

## ОТЗЫВ

официального оппонента д.ф.-м.н. Стрелкова Василия Вячеславовича  
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 фотоионизации в интенсивных когерентных коротковолновых полях. В оптической и инфракрасной области спектра этот круг явлений активно исследуется экспериментально после создания несколько десятилетий назад методики усиления чирпированных лазерных импульсов. Однако, до недавнего времени достаточно интенсивные источники в более коротковолновой области, а именно в области вакуумного ультрафиолета (ВУФ) и рентгеновского излучения, отсутствовали. Появление рентгеновских лазеров на свободных электронах (ЛСЭ) и источников, основанных на генерации высоких гармоник лазерного излучения, сделало возможным экспериментальные исследования фотоионизации в интенсивных коротковолновых полях. Кроме высокой интенсивности излучения, такие источники характеризуются очень малой длительностью импульса, лежащей в фемто- и даже аттосекундном диапазоне. Это дало возможность экспериментально изучать, в частности, явление кратной последовательной фотоионизации, сопровождающейся образованием многозарядных ионов в экзотических «полых» конфигурациях. Также стало доступным измерение угловых распределений продуктов реакции с высоким разрешением.

Такой прогресс в экспериментальных исследованиях требует соответствующего развития теоретических подходов. Кроме того, для планирования новых экспериментов необходимы результаты детального и надежного моделирования процессов ионизации в ВУФ и рентгеновском диапазоне. Это определяет важность теоретических исследований, проведенных в настоящей диссертации.

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

Во **введении** обосновывается актуальность темы исследования, формулируются цели и задачи работы, научная новизна диссертационной работы и

практическая значимость полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту, а также сведения об апробации диссертационной работы.

**В первой главе** приводится общее описание используемых для моделирования методов, а именно многоконфигурационного метода Хартри-Фока, с помощью которого рассчитывались волновые функции атомов и ионов в различных электронных конфигурациях, а также метода R-матрицы с B-сплайнами, в рамках которого проводились расчёты амплитуд исследуемых процессов ионизации.

**Вторая глава** посвящена исследованию образования экзотического состояния с двойной вакансией на K-оболочке в ионе неона под действием импульса лазера на свободных электронах. Методом R-матрицы с B-сплайнами в приближении LS-связи каналов произведены расчёты амплитуд фотоионизации для указанного процесса в двух моделях: в модели с активным *pr*-электроном и в модели с пассивным *pr*-электроном. Показано, что пренебрежение каналами распада с пассивным *pr*-электроном приводит к чрезвычайно сильно завышенным временам жизни рассматриваемых резонансов. Кроме того, результаты теоретического моделирования сопоставлены с результатами первого в мире эксперимента на линии SQS Европейского ЛСЭ (г. Гамбург, Германия) по исследованию таких резонансов. С учётом экспериментального разрешения электронного детектора получено хорошее согласие теории и экспериментальных данных по фотоэлектронным спектрам.

**Третья глава** диссертации посвящена исследованию ионизации внешних  $4s$  и  $4p$  оболочек криптона под действием импульса ЛСЭ. Рассматривается многократная ионизация атома криптона фотонами из одного и того же пучка излучения ЛСЭ с энергиями, не превышающими порог ионизации  $3d$ -оболочки ( $\sim 92$  эВ). Чтобы проследить динамику заселенностей состояний с различными электронными конфигурациями, применяется метод решения скоростных уравнений. Получены зависимости заселённости различных зарядовых состояний иона криптона  $Kr^{n+}$  до  $n = 3$  включительно от времени в течение действия импульса ЛСЭ длительностью 18 фс. При тех же параметрах падающего излучения смоделированы фотоэлектронные спектры. Дополнительно исследован вопрос о зависимости наблюдаемых параметров и заселённости различных электронных конфигураций от поляризации падающего излучения. Показано, что учёт поляризации излучения может привести к изменению в выходах ионов до 10% в зависимости от режима облучения, а также к подавлению отдельных линий в фотоэлектронных спектрах.

Глава завершается рассмотрением влияния ридберговских автоиониза-

ционных состояний типа  $4s^24p^4(^1D)ns/nd$  и  $4s^14p^5np$  на сечения фотопоглощения, спектры и угловые распределения фотоэлектронов при двухфотонной двойной ионизации криптона.

**В четвёртой главе** продолжено исследование ионизации атома криптона. Рассмотрена ионизация при больших значениях энергий падающего излучения, а именно, превышающих порог ионизации  $3d$ -оболочки. Рассматривается вопрос об образовании так называемых корреляционных сателлитных линий фотоэлектронного спектра криптона типа  $3d^{-1}4p^{-1}nl$  и  $3d^{-1}4s^{-1}nl$ . Теоретические исследования сопровождали эксперимент, проведённый на синхротроне MAX IV (г. Лунд, Швеция). В связи с этим третья глава содержит результаты сопоставления теоретических и экспериментальных фотоэлектронных спектров и энергетических зависимостей параметров анизотропии углового распределения фотоэлектронов.

**Пятая глава** посвящена исследованию вопроса об ионизации закрученным бесселевым пучком многоэлектронных атомов. Разработан теоретический аппарат для вычисления угловых распределений фотоэлектронов, вылетающих из многоэлектронного атома под действием такого пучка. При этом не накладывается ограничений на количество учитываемых мультиполей и на структуру волновых функций. Более того, рассмотрены случаи как циркулярно поляризованного закрученного бесселева пучка, так и линейно поляризованного.

Кроме того, показано, что угловое распределение фотоэлектронов (УРФ) при ионизации закрученным бесселевым пучком различной поляризации может быть получено из УРФ при ионизации плоской волной путём домножения каждой сферической гармоники  $Y_{kq}(\theta_p; \varphi_p)$  на малую  $D$ -функцию Вигнера, зависящую от угла раскрытия конуса бесселева пучка.

Разработанный математический аппарат применён на случай ионизации атома гелия в области низших автоионизационных дипольного  $2s2p\ ^1P_1$  и квадрупольного  $2p^2\ ^1D_2$  резонансов. Эта область энергий выбрана в связи с тем, что дипольный резонанс в сечении ионизации имеет фановский профиль с минимумом, достигающим околонулевого значения. Это позволяет недипольным эффектам выйти на передний план несмотря на то, что при других энергиях квадрупольный вклад на  $\sim 5$  порядков ниже дипольного. Вычисление угловых распределений при ионизации гелия показало, что в минимуме дипольного резонанса возникает сильная асимметрия вылета фотоэлектронов «вперёд-назад».

**В заключении** приводятся основные результаты диссертации, список работ автора по материалам диссертации и список цитируемой литературы.

Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне, хорошо апробирована публикациями в авторитетных журналах и докладами на российских и международных конференциях. В качестве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

- Надежность полученных результатов, определяемая совершенством применяемых теоретических подходов;
- Подробное сравнение теоретических результатов с экспериментальными в тех случаях, где современные эксперименты (в первую очередь, с использованием лазеров на свободных электронах) позволяют провести такое сравнение;
- Подробное изложение результатов работы в диссертации, а также в многочисленных ведущих научных журналах.

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

- В разделе 4.2 четвёртой главы, на мой взгляд, не уделено должное внимание возможным причинам расхождения в интенсивности отдельных корреляционных сателлитных линий для результатов теоретического моделирования фотоэлектронного спектра и экспериментально измеренного (рисунок 4.2).
- В пятой главе диссертации термины «закрученный пучок» и «бесселев пучок» употребляются в ряде случаев как синонимы. На мой взгляд, это некорректно: пучок может быть бесселевым, но не быть закрученным (таким является, например, пучок, определяемый выражением (5.35) с  $m_{\text{оам}}=0$ ); может быть закрученным, но не быть бесселевым (таким является, например, бессель-гауссов пучок).

Указанные замечания носят скорее методический характер и не умаляют заслуг соискателя в получении важных и интересных результатов, равно как и высокой оценки диссертации.

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

ляемым 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,  
ведущий научный сотрудник теоретического отдела  
Федерального государственного бюджетного учреждения науки  
Федерального исследовательского центра  
«Институт общей физики им. А.М. Прохорова Российской академии наук»  
(ИОФ РАН)

Стрелков Василий Вячеславович

«26» апреля 2024 г.

Контактные данные:

Телефон: +7 (499) 503-87-77 (доб. 3-35)

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена диссертация:

01.04.21 — «Лазерная физика»

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ГСП-1, ул. Вавилова, д. 38  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный  
исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова  
Российской академии наук» (ИОФ РАН)

Телефон: +7 (499) 503-87-34; e-mail: office@gpi.ru

«Подпись Стрелкова Василия Вячеславовича ЗАВЕРЯЮ»:

ВРИО учёного секретаря ИОФ РАН  
д.ф.-м.н., доцент

Глушков В.В.