

## О Т З Ы В

официального оппонента Нефёдова А.В. на диссертационную работу Лященко Константина Николаевича «Исследование автоионизационных состояний в резонансных процессах при столкновениях многозарядных ионов с атомными частицами», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика

Диссертационная работа К. Н. Лященко посвящена теоретическому исследованию диэлектронной рекомбинации с многозарядными ионами и резонансной ионизации ионов при столкновениях с электронами, протонами и легкими атомами. Основной целью работы является теоретическое вычисление полных и дифференциальных сечений этих процессов в рамках квантовой механики и квантовой электродинамики (КЭД) и, в частности, изучение резонансной структуры сечений, обусловленной возбуждением ионов в автоионизационные состояния.

В течение последнего десятилетия был достигнут значительный прогресс в приготовлении многозарядных ионов, в том числе ионов тяжелых элементов вплоть до урана. Исследования процессов столкновений ионов с заряженными частицами (электронами, протонами), ионами и нейтральными атомами традиционно привлекают к себе внимание как для разработки новых теоретических методов, так и для анализа лабораторной и астрофизической плазмы. Можно ожидать, что дальнейшее развитие экспериментальной техники, в частности ввод в эксплуатацию ускорительного комплекса FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) в Дармштадте, выведет исследования столкновений с участием многозарядных ионов на новый уровень. Поэтому выбранная тема диссертации является актуальной.

Диссертация состоит из введения, двух глав, заключения и двух приложений. Список литературы включает 65 наименований и в достаточно полной мере отражает основные научные публикации по данной тематике.

Во введении сформулированы актуальность работы, ее основные цели, научная новизна и практическая ценность, указана апробация представленных в ней результатов и дано краткое содержание диссертации.

Первая глава посвящена диэлектронной рекомбинации с одно- и двухэлектронными ионами и состоит из четырех разделов. Первый раздел содержит общее описание процесса и обзор близких по тематике научных публикаций. Второй раздел содержит изложение теоретических методов для описания двух- и трехэлектронных систем в рамках квантовой электродинамики. Многоэлектронные волновые функции сначала рассматриваются в виде детерминантов Слэйтера, составленные из одноэлектронных

решений уравнения Дирака. Далее для учета КЭД поправок используется метод контура линии для квазивырожденных состояний. На основе полного набора многоэлектронных волновых функций с помощью стандартной КЭД теории возмущений формируется матрица, состоящая из соответствующих дираковских энергий и различных КЭД поправок, включающих однопетлевые поправки на поляризацию вакуума и собственную энергию электрона и поправки на межэлектронное взаимодействие с учетом одно- и двухфотонного обмена. Затем решается задача нахождение собственных функций данной матрицы и ее собственных чисел. В следующем разделе данные функции используются для нахождения выражения для сечения диэлектронной рекомбинации. Последний раздел главы содержит результаты расчета дифференциальных и полных сечений с одно- и двухэлектронными ионами урана. Подробно обсуждаются особенности резонансной структуры полных сечений. Каждый резонанс идентифицируется с определенным автоионизационным состоянием или группой таких состояний, энергии и ширины которых приведены в таблице. Также обсуждается угловое распределение вылетающих фотонов. Анализируется относительный вклад брейтовского межэлектронного взаимодействия.

Вторая глава состоит из двух разделов и посвящена ионизации многозарядных ионов при столкновениях с различными заряженными частицами и легкими нейтральными атомами. Первый раздел посвящен процессу прямой ионизации одноэлектронных ионов. Для теоретического описания электронов, связанных в ионах, а также атомной частицы, с которой рассматривается столкновение, используются решения уравнения Дирака. Взаимодействие между электроном и атомной частицей описывается в лидирующем порядке теории возмущений по малому параметру  $\alpha Z_A / v \ll 1$ , где  $Z_A$  – зарядовое число атома, налетающего со скоростью  $v$ . В околопороговой области, где  $v \sim \alpha Z$ , это приближение оправдано, если  $Z_A \ll Z$  ( $Z$  – зарядовое число иона). Полные сечения ионизации вычислены для одноэлектронных ионов железа, ксенона, золота и урана, сталкивающихся с электронами, протонами, атомами водорода и гелия. В разделе также приводятся выражения для дифференциальных сечений ионизации и соответствующие результаты численного расчета. Сравнение смешанных распределений по энергии и углам вылета электронов проведено для столкновений ионов с электронами и протонами равных скоростей.

Во втором разделе второй главы представлено исследование резонансной ионизации двухэлектронных многозарядных ионов при столкновениях с голыми ядрами и атомами. В первой части раздела приведен краткий обзор литературы по данной тематике. Далее описываются используемые теоретические методы. Для описания электронов иона используется, как и в первой главе, метод контура линии. Налетающее ядро (или атом) трактуется в полуклассическом приближении. Взаимодействие связанных электронов с полем налетающей частицы рассматривается в рамках теории возмущений по параметру

$\alpha Z_A / v \ll 1$ . Численный расчет и анализ дифференциальных (по энергии и углу вылета электронов) сечений ионизации выполнен для двухэлектронных ионов кальция и цинка. В силу малости параметра  $\alpha Z \ll 1$  релятивистское описание ионов, по-видимому, избыточно. Как и в случае диэлектронной рекомбинации, сечения проявляют резонансную структуру, обусловленную вкладами от автоионизационных состояний. В заключении диссертации сформулированы положения, выносимые на защиту.

По диссертации можно сделать несколько замечаний. Текст диссертации написан несколько небрежно, часто содержит орфографические ошибки и местами выглядит как неудачный перевод с английского языка. Например, ионизованные электроны автор называет «ионизированными» (см. стр. 47, 54, 57, 61). На стр. 62 упоминается «минорное» брейтовское взаимодействие. Отметим также, что в релятивистском атоме квантовое число  $l$  определяет четность состояния, а не орбитальный угловой момент (см. стр. 16). Энергии связи по определению положительны, а не отрицательны как в таблице 2.4. Фраза на стр. 13 «...однофотонный обмен между низколежащими состояниями учтен во всех порядках теории возмущений,...» сформулирована не вполне удачно.

Отмеченные недостатки не влияют на общую положительную оценку диссертации. В целом, работа выполнена на высоком научном уровне. Все основные результаты, представленные в ней, докладывались на международных конференциях и опубликованы в престижных научных журналах: Physical Review A и Journal of Physics B: Conference Series. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Диссертация удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук, а автор диссертации К. Н. Лященко заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.02 – теоретическая физика.

Ведущий научный сотрудник ОТФ ПИЯФ,  
Доктор физ.-мат. наук  
Нефёдов Андрей Владимирович

Служебный адрес:  
188300, Ленинградская область  
г. Гатчина, Орлова роща 1, ФГБУ ПИЯФ  
Отделение теоретической физики

Телефон: +7 (81371) 4-60-96  
E-mail: [anef@thd.pnpi.spb.ru](mailto:anef@thd.pnpi.spb.ru)

«21» марта 2018 г.

Подпись руки *Нефёдова А.В.*

Закрываю:  
Нач. отдела кадров

22.03.2018 Зинovieva A.H.

