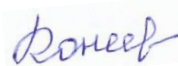


Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Ростовский государственный университет путей сообщения»

На правах рукописи



КОНЕЕВ РУСТАМ ВИКТОРОВИЧ

**РЕЗОНАНСЫ И АНОМАЛИИ ПРИ РАССЕЯНИИ ФОТОНА
ЭЛЕКТРОНАМИ АТОМА И АТОМНОГО ИОНА**

01.04.15 – физика и технология наноструктур,
атомная и молекулярная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико–математических наук

Ростов-на-Дону
2019

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Ростовский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО РГУПС)

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, доцент
Надолинский Алексей Михайлович
(Ростовский государственный университет путей сообщения, кафедра «Физика», профессор)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Грум-Гржимайло Алексей Николаевич
(Национальный исследовательский институт ядерной физики им. Д.В. Скобельцина «МГУ», отдел электромагнитных процессов и взаимодействия атомных ядер, ведущий научный сотрудник)

кандидат физико-математических наук
Таранухина Анна Ивановна (Южный федеральный университет, кафедра теоретической и вычислительной физики, доцент)

Защита диссертации состоится «03» марта 2020 г. в 13⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета ЮФУ01.01 по физико-математическим наукам (специальность 01.04.15) при Южном федеральном университете по адресу: 344090, Ростов-на-Дону, ул. Зорге 5, физический факультет, ауд.247.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке ЮФУ им. Ю.А. Жданова по адресу: г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 21Ж и на сайте: <http://hub.sfedu.ru/diss/announcement/5c0457f8-ca1e-4d43-b8b1-76048633f3f8/>

Автореферат разослан «__» _____ 2020 года

Отзыв на автореферат (в нем укажите дату, а также полностью свои фамилию, имя, отчество, учёную степень со специальностью, звание, организацию, подразделение, должность, адрес, телефон, e-mail) с заверенной подписью рецензента и печатью учреждения просим направлять в 2 экз. учёному секретарю диссертационного совета ЮФУ01.01 при ЮФУ по адресу: 344090, г.Ростов-на-Дону, ул. Андрея Сладкова, 178/24, МИИ ИМ, а также в формате .pdf – на e-mail: podkovyrina@sfedu.ru

Учёный секретарь
диссертационного совета _____  _____ Ю.С. Подковырина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Повышение уровня спектрального разрешения современного эксперимента в области физики рассеяния многоэлектронными системами электромагнитного излучения определяет необходимость модификации существующих теоретических моделей описания процесса. Наша работа представляет такую модификацию для комптоновского рассеяния одного, двух и Рэлеевского рассеяния трёх фотонов электронами свободного атома и атомных ионов.

Существующие к настоящему времени в мировой научно-исследовательской практике исследования комптоновского рассеяния в своей теоретической части продолжают использовать модели, основанные на приближении некогерентной функции рассеяния (НФР) и импульсном приближении [1]. Указанные приближения определены при условии $\eta = qa_0 / Z \gg 1$ (q – вектор импульса, переданный атому (или атомному иону), a_0 – боровский радиус и Z – заряд ядра рассеивающей системы). Строгое ограничение этим условием приводит к формальной неприменимости, прежде всего, импульсного приближения в интенсивно исследуемых современной физикой областях энергий фотона и углов его рассеяния. Более того, в данных приближениях волновые функции фотоэлектронов сплошного спектра рассматриваются в виде плоских волн [2]. В итоге игнорируются не только существование бесконечной l –мультипольности $[0 \leq l < \infty)$ физически отличающихся одночастичных xl –состояний рассеяния, но не учитывается также и фаза процесса рассеяния. Это обстоятельство, в свою очередь, означает исключение одного из существеннейших многочастичных эффектов – эффекта монополярной перестройки состояний сплошного спектра энергий в поле возникающих вакансий.

Таким образом, тема диссертации, посвященная развитию нерелятивистской квантовой теории описания нелинейного процесса комптоновского рассеяния фотона электронами атома (атомного иона), спектральных методов расчета характеристик процесса вне рамок импульсного и НФР приближений, а также модификация теории многофотонного рассеяния атомом (атомным ионом) является *актуальной* для физики не только оптического, но и рентгеновского диапазонов и имеет как фундаментальное, так и прикладное значение.

Степень разработанности

Стремление разработать квантовомеханическую модель надёжного и достоверного расчета спектров комптоновского рассеяния фотона электронами атома (атомного иона) в областях порогов ионизации их глубоких оболочек вне, используемых традиционно, импульсного и НФР приближений, а также попытка создать нерелятивистскую модель упругого рассеяния трёх фотонов

атомом (атомным ионом) стало основанием для выбора тематики нашей работы.

Цели и задачи диссертации

В диссертации поставлена цель квантовомеханического описания процесса комптоновского рассеяния фотона электронами атома (атомного иона) вне условий применимости указанных выше приближений и создания теоретической модели процесса слияния фотонов в поле атома (атомного иона). Для осуществления поставленной цели сформулированы основные задачи исследования:

1. Развить аналитические и численные методы расчета дифференциальных сечений комптоновского рассеяния фотона атомом (атомным ионом) вне рамок импульсного и НФР приближения.
2. Проанализировать причины появления гигантских автоионизационных резонансов в сечении комптоновского рассеяния фотона электронами свободного атома Mn при распаде виртуальной 3p–вакансии по каналу Костера-Кронига.
3. Исследовать процессы нелинейного взаимодействия фотонов с электроном сплошного спектра состояния $1s \rightarrow \epsilon p$ фотоионизации атома Be, приводящего к возникновению в сечении рассеяния области аномального комптоновского рассеяния.
4. Сформулировать теорию нелинейного эффекта слияния трёх фотонов в один фотон в области энергии порога ионизации 1s–оболочки атома Ne.
5. Исследовать гигантские резонансы и угловую анизотропию дифференциального сечения слияния по мере перехода от атома Ne к положительно заряженным ионам его изоэлектронного ряда (Ar^{8+} , Ti^{12+} , Fe^{16+}).

Объекты и предмет исследования

Объектами теоретического исследования диссертации выбраны атомы с полностью заполненными оболочками – ${}^4\text{Be}$ и ${}^{10}\text{Ne}$, атомы с заполняющейся 3d–оболочкой (${}^{22}\text{Ti}$ и ${}^{25}\text{Mn}$) и ряд неоноподобных (Ar^{8+} , Ti^{12+} и Fe^{16+}) атомных ионов.

Атомы Be и Ne, а также неоноподобные ионы с 1S_0 термом в их основном состоянии выбраны по причинам того, что их изучение позволяет установить роль *многоэлектронных эффектов* в процессах рассеяния без рассмотрения влияния, в частности, твердотельных эффектов.

Атомы Ti и Mn выбраны с целью исследования динамики сечений процесса рассеяния в металлах четвертого периода с заполняющейся 3d–оболочкой.

Теоретические основы исследования

При решении всех задач диссертации ставились требования получения не относительных, а абсолютных значений дифференциальных сечений процессов.

Такой способ исследования позволяет: (а) провести сравнение с теоретических результатов диссертации с результатами существующих экспериментов и (б) сделать теоретические предсказания для проведения будущих экспериментов в соответствии с принципом верификации. При построении волновых функций состояний многоэлектронных систем и матричных элементов операторов квантовых переходов в диссертации использовались методы теории неортогональных орбиталей, теория неприводимых тензорных операторов, многих тел на основе квантовой теории возмущений. Волновые функций атомных орбиталей получены в диссертации решением систем нерелятивистских уравнений Хартри-Фока.

Научная новизна определена следующими основными результатами, полученными в диссертации:

1. Впервые выполнен расчет абсолютных величин и исследована форма дифференциального сечения комптоновского рассеяния *неполяризованного* фотона электронами атома титана *вне* моделей, базирующихся на приближении некогерентной функции рассеяния и импульсном приближении. Результаты расчета хорошо согласуются с результатами эксперимента.
2. Впервые на примере атома марганца предсказано существование *автоионизационного* гигантского резонанса в спектрах комптоновского рассеяния фотона электронами атома с заполняющейся $3d$ –оболочкой основного состояния.
3. Впервые установлено, что в процессе комптоновского рассеяния абсолютные величины сечений и формы профилей автоионизационных резонансов существенно изменяются при варьировании энергий $\hbar\omega_1$ –падающего, $\hbar\omega_2$ –рассеянного фотонов и θ –угла рассеяния.
4. Впервые предсказано, на аттосекундной шкале времени что процесс контактного взаимодействия фотона с электронами возбужденного атома приводит к эффекту рождения резонансов *аномального* ($\hbar\omega_2 > \hbar\omega_1$) комптоновского рассеяния.
5. Впервые на примере атома Ne и ионов его изоэлектронного ряда изучен эффект слияния (merging) трех XFEL–фотонов в один фотон (XFEL – X-ray Free Electron Laser – рентгеновский лазер на свободных электронах). Получены абсолютные величины и формы дифференциального сечения слияния.
6. Впервые установлено, что три фотона с наибольшей вероятностью сливаются в один фотон в областях угла рассеяния $\theta \in (90^\circ, 180^\circ)$ – *обратное рассеяние*.

Теоретическая и практическая значимость работы

Развитые в диссертации теория и методы расчетов могут быть обобщены, например, на случай описания спектров твердых тел. Это определяет их *ценность* для последующего развития теории комптоновского рассеяния фотона веществом в *конденсированном состоянии*.

Полученные в диссертации результаты для атома с открытой оболочкой найдут своё применение при интерпретации будущих экспериментов, таких, как с рентгеновским лазером на свободных электронах [3], при исследовании проблем управляемого термоядерного синтеза [4], космологии [5] и при исследовании биологически важных систем [6].

Полученные в диссертации оценки абсолютных значений максимумов дифференциальных сечений нелинейного эффекта слияния трех XFEL–фотонов в один фотон в поле атома (и атомного иона) демонстрируют принципиальную возможность экспериментального обнаружения данного процесса при ожидаемом в недалеком будущем уровне яркости XFEL–систем.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Распад виртуальной $3p$ –вакансии по $3p^5 3d^6 \rightarrow 3p^6 3d^4 \epsilon f$ каналу Костера–Кронига приводит к появлению гигантского автоионизационного резонанса в сечении комптоновского рассеяния фотона атомом Mn.
2. Нелинейное взаимодействие рентгеновских фотонов с электроном сплошного спектра $1s\epsilon p$ –состояния фотоионизации атома Be приводит к возникновению в сечении рассеяния области аномального комптоновского рассеяния.
3. Нелинейный эффект слияния трёх фотонов в один фотон в области энергии порога ионизации $1s$ –оболочки атома Ne приводит к появлению ярко выраженной резонансной структуры и сильной угловой анизотропии дифференциального сечения рассеяния.
4. Переход от атома неона к элементам его изоэлектронного ряда (Ar^{8+} , Ti^{12+} , Fe^{16+}) сопровождается: (а) возникновением гигантских резонансов слияния; (б) сохранением эффекта сильной угловой анизотропии дифференциального сечения рассеяния.

Достоверность и обоснованность основных результатов проведённых исследований и выводов, сделанных на их основе обеспечена корректным применением математического аппарата нерелятивистской квантовой теории многоэлектронных систем при расчете волновых функций, энергий и амплитуд вероятности процессов, апробированных компьютерных программ и хорошим согласием основных особенностей рассчитанных спектров рассеяния с результатами существующих синхротронных экспериментов.

Апробация основных результатов диссертации проходила на шести, ниже указанных, конференциях:

1. IX Международная конференция “Фундаментальные проблемы оптики” ФПО-2016 (Санкт-Петербург, Россия, 17–21 октября 2016).
2. VI Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, Россия, 1–3 февраля 2017).
3. VII Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, Россия, 24–26 января 2018).

4. X Международная конференция “Фундаментальные проблемы оптики” ФПО-2018 (Санкт-Петербург, Россия, 15–19 октября 2018).

5. VIII Международная конференция по фотонике и информационной оптике (Москва, Россия, 23–25 января 2019).

Публикации автора

По материалам исследований, выполненных в диссертации опубликовано 18 печатных работ: 6 статей опубликовано в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и Web of Science, 7 статей опубликовано в журналах, входящих в базу РИНЦ, и 5 тезисов в сборниках научных трудов всероссийских и международных конференций.

Структура и объём диссертации

Диссертационная работа состоит из Введения, 4-х глав и Заключения. Объём диссертации составляет 118 страниц, включая 26 рисунков, 2 таблицы, список цитируемой литературы из 111 библиографических наименований и список публикаций автора из 18 наименований.

Краткое содержание работы

Во **Введении** представлена общая характеристика работы. Сформулирована основная цель и задачи исследования, а также даны основные результаты и положения, выносимые на защиту. Отмечена научная новизна и указана практическая ценность полученных в диссертации результатов.

В **Первой главе** работы изложены основы стандартных теоретических подходов (импульсное приближение, приближение некогерентной функции рассеяния) к описанию нерезонансного комптоновского рассеяния фотона многоэлектронной системой. Дан обзор результатов существующих экспериментальных и теоретических исследований. Цель обзора – дать описание существующего к настоящему времени состояния исследований и показать актуальность задач, решаемых в диссертации. Основное внимание в обзоре обращено к моделям теоретического исследования процесса комптоновского рассеяния фотона многоэлектронными системами в областях энергий падающего фотона, значительно превышающих энергию порога ионизации глубокой оболочки.

Во **Второй главе** диссертации получена аналитическая структура дифференциального сечения и представлены результаты расчета процесса нормального ($\hbar\omega_2 < \hbar\omega_1$) нерезонансного комптоновского рассеяния электромагнитного излучения электронами атома с открытой 3d-оболочкой (атомы Mn и Ti).

Установлено, что в дважды дифференциальном сечении рассеяния атома Mn (открытая 3d⁵-оболочка) появляется гигантский *автоионизационный*

резонанс, обусловленный распадом виртуальной $3p$ -вакансии по $3p^5 3d^6 \rightarrow 3p^6 3d^4 \varepsilon f$ каналу (безрадиационного типа) Костера-Кронига.

Проведен расчет абсолютных величин и формы спектра комптоновского рассеяния *неполяризованного* фотона электронами атома Ti (открытая $3d^2$ -оболочка). Дано сравнение результатов диссертации как с импульсным приближением, так и с результатами существующего синхротронного эксперимента.

В Разделе 2.1 в схеме LS -связи представлена математическая структура для описания дважды дифференциального сечения комптоновского рассеяния линейно поляризованного (перпендикулярно ($\perp$) плоскости рассеяния) электромагнитного излучения энергии $\hbar\omega_1$ электронами $n_1 l_1$ -оболочки свободного атома:

$$\sigma_{n_1 l_1} \equiv d^2 \sigma_{n_1 l_1} / d\omega_2 d\Omega = r_0^2 (\mathbf{e}_1 \cdot \mathbf{e}_2) \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \int_0^\infty P_{n_1 l_1} G_{n_1 l_1} d\varepsilon, \quad (1)$$

$$P_{n_1 l_1} = [J]^{-1} \sum_{TT'} \sum_{t=0}^\infty [t] \left| (A \| Q^{(t)} \| B) \right|^2, \quad (2)$$

$$(A \| Q^{(t)} \| B) = (-1)^{l+L_1-S-J'} \delta_{SS'} \sqrt{N_1 [L, L', J, J']} (l_1^{N_1} LS \| l_1^{N_1-1} (L_1 S_1) l_1) \times \\ \times \left\{ \begin{matrix} l_1 & L & L_1 \\ L' & l & t \end{matrix} \right\} \left\{ \begin{matrix} L & J & S \\ J' & L' & t \end{matrix} \right\} (l_1 \| C^{(t)} \| l) R_t(n_1 l_1, \varepsilon l), \quad (3)$$

$$R_t(n_1 l_1, \varepsilon l) = \int_0^\infty P_{n_1 l_1}(r) j_t(qr) P_{\varepsilon l}(r) dr, \quad (4)$$

$$q = (\omega_1 / c) \cdot (1 + \beta^2 - 2\beta \cdot \cos \theta)^{1/2}, \quad (5)$$

$$G_{n_1 l_1} = \frac{1}{\gamma_b \sqrt{\pi}} \left[- \left(\frac{\Delta_{n_1 l_1} - \varepsilon}{\gamma_b} \right)^2 \right], \quad (6)$$

где принята атомная система единиц ($e = m_e = \hbar = 1$), Ω – пространственный угол вылета фотона рассеянного атомом, r_0 – классический радиус электрона, $\mathbf{e}_1$ и $\mathbf{e}_2$ – векторы поляризации падающего и рассеянного фотонов, соответственно, $[J] = 2J + 1$, $T = LS$, A – и B – основное и конечное состояние атома-рассеивателя, $\beta = \omega_2 / \omega_1$, θ – угол рассеяния, N_1 – число заполнения $n_1 l_1$ -оболочки, $P_{n_1 l_1}$ – радиальная часть волновой функции $n_1 l_1$ - электрона, c – скорость света в вакууме, j_t – сферическая функция Бесселя первого рода t -порядка, $\gamma_b = \Gamma_{beam} / 2\sqrt{\ln 2}$, Γ_{beam} – ширина инструментальной функции Гаусса-Лапласа $G_{n_1 l_1}$ на половине её максимума, $\Delta_{n_1 l_1} = \omega_1 - \omega_2 - I_{n_1 l_1}$ и $I_{n_1 l_1}$ – энергия порога ионизации $n_1 l_1$ - оболочки.

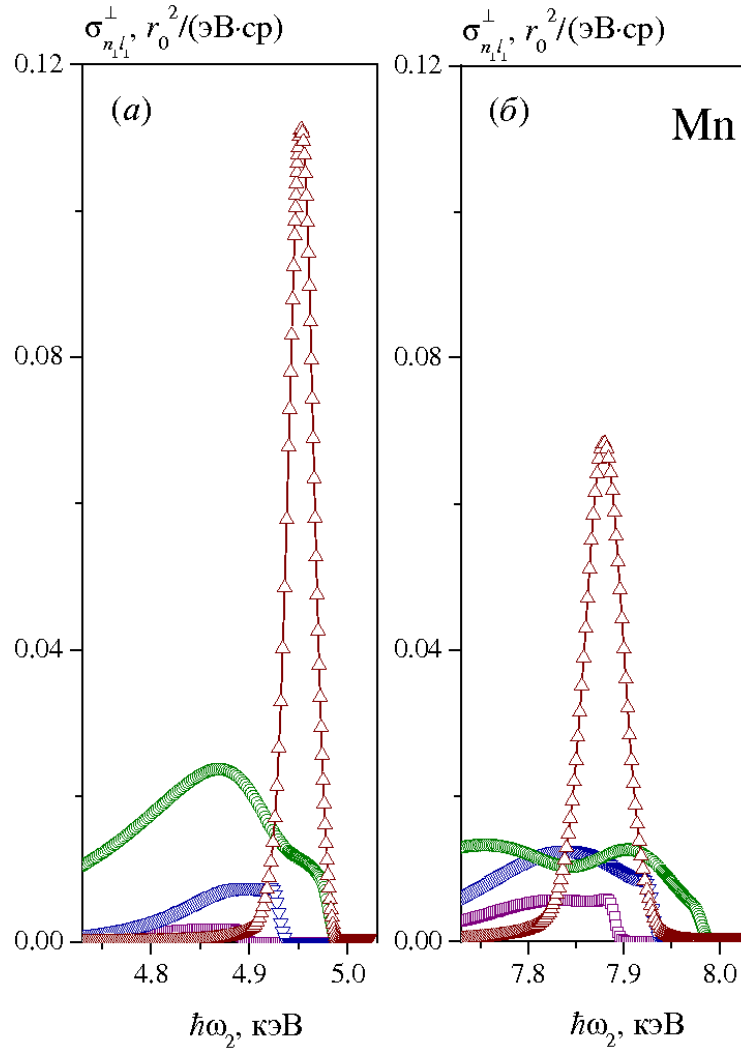


Рисунок 1 - Парциальные дважды дифференциальные сечения Комптоновского рассеяния линейно поляризованного фотона электронами атома Mn *без* учета канала автоионизации (теория диссертации): $n_1 l_1 = 3s$ (квадрат), $3p$ (треугольник вниз), $3d$ (кружок), $4s$ (треугольник вверх). $\hbar\omega_1 = 5$ кэВ (а), 8 кэВ (б), $\theta = 90^\circ$, $\Gamma_{beam} = 10$ эВ. Вклад глубоких $1s$, $2s$ и $2p$ оболочек определен *вне* энергетических шкал Рис. 1 ($\hbar\omega_2 \leq 4.35$ (а) и 7.35 (б) кэВ)

В Разделе 2.2 изложены результаты теоретических исследований процесса нерезонансного комптоновского рассеяния электромагнитного излучения атомом с открытой оболочкой.

Результаты эксперимента, представленные в работе [8] обнаружили в M_{23} -спектре поглощения мягкого рентгеновского фотона (длина волны $\lambda \sim 206 \div 280$ Å) атомом марганца (Mn: заряд ядра $Z = 25$, $[0] = (\text{Ar})3d^5 4s^2 [^6S_{5/2}]$) существование *гигантского* автоионизационного резонанса.

В данном Разделе диссертации мы устанавливаем, что обнаруженный резонанс достаточно ярко проявляется и в спектре нерезонансного комптоновского рассеяния фотона электронами свободного атома Mn.

В Разделе 2.2.1 проведен расчет для атома Mn (Рис. 1,2) и выполнено сравнение результатов теории диссертации с результатами выполненными в рамках импульсного приближения.

В Разделе 2.2.2 проведен расчет для атома титана (Рис. 3,4). Этот атом «близок» к атому Mn и также имеет открытую $3d$ -оболочку (Ti: $Z = 22$, $[0] = (\text{Ar})3d^2 4s^2 [^3F_2]$). Выбор атома Ti обусловлен, прежде всего, тем, что для него авторами работы [9] проведены *первые* экспериментальные исследования относительных величин и формы дважды дифференциального сечения рассеяния неполяризованного рентгеновского фотона. Это позволило провести непосредственное сравнение результатов нашего расчета с экспериментальными данными (наряду с результатами импульсного приближения).

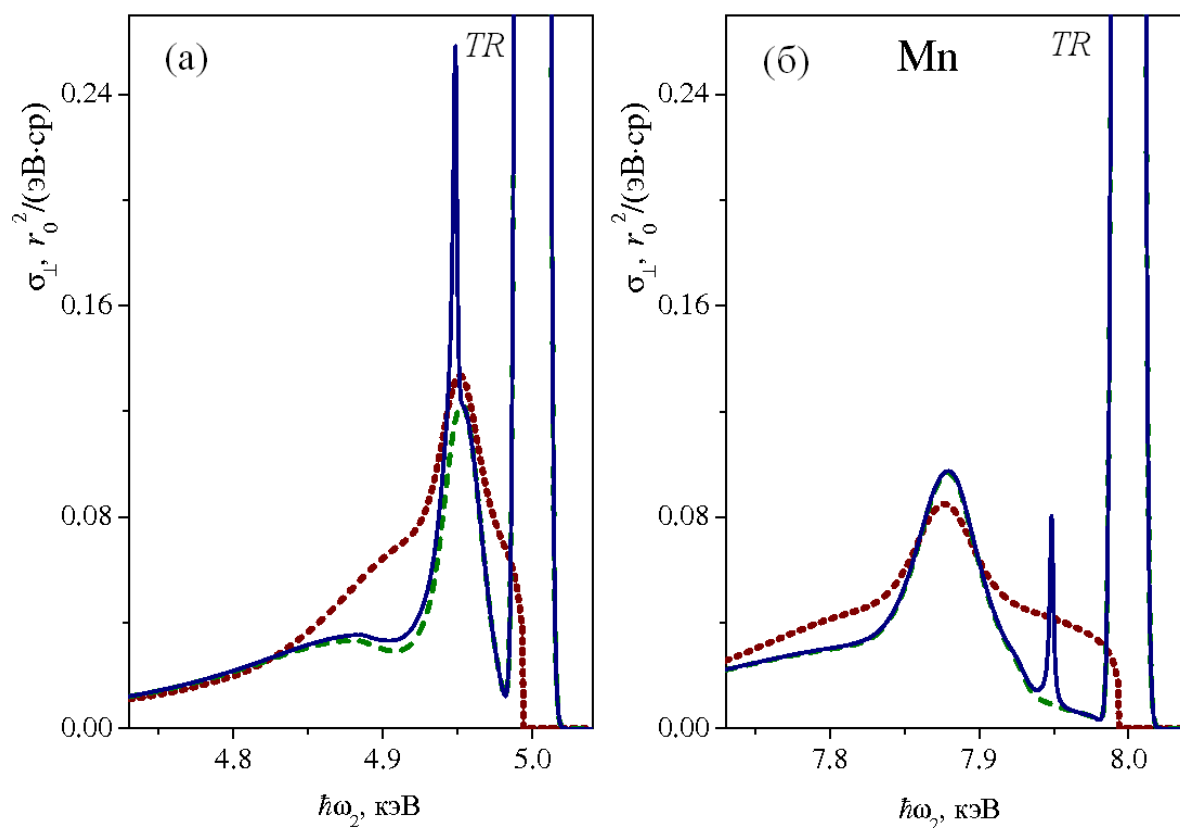


Рисунок 2 - Полные дважды дифференциальные сечения рассеяния линейно поляризованного ($\perp$) фотона электронами атома Mn (теория диссертации): сплошная кривая (штрих) – учтен (*не* учтен) канал автоионизации. Пунктир – результат выполненный в рамках импульсного приближения (по данным работы [7]). $\hbar\omega_1 = 5$ кэВ (а), 8 кэВ (б), $\theta = 90^\circ$, $\Gamma_{beam} = 10$ эВ. В области упругого Томсоновского (T) и Рэлеевского (R) рассеяния $\max(\sigma_{\perp}^{TR}) = 21.07$ (а), 12.70 (б) $r_0^2/(\text{эВ}\cdot\text{ср})$

В **Третьей** главе диссертации на примере атома Ве изучен процесс рассеяния фотона электронами *возбужденного* атома на *аттосекундной* шкале ($1\text{ас} = 10^{-18}\text{ с}$) времени фотон–электронного взаимодействия. Установлено, что в сечении рассеяния, наряду с профилем нормального ($\hbar\omega_2 < \hbar\omega_1$) комптоновского рассеяния и томсоновской линией упругого ($\hbar\omega_2 = \hbar\omega_1$) рассеяния, возникают резонансы **аномального** комптоновского рассеяния фотона электроном *сплошного* спектра при энергиях рассеянного фотона $\hbar\omega_2 > \hbar\omega_1$ ($\hbar\omega_2^{\text{max}} = 2\hbar\omega_1 - I_{1s}$).

В **Разделе 3.1** проведено построение *трижды* дифференциального сечения процесса, реализуемого *после* ионизации нейтрального атома в

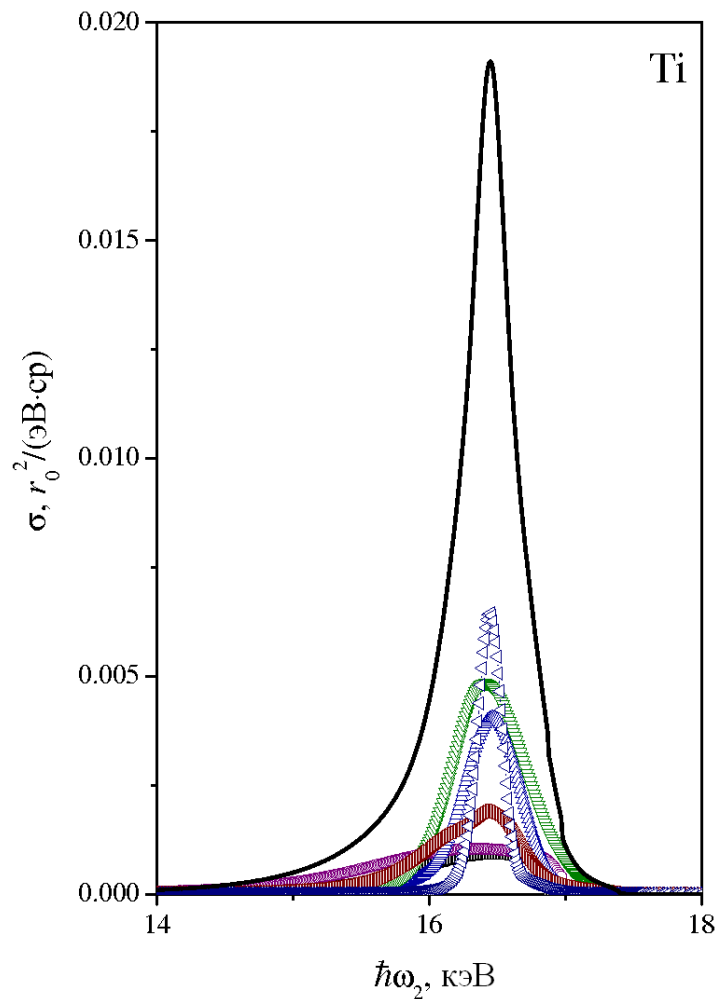


Рисунок 3 - Парциальные дважды дифференциальные сечения Комптоновского рассеяния *неполяризованного* излучения электронами атома Ti (теория диссертации): $n_1 l_1 = 2s$ (квадрат), $2p$ (кружок), $3s$ (треугольник *вверх*), $3p$ (треугольник *вниз*), $3d$ (треугольник *вправо*), $4s$ (треугольник *влево*) и полное сечение – сплошная кривая. Вклад глубокой $1s$ оболочки ($\hbar\omega_2 \leq 12.49$ кэВ) определен вне энергетической шкалы Рис. 3. $\hbar\omega_1 = 17.44$ кэВ ($K\alpha$ –линия Mo), $\theta = 141^\circ$, $\Gamma_{beam} = 180$ эВ (параметры эксперимента [9])

состояние $1s\varepsilon p$ фотоном, обладающим энергией $\hbar\omega_0$,

$$\hbar\omega_0 + [0] \rightarrow 1s\varepsilon p[{}^1P_1]. \quad (7)$$

Для трижды дифференциального сечения получаем (в обычных единицах):

$$\frac{d^3\sigma_{\perp}}{d\hbar\omega_0 d\hbar\omega_2 d\Omega} = r_0^2 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right) B(x, y) \equiv \sigma_{\perp}^{(3)}, \quad (8)$$

$$B(x, y) = \sum_{l=0}^{\infty} (l+1) [Q_l^2(xp, y(l+1)) + Q_{l+1}^2(xp, yl)], \quad (9)$$

$$Q_l(a, b) = \int_0^{\infty} P_a(r) j_l(qr) P_b(r) dr, \quad (10)$$

$$x = \hbar\omega_0 - I_{1s} \geq 0, \quad (11)$$

$$y = \hbar\omega_1 - \hbar\omega_2 + x \geq 0. \quad (12)$$

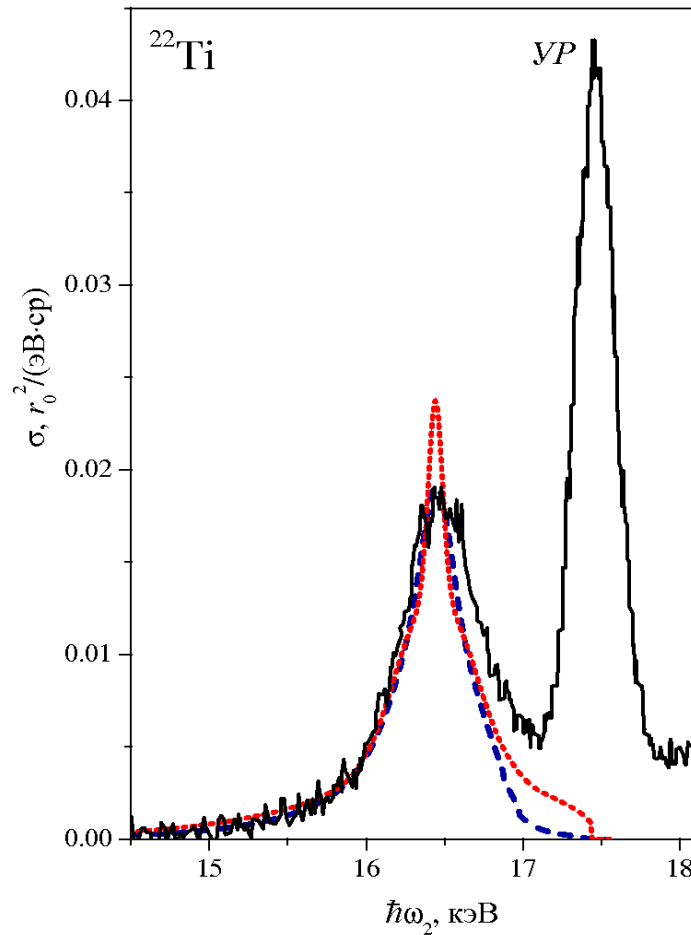


Рисунок 4 - Полные дважды дифференциальные сечения рассеяния неполяризованного излучения атомом Ti: штриховая кривая – теория диссертации, пунктирная – результат импульсного приближения (по данным работы [7]). Сплошная кривая – эксперимент работы Синха и др. (2006) [9]: $\hbar\omega_1 = 17.44$ кэВ ($K\alpha$ –линия Mo), $\theta = 141^\circ$, $\Gamma_{beam} = 180$ эВ. UP – упругое рэлеевское рассеяние

В Разделе 3.2 представлены результаты расчёта сечения процесса рассеяния (8) для свободного атома Be.

Для энергии падающего фотона принято значение $\hbar\omega_1 = 1$ кэВ. Заметим, что указанное значение энергии существенно превышает величину энергии

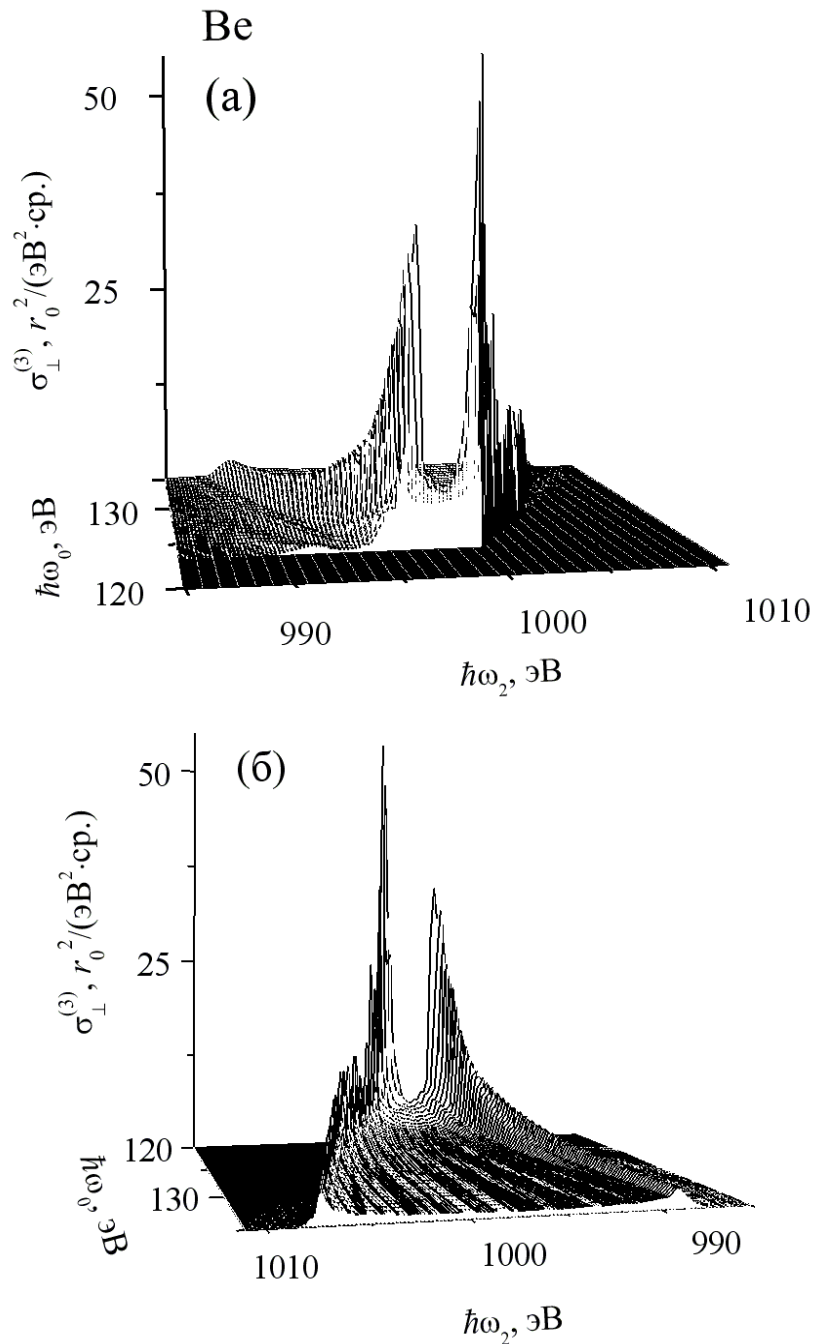


Рисунок 5 - Трижды дифференциальное сечение рассеяния линейно поляризованного $\hbar\omega_1$ -фотона ϵp -электроном сплошного спектра состояния $1s \rightarrow \epsilon p$ канала фотоионизации атома Be в приближении $\Gamma_{1s} = \Gamma_{beam} = 0$. (б) – см. Рис. 5(а), развернутый на угол 180° . $\hbar\omega_1 = 1$ кэВ, $I_{1s} = 123.09$ эВ, $\theta = 90^\circ$, $\hbar\omega_0$ – энергия фотона, приготавливающего состояния ионизации как начальные состояния процесса и $\hbar\omega_2$ – энергия рассеянного фотона

порога ионизации $1s$ –оболочки атома Ne $I_{1s} = 123.09$ эВ (расчет диссертации). Для величины спектрального разрешения предполагаемого эксперимента в области Томсоновского рассеяния принято $\Gamma_{beam} = 1$ эВ. Это значение превышает естественную ширину распада $1s$ –вакансии атома Ne $\Gamma_{1s} = 0.016$ эВ (расчет диссертации) и соответствует современному уровню спектрального разрешения экспериментов по исследованию неупругого рассеяния фотона атомом ($\Gamma_{beam} \cong 1.00$ эВ [10]). Угол рассеяния принят равным $\theta = 90^\circ$. При расчетах величин (10) учтены значения l от 0 до 25.

Оценки показывают, что учет старших гармоник мультипольности ($l > 25$) изменяет величину сечений (8) не более чем на 0.1 %.

Рис. 5 демонстрирует, что с увеличением энергии $\hbar\omega_0$ –фотона локальные максимумы сечений нормального комптоновского рассеяния смещаются в длинноволновую по энергии $\hbar\omega_2$ –фотона область относительно энергии упругого рассеяния и уменьшаются. Форма самих профилей сечения рассеяния заметно уширяется.

Аналогичные изменения, но в коротковолновой области по энергии $\hbar\omega_2$ –фотона, наблюдаются как для комптоновских профилей, так и локальных

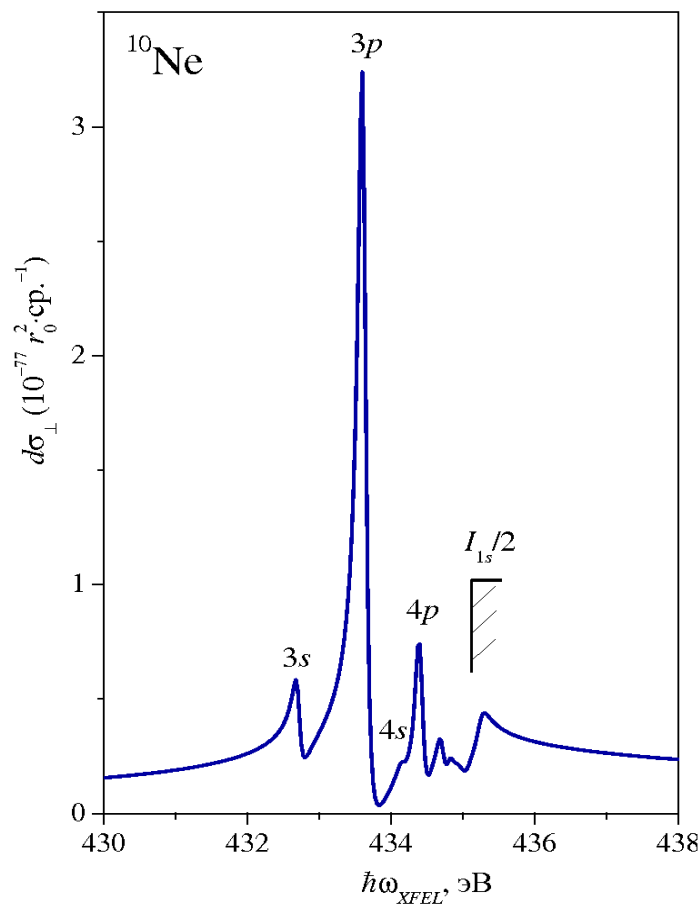


Рисунок 6 - Дифференциальное сечение слияния для атома Ne в области энергии падающего XFEL–фотона $2\hbar\omega \cong I_{1s} \pm 40$ эВ. $\theta = 150^\circ$, $I_{1s} = 870.17$ и $\Gamma_{1s} = 0.27$ эВ

максимумов сечения *аномального* комптоновского рассеяния.

Четвертая глава диссертации посвящена первому теоретическому исследованию процесса слияния трёх XFEL–фотонов в поле свободного атома (атомного иона). В качестве объектов исследований взяты свободный атом Ne и ионы его изоэлектронной последовательности (Ar^{8+} , Ti^{12+} и Fe^{16+}).

Получены абсолютные величины и формы дифференциального сечения слияния. В областях энергий падающего XFEL–фотона $\hbar\omega \cong I_{1s} / 2$ установлены ярко выраженные резонансные структуры и сильная угловая анизотропия дифференциального сечения слияния. Показано, что в предполагаемой схеме XFEL–эксперимента (компланарное и аксиально–симметричное слияние) три XFEL–фотона сливаются в один фотон с наибольшей вероятностью в области углов рассеяния $\theta \in (90^\circ; 180^\circ)$ – *обратное рассеяние*.

В **Разделе 4.1** установлена структура дифференциального сечения эффекта слияния трех XFEL–фотонов в один фотон в поле свободного атома с 1S_0 –термом основного состояния (принята атомная система единиц):

$$\omega + \omega + \omega + [0] \rightarrow X \rightarrow [0] + \omega_R, \quad (13)$$

где ω (ω_R) – энергия падающего (рассеянного) фотона, X – промежуточные (виртуальные) состояния квантовой системы «атом $\oplus$ фотоны» и закон сохранения энергии имеет вид $\omega_R = 3\omega$.

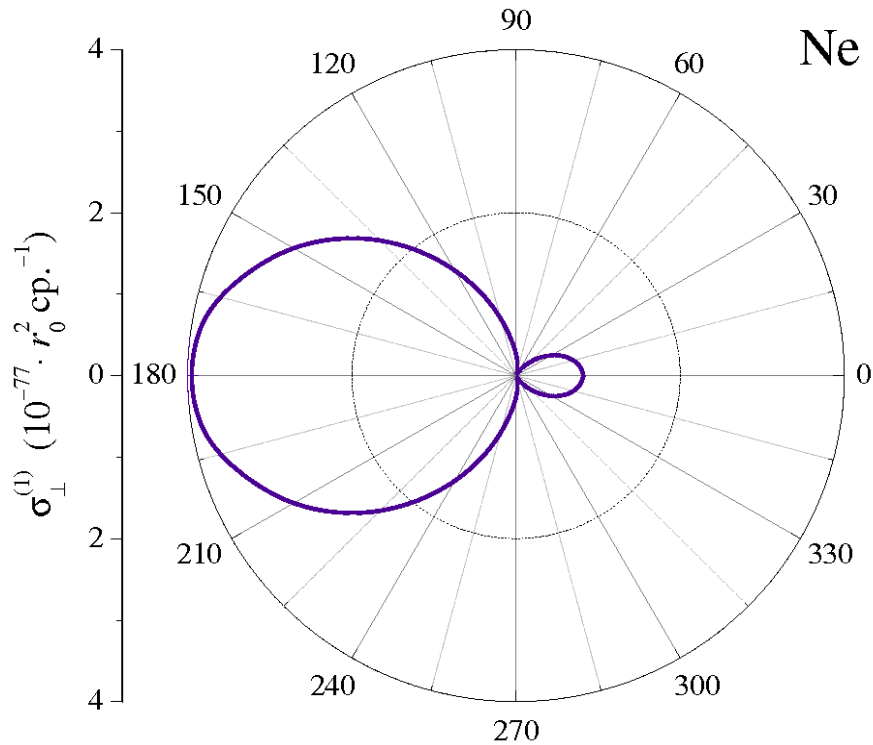


Рисунок 7 - См. Рис. 6, но в полярной системе координат с полярным радиусом $\max[\sigma_{\perp}^{(1)}]$ и полярным углом θ для фиксированного значения энергии падающего XFEL–фотона $\hbar\omega = 433.615$ эВ ($\hbar\omega_R = 1300.845$ эВ) (см. $1s \rightarrow 3p$ дипольный резонанс в Табл. 1). $I_{1s} = 870.17$ и $\Gamma_{1s} = 0.27$ эВ

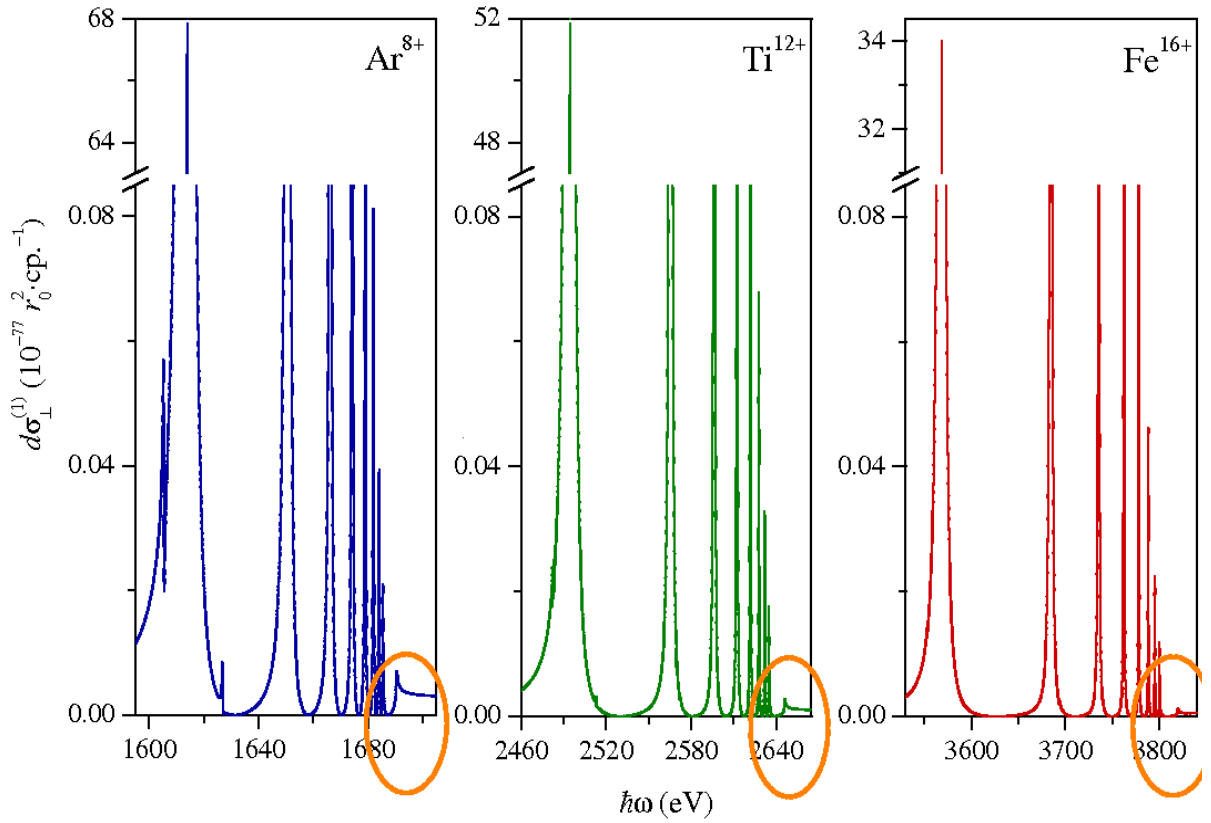


Рисунок 8 - Дифференциальные сечения слияния для ионов Ar^{8+} , Ti^{12+} и Fe^{16+} в области энергии падающего XFEL-фотона $2\hbar\omega \cong I_{1s} \pm (200 \div 600)$ эВ. Угол рассеяния $\theta = 150^\circ$, $I_{1s} = 3380.791$ (Ar^{8+}), 5292.143 (Ti^{12+}) и 7639.277 (Fe^{16+}) эВ (расчет диссертации). $\Gamma_{1s} = 0.590$ (Ar^{8+}), 0.778 (Ti^{12+}) и 1.046 (Fe^{16+}) эВ [12]. Выделены области непрерывных спектров энергий

Дифференциальное сечение процесса (13) определяется выражением:

$$\frac{d\sigma_{\perp}}{d\Omega_R} \equiv \sigma_{\perp}^{(1)} = |\eta M|^2, \quad (14)$$

$$M = \sum_{x>F} Q \left(\frac{1}{2\omega - \Delta + i\gamma_{1s}} - \frac{1}{2\omega + \Delta} \right), \quad (15)$$

$$Q = (4l + 2) R_l^{(1)} R_l^{(2)} P_l(\cos\Psi), \quad (16)$$

где $\eta = 2\pi c r_0^2 / \omega$, $\Delta = I_{1s} + x$, F – уровень Ферми и P_l – полином Лежандра.

В Разделе 4.2 теория предыдущего раздела распространена на случай свободного атома неона (Ne ; $Z = 10$; $[0] = 1s^2 2s^2 2p^6 [^1S_0]$). Такой выбор объекта исследования обусловлен, прежде всего, сферической симметрией основного состояния атома Ne и его доступностью для проведения высокоточных экспериментов.

Таблица 1. Спектральные характеристики амплитуд вероятности $1s \rightarrow nl$ переходов в состояния дискретного спектра атома Ne: $\langle r_{nl} \rangle$ – средний радиус возбужденного nl -электрона, $\hbar\omega$ – энергия падающего XFEL-фотона. $\theta = 150^\circ$, $I_{1s} = 870.17$ эВ, $\Gamma_{1s} = 0.27$ эВ.

nl	$\langle r_{nl} \rangle$ (Å)	$\hbar\omega$ (эВ)	Q^*
3s	2.30	432.704	0.24 [–5]
3p	3.17	433.615	0.13 [–4]
4p	7.41	434.420	0.41 [–5]
5p	13.22	434.711	0.18 [–5]
3d	5.53	434.348	0.14 [–10]
4f	9.53	434.680	0.68 [–15]

*) Символ [– n] означает множитель 10^{-n} .

Результаты расчета представлены на Рис. 6, 7 и в Таблице 1. Учтены лишь наиболее интенсивные $1s \rightarrow n(s, p, d, f)$ переходы ($n \leq 15$) в состояния дискретного спектра. Для состояний $1s \rightarrow xl$ ионизации учтены лишь значения орбитальных чисел $l \in [0; 17]$. Для I_{1s} – энергии порога ионизации $1s$ -оболочки и естественной Γ_{1s} -ширины распада $1s$ -вакансии Ne приняты (в эВ) экспериментальные значения 870.17 и 0.27 [11], соответственно.

Согласно Рис. 6 дифференциальное сечение процесса (14) в области энергий $\omega \cong I_{1s}/2$ носит ярко выраженный резонансный характер. При этом, лидирующий вклад в вероятность слияния трех XFEL-фотонов в один дают переходы в состояния дискретного (Табл. 1) и сплошного (Рис. 6) спектра дипольно разрешенной p -симметрии возбуждения (ионизации).

В Разделе 4.3 теория Раздела 4.1 распространена на случай атомного иона. Исследована динамика эффекта слияния фотонов при переходе от атома неона к ряду ионов его изоэлектронной последовательности. Взяты ионы аргона (Ar^{8+} ; $Z = 18$), титана (Ti^{12+} ; $Z = 22$) и железа (Fe^{16+} ; $Z = 26$).

Результаты расчета представлены в Табл. 2 и на Рис. 8, 9.

Для ионов Ar^{8+} , Ti^{12+} и Fe^{16+} теория диссертации в соответствующих областях энергий XFEL-фотонов и ω_R -фотона слияния обнаруживает возникновение *протяженной резонансной структуры* дифференциального сечения процесса слияния (14), а *лидирующие резонансы* сечений принимают характер *гигантских резонансов*.

Увеличение заряда ядра наблюдается локализация к ядру состояний дискретного спектра и, соответственно, делокализация состояний непрерывного спектра энергий. Как результат, интенсивность эффекта слияния через состояния непрерывного спектра энергий перераспределяется в область рождения гигантских резонансов сечения рассеяния.

Таблица 2. Дифференциальные сечения для лидирующих резонансов $1s \rightarrow nl$ переходов в состояния дискретного спектра ионов Ar^{8+} , Ti^{12+} и Fe^{16+} . $\hbar\omega$ – энергия падающего XFEL–фотона. Параметры расчета (эВ): $\Gamma_{1s} = 0.590$, $I_{1s} = 3380.791$ (Ar^{8+}), $\Gamma_{1s} = 0.778$, $I_{1s} = 5292.143$ (Ti^{12+}) и $\Gamma_{1s} = 1.046$, $I_{1s} = 7639.277$ (Fe^{16+}). Угол рассеяния $\theta = 150^\circ$.

nl	Ar^{8+}		Ti^{12+}		Fe^{16+}	
	$\hbar\omega$ (эВ)	$\sigma_{\perp}^{(1)} \cdot 10^{77}$	$\hbar\omega$ (эВ)	$\sigma_{\perp}^{(1)} \cdot 10^{77}$	$\hbar\omega$ (эВ)	$\sigma_{\perp}^{(1)} \cdot 10^{77}$
$3s$	1605.326	0.03818	2482.153	0.02274	3552.582	0.01362
$3p$	1613.831	67.97397	2494.252	52.68750	3568.243	33.98469
$4p$	1650.677	7.71778	2565.506	6.24329	3684.550	4.14727
$5p$	1666.238	1.66357	2596.263	1.37493	3735.432	0.92614
$6p$	1674.294	0.50201	2612.370	0.41967	3762.266	0.28370
$3d$	1626.813	0.00826	2512.840	0.00307	3592.267	0.00257
$4f$	1656.810	0.00042	2574.980	0.00083	3697.407	0.00082

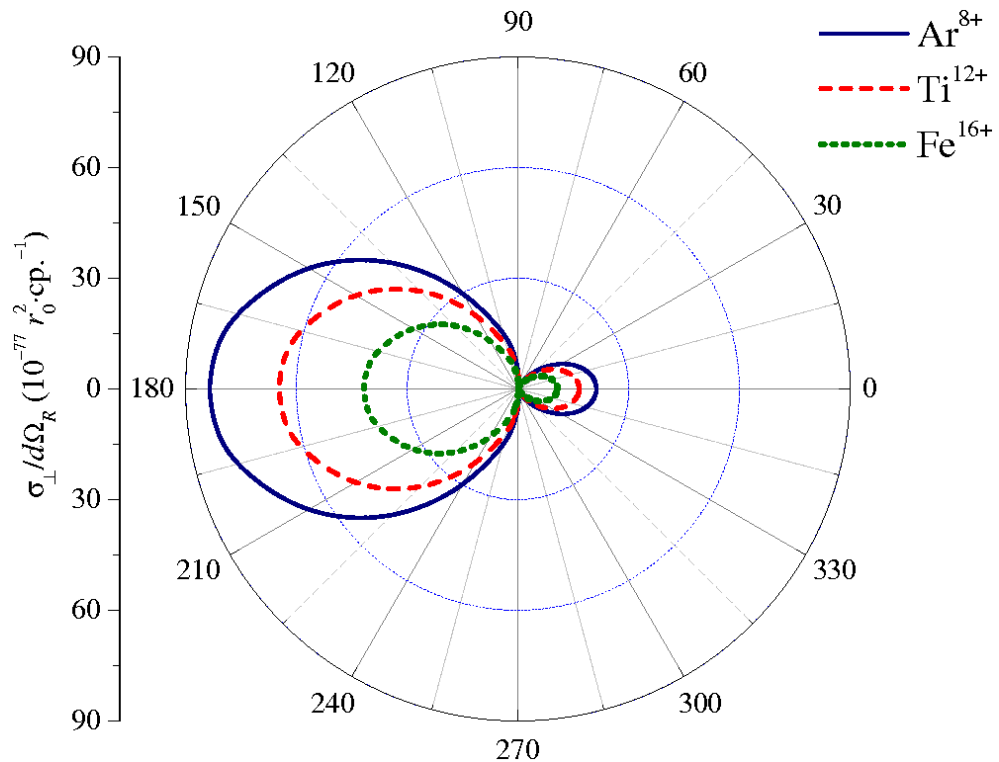


Рисунок 9 - Индикатрисы слияния для ионов Ar^{8+} , Ti^{12+} и Fe^{16+} с полярным радиусом $\max[\sigma_{\perp}^{(1)}]$ и полярным углом θ для фиксированных значений энергии падающих XFEL–фотонов $\hbar\omega = 1613.831$ эВ (Ar^{8+} ; $\hbar\omega_R = 4841.493$ эВ), 2494.252 эВ (Ti^{12+} ; $\hbar\omega_R = 7482.756$ эВ) и 3568.243 эВ (Fe^{16+} ; $\hbar\omega_R = 10704.729$ эВ) (см. соответствующие $1s \rightarrow 3p$ дипольные резонансы в Табл. 2)

В **Заключении** дана сводка основных результатов и выводов диссертации.

1. На примере свободного атома марганца теоретически предсказано существование гигантского автоионизационного резонанса в спектрах комптоновского рассеяния фотона атомом с открытой оболочкой в основном состоянии. Именно: распад виртуальной $3p$ -вакансии по $3p^5 3d^6 \rightarrow 3p^6 3d^4 \varepsilon f$ каналу супер-Костера-Кронига приводит к возникновению *гигантского автоионизационного резонанса* в сечении комптоновского рассеяния фотона электронами атома.

2. Установлено, что, в отличие от процесса фотопоглощения, в спектрах комптоновского рассеяния абсолютные значения и формы профиля автоионизационного резонанса существенно изменяются при варьировании энергий $\hbar\omega_1$ ($\hbar\omega_2$) падающего (рассеянного) фотонов и θ угла рассеяния.

3. Проведен расчет абсолютных величин и формы спектра комптоновского рассеяния *неполяризованного* фотона атомом Ti – атома с открытой оболочкой в основном состоянии.

4. Дано сравнение результатов теории диссертации для атома Ti не только с результатами импульсного приближения, но прежде всего с результатами существующего эксперимента. Сравнение демонстрирует хорошее согласие нашей теории с экспериментальными данными. Кроме того, результат, полученный для атома ^{22}Ti (достаточно «близкого» к атому ^{25}Mn) служит «тестом надежности» расчета сечения комптоновского рассеяния в случае атома Mn.

5. Установлено, что контактное взаимодействие фотона с электронами *возбужденного* атомом на аттосекундной шкале времени приводит к квантовому эффекту возникновения резонансов *аномального* неупругого ($\omega_2 > \omega_1$) рассеяния.

6. На примере атома Be получены абсолютные величины и форма *трижды* дифференциального сечения аномального неупругого рассеяния в зависимости от энергии фотона, приготавливающего состояния возбуждения/ионизации атома и угла рассеяния.

7. Установлено, что при условии $\hbar\omega_2 > \hbar\omega_1$ наблюдается структура сечения *аномального* комптоновского рассеяния: в результирующем сечении возникают *локальные* максимумы вероятности эффекта аномального неупругого рассеяния на одноэлектронных состояниях непрерывного спектра.

8. Показано, что при увеличении энергии $\hbar\omega_0$ –фотона (приготавливающего состояния $1s \rightarrow n(\varepsilon)p$ возбуждения/ионизации) локальные максимумы сечения нормального комптоновского рассеяния уменьшаются и сдвигаются в длинноволновую область энергий ω_2 –фотона относительно энергии упругого рассеяния, а сами профили сечения комптоновского рассеяния заметно уширяются. Подобные изменения, но в *коротковолновой* области по энергии $\hbar\omega_2$ –фотона, наблюдаются как для комптоновских

профилей, так и локальных максимумов сечения аномального комптоновского рассеяния.

9. Получены абсолютные величины и формы дифференциального (по углу рассеяния) сечения слияния трех XFEL–фотонов в один фотон в поле атома (Ne) и атомного иона (Ar^{8+} , Ti^{12+} , Fe^{16+}). В области энергий падающего XFEL–фотона $\hbar\omega \cong I_{1s} / 2$ установлены ярко выраженная резонансная структура и сильная угловая анизотропия дифференциального сечения слияния.

10. Показано, что в предполагаемой схеме эксперимента компланарного и аксиально–симметричного слияния трех XFEL–фотонов с наибольшей вероятностью последние сливаются в один фотон в области углов рассеяния $\theta \in (90^\circ, 180^\circ)$ (*эффект рассеяния назад*). Установлено появление «инфракрасной расходимости» дифференциального сечения слияния в формально математическом пределе $\hbar\omega \rightarrow 0$.

11. С целью демонстрации возможности экспериментального исследования *предсказываемого* «эффекта слияния» методами классической теории вероятности дана *оценка* максимальной абсолютной величины *наблюдаемого* дифференциального сечения процесса.

11. Показано, что переход от атома (в нашем случае – атом Ne) к ионам его изоэлектронной последовательности сопровождается расширением энергетических областей резонансов слияния и между лидирующими резонансами спектра слияния вдоль шкалы энергий падающих на ион XFEL–фотонов появляются протяженные «окна прозрачности». Также установлено, что основной вклад в вероятность процесса слияния вносят состояния дипольно ($l=1$) разрешенной p –симметрии. При этом, эффект локализации дискретных состояний высших ($l \geq 2$) симметрий сопровождается увеличением их вклада в сечение слияния.

СПИСОК ЦИТИРОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Kane, P.P.** Inelastic scattering of X-rays and gamma rays by inner shell electrons / P.P. Kane // Phys. Reports – 1992. – V. 218. – P. 67–139.
2. **Eisenberger, P.** Compton scattering of X-rays from bound electrons / P. Eisenberger, P.M. Platzmann // Phys. Rev. A – 1970. – V. 2. – P. 415–423.
3. **Pelligrini, C.** The physics of x-ray free-electron lasers / C. Pelligrini, A. Marinelli, S. Reiche // Rev. Mod. Phys. – 2016. – V. 88. – P. 015006.
4. **Glenzer, S.H.** X-ray Thomson scattering in high energy density plasmas / S.H. Glenzer, R. Redmer // Rev. Mod. Phys. – 2009. – V. 81. – P. 1625–1663.
5. **Remington, B.A.** Experimental astrophysics with high power lasers and Z pinches / B.A. Remington, R.P. Drake, D.D. Ryutov // Rev. Mod. Phys. – 2006. – V. 78. – P. 775–807.
6. **Hugtenburg, R. P.** Anomalous Rayleigh scattering with dilute concentrations of elements of biological importance / R. P. Hugtenburg, D. A. Bradley // Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B – 2004. – V. 213. – P. 552–555.

7. **Biggs, F.** Hartree-Fock Compton profiles for the elements / F. Biggs, L.B. Mendelsohn, J.B. Mann // *At. Data Nucl. Data Tables* – 1975. – V.16. – P.201–309.
8. **Bruhn, R.** 3p-excitation of atomic Mn: experimental evidence for the super Coster-Kronig decay / R. Bruhn, B. Sonntag, H. W. Wolff // *Phys. Lett. A* – 1978. – V. 69. – P. 9–11.
9. **Singh, P.** Differential cross-section measurements for elastic and inelastic scattering of 17.44 keV photons / P. Singh, S. Kumar, J. Goswamy, D. Mehta, N. Singh // *Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. B* – 2006. – V. 244. – P. 295–302.
10. **Huotari, S.** Asymmetry of Compton profiles / S. Huotari, K. Hämäläinen, S. Manninen, A. Issolah, M. Marangolo // *J. Phys. Chem. Solids* – 2001. – V. 62. – P. 2205–2213.
11. **Coreno, M.** Measurement and *ab initio* calculation of the Ne photoabsorption spectrum in the region of the K edge / M. Coreno, L. Avaldi, R. Camilloni, K. C. Prince, M. de Simone, J. Karvonen, R. Colle, S. Simonucci // *Phys. Rev. A* – 1999. – V. 59. – P. 2494–2497.
12. **Chen, M.H.** Relativistic Auger and X-Ray deexcitation rates of highly stripped atoms / M.H. Chen, B. Crasemann, Kh R. Karim, H. Mark // *Phys. Rev. A* – 1981. – V. 24. – P. 1845–1851.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ АВТОРА

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в базы данных международных индексов научного цитирования Scopus и Web of Science:

A1. Hopersky, A.N. Anomalous elastic scattering of an X-Ray photon by an atom with an open shell / A.N. Hopersky, I.D. Petrov, V.A. Yavna, A.M. Nadolinsky, **R.V. Koneev** // *J. Phys. B* – 2004. – V. 37. – No 16. – P. 3313–3319.

A2. Khoperskiĭ, A.N. Elastic scattering of a photon by an atom with an open shell / A.N. Khoperskiĭ, A.M. Nadolinskiĭ, V.A. Yavna, **R.V. Koneev** // *Optics and Spectroscopy*. – 2005. – V. 98 (2). – P. 161-165. – DOI: 10.1134/1.1870054.

A3. Khoperskiĭ, A.N. Resonance inelastic scattering of a photon by the neon atom in the region of the K and KL 23 ionization thresholds / A.N. Khoperskiĭ, A.M. Nadolinskiĭ, **R.V. Koneev**, V.A. Yavna // *Optics and Spectroscopy*. – 2006. – V. 100 (4). – P. 510-516. – DOI: 10.1134/S0030400X06040059

A4. Hopersky, A.N. Inelastic scattering of an X-ray photon by a manganese atom / A.N. Hopersky, A.M. Nadolinsky, **R.V. Koneev**, M.E. Vasil'eva // *Optics and Spectroscopy*. – 2008. – V. 105 (5). – P. 705-710. – DOI: 10.1134/S0030400X08110106.

A5. Khopersky, A.N. Scattering of a photon by an electron of the atom continuous spectrum / A.N. Khopersky, A.M. Nadolinsky, **R.V. Koneev**, V.A. Yavna // *Optics and Spectroscopy*. – 2015. – V. 119 (2). – P. 187-190. – DOI: 10.1134/S0030400X15080123.

A6. Hopersky, A.N. Merging of X-Ray photons in the field of a light atomic ion / A.N. Hopersky, A.M. Nadolinsky, **R.V. Koneev** // JETP Letters. – 2017. – V. 105 (9). – P. 568-571. – DOI: 10.1134/S0021364017090107

Статьи, опубликованные в журналах, входящих в базу РИНЦ:

A7. Надолинский, А.М. Рассеяние рентгеновского фотона атомом меди / А.М. Надолинский, А.Н. Хоперский, В.А. Явна, Д.В. Дзюба, **Р.В. Конеев** // Вестник РГУПС. Физ.-мат. науки – 2004. – № 2. – С. 108-113.

A8. Надолинский, А.М. Аномальное упругое рассеяние рентгеновского излучения неоноподобным ионом / А.М. Надолинский, А.Н. Хоперский, В.А. Явна, Д.В. Дзюба, **Р.В. Конеев** // Вестник РГУПС. Физ.-мат. науки – 2004. – № 3. – С. 123-128.

A9. Надолинский, А.М. Неупругое рассеяние рентгеновского фотона многозарядным положительным атомным ионом / А. М. Надолинский, А. С. Каспржицкий, А. Н. Хоперский, В.А.Явна, **Р.В. Конеев** // Вестник РГУПС. Физ.-мат. науки – 2005. – № 4. – С. 133-138.

A10. Надолинский, А.М. Многочастичные эффекты при резонансном неупругом рассеянии фотона субвалентной оболочкой свободного атома / А.М. Надолинский, **Р.В. Конеев**, А.С. Каспржицкий, А.Н. Хоперский, В.А. Явна // Вестник РГУПС. Физ.-мат. науки – 2006. – № 4. – С. 133-138.

A11. Надолинский, А.М. Эффект контактного рассеяния рентгеновского фотона атомом неона / А.М. Надолинский, А.С. Каспржицкий, **Р.В. Конеев**, А.Н. Хоперский, В.А. Явна // Вестник РГУПС. Физ.-мат. науки – 2007. – № 2. – С. 111–115.

A12. Хоперский, А.Н. Гигантский автоионизационный резонанс при Комптоновском рассеянии рентгеновского фотона атомом с открытой оболочкой / А.Н. Хоперский, А.М. Надолинский, В.А. Явна, К.Х. Икеева, **Р.В. Конеев**, // Вестник РГУПС. Физ.-мат. науки – 2013. – 1 (49). – С. 130-141. https://elibrary.ru/download/elibrary_18917882_74894540.pdf

A13. Хоперский, А.Н. Аномальное неупругое рассеяние фотона возбужденным атомом на аттосекундной шкале времени / А.Н. Хоперский, А.М. Надолинский, В.А. Явна, **Р.В. Конеев** // Вестник РГУПС. Физ.-мат. науки – 2013. – № 2. – С. 141-144. https://elibrary.ru/download/elibrary_19020854_11482827.pdf.

Статьи, опубликованные в сборниках тезисов и трудах конференций:

A14. Хоперский, А.Н. Атом как рентгеновская линза / А.Н. Хоперский, А.М. Надолинский, **Р.В. Конеев** // Сборник трудов IX Международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2016», Санкт-Петербург, 17-21 октября 2016 / под ред. проф. В. Г. Беспалова, проф. С. А. Козлова. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2016. – С. 131-132. http://conf-bpo.ifmo.ru/files/2016_materials.pdf.

A15. Хоперский, А.Н. Слияние рентгеновских фотонов в поле атомного иона / А.Н. Хоперский, А.М. Надолинский, **Р.В. Конеев** // VI международная конференция по фотонике и информационной оптике, 1–3 февраля 2017 г. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2017. – С. 474-475.

A16. Хоперский, А.Н. Рэлеевское рассеяние двух фотонов атомом / А.Н. Хоперский, А.М. Надолинский, **Р.В. Конеев** // VII международная конференция по фотонике и информационной оптике, 24–26 января 2018 г. : сборник научных трудов. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2018. – С. 438-439.

A17. Хоперский, А.Н. Резонансное неупругое рассеяние двух XFEL–фотонов многоэлектронным атомом / А.Н. Хоперский, А.М. Надолинский, **Р.В. Конеев** // Сборник трудов X международной конференции «Фундаментальные проблемы оптики – 2018», Санкт-Петербург, 15-19 октября 2018 / под ред. проф. В. Г. Беспалова, проф. С. А. Козлова. – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2018. – С. 98-99.

A18. Хоперский, А.Н. Квадрупольная эмиссия при рассеянии двух фотонов атомом / А.Н. Хоперский, А.М. Надолинский, О.Б. Сухорукова, **Р.В. Конеев** // VIII международная конференция по фотонике и информационной оптике, 23–25 января 2019 г. : сборник научных трудов. – Москва: НИЯУ МИФИ, 2019. – С. 511-512.