

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

д.ф.-м.н., старшего научного сотрудника Пальчикова Виталия Геннадьевича о диссертационной работе Грызловой Елены Владимировны «Векторные корреляции в нелинейных процессах ионизации атомов высокочастотным излучением», представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика

Диссертация Грызловой Елены Владимировны посвящена актуальной и востребованной на сегодняшний день проблематике – развитию теоретических методов для описания нового класса нелинейных процессов при взаимодействии интенсивного лазерного поля с атомами и ионами низкой кратности ионизации. Данное направление исследований стимулировано появлением лазеров на свободных электронах, позволяющих осуществлять генерацию коротких интенсивных импульсов в вакуумном ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах спектра. Для корректного описания динамики ионизационных процессов в этом диапазоне необходимо учитывать новый класс эффектов, которые ранее (при использовании традиционных лазерных источников в оптическом диапазоне) были просто недоступными для проведения экспериментов – последовательная кратная ионизация атомов, многофотонная ионизация ионов и т.д. Именно этим вопросам и посвящена докторская диссертация Грызловой Елены Владимировны. Эта тематика важна не только для развития теории по данному направлению, но и в ряде чисто фундаментальных приложений, например, в исследованиях свойств биомолекул и нанокристаллов, в динамике сверхбыстрых процессов, а также в астрофизике.

Данная тематика исследований традиционно находится в фокусе внимания теоретиков МГУ на протяжении многих лет. Часть достижений в этой области принадлежит лично Грызловой Е. В. и составляет предмет ее диссертационной работы. Перечислим наиболее значимые, на мой взгляд, результаты диссертации:

1. Развитие и применение единого теоретического подхода для исследования угловых распределений и угловых корреляционных функций фотоэлектронов в кратной фотоионизации атомов и ионов.
2. Проведение теоретических расчетов параметров двойной ионизации атомов инертных газов с учетом поляризационных эффектов и спектра автоионизационных состояний.
3. Прецизионный анализ эффектов деполяризации ионизируемых состояний атомов двумя лазерными полями, линейно поляризованными в одном направлении.

Часть из перечисленных результатов являются оригинальными, полученными впервые.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, содержит 54 рисунка, 9 таблиц, а также списка литературы из 286 наименований, а также приложение. Общий объем диссертационной работы составляет 187 страниц машинописного текста. Основные результаты диссертационного исследования своевременно опубликованы в 35 печатных работах, при этом 29 статей из них соответствуют рекомендованному списку «Положения о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова».

Во введении обсуждается актуальность темы диссертации, формулируется цель и задачи работы, ее новизна, достоверность, апробация результатов работы, личный вклад соискателя, научная и практическая значимость. Там же формулируются и обосновываются преимущества используемых автором диссертации подходов применительно к кругу проблем, рассматриваемых в диссертации. В заключительной части данного раздела перечислены 5 положений, выносимых на защиту.

Глава 1 диссертации носит, в основном, обзорный характер. В ней детально описаны современные методы наблюдений процессов ионизации как в нейтральных атомах, так и в многозарядных ионах низкой кратности ионизации с учетом новых нелинейно-оптических эффектов при взаимодействии атомов с лазерными полями в вакуумно-ультрафиолетовом и в мягком рентгеновском (высокочастотном) диапазоне спектра. В параграфе 1.2. рассмотрены теоретические подходы, описывающие взаимодействия атомов и молекул с высокочастотным полем в нелинейном режиме. Там же автор диссертации изложил идейный замысел своего подхода, заключающегося в том, что для высокочастотных полей даже единичный фотон может вызвать последовательную ионизацию, хотя ионизация и возбуждение атомов происходят в многофотонном режиме. В Главе 1 так же приведено краткое описание корреляционных и поляризационных характеристик процессов ионизации, эффекты сверхтонкого расщепления, выход за рамки дипольного приближения для углового распределения фотоэлектронов.

В Главе 2 приведена сводка основных формулировок в соответствии с подходом автора диссертации, изложенным в Главе 1, а именно: применение теории возмущений в низшем неисчезающем порядке при использовании матрицы плотности и развитой техники статистических тензоров углового момента. Формулы для компонент статистических тензоров углового момента, а также тензор эффективности детектора фотоэлектронов, представленные в этой Главе 2, носят общий характер и применимы к довольно широкому классу задач, рассматриваемых в диссертации: двойной двухфотонной ионизации, тройной трехфотонной ионизации и т.д. Выход за рамки дипольного приближения при взаимодействии атомов с лазерными полями осуществляется посредством учета вклада электрического квадрупольного оператора в нерелятивистском приближении.

Глава 3 посвящена приложениям общих формулировок Главы 2 применительно к расчету кратной ионизации в области непрерывного спектра. В частности, детально проанализированы параметры угловой анизотропии для двухфотонной ионизации валентных оболочек инертных газов. При этом исследовались: этапность ионизации, поляризационные свойства промежуточного положительного однократного иона, выстроенность и ориентация состояний. Результаты теоретических расчетов параметров для асимметрии угловых распределений фотоэлектронов в случае атомов неона и криптона (для линейных и поляризованных по кругу полей) представлены в наглядном графическом виде. Важно отметить, что часть из приведенных результатов вычислений, выполненных с выходом за пределы дипольного приближения, являются оригинальными, впервые полученными в мировой литературе. В пользу достоверности расчетов диссертационной работы в данной Главе 3 свидетельствует их хорошая согласованность с имеющимися на сегодняшний день экспериментальными данными.

Основными результатами **Главы 4**, посвященной исследованию роли автоионизационных состояний в процессе кратной ионизации, являются следующие:

- Проведено исследование поведения каналов распада в процессе ионизации атомов Ne и Ar, обусловленных присутствием автоионизационных состояний;

- для однократных ионов атомов Ne и Ar анализируются механизмы распада ридберговских автоионизационных состояний и частично-дырочных состояний в зависимости от степени близости энергий фотонов от нижнего порога ионизации иона;

- проведение сопоставительного анализа для рассчитанных автором и измеренных значений выхода ионов в $2p^4(^1D)$ и $2p^4(^3P)$ состояния в процессе ионизации, а также параметров угловой анизотропии, как функций энергии фотонов при различных типах их поляризации (линейной и круговой);

- для случая однофотонной атомной ионизации рассчитан спектр фотоэлектрона и параметры угловой анизотропии и выстроенности для однократного иона аргона.

В **главе 5** диссертации проанализированы эффекты деполяризации ионизируемого состояния атомов при одновременном взаимодействии с двумя лазерными источниками с заданными поляризациями. Эффект деполяризации обусловлен сверхтонким взаимодействием ядра с ненулевым спином. Приведено описание явного вида расчетных формул для оценок распределений фотоэлектронов в двойной резонансной фотоионизации атомов, а также представлены простые аналитические формулы для параметров деполяризации. Для смешанных состояний ксенона табулированы значения линейного и кругового дихроизмов, которые находятся в качественном согласии с экспериментом. Представляют значительный интерес результаты расчетов параметров угловой анизотропии

при ионизации ксенона двумя лазерными источниками с заданными значениями поляризации.

Наконец, в **Главе 6** сформулированы условия и требования к полному эксперименту применительно к задаче определения параметров двойной двухфотонной ионизации атомов инертных газов. Получены следующие результаты;

1. Теоретически рассчитаны параметры угловой анизотропии при линейной и круговой поляризациях.
2. Определены отношения выхода ионов Xe^{2+} ($2p^4(^1D)$) и ($2p^4(^3P)$) для двухфотонной двукратной ионизации.
3. Проведено обобщение результатов теоретических расчетов в рамках модели Купера-Заре.
4. Проведено сравнение теоретических расчетов с данными измерений.

В **заключении** приведены результаты решения частных задач диссертации, перечисленных на стр. 7 Введения. Там же сформулированы перспективы дальнейшего развития теоретических подходов, изложенных в диссертации.

Приложение содержит аналитическое описание свойств статистических тензоров фотона произвольной мультиполярности.

Автореферат полно и правильно отражает содержание диссертации.

Оценивая диссертацию в целом, хотелось бы отметить высокий научный уровень работы, а также значительное количество представленных в ней новых оригинальных результатов.

Достоверность результатов диссертационной работы Грызловой Елены Владимировны подкреплена согласованностью с данными других авторов, полученных в рамках независимых альтернативных подходов, а также с результатами эксперимента. Полученные в работе результаты, основные положения и выводы являются обоснованными. К достоинствам диссертации следует отнести четкость и ясность изложения представленных в ней результатов, а также наличие значительного числа ссылок на работы других авторов. Основные результаты автора докладывались на представительных конференциях и семинарах, своевременно опубликованы в отечественной и зарубежной печати.

Замечания по тексту диссертационной работы:

- 1) В Главе 2 на стр. 47 бросается в глаза отсутствие магнитного дипольного оператора в мультипольном разложении векторного потенциала, описывающего взаимодействие атомов с внешним лазерным полем. Хотя ранее в параграфе 1.5 диссертации обсуждались случаи, когда становится актуальной задача учета высших членов мультипольного разложения в угловых

распределениях фотоэлектронов, вклад мультипольных магнитных операторов высшего порядка не рассматривался.

- 2) В расчетах угловых распределений фотоэлектронов при 2PDI в Главе 3, выполненных с выходом за пределы дипольного приближения, был бы уместным, на мой взгляд, анализ вклада релятивистских эффектов.
- 3) Требуется пояснение утверждения автора в Главе 2 о том, что формулы для наблюдаемых квантовомеханических величин в этой Главе представлены в виде аналитических выражений. Этому определению, на мой взгляд, скорее соответствуют, например, параметры деполяризации в Главе 5, формулы (5.9 и 5.10).
- 4) В диссертации исподволь используется термин высокочастотное излучение, под этим подразумевается интенсивное лазерное поле в ультрафиолетовом и мягком рентгеновском диапазонах. На стр.7 диссертации следовало бы дать соответствующее разъяснение при первом упоминании этого термина, поскольку он не является общеупотребительным.
- 5) Положения, выносимые на защиту, перегружены детализацией условий их применимости. Эта информация подробно представлена в Главах диссертации и ее здесь можно было бы опустить.
- 6) Неясна до конца необходимость введения термина «Полный эксперимент» с его зависимостью от теоретического подхода авторов, хотя соответствующее определение имеется в тексте диссертации и в автореферате.

Сделанные замечания носят, скорее, рекомендательный характер и не затрагивают основные положения диссертационной работы, а также общую положительную оценку диссертации.

Подводя итоги анализа диссертационной работы Грызловой Елены Владимировны можно сделать следующее заключение:

- тема диссертации актуальна, диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу;
- результаты диссертации обладают научной новизной, практической значимостью, прошли апробацию, в достаточной степени представлены в научных трудах автора;
- результаты диссертационного исследования имеют перспективу использования при интерпретации и планировании ряда экспериментов и теоретических исследований в этой области как в настоящее время, так и в будущем, а также для понимания фундаментальных процессов в межзвездной среде и во внешних слоях ионосферы, в астрофизике и т.д.
- по актуальности, новизне, научной и практической значимости диссертационная работа Грызловой Е.В. отвечает всем требованиям, установленным Московским государственным университетом имени М.В. Ломоносова к работам подобного рода.

Считаю, что диссертация «Векторные корреляции в нелинейных процессах ионизации атомов высокочастотным излучением» 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 докторским 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 — Грызлова Елена Владимировна — заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 1.3.6. Оптика.

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Пальчиков Виталий Геннадьевич,

главный научный сотрудник Отдела № 77 "Перспективных исследований и измерений времени и частоты" Главного метрологического центра Государственной службы времени и частоты (ГМЦ ГСВ(НИО-7)) Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»(ФГУП «ВНИИФТРИ»),

Российская Федерация, 141570, Московская область, город Солнечногорск, рабочий посёлок Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 28

Тел. 8-495-660-57-24

e-mail: palchikov@vniiftri.ru

/ Пальчиков В.Г./

19.02.2025

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация:

01.04.05— Оптика (физ.-мат. науки)

Место защиты: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), г. Москва, г.Троицк, ул. Физическая,5.

Подпись Пальчикова Виталия Геннадьевича удостоверяю:

Лобова Оксана Алексеевна,

начальник отдела кадров Федерального государственного унитарного предприятия «Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений»(ФГУП «ВНИИФТРИ»),

Российская Федерация, 141570, Московская область, город Солнечногорск, рабочий посёлок Менделеево, промзона ФГУП «ВНИИФТРИ», корпус 11

Тел. 8-495-546-63-28

e-mail: lobova@vniiftri.ru

/ Лобова Оксана Алексеевна /