

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Глазова Дмитрия Алексеевича
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

Активное развитие экспериментальных методов изучения процессов в интенсивных когерентных коротковолновых полях с появлением новейших источников ультрафиолетового и рентгеновского излучения открыло новые возможности, в частности, для исследования процесса фотоионизации. Передовые эксперименты в этой области проводятся в таких лабораториях как EuXFEL в Гамбурге и MAX IV в Лунде. Длительность импульсов в таких источниках достигает фемто- и аттосекунд. Среди новых эффектов, которые ранее были недоступны для наблюдения, можно отметить кратную последовательную фотоионизацию, в результате которой образуются многозарядные ионы в так называемых «полых» конфигурациях. Таким образом, современное состояние в этой области делает чрезвычайно востребованными соответствующие теоретические результаты. Они имеют большое значение как для интерпретации выполненных экспериментов, так и для планирования новых.

Диссертационная работа М.Д. Киселева посвящена исследованию таких процессов с использованием современных высокоточных теоретических методов, развитых научной группой А.Н. Грум-Гржимайло в Московском государственном университете. В работе получены важные новые результаты в этой области, в том числе, в таком динамично развивающемся направлении как процессы с участием фотонов с ненулевым угловым моментом.

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** обоснована актуальность выбранной тематики исследований, сформулированы цели и задачи работы, выделена научная

новизна и практическая значимость полученных результатов. Также представлены положения, выносимые на защиту, и предоставлена информация об апробации диссертационной работы.

В первой главе дано описание теоретических основ методов, используемых при различных расчётах в рамках представляемого диссертационного исследования (многоконфигурационный метод Хартри-Фока и метод R-матрицы).

Вторая глава посвящена изучению образования глубокого двухдырочного состояния на $1s$ -оболочке иона неона в поле импульса лазера на свободных электронах (ЛСЭ). Приведены результаты и обсуждение обширных расчётов соответствующего процесса фотоионизации в рамках метода R-матрицы и моделирования энергетических зависимостей сечений этого процесса с учётом «встряски» электронов и последующего распада образовавшихся конфигураций по каналам типа *participator* (активный электрон) и *spectator* (пассивный электрон). Важной частью второй главы является сравнение теоретического моделирования с реальным экспериментом по исследованию описываемых состояний, проведённым на EuXFEL (г. Гамбург, Германия).

Третья глава содержит результаты исследований процесса многократной ионизации $4s$ и $4p$ оболочек криптона под действием фотонов импульса ЛСЭ. Обсуждается динамика заселённостей различных зарядовых состояний ионов криптона до зарядности $+3$ включительно, а также поведение спектров фотоэлектронов при различных режимах облучения (изменяются флюенс и энергия фотонов). Кроме того, автором показано, что учёт поляризации падающего излучения может повлиять даже на интегральные характеристики процесса, такие как выходы ионов различной кратности, приводя к изменениям на уровне 10%. При этом в фотоэлектронных спектрах поляризация падающего излучения приводит к подавлению или полному исчезновению отдельных линий.

Четвёртая глава продолжает исследование вопроса ионизации атома криптона, но уже при более высоких энергиях падающего излучения, достаточным для ионизации глубокой $3d$ -оболочки криптона. В таком случае за счёт корреляций электронов возможно образование корреляционных сателлитных линий, которые соответствуют «встрясочным» состояниям вида $3d^1 4p^1 nl$ и $3d^1 4s^1 nl$. Для расчётов амплитуд фотоионизации автор вновь использовал метод R-матрицы, а на основе полученных данных смоделировал фотоэлектронные спектры и угловые распределения фотоэлектронов. Кроме

того, показано, что механизм образования корреляционных сателлитных линий исследуемого вида (в терминологии нормальной и сопряжённой «встряски») может быть определён однозначно в условиях, когда доминирует канал ионизации с определённым значением орбитального момента электрона.

Отдельного внимания заслуживает то, что теоретическая часть работы сопровождала соответствующий эксперимент, проведённый международной группой на синхротроне 4го поколения MAX IV (г. Лунд, Швеция). В связи с этим удалось сопоставить результаты теоретического моделирования с измеренными электронными спектрами и энергетическими зависимостями дипольных параметров анизотропии угловых распределений. С учётом сложности исследуемого процесса можно сказать, что результаты находятся в хорошем согласии.

Пятая глава посвящена ионизации ансамблей многоэлектронных атомов бесселевыми пучками. Значительная часть этой главы посвящена разработке формализма для вычисления угловых распределений фотоэлектронов, образованных под действием бесселева излучения. В модели равномерно распределённых атомов автору удалось доказать оригинальное утверждение, которое формулирует чёткую процедуру построения углового распределения в процессе ионизации бесселевым светом на основании общеизвестного выражения для углового распределения в процессе ионизации плоской волной. На основе этой процедуры предложен метод диагностики угла раскрытия конуса бесселева пучка.

Демонстрация использования развитого формализма проведена на примере ионизации бесселевым пучком мишени из атомов гелия в области низших по энергии дипольного и квадрупольного резонансов последнего. Показано, что из-за наличия глубокого минимума в дипольном резонансе недипольный эффект может стать доминирующим, вследствие чего форма угловых распределений электронов испытывает достаточно сильную модуляцию как в зависимости от энергии падающего излучения, так и в зависимости от угла раскрытия конуса пучка.

В заключении приведены основные результаты диссертационного исследования, список работ автора по материалам диссертации и библиография.

Диссертационная работа выполнена на хорошем научном уровне, в достаточной степени апробирована публикациями в рейтинговых журналах (Q1, Q2) и докладами на российских и международных конференциях. В

качестве основных **достоинств работы** можно выделить следующие:

- Использование хорошо отлаженных и проверенных временем программных комплексов, позволяющих проводить высокоточные спектроскопические расчёты, что критически важно для выбранного направления исследований;
- Наличие сопоставления результатов теоретического моделирования с современными экспериментальными измерениями, в анализе которых автор принимал непосредственное участие;
- Подробность изложения информации по используемым спектроскопическим моделям, а также последовательность вывода рабочих выражений (особенно в пятой главе).

Автореферат соответствует тексту диссертационной работы.

В то же время к работе имеется ряд замечаний:

- В Таблице 1 приведены результаты для энергетических ширин резонансов иона неона $1s^2np$, однако, нет никакой информации о том, как эти ширины были извлечены;
- Автор не в полной мере прояснил, почему в разделе 3.2 третьей главы исследование ионизации проводится только до зарядности ионов криптона +3, в то время как для рассматриваемых энергий допустима и дальнейшая ионизация.

Приведённые замечания скорее показывают, как можно было бы улучшить текст диссертации, но ни в коем случае не умаляют заслуг соискателя в получении интересных и важных физических результатов, а также 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», 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:

кандидат физико-математических наук,
ведущий научный сотрудник физического факультета
физико-технического мегафакультета
Национального исследовательского университета ИТМО

Глазов Дмитрий Алексеевич

«12» мая 2024 г.

Контактные данные:

Телефон: +7 (812) 480-08-32

E-mail: dmitry.glazov@metalab.ifmo.ru.

Специальность, по которой официальным оппонентом
защищена диссертация:

01.04.02 — «Теоретическая физика»

Адрес места работы:

197101, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49А

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение
высшего образования «Национальный исследовательский университет
ИТМО»

Телефон: +7 (812) 480-08-32; e-mail: edu@physics.itmo.ru

«Подпись Глазова Дмитрия Алексеевича ЗАВЕРЯЮ»: