете, аналогичную поправку Блоха, кроме того, возможен классический предел, совпадающий с формулой Бора. Вся теория работает для скоростей иона близких к атомным $v \sim 1$.

В разделе (2.8) развита теория выхода кластеров при ионном распылении твёрдого тела [A22]. Показано, что развитый подход даёт не плохое согласие с экспериментом.

В третьей главе развита теория по расчёту флуктуации ионизационных потерь энергии (straggling) на сложных атомах [A10, A11]. Введена поправка к известной теории Титейка по расчёту флуктуаций потерь энергии. Показано, что теория Титейка является частным случаем нашего подхода. На основе анализа полученных выражений показано, что вклад нашей поправки к теории Титейка может быть в несколько раз больше (до десяти раз!) результатов рассчитываемых по формуле Титейка, что подтверждено экспериментами. Также проведены расчёты флуктуации потерь энергии с учётом размеров иона, установлено, что размер иона может давать существенный вклад к теории, где размер иона не учитывается, что также подтверждает эксперимент. Также развит модельный подход по расчёту straggling в случае скоростей иона близких к атомным $v \sim 1$ [A17].

В разделе (3.1) развита теория и метод расчёта флуктуаций потерь энергии на основе приближения эйконала [A10]. Показано, что в приближении эйконала, при определённых предположениях, можно получить формулу Титейка и будет введена поправка к этой формуле рассчитываемая численно.

В разделе (3.2) найдена аналитическая поправка к формуле Титейка для атома водорода [A10]. В итоге получено следующее выражение для среднеквадратичных флуктуаций

$$\Omega^2 = 4\pi Z^2 \left[1 + \frac{4K}{3v^2} \left(\ln \frac{2v^2}{I_F} + \Delta L^{Bloch} \right) + \Delta \right], \quad (6)$$

где v - скорость налетающей частицы, K - средняя кинетическая энергия электрона в атоме водорода, I_F - средний ионизационный потенциал Фано, а аналитическое выражение для поправки к формуле Титейка имеет вид

$$\Delta = \frac{1}{v^2} \frac{4}{3} K \left(\gamma + K_0(2x) + \ln(x) \right) + \frac{(1.57Z/v^2)^3}{1 + (1.57Z/v^2)^2}, \quad (7)$$

где $x = (2\beta^F)^{1/2} Z/v^2 = 1,93Z/v^2$. В качестве примера, вклада нашей поправки в теорию Титейка, приведём график на рисунке 4.

В разделе (3.3) найдена аналитическая поправка к формуле Титейка для сложного атома. В итоге

$$\Omega^2 = 4\pi Z^2 N \left[1 + \frac{4K}{3v^2} \left(\ln \frac{2v^2}{I_F} + \Delta L^{Bloch} \right) + \Delta \right], \quad (8)$$

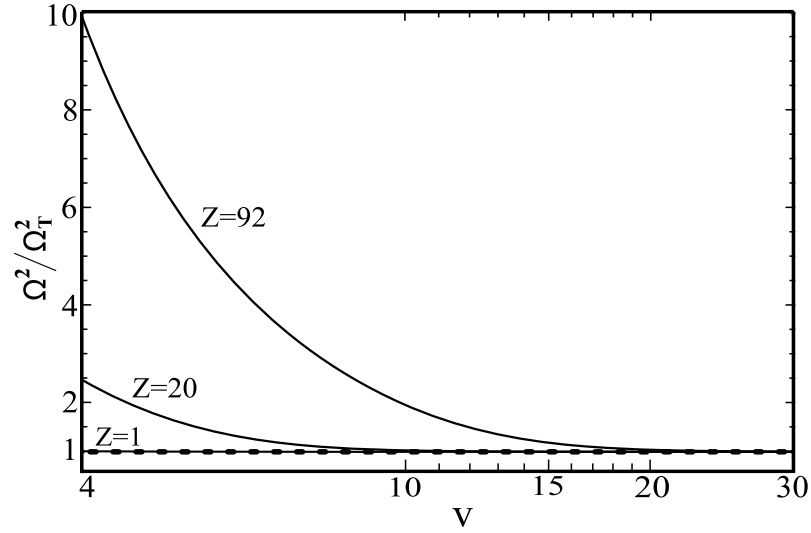


Рис. 4. Зависимость Ω^2/Ω_T^2 от относительной скорости столкновения v для трёх значений заряда снаряда $Z = 1$; $Z = 20$; $Z = 92$ при столкновении с атомом водорода.

где K - средняя кинетическая энергия электрона в атоме, N - число электронов в атоме, а

$$\Delta = \frac{1}{N} \sum_{n,l} N_{n,l} \Delta_{n,l} . \quad (9)$$

Здесь $N_{n,l}$ - число атомных электронов в состояниях с квантовыми числами n, l ; в формуле (9) суммирование производится только по заполненным состояниям и $\sum_{n,l} N_{n,l} = N$ - общему числу электронов в данном атоме (напомним, речь идет о числах заполнения $N_{n,l}$ для атома находящегося в основном состоянии до столкновения), и, в соответствии с (7),

$$\Delta_{n,l} = \frac{4K}{3v^2} \left[\gamma + K_0 \left(2 \frac{(2\beta_n^F)^{1/2} Z Z_a^{(n,l)}}{v^2} \right) + \ln \left(\frac{(2\beta_n^F)^{1/2} Z Z_a^{(n,l)}}{v^2} \right) \right] + \quad (10)$$

$$+ \left(\frac{1.57 Z Z_a^{(n,l)}}{n^2 v^2} \right)^3 / \left(1 + \left(\frac{1.57 Z Z_a^{(n,l)}}{n^2 v^2} \right)^2 \right) , \quad (11)$$

где коэффициенты β_n^F были рассчитаны численно

$$\beta_{n=1}^F = 1,85; \quad \beta_{n=2}^F = 0,0502; \quad \beta_{n=3}^F = 0,00541; \quad \beta_{n=4}^F = 0,00310. \quad (12)$$

Также в этом же разделе приведены сравнения с экспериментальными данными, например, один из расчетов представлен на рисунке 5.

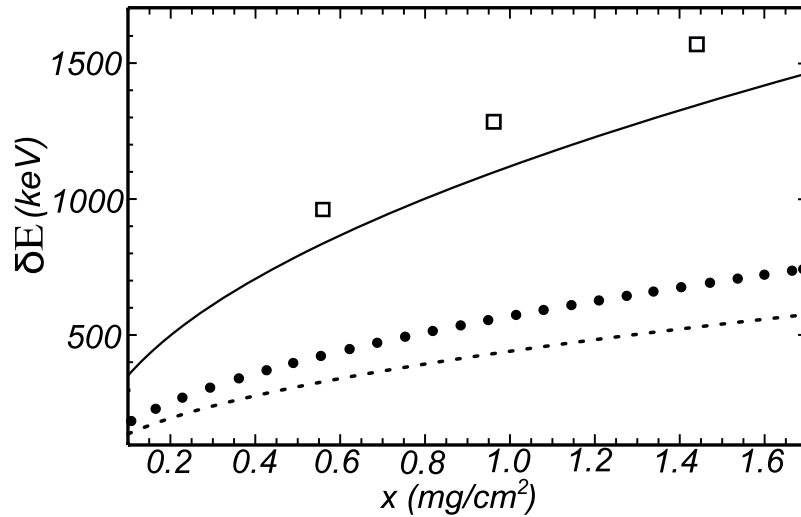


Рис. 5. Зависимость δE от толщины мишени x для ионов йода (с энергией 1.467 MeV/n), сталкивающихся с медной мишенью. Обозначения: квадраты - экспериментальные данные [18]; сплошная линия - результаты наших расчетов величины δE с Ω^2 , вычисленной в приближении эйконала; кружки - результаты расчетов δE с использованием для страгглинга формулы Титейка (6); пунктирная линия - результаты расчетов δE с использованием для страгглинга формулы Бора.

На рисунке 5 приведены экспериментальные данные [18] (лежащие вне области применимости теории возмущений и формулы Фано) и наши расчеты ширины энергетического страгглинга δE , связанной со страгглингом Ω^2 соотношением [18]:

$$\delta E = 2(2 \ln 2)^{1/2} \sqrt{\Omega^2 x}, \quad (13)$$

где x - толщина поглотителя (пленки).

В следующем разделе 3.4 рассматривается та же задача, но с учётом размеров иона [A11]. Потенциал иона выбирался в модели Бранта-Китагавы. Результаты расчётов проводились численно. Показано, что размер иона, может существенно влиять на флуктуации ионизационных потерь энергии иона. Например, тот же эксперимент, что рассматривался ранее на рисунке 5, уже будет намного лучше согласоваться с теорией, где учитывается размер иона.

В последнем разделе 3.5 представлена теория флуктуации ионизационных потерь энергии в модельном подходе [A17]. Рассмотрены потери энергии быстрых заряженных частиц при столкновениях с осциллятором в дипольном приближении. В этом приближении задача решается точно и находятся флуктуации потерь энергии осциллятора из начального состояния. Показано, что можно при $v \gg 1$ получить теорию Фано для атома, при малости возмуще-

ний, а в случае сильных полей, выражение, аналогичное теории Титейка, кроме того, возможен классический предел, совпадающий с формулой Бора. Вся теория работает для скоростей иона близких к атомным $v \sim 1$.

В четвёртой главе предложена теория поляризационной поправки (поправки Баркаса) для расчёта потерь энергии заряженных частиц при столкновениях с многоэлектронными атомами [A18, A20]. Поправка Баркаса представлена в простом аналитическом виде. Проведены сравнения с экспериментальными данными, показано, что учет поправки Баркаса улучшает согласие теории с экспериментом.

В разделе 4.1 предложена теория и метод расчёта поправки Баркаса на обрезанном потенциале. Получена аналитическая формула по расчёту поляризационной поправки используя точное решение квантовой задачи о рассеянии электрона на обрезанном потенциале, в которую входит неопределённый коэффициент α , который обычно называют эффективным радиусом взаимодействия. Формула имеет вид

$$\Delta L_{Barkas} = \Delta L_{Barkas}^{cl} \frac{1 + \frac{\eta\lambda}{1+6\lambda^2} e^{-\eta}}{1 + \left(\frac{\lambda}{0.4\eta(1+1.5\eta)} \right)^{4.5} e^{-0.5\lambda^2\eta^2}}, \quad (14)$$

где $\lambda = \frac{Z}{v^2\alpha}$, а $\eta = Z/v$. ΔL_{Barkas}^{cl} - это классическая поправка Баркаса, которая равна

$$\Delta L_{Barkas}^{cl} = (L_1^{cl}(Z) - L_1^{cl}(-Z))/2, \quad (15)$$

а

$$L_1^{cl} = \frac{1}{2(1-2\lambda)^2} \left(2\lambda - 1 + (\lambda - 1)^2 \ln \left(\frac{\lambda - 1}{\lambda} \right)^2 \right). \quad (16)$$

В разделе 4.2 найден неопределённый коэффициент α , используя общую теорию торможения быстрых заряженных частиц. Показано, что для того, чтобы найти этот параметр необходимо вводить в общую теорию торможения нашу непертурбативную оболочечную поправку ΔL или см. главу 2. Например, для атома водорода $\alpha = 2.369$.

В последнем разделе 4.3 развита теория поправки Баркаса на сложных

атомах. Для такого обобщения надо параметр α рассчитывать для разных оболочек, так что для (n, l) оболочки значения параметра α будем обозначать $\alpha_{n,l}$, причем

$$\alpha_{n,l} = \frac{e^{3/2-\gamma}}{2Z^{n,l}\sqrt{2\beta_n}}, \quad (17)$$

где β_n коэффициенты, представленные в главе 2. Таким образом, поправка Баркаса имеет оболочечный характер и для потерь энергии на сложном атоме ее следует рассчитывать путем суммирования по оболочкам атома-мишени, аналогично процедуре описанной в главе 2.

Полученные результаты хорошо согласуются с ранее известными, полученными по теории возмущений, а также с экспериментами.

В пятой главе развита теория процессов переизлучения (рассеяния) ультракоротких импульсов электромагнитного поля произвольными наносистемами, составленными из изолированных сложных атомов [A12, A13, A15, A28, A29, A31]. Получены угловые распределения спектров переизлучения для ряда регулярных наносистем. Показано, что процессы интерференции амплитуд излучения фотона на наносистемах приводят к появлению характерных "дифракционных" максимумов. В качестве примеров, допускающих простое аналитическое рассмотрение, использованы одномерные, двумерные и трехмерные наноструктуры, а также плоские и цилиндрические конструкции в качестве моделей плоских наносистем и нанотрубок. Представленная теория развита на сложные системы с учётом тепловых колебаний атомов, а также дефектов в наноструктурах [A23, A24]. Найдено аналитическое решение уравнения Шредингера для аттосекундных импульсов, на основе этого решения рассчитаны неупругие процессы в атомах и рассеяние на таких импульсах [A25, A27]. Также рассмотрена ионизация атома в сильном 2 модовом квантованном электромагнитном поле [A30], показано, что такие поля генерируют интенсивные квантово-запутанные фотоны [32].

В разделе 5.1 развита теория по расчёту спектров переизлучения сложных атомов при взаимодействии с ультракоротким импульсом электромагнитного поля [A15, A31]. В полученном выражении есть спектры переизлучения для некогерентных ($\sim N$) и когерентных частей спектра ($\sim N^2$), где N - число электронов в атоме. Показано, что спектр существенно зависит не только от

числа электронов в атоме, но и от распределения электронной плотности в нем. Выражение имеет вид

$$\frac{d^2W}{d\Omega_{\mathbf{k}}d\omega} = \frac{|f_0(\omega)|^2}{(2\pi)^2c^3\omega} \left\{ NG(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0) + N(N-1)F(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0) \right\}, \quad (18)$$

где $F(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0)$ и $G(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0)$ - полученные аналитические функции.

В разделе 5.2 приведён вывод выражения по расчёту спектров переизлучения ультракоротких импульсов электромагнитного поля произвольными наносистемами, составленными из изолированных сложных атомов [A12, A13]. Итоговое выражение будет следующим

$$\frac{d^2W}{d\Omega_{\mathbf{k}}d\omega} = \frac{|f_0(\omega)|^2}{(2\pi)^2c^3\omega} \left\{ NN_eG(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0) + NN_e(N_e-1)F(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0) + N_e^2Q(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0)g_N(\mathbf{p}) \right\}, \quad (19)$$

где

$$g_N(\mathbf{p}) = \sum_{a,b(a \neq b)} e^{i\mathbf{p}(\mathbf{R}_a - \mathbf{R}_b)} = \sum_{a,b} e^{i\mathbf{p}(\mathbf{R}_a - \mathbf{R}_b)} - N = \left| \sum_a e^{i\mathbf{p}\mathbf{R}_a} \right|^2 - N, \quad (20)$$

Отметим, что число атомов N в системе произвольно, в частности, при $N = 1$ формула (19) описывает спектр переизлучения одного атома. $F(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0)$, $G(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0)$ и $Q(\omega, \mathbf{n}, \mathbf{n}_0)$ - рассчитанные функции. Фактор $g_N(\mathbf{p})$ - отвечает за интерференцию и максимум этого выражения $g_N(\mathbf{p}) = N^2 - N$.

Также рассмотрены различные наносистемы, где фактор $g_N(\mathbf{p})$ рассчитан в аналитическом виде. На основе этого фактора проведён анализ спектров переизлучения на рассмотренных наносистемах.

В разделе 5.3 развита теория переизлучения ультракоротких импульсов электромагнитного поля регулярными многоатомными системами, составленными из одинаковых сложных атомов с учетом хаотических тепловых колебаний [A23]. Показано, что учет тепловых колебаний приводит к заметным изменениям "дифракционных" максимумов, характерных для регулярных мишеней с неподвижными атомами. В качестве примера рассмотрена одномерная решетка и проведено обобщение на двухмерные и трехмерные решетки. Общее

выражение по расчёту спектра такое же, как и для спектра без учёта тепловых колебаний, за исключением фактора

$$\langle g_N(\mathbf{pd}) \rangle = \sum_{\mathbf{R}_a^0, \mathbf{R}_b^0 (a \neq b)} e^{-i\mathbf{p}(\mathbf{R}_a^0 - \mathbf{R}_b^0)} \times \exp \left\{ - \sum_s \frac{(\mathbf{p}\mathbf{e}_s)^2}{NM\omega_s} (2 \langle n^s \rangle_T + 1) \sin^2[\mathbf{k}(\mathbf{R}_a^0 - \mathbf{R}_b^0)/2] \right\}, \quad (21)$$

где $\langle n^s \rangle_T = (\exp(\omega_s/T) - 1)^{-1}$ - среднее число фононов, \mathbf{R}_a^0 - радиус-вектор равновесного положения атома с номером a в мишени, s индекс моды нормальных колебаний, \mathbf{e}_s - единичные векторы поляризации перпендикулярные волновому вектору \mathbf{k} . Например, приведём рисунок 6, который показывает как сильно меняют спектр тепловые колебания одноатомной цепочки

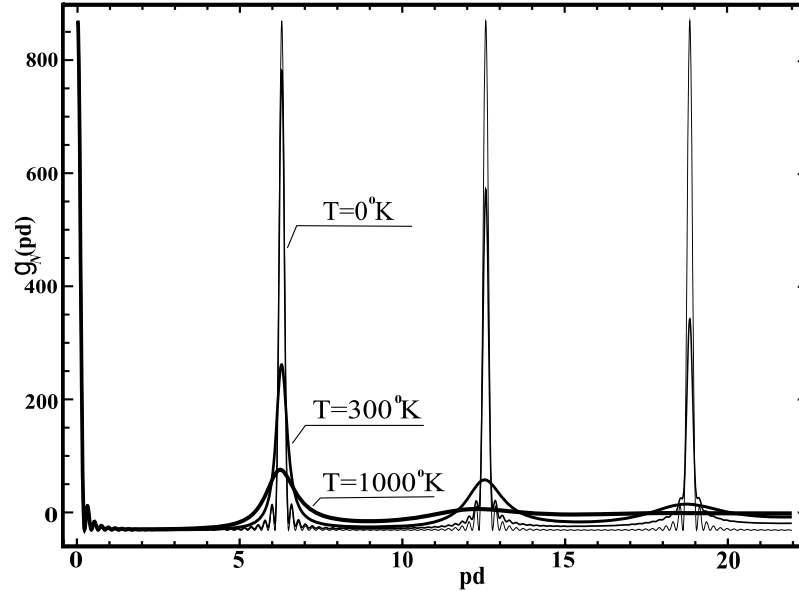


Рис. 6. Зависимость интерференционного фактора $\langle g_N(\mathbf{pd}) \rangle$ с учётом тепловых колебаний, от безразмерного параметра \mathbf{pd} при $v = 5 \text{ km/s}$, для атомов углерода и при трех значениях температуры, в градусах Кельвина, при межатомном расстоянии $d = 2$, а также результаты расчета без учета тепловых колебаний - тонкая сплошная линия; три более толстые сплошные линии соответствуют росту температуры: толще линия - больше температура.

В разделе 5.4 рассмотрено влияние присутствия дефектов в наноструктурированных мишенях на интерференционные спектры при переизлучение аттосекундных импульсов электромагнитного поля [A24]. Получены общие выражения для расчетов спектральных распределений одномерными, двухмерными и трехмерными многоатомными наносистемами, составленными из одинаковых сложных атомов с дефектами типа изгибов, вакансий и разрывов. В качестве

примеров, допускающих простое аналитическое представление, проведены расчеты изменений интерференционных спектров: линейной цепочкой с удаленными несколькими атомами (цепочка с разрывами), линейной цепочкой с изгибом. Развито обобщение на двух- и трехмерные наносистемы. Предложенный подход непосредственно может быть распространен на более общие типы дефектов.

В разделе 5.5 найдено аналитическое решение уравнения Шредингера в приближении внезапных возмущений атома электромагнитными импульсами аттосекундной и меньшей длительности [A27]. При этом поле ультракороткого импульса учитывается точно в рамках приближения внезапных возмущений и не используется дипольное приближение. Развитая методика позволяет произвести точный учет пространственной неоднородности поля ультракороткого импульса на размерах мишени, в том числе и действие магнитной составляющей электромагнитного поля. Результаты представлены в виде простых аналитических формул.

В разделе 5.6 рассмотрены неупругие процессы и переизлучение импульсов электромагнитного поля аттосекундной и меньшей длительности при взаимодействии с атомами на основе точного решения [A25] (см. раздел 5.5). Развитая методика расчетов, позволяющая произвести точный учет пространственной неоднородности поля ультракороткого импульса и импульсов фотонов в процессах переизлучения. Результаты представлены в виде аналитических формул. В качестве примеров рассчитаны вероятности неупругих процессов и спектры переизлучения ультракоротких импульсов электромагнитного поля одноэлектронными атомами.

В последнем разделе 5.7 рассмотрено взаимодействие сильного 2 модового квантованного электромагнитного поля с атомом. Найдено аналитическое решение уравнения Шредингера для системы - электрон в двухмодовом квантованном электромагнитном поле. Полученное решение позволяет рассчитывать спектры фотоэлектронов и скорости ионизации атомов в сильных электромагнитных полях. Показано, как можно применить полученные выражения в случае ионизации атома в таких полях [A30]. В этой же разделе показано, что 2 модовые квантованные электромагнитные поля могут генерировать высокоинтенсивные квантово-запутанные фотоны [A32].

В шестой главе развита теория по расчёту спектров переизлучения ультракоротких импульсов электромагнитного поля на динамических мишенях,

таких как сталкивающийся атом водорода с протоном, релаксирующий атом, оже-переходы. Развитый подход распространён на столкновения ионов с динамическими мишенями, где рассчитываются сечения ионизации [A14, A16, A21].

В разделе 6.1 рассмотрены процессы переизлучения ультракоротких импульсов электромагнитного поля и ионизации системами, находящимися в нестационарных состояниях, используя развитую теорию [A21]. В качестве примеров рассчитаны вероятности переизлучения ультракоротких импульсов электромагнитного поля при резонансной перезарядке протона на атоме водорода, при распаде квазистационарного состояния и вероятности переизлучения аттосекундных импульсов системой в резонансном внешнем поле, в двух последних случаях рассмотрены ещё и вероятности ионизации систем. Развитая методика допускает распространение на более сложные мишени, в том числе, на находящиеся в состоянии столкновения и разного рода химические реакции. Показано, что спектры переизлучения и вероятности переходов динамических систем в какое-либо стационарное состояние существенно зависят от момента действия ультракороткого импульса электромагнитного поля на динамическую систему.

В разделе 6.2 рассмотрены процессы ионизации при взаимодействии ультракороткого импульса электромагнитного поля с атомами, находящимися в нестационарных состояниях, используя развитую теорию [A14, A16]. В качестве примера рассчитана вероятность и сечения ионизации водородоподобного атома при распаде квазистационарного состояния и оже-распаде. Развитая методика допускает распространение на более сложные мишени, в том числе, на находящиеся в состоянии столкновения и разного рода химические реакции. Показано, что сечения переходов динамических систем в какое-либо стационарное состояние существенно зависят от момента действия поля иона на динамическую систему. Получены следующие выражения:

1) Сечения ионизации атома водорода, находящегося в состоянии радиационного распада ударом релятивистского иона

$$\sigma_{ion} = \sigma_{2p} e^{-\Gamma t_0} + \sigma_{1s} (1 - e^{-\Gamma t_0}), \quad (22)$$

где

$$\sigma_{nl} = 8\pi \left(\frac{Z}{v}\right)^2 \lambda_{nl} \left(\ln \frac{2\alpha_{nl} v^2 \gamma}{\eta Z \Omega_{nl}} - \frac{\beta^2}{2} \right). \quad (23)$$

В (23) для $1s$ ионизации - $\lambda_{1s} = 0.2834, \alpha_{1s} = 3.264, \Omega_{nl} = 0.7113$, для $2p$ ионизации - $\lambda_{2p} = 0.5312, \alpha_{2p} = 41.38, \Omega_{2p} = 0.1699$, γ и β^2 - соответственно релятивистские гамма и бетта факторы, $\eta = 1.781$. На рисунке 7 приведена зависимость относительного сечения σ_{ion}/σ_{2p} от безразмерного времени Γt_0 для заряда иона $Z = 20$ и скорости иона $v/c = 0,9$. Следуем сказать, что если рассматриваем не атом водорода, а водородоподобный атом, то надо в выражении (23) Z заменить на Z/Z_t .

2) Если рассмотреть KLL переходы электронов при Оже-распаде для водородоподобных атомов, т.е. Оже-электрон в континууме, а другой электрон составляет водородоподобный атом, получим для сечения ионизации Оже-электрона

$$\sigma_{ion12} = 8\pi \left(\frac{Z}{v}\right)^2 1.1886e^{-\Gamma t_0} + \sigma_{1s}(1 - e^{-\Gamma t_0}). \quad (24)$$

Также представим график зависимости сечения (24), нормированного к сечению ионизации при $t_0 = 0$ (до Оже-перехода) т.е. $\sigma_{t_0} = 8\pi \left(\frac{Z}{v}\right)^2 1.1886$, от Γt_0 на рисунке 8.

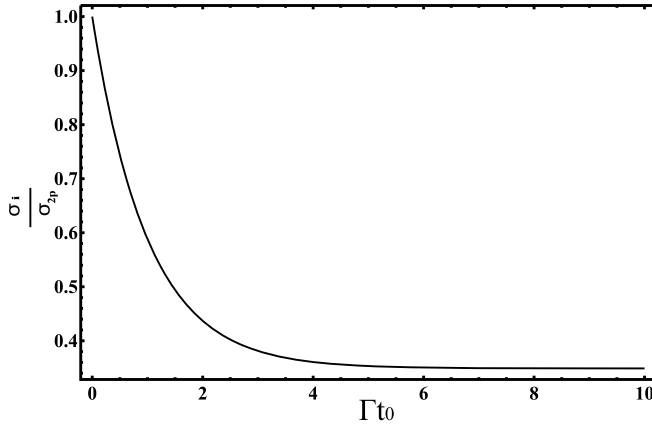


Рис. 7. Зависимость относительного сечения σ_{ion}/σ_{2p} от безразмерного времени Γt_0 для заряда иона $Z = 20$ и скорости иона $v/c = 0,9$.

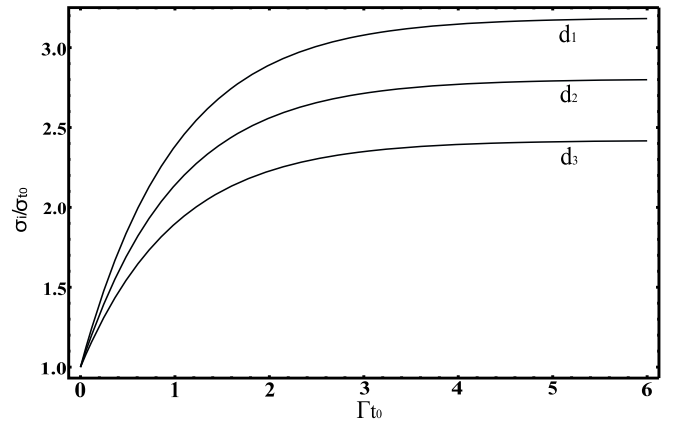


Рис. 8. Зависимость относительного сечения $\sigma_{ion}/\sigma_{t_0}$ от безразмерного времени Γt_0 для трёх значений $d_1 = Z/Z_t = 1/5, d_2 = Z/Z_t = 1, d_3 = Z/Z_t = 5$ и скорости иона $v/c = 0,9$.

Из рисунка 8 можно увидеть, что сечение полной ионизации сильно зависит от Γt_0 и может меняться в несколько раз.

В заключении кратко сформулированы основные результаты полученные в диссертации и выносимые автором на защиту.

Автор пользуется возможностью выразить искреннюю благодарность профессору В.И. Матвееву за многочисленные плодотворные дискуссии и консультации, профессору М.В. Федорову за предоставление возможности многократно выступать на семинарах теоретического сектора отдела мощных лазеров Института общей физики РАН имени А. М. Прохорова, а также чл.-кор. И.Н. Мешкову за обсуждение и интерес проявленный к работе по эффекту кратности столкновений и док. физ.-мат. наук М.К. Есееву за предоставленную помощь.

Список публикаций по материалам диссертации

Статьи в рецензируемых журналах из списка ВАК

- A1. Матвеев, В. И. Потери энергии быстрыми тяжёлыми структурными ионами при кратных столкновениях с двухатомными молекулами / В. И. Матвеев, Е. С. Гусаревич, С. В. Рябченко, Д. Н. Макаров // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2008. — Т. 88, № 4. — С. 268–275.
- A2. Матвеев, В. И. Потеря электронов быстрыми тяжёлыми структурными ионами при столкновениях с двухатомными молекулами / В. И. Матвеев, Е. С. Гусаревич, Д. Н. Макаров, С. В. Рябченко // *Вестник Поморского университета. Серия «Естественные и точные науки»*. — 2008. — Т. 3, — С. 64–75.
- A3. Матвеев, В. И. Эффективное торможение быстрых тяжелых структурных ионов при кратных столкновениях с молекулами и наночастицами / В. И. Матвеев, Е.С. Гусаревич, Д. Н. Макаров // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2009. — Т. 136, № 5, С. 843-852.
- A4. Матвеев, В. И. К теории потерь энергии быстрыми заряженными частицами / В. И. Матвеев, Д. Н. Макаров, Е.С. Гусаревич // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2010. — Т. 92, № 5. — С. 317–323.
- A5. Матвеев, В. И. Процессы обдирки быстрых гелиеподобных ионов при кратных столкновениях с двухатомными молекулами / В. И. Матвеев, Д. Н.

- Макаров, Х. Ю. Рахимов // Письма в журнал технической физики. — 2011. — Т. 37, № 12. — С. 73–79.
- A6. Matveev, V. I. Electron loss of fast projectiles in collisions with molecules / V.I. Matveev, D.N. Makarov, Kh.Yu.Rakhimov // *Physical Review A* .— 2011.— Vol. 81, № 1,— P. 012704-012710 .
- A7. Матвеев, В. И. Приближение эйконала в теории потерь энергии быстрыми заряжёнными частицами / В. И. Матвеев, Д. Н. Макаров, Е.С. Гусаревич // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2011. — Т. 139, № 5, — С. 868–882 .
- A8. Матвеев, В. И. Непертурбативная оболочечная поправка к формуле Бете-Блоха для потерь энергии быстрыми заряженными частицами / В. И. Матвеев, Д. Н. Макаров // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2011. — Т. 94, № 1. — С. 3–7.
- A9. Матвеев, В. И. Поправка Блоха в теории потерь энергии быстрыми заряженными частицами / В. И. Матвеев, Д. Н. Макаров // *Журнал технической физики*. — 2012. — Т. 82, № 11, — С. 137–139 .
- A10. Макаров, Д. Н. Флуктуации потерь энергии быстрыми заряженными частицами / Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2012. — Т. 95, № 3. — С. 131–137.
- A11. Макаров, Д. Н. Флуктуации потерь энергии при столкновении быстрых ионов конечных размеров с атомами / Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2013. — Т. 143, № 3, — С. 453–458 .
- A12. Макаров, Д. Н. Эффекты интерференции при переизлучении ультракоротких импульсов электромагнитного поля многоатомными системами / Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2013. — Т. 144, № 5, — С. 905–913 .
- A13. Макаров, Д. Н. Спектры переизлучения и эффекты интерференции при взаимодействии ультракоротких импульсов электромагнитного поля с на-

- носистемами / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев // Оптика и спектроскопия.* — 2014. — Т. 116, № 2, — С. 179–189 .
- A14. *Макаров, Д. Н.* Ионизация динамических мишеней в поле ультракороткого импульса / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев, К. А. Макарова // Письма в журнал технической физики.* — 2014. — Т. 40, № 17, — С. 103–110 .
- A15. *Макаров, Д. Н.* Переизлучение ультракоротких импульсов электромагнитного поля многоэлектронными атомами / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев // Журнал экспериментальной и теоретической физики.* — 2014. — Т. 146, № 4, — С. 685–692 .
- A16. *Матвеев, В. И.* Динамика электронных переходов и спектры переизлучения аттосекундных импульсов электромагнитного поля / *В. И. Матвеев, Д. Н. Макаров // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики.* — 2014. — Т. 99, № 5, — С. 299–306 .
- A17. *Макаров, Д. Н.* Флуктуация потерь энергии при столкновении заряженных частиц с осциллятором / *Д. Н. Макаров // Журнал экспериментальной и теоретической физики.* — 2014. — Т. 146, № 4, С. 711–719 .
- A18. *Макаров, Д. Н.* Аналитическая формула для поправки Баркаса в теории торможения заряженных частиц / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев, К. А. Макарова // Письма в журнал технической физики.* — 2015. — Т. 41, № 10, — С. 65–71 .
- A19. *Макаров, Д. Н.* Потери энергии при столкновении заряженных частиц с осциллятором / *Д. Н. Макаров // Журнал технической физики.* — 2015. — Т. 85, № 4, С. 7–12 .
- A20. *Макаров, Д. Н.* Поляризационная поправка в теории потерь энергии заряженными частицами / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев // Журнал экспериментальной и теоретической физики.* — 2015. — Т. 147, № 4, — С. 896–905.
- A21. *Макаров, Д. Н.* Процессы ионизации атомов, находящихся в нестационарных состояниях, полем аттосекундного импульса / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев // Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики.* — 2015. — Т. 101, № 3. — С. 170–175.

- A22. *Матвеев, В. И.* Размеры нейтральных кластеров и процессы их фрагментации при ионном распылении твёрдого тела / *В. И. Матвеев, Д. Н. Макаров, С. Н. Капустин* // *Письма в журнал технической физики*. — 2015. — Т. 41, № 16, — С. 15–20.
- A23. *Макаров, Д. Н.* Влияние тепловых колебаний на эффекты интерференции при переизлучении аттосекундных импульсов электромагнитного поля регулярными многоатомными системами / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев* // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2015. — Т. 101, № 9. — С. 677–682.
- A24. *Матвеев, В. И.* Влияние дефектов в регулярных наносистемах на процессы интерференции при переизлучении аттосекундных импульсов электромагнитного поля / *В. И. Матвеев, Д. Н. Макаров* // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2016. — Т. 103, № 4. — С. 314–319.
- A25. *Макаров, Д. Н.* Неупругие процессы и переизлучение импульсов электромагнитного поля аттосекундной и меньшей длительности при взаимодействии с атомом / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев* // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2016. — Т. 103, № 12. — С. 851–856.
- A26. *Макаров, Д. Н.* К теории ионизационного торможения быстрых разяженных частиц / *Д. Н. Макаров* // *Журнал технической физики*. — 2016. — Т. 86, № 9. — С. 141–145.
- A27. *Макаров, Д. Н.* Аналитическое решение уравнения Шредингера в приближении внезапных возмущений атома электромагнитными импульсами аттосекундной и меньшей длительности / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев* // *Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2016. — Т. 103, № 6. — С. 464–468.
- A28. *Matveev, V. I.* Defects in regular nanosystems and interference spectra at reemission of electromagnetic field attosecond pulses / *V. I. Matveev, D. N. Makarov* // *EPJ Web of Conferences*. — 2017. — V. 132. — p. 02015.

- A29. *Makarov, D. N.* Reemission spectra and inelastic processes at interaction of attosecond and shorter duration electromagnetic pulses with atoms / *D. N. Makarov, V. I. Matveev* // *EPJ Web of Conferences*. — 2017. — V. 132. — p. 03031.
- A30. *Макаров, Д. Н.* Ионизация в двухмодовом квантованном электромагнитном поле / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев* // *Теоретическая и математическая физика*. — 2017. — Т. 191, № 1, — С. 25–33.
- A31. *Макаров, Д. Н.* Спектры переизлучения импульсов электромагнитного поля аттосекундной и меньшей длительности многоэлектронными атомами / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев* // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. — 2017. — Т. 152, № 2, — С. 227–233.
- A32. *Makarov, D. N.* High Intensity Generation of Entangled Photons in a Two-Mode Electromagnetic Field / *D. N. Makarov* // *Annalen der physik*. — 2017. — Vol. 529, № 10, — P. 1600408.
- A33. *Makarov, D. N.* New-Type Internal Target for Structural Ion Stripping / *D. N. Makarov, V. I. Matveev* // *Chinese Physics C*. — 2018. — Vol. 42, № 1, — P. 017001.

Монографии

- A34. *Матвеев, В. И.* Непертурбативные методы в теории столкновений быстрых тяжёлых ионов с атомами и молекулами / *В. И. Матвеев, Д. Н. Макаров*. — Архангельск: ИПЦ САФУ им. М.В. Ломоносова, — 2012. — 153 с.
- A35. *Матвеев, В. И.* Столкновения быстрых многозарядных ионов с атомами и молекулами / *В. И. Матвеев, Д. Н. Макаров*. — Архангельск: ИПЦ САФУ им. М.В. Ломоносова, — 2013. — 216 с.

Печатные труды конференций и НИР

- A36. *Макаров, Д. Н.* Кратные столкновения снаряда с двухатомной молекулой / *Д. Н. Макаров, С. В. Рябченко* // XIX- конференция и школа молодых учёных по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС XIX). Сборник

- тезисов — Т. 1. — г. Архангельск - Соловки: 22 июня – 29 июня 2009. — С. 27–28.
- A37. *Макаров, Д. Н.* Поправка Блоха и асимптотика Бёте для потерь энергии, как частный случай малоуглового эйконального приближения / *Д. Н. Макаров* // XIX- конференция и школа молодых учёных по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС XIX). Сборник тезисов — Т. 1. — г. Архангельск - Соловки: 22 июня – 29 июня 2009. — С. 133–134.
- A38. *Макаров, Д. Н.* Потери энергии быстрых тяжёлых структурных ионов при кратных столкновениях с молекулами и наночастицами / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев, Е. С. Гусаревич* // XX международная конференция "Взаимодействие ионов с поверхностью"(ВИП-2011). Сборник тезисов— Т. 1. — г. Звенигород: 25 августа - 29 августа, 2011 г.
- A39. *Макаров, Д. Н.* Интерференционные эффекты при переизлучении ультракороткого импульса электромагнитного поля многоатомными системами с учётом тепловых колебаний / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев* // XX-конференция и школа молодых учёных по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС XX). Сборник тезисов — Т. 1. — г. Воронеж: 23 сентября – 27 сентября, 2013 г.
- A40. *Макаров, Д. Н.* Масс-спектры кластеров при ионном распылении металла / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев* // 22 - Международная конференция "Взаимодействие ионов с поверхностью"(ВИП-2015). Сборник тезисов— Т. 1. — г. Москва: 20 августа - 24 августа , 2015 г.
- A41. Спектроскопия с высоким временным разрешением и рентгеноструктурный анализ для диагностики наноматериалов и наноустройств: Отчёт по НИР (итоговый)/САФУ им. М.В. Ломоносова; рук. *Макаров Д.Н.*; исп. *К. А. Макарова, С. Н. Капустин.* – Архангельск, 2014 г., – 51 с.– № ГР 01201463943.
- A42. Непертурбативные эффекты в процессах потерь энергии и электронов быстрыми высокозарядными ионами при столкновениях с атомами, молекулами и наночастицами: Отчёт по НИР (промежуточный)/САФУ им. М.В. Ломоносова; рук. *Матвеев В.И.*; исп. *Макаров Д.Н.* [и др.]. – Архангельск, 2015 г., – 62 с.– № ГР 114100140002.

- A43. *Макаров, Д. Н.* Рассеяние ультракоротких импульсов электромагнитного поля на наносистемах с дефектами в задачах рентгеноструктурного анализа / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев* // Третья Международная молодежная научная конференция. Физика. Технологии. Инновации ФТИ-2016. Сборник тезисов—Т. 1. — г. Екатеринбург: 16 мая - 20 мая , 2016 г.
- A44. *Matveev, V. I.* Straggling of Energy Loss at Collisions of Fast Ions with Atoms / *V. I. Matveev, D. N. Makarov* // 12th European Conference on Atoms Molecules and Photons (ECAMP 12), Frankfurt am Main, Germany, September 5th to 9th, 2016. Book of Extended Abstracts, p.365.
- A45. *Makarov, D. N.* Influens of Defects in Regular Nanosystems on Interference Processes at the Reemission of Attosecond Electromagnetic Pulses / *D. N. Makarov, V. I. Matveev* // 12th European Conference on Atoms Molecules and Photons (ECAMP 12), Frankfurt am Main, Germany, September 5th to 9th, 2016. Book of Extended Abstracts, p.38.
- A46. *Matveev, V. I.* Scattering of Attosecond Electromagnetic Field Pulses by Multielectron Atoms / *V. I. Matveev, D. N. Makarov* // The International Conference on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces (MPS-2016), Moscow, Russia, August 23 until August 26, 2016 in Lomonosov Moscow State University, p. 50.
- A47. *Makarov, D. N.* Polarization Correction in the Theory of Energy Losses by Heavy Ions / *D. N. Makarov, V. I. Matveev* // The International Conference on Many Particle Spectroscopy of Atoms, Molecules, Clusters and Surfaces (MPS-2016), Moscow, Russia, August 23 until August 26, 2016 in Lomonosov Moscow State University, p. 95.
- A48. *Макаров, Д. Н.* Дефекты в регулярных наносистемах и спектры интерференции при переизлучении аттосекундных импульсов электромагнитного поля / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев* // XXV Съезд по спектроскопии, Сборник тезисов—Т. 1. — г. Троицк, Москва : 3 октября - 7 октября , 2016 г.
- A49. *Макаров, Д. Н.* Спектры переизлучения и неупругие процессы при взаимодействии импульсов электромагнитного поля аттосекундной и меньшей

длительности с атомами / *Д. Н. Макаров, В. И. Матвеев* // XXV Съезд по спектроскопии, Сборник тезисов— Т. 1. — г. Троицк, Москва : 3 октября - 7 октября , 2016 г.

Препринты

- A50. *Makarov, D. N.* Quantum entanglement of a harmonic oscillator in an electromagnetic field / *D. N. Makarov* // Cornell University Library, arXiv:1709.04716, Submitted on 14 Sep 2017.
- A51. *Makarov, D. N.* Coupled harmonic oscillators and their quantum entanglement / *D. N. Makarov* // Cornell University Library, arXiv:1710.01158, Submitted on 3 Oct 2017.

Список литературы

- [1] *Baltz, A. J.* Exact Dirac equation calculation of ionization and pair production induced by ultrarelativistic heavy ions / *A. J. Baltz* // *Phys. Rev. Lett.*— 1997. — Vol. 78. — P. 1231–1234.
- [2] *Agostini, P.* The physics of attosecond light pulses / *P. Agostini, L. F. DiMauro* // *Rep. Prog. Phys.*— 2004. — Vol. 67. — P. 813–855.
- [3] *Corkit, P. B.* Attosecond Science / *P. B. Corkit, F. Krausz* // *Nature Phys.*— 2007. — Vol. 3. — P. 381–387.
- [4] *Krausz, F.* Attosecond physics / *F. Krausz, M. Ivanov* // *Rev. Mod. Phys.*— 2009. — Vol. 81. — P. 163–234.
- [5] *Желтиков, А.М.* Комбинационное рассеяние света в фемто- и аттосекундной физике / *А.М. Желтиков* // *УФН*— 2011. — Т. 181. — С. 33–58.
- [6] *Moshhammer, R.* Ionization of Helium in the Attosecond Equivalent Light Pulse of 1 GeV/Nucleon U^{92+} Projectiles / *R. Moshhammer, W. Schmitt, J. Ullrich et al.* // *Phys. Rev. Lett.*— 1997. — Vol. 79. — P. 3621–3624.

- [7] *Пресняков, Л.П.* Элементарные процессы с участием многозарядных ионов / *Л.П. Пресняков, В.П. Шевелько, Р.К. Янев* // *М.: Энергоатомиздат*—1986.—199 с.
- [8] *Beyer, H.F.* Introduction to physics of highly charged ions / *H.F. Beyer, V.P. Shevelko* // *IOP Publishing Ltd, Bristol and Philadelphia*—2003.—376 p.
- [9] *Carron, N. J.* Introduction to the Passage of Energetic Particles through Matter / *N. J. Carron* // *CRC Press, New York, London*—2007.—386 p.
- [10] *Гольдбергер, М.* Теория столкновений / *М. Гольдбергер, К. Ватсон* // *М.Мир: Пер. с англ.* —1967. —867 с.
- [11] *Bethe, H. A.* Theory of the passage of fast corpuscular rays through matter / *H. A. Bethe* // *Ann. d. Phys.* —1930. — Vol. 5. — P. 325–400.
- [12] *Bloch, F.* Stopping power for fast charged particles and ions / *F. Bloch* // *Annalen der Physik* —1933. — Vol. 16. — P. 285–297.
- [13] *Ziegler, J. F.* Stopping of Energetic Light Ions in Elemental Matter / *J. F. Ziegler* // *Appl. Phys. A: Mater. Sci. Process* —1999. — Vol. 85. — P. 1249–1272.
- [14] *Sigmund, P. K.* Special issue on Ion Beam Science: Solved and Unsolved Problems / *P. K. Sigmund* // *Dan. Vidensk. Selsk. Mat. F. Medd.*—2006. — Vol. 52. — 557 p.
- [15] *Бор, Н.* Избранные труды / *Н. Бор* // *М. Наука*,—1970.—Т. 1.—584 с.
- [16] *Ashley, J.C.* Z^3 effect in the stopping power of matter for charged particles / *J.C. Ashley, R.H. Ritchie, W. Brandt* // *Phys. Rev. B* —1972. — Vol. 5. — P. 2393–2397.
- [17] *Salvat, F.* Analytical Dirac-Hartree-Fock-Slater screening function for atoms ($Z=1-92$) / *F. Salvat, J. D. Martinez, R. Mayol, J. Parellada* // *Physical Review A*. —1987. — Vol. 36. — P. 467–474.
- [18] *Ouichaoui, S.* Energy loss straggling of swift heavy ions in metal foils at $E/A \sim 2$ MeV/u / *S. Ouichaoui, E. Hourani, L. Rosier, et.al.* // *Nucl. Instr. and Meth. B* —2000. — Vol. 164-165. — P. 259–267.