

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

д.ф.-м.н., доцента Кузакова Константина Алексеевича 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

Диссертационная работа Грызловой Елены Владимировны посвящена теоретическому исследованию ионизационных процессов при взаимодействии атомов с импульсами электромагнитного излучения в вакуумном ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах. Разработанные в диссертации подходы и методы вносят существенный вклад в развитие теории многофотонной многократной ионизации атомов, а выполненные на их основе расчеты, несомненно, послужат развитию эксперимента в этой области, в частности, с использованием последнего поколения лазеров на свободных электронах и с генерацией высших гармоник. Диссертантом получены новые и важные результаты, среди которых следует особо отметить:

– Впервые предложен и исследован механизм дважды резонансной трехфотонной двукратной ионизации атомов.

– Впервые предложен метод извлечения параметров сверхтонкого взаимодействия из измеренных угловых распределений фотоэлектронов при резонансной двухфотонной двукратной ионизации.

– Впервые показана возможность реализации полного эксперимента при двухфотонной двукратной ионизации атома.

Часть полученных в диссертации результатов уже использовалась для интерпретации и планирования ряда экспериментов в этой области. Важность проведенных в диссертации исследований характеризуется также тем, что изучение рассматриваемых в ней процессов нелинейной фотоионизации короткими интенсивными импульсами излучения в вакуумном ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах необходимо для понимания процессов в межзвездной среде и во внешних слоях ионосферы планет солнечной системы, динамики фотопроцессов в малых квантовых объектах, получения изображений из одиночных рентгеновских изображений, оптики сверхбыстрых процессов и астрофизики.

Диссертация состоит из введения, шести глав, заключения, списка литературы из 286 наименований и приложения. Общий объем работы составляет 187 страниц, включающих 54 рисунка и 9 таблиц. Результаты диссертации опубликованы в 35 печатных работах, из которых 29 статей в ведущих рецензируемых научных изданиях, удовлетворяющих «Положению о присуждении ученых степеней в МГУ имени М.В. Ломоносова», включая Nature Physics, Nature Communications, Physical Review Letters, Physical

Review A, Journal of Optics, Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics, European Journal of Physics D, ATOMS и др.

Во **введении** дан краткий обзор актуальных направлений в области физики многофотонной ионизации, к которой относится диссертационное исследование, сформулированы его цели и задачи и использованные в нем теоретические методы, приведены выносимые на защиту положения. Также обозначена научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных в диссертации результатов, их достоверность и апробация.

В **главе 1** описано современное состояние экспериментальных исследований процессов ионизации в полях высокой частоты и представлен обзор теоретических методов и подходов для их описания. Также представлен обзор литературы по исследованиям таких аспектов физики взаимодействия атомов с электромагнитным полем, как поляризационные и корреляционные характеристики ионизации, автоионизационные состояния, недипольные эффекты и эффекты сверхтонкого расщепления.

**Глава 2** посвящена общим положениям используемого в диссертационной работе теоретического подхода для описания последовательной кратной ионизации атомов. Основными элементами данного подхода являются статистические тензоры углового момента, которые вводятся в рамках формализма матрицы плотности квантовой системы, мультипольные амплитуды взаимодействия системы с электромагнитным полем и тензор эффективности детектора. Для случая двухфотонной двукратной ионизации атомов приведены общие выражения для статистических тензоров промежуточной и конечной систем, функции угловой корреляции фотоэлектронов и угловых распределений фотоэлектронов, отвечающих линейной и круговой поляризации электромагнитного излучения и учитывающих первые недипольные поправки. Обсуждаются свойства фактора деполяризации промежуточного состояния в двухфотонной двукратной ионизации атомов инертных газов в зависимости от длительности импульса излучения.

В **главе 3** приведены аналитические и численные расчеты различных характеристик процессов двухфотонной двукратной и трехфотонной трехкратной ионизации атомов инертных газов в область бесструктурного непрерывного спектра. Выполнены численные расчеты выстроенности и поляризации промежуточного иона в процессах двухфотонной двукратной ионизации атомов Ne, Ar и Kr в поле линейно и циркулярно поляризованного излучения. Также для указанных случаев процессов ионизации выполнены численные расчеты параметров анизотропии и асимметрии угловых распределений фотоэлектронов. Результаты расчетов сопоставлены с имеющимися в литературе результатами других авторов и экспериментальными данными. Рассмотрен переход от амплитуд ионизации в представлении  $LSJ$ -связи к амплитудам в представлении  $LS$ -связи.

Исследовано влияние когерентности возбуждения подуровней тонкой структуры промежуточного иона на параметры анизотропии угловых распределений фотоэлектронов первой и второй степени в процессах двухфотонной двукратной ионизации атомов Ne, Ar и Kr в поле линейно и циркулярно поляризованного излучения. В случае линейной поляризации проведено сравнение с имеющимися экспериментальными данными. Показано, что выстроенность промежуточного иона в угловых распределениях фотоэлектронов как первой, так и второй степени проявляется тем сильнее, чем более когерентно заселение подуровней его тонкой структуры, в независимости от поляризации излучения (линейной или круговой) и первых поправок к дипольному приближению. В рамках модели Купера–Заре показано, что вклад поляризации состояния промежуточного иона в двухфотонной двукратной ионизации атомов инертных газов зависит от состояния конечного иона, и всегда имеет противоположный знак для термов  $np^4(^1S)$  и  $np^4(^3P)$ . Помимо этого показано, что при двухфотонной двукратной ионизации атомов инертных газов в области энергии, соответствующей бесструктурному непрерывному спектру, угловые распределения фотоэлектронов, испущенных на первой и второй ступенях, подобны. Представлены расчеты функции угловой корреляции фотоэлектронов для процессов двухфотонной двукратной ионизации атомов Ne, Ar и Kr. В случае атома Ne результаты сопоставлены с данными первого в мире измерения функции угловой корреляции фотоэлектронов, выполненного на лазере на свободных электронах FLASH. Рассмотрен процесс трехфотонной трехкратной ионизации  $2s$  и  $2p$  оболочек атома неона и выполнены расчеты параметров анизотропии угловых распределений фотоэлектронов, функций угловых корреляций фотоэлектронных пар и фотоэлектронных спектров. Рассчитанные параметры угловой анизотропии находятся в разумном согласии с имеющимися экспериментальными данными.

**Главе 4** посвящена исследованию роль автоионизационных состояний положительно заряженных ионов инертных газов в процессах двух- и трехфотонной ионизации атомов Ne и Ar. Выполнены численные расчеты отношения выхода ионов в  $2p^4(^1D)$  и  $2p^4(^3P)$  состояния и параметров угловой анизотропии для различных термов конечного иона  $Ne^{2+}$  при двухфотонной двукратной ионизации атома Ne в поле линейно и циркулярно поляризованного излучения в окрестности автоионизационного состояния промежуточного иона  $Ne^+$  ( $2p^5(^2P_{3/2})$ ) с энергией 56.55 эВ. Результаты расчетов находятся в разумном согласии с имеющимися экспериментальными измерениями. Кроме того, рассчитаны спектры и параметры угловой анизотропии при двухфотонной двукратной ионизации атома Ar в поле линейно поляризованного излучения для различных термов конечного иона. Результаты расчетов для параметров угловой анизотропии

находятся в разумном согласии с имеющимися экспериментальными измерениями. Рассмотрена двухфотонная двукратная ионизация атома Ar в окрестности серии ридберговских автоионизационных состояний иона. Для этого случая выполнены расчеты спектров фотоэлектронов, параметров угловой анизотропии и функции угловых корреляций фотоэлектронов, отвечающих конечным состояниям иона  $Ar^{2+}$  ( $3p^4(^3P_{0,1,2})$ ). Проанализирована роль автоионизационных состояний Ar и  $Ar^+$  в рассчитанных характеристиках. На примере атома Ne показана возможность резонансного двухфотонного возбуждения дипольно запрещенных автоионизационных состояний. Предложен механизм трехфотонной дважды резонансной двукратной ионизации атома, предполагающий, что после ионизации атома первым фотоном происходит поглощение двух фотонов промежуточным ионом с последующим возбуждением сначала дискретного, а затем автоионизационного состояния. Численные расчеты в рамках предложенной модели для спектров фотоэлектронов в процессе трехфотонной двукратной ионизации атома Ar находятся в разумном согласии с экспериментом.

В главе 5 рассматриваются эффекты в двухфотонной двукратной ионизации атомов, связанные с деполяризацией ионизируемого состояния, вызванной сверхтонким взаимодействием. В отличие от глав 3 и 4, здесь предполагается, что возбуждение и ионизация происходят в результате поглощения фотонов от двух разных импульсов излучения. Выполнен анализ параметра деполяризации в зависимости от энергетического расщепления и ширины уровней сверхтонкой структуры, а также спина ядра. Приведены выражения для сечений, линейного и кругового дихроизма и углового распределения фотоэлектронов в терминах парциальных амплитуд. Выполнены расчеты дихроизма и параметров угловой анизотропии для двукратной ионизации изотопов Xe двумя импульсами с различными комбинациями поляризации. Результаты расчетов для линейного и кругового дихроизма находятся в разумном согласии с экспериментом. Показано, что измерение угловых распределений фотоэлектронов при ионизации изотопов с различным ядерным спином позволяет определить параметры сверхтонкой структуры для частично перекрывающихся подуровней электронной оболочки атома.

В главе 6 рассмотрены условия для реализации полного эксперимента по двухфотонной двукратной ионизации – извлечения всех комплексных амплитуд процесса из измеряемых величин. В сравнении с экспериментальными данными представлены рассчитанные параметры угловой анизотропии, а также отношение выхода ионов  $Ne^{2+}$  ( $2p^4(^1D)$ ) и ( $2p^4(^3P)$ ) для двухфотонной двукратной ионизации атома Ne в полях линейно и циркулярно поляризованного излучения. Для энергий фотонов 54-58 эВ сформулирована процедура извлечения амплитуд в модели Купера–Заре, отвечающей области гладкого непрерывного спектра, и в схеме *LS*-связи,

отвечающей окрестности автоионизационных состояний.

В **заключении** кратко обозначены дальнейшие направления и приложения диссертационного исследования.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

В качестве замечаний можно отметить следующее:

1) В главе 2 при формулировке общих положений теоретического подхода не приведен явный вид оператора взаимодействия атома с электромагнитным полем. Причем используется одинаковое обозначение  $U$  как для оператора возмущения атома электромагнитным полем, так и для оператора эволюции матрицы плотности атома, явный вид которых также не приведен. Кроме того, затрудняет понимание изложенного формализма использование схожих обозначений для мультипольных моментов атома, а именно (2.4) и (2.5), и членов ряда мультипольного разложения оператора возмущения  $U$ .

2) В разделе 2.1 при выводе статистического тензора конечной системы после поглощения второго фотона (2.17) не обсуждается эволюция промежуточной системы из иона и фотоэлектрона, образовавшихся в результате поглощения первого фотона. В общем случае эволюция системы между актами поглощения первого и второго фотона должна учитываться в полной амплитуде процесса в терминах её функции Грина (пропагатора), однако в диссертации учитывается только эффект деполяризации промежуточного иона.

3) В разделе 2.1. утверждается, что  $M1$  амплитуды, отвечающие возбуждению в непрерывный спектр, незначительны по сравнению с  $E1$  и  $E2$  амплитудами. Данное утверждение требует обоснования и/или ссылок на соответствующую литературу, по крайней мере, в случае сравнения  $M1$  и  $E2$  амплитуд.

4) Сопоставление расчетов в представлении длины и скорости для взаимодействия атома с электромагнитным полем впервые встречается только в главе 4. Остается неясным, в каком представлении выполнены расчеты в предыдущих главах и почему такое сравнение там отсутствует.

5) Чтение диссертации осложняет присутствие ряда опечаток в тексте, включая формулы, и отсутствие определения некоторых из использованных в формулах обозначений.

Вместе с тем, указанные замечания не влияют на высокую оценку диссертационного исследования. 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, доцент,  
профессор кафедры физики атомного ядра и  
квантовой теории столкновений физического факультета  
Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова

Кузаков Константин Алексеевич

«24» февраля 2025 года

Контактные данные:

Телефон: +7 (495) 939-24-65

E-mail: kouzakov@srd.sinp.msu.ru

Специальность, по которой официальным оппонентом  
защищена докторская диссертация:

01.04.02 — Теоретическая физика (физ.-мат. науки)

Федеральное государственное бюджетное  
образовательное учреждение высшего образования  
«Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»

Адрес места работы:

119991, г. Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

Телефон: +7 (495) 939-31-60; e-mail: info.ff@org.msu.ru

Подпись Кузакова Константина Алексеевича УДОСТОВЕРЯЮ:

Учёный секретарь учёного совета

физического факультета

МГУ имени М.В. Ломоносова

доктор физико-математических наук, доцент

Стремоухов С.Ю.