

ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н., доцента Ипатова Андрея Николаевича
о диссертационной работе Киселева Максима Дмитриевича
«Моделирование нелинейных и сверхбыстрых ионизационных процессов
в атомах в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом
диапазоне», представленной на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертационная работа М.Д. Киселева посвящена исследованию процесса фотоионизации в различных атомных и ионных системах под действием высокоинтенсивного когерентного электромагнитного излучения в спектральной области экстремального ультрафиолета и мягкого рентгена. В настоящее время данный спектральный диапазон активно осваивается экспериментаторами благодаря прогрессу в технике генерации излучения (развитие лазеров на свободных электронах и источников, основанных на генерации высоких лазерных гармоник), а также в связи с улучшением процедуры регистрации продуктов реакции. Высокая интенсивность и сверхмалая длительность импульсов излучения дают возможность исследовать явления на недоступных ранее временных масштабах. При этом высококачественное теоретическое моделирование является очень важным элементом при планировании будущих экспериментов, т.к. позволяет заранее оценить ожидаемую величину исследуемого эффекта. Поэтому настоящая диссертационная работа является крайне актуальной и может быть востребована ведущими мировыми научными группами.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и одного приложения. Объём диссертации составляет 173 страницы и включает в себя 50 рисунков и 11 таблиц. Список литературы содержит 176 библиографических ссылок.

Во **введении** приведены общие сведения о диссертационной работе, такие как актуальность выбранной темы исследования, цели и задачи, научная новизна и практическая значимость, выносимые на защиту положения, а также информация о публикациях соискателя и данные об апробации результатов работы.

Первая глава содержит описание основных методов, которые автор диссертации использовал на разных этапах моделирования исследуемых ионизационных процессов, а именно: многоконфигурационного приближения Хартри-Фока и метода R-матрицы с B-сплайнами.

Во **второй главе** обсуждаются результаты совместной теоретико-экспериментальной работы по изучению образования и распада промежуточных резонансов иона неона вида $1s^2np$ под действием импульса лазера на свободных электронах (ЛСЭ). С помощью метода R-матрицы автором смоделированы в двух моделях сечения образования соответствующих состояний электронной системы, вероятности фотоионизации как двухпараметрические функции энергии образовавшегося при распаде электрона и энергии падаю-

щего фотона, а также угловые распределения фотоэлектронов. Показано, что при описании данных процессов важную роль играет учёт каналов распада исследуемых резонансов с пассивным электроном. Полученные результаты теоретического моделирования были использованы для интерпретации данных эксперимента, проведённого на Европейском ЛСЭ (EuXFEL, г. Гамбург, Германия), и показали очень хорошее согласие.

В **третьей главе** речь идёт о моделировании динамики многократной ионизации атома криптона на его $4s$ и $4p$ оболочках с использованием скоростных уравнений. Приведены результаты численного моделирования ряда параметров (заселённости ионных конфигураций, выходы ионов различной кратности, спектры электронов) для импульса длительностью 18 фс с различными значениями флюенса падающего пучка и энергии фотона. Важной частью главы является описание разработанного автором аналога скоростных уравнений для статистических тензоров, позволившего эффективно учитывать поляризацию промежуточных ионных состояний и поляризацию падающего излучения, и было показано, что эти подходы эквивалентны. Приведены результаты расчетов, проведенных с учётом поляризации, и их сравнение со случаем без поляризации.

Четвёртая глава также посвящена ионизации атома криптона фотонами высоких энергий, а именно, выше 92 эВ, что соответствует превышению порога ионизации $3d$ -оболочки. Обсуждается вопрос образования и распада при таких энергиях фотона так называемых корреляционных спутниковых линий вида $3d^{-1}4p^{-1}nl$ и $3d^{-1}4s^{-1}nl$. Как и в случае, описанном во второй главе, авторское моделирование сопровождало проведённый на установке MAX IV (г. Лунд, Швеция) первый в мире эксперимент по изучению таких состояний с угловым разрешением. Сопоставление полученных численных результатов по угловой анизотропии отдельных спутниковых линий и по фотоэлектронным спектрам показало хорошее согласие с экспериментом. Кроме того, автору удалось показать, что при определённых условиях механизм образования в терминологии встряски электронов может быть определён однозначно.

Пятая глава завершает представленные в рамках данной диссертации исследования моделированием более экзотического процесса ионизации, а именно, ионизации под действием так называемого закрученного света в виде бесселевой волны. Последовательно и без ограничений, накладываемых как на волновые функции, описывающие состояния атома и иона, так и на число мультиполей в разложении падающего поля, автору удалось разработать формализм, в рамках которого оказывается возможным получать строгие аналитические выражения для угловых распределений фотоэлектронов, образованных в результате воздействия бесселева пучка на определённую атомную мишень. Следует особо отметить тот факт, что в получаемых по разработанной процедуре выражениях параметры анизотропии могут быть рассчитаны в любом приближении, а учёт эффектов закрученности падающего излучения сводится к аналитическим множителям в виде малых d -функций Вигнера, зависящих от угла раскрытия конуса падающего бесселева

пучка. Автор продемонстрировал эффективность данного метода на примере ионизации атомов гелия в области перекрывающихся дипольного и квадрупольного автоионизационных резонансов, а также предложил новую методику диагностики бесселевых пучков.

Заключение содержит сведения об основных результатах работы, библиографический список опубликованных работ автора по теме диссертации и общий список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на высоком научном уровне, в достаточной степени апробирована публикациями в соответствующих исследовательской области научных журналах (в том числе высокорейтинговых) и докладами на конференциях различного уровня. В качестве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

- Наличие совместных с экспериментаторами работ, что показывает высокую заинтересованность ведущими мировыми экспериментальными группами в результатах качественного теоретического моделирования, соответствующего теме диссертации;
- Непосредственный вывод рабочих формул и подробное обоснование разработанного формализма, что позволяет полностью проследить авторскую логику и проанализировать промежуточные этапы;
- Проведение демонстрационных расчётов на примере конкретных физических процессов, а также пошаговый анализ используемых моделей «от простого к сложному».

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

- Амплитуды ионизации могут быть рассчитаны в рамках различных калибровок (например, длины и скорости), однако, в Главе 3 автором явно не указано, в какой именно калибровке проводились расчёты амплитуд ионизации криптона и насколько хорошо согласуются результаты в этих приближениях;
- В Главе 5 для волновых функций образовавшихся фотоэлектронов используется разложение по плоским волнам, но не пояснено, исследовался ли вопрос о возможной закрученности этих электронов.

При этом указанные замечания призваны помочь автору в будущем излагать материал более доступно и не являются критическими по отношению к проведённым исследованиям. Соискатель получил большое количество важных и принципиально новых результатов, что продвинуло понимание процессов в соответствующей области, поэтому диссертация заслуживает высокой оценки.

Общее впечатление о диссертационной работе М.Д. Киселева положительное. Считаю, что диссертация «Моделирование нелинейных и сверх-

быстрых ионизационных процессов в атомах в мягком рентгеновском и экстремальном ультрафиолетовом диапазоне» соответствует специальности 1.3.6. «Оптика» (по физико-математическим наукам), а также критериям, определённым пп. 2.1–2.5 «Положения о присуждении учёных степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова», предъявляемым к кандидатским диссертациям, и оформлена согласно приложениям № 8 и 9 «Положения о совете по защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова», а её автор — Киселев Максим Дмитриевич — заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.6. «Оптика».

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук, доцент,
профессор кафедры физики Санкт-Петербургского
национального исследовательского
Академического университета имени Ж.И. Алфёрова

Ипатов Андрей Николаевич

«25» апреля 2024 г.

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.02 — «Теоретическая физика»

Адрес места работы:

194021, г. Санкт-Петербург, ул. Хлопина, д. 8, корп. 3, литер А
Федеральное государственное бюджетное учреждение высшего образования
и науки «Санкт-Петербургский национальный исследовательский Академи-
ческий университет им. Ж.И. Алфёрова Российской академии наук» (СПбАУ
РАН им. Ж.И. Алфёрова)

Телефон: +7 (812) 247-44-84; e-mail: office@spbau.ru

«Подпись Ипатова Андрея Николаевича ЗАВЕРЯЮ»:

учёный секретарь
СПбАУ РАН им. Ж.И. Алфёрова
д.ф.-м.н., профессор

Липовский А.А.