

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Физический институт им. П.Н. Лебедева
Российской академии наук

УДК 539.186.3, 539.196.2

На правах рукописи

Мирончук Елена Сергеевна

Резонансное тушение ридберговских состояний атомов
нейтральными частицами с малым сродством к
электрону

Специальность 01.04.05 — оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016 г.

Работа выполнена в Физическом институте им. П.Н.Лебедева Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук
Лебедев Владимир Сергеевич (ФИАН)

Научный консультант: кандидат физико-математических наук
Нариц Александр Александрович (ФИАН)

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
Бычков Владимир Львович
(МГУ им. В.Н. Ломоносова)
доктор физико-математических наук
Чернов Владислав Евгеньевич
(Воронежский государственный университет)

Ведущая организация: Институт спектроскопии РАН (ИСАН)

Защита диссертации состоится «___» _____ 2016 г. в 12 час. на заседании диссертационного совета Д 002.023.03 Физического института им. П.Н.Лебедева Российской академии наук по адресу: 119991, Москва, Ленинский проспект, 53.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФИАН им. П.Н. Лебедева.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 002.023.03
доктор физико-математических наук

Казарян М. А.

Общая характеристика работы

Актуальность темы диссертации

Уникальные физические свойства атомов в ридберговских (высоковозбуждённых) состояниях делают их интересным объектом фундаментальных исследований для ряда актуальных направлений атомно-молекулярной физики [1, 2], квантовой и нелинейной оптики [3, 4], квантовой информатики [5, 6]. Изучение радиационных и столкновительных процессов с участием таких атомов нашло приложения в астрофизике, радиоастрономии и в оптике звёздных атмосфер [7], а также при построении кинетики низкотемпературной плазмы [8]. В настоящее время интенсивно проводятся экспериментальные исследования механизмов взаимодействия ридберговских атомов в ультрахолодных газах; теоретически предсказаны либо получены в лабораторных условиях двух- и трёхатомные молекулы гигантских размеров $10^3 - 10^5$ ат. ед. с предельно низкими энергиями связи, которые состоят из ридберговского атома и атомов в основном состоянии. С указанным кругом вопросов непосредственно связан анализ эффектов дальнего взаимодействия при переходах между высоковозбуждёнными состояниями и в процессах ионизации ридберговских атомов в столкновениях с заряженными и нейтральными частицами.

Процесс захвата ридберговского электрона атомом или молекулой с малыми значениями энергии сродства к электрону был широко использован для создания и экспериментального изучения дипольно- и квадрупольно-связанных анионов с энергиями связи в диапазоне 1 – 100 мэВ. В последнее время интерес к процессам переноса электрона с участием ридберговского атома и частиц, обладающих малым сродством к электрону, возобновился в связи с экспериментами по образованию «тяжёлых ридберговских систем», представляющих собой положительный и отрицательный ионы в слабосвязанном состоянии. Также недавно был предложен новый метод получения холодных сильнополярных молекул путём захвата электрона в столкновении с ридберговским атомом и последующего торможения иона в электрическом поле [9].

Традиционный механизм столкновительного взаимодействия ридберговских атомов с нейтральными частицами, обусловленный рассеянием слабосвязанного электрона на возмущающей частице, был рассмотрен во многих теоретических и экспериментальных работах. Для нейтральных атомов и молекул, обладающих положительным сродством к электрону, существует альтернативный механизм, проходящий через стадию временно образующихся отрицательного и положительного ионов: $A^* + B \rightarrow A^+ + B_t^- \rightarrow \dots$. В результате такого взаимодействия возможно образование пары ионов (канал образования ионной пары)

либо нейтральных частиц в состоянии, отличном от начального (канал тушения). Существующие теоретические методы описания процессов столкновения с участием ридберговских атомов были изначально разработаны для случая возмущающих нейтральных частиц, энергии сродства к электрону которых не являются малыми, и пренебрежимо малого дальнедействующего взаимодействия. Поэтому в них в том или ином виде использовалось приближение псевдопотенциала нулевого радиуса. Однако для столкновений с атомами щелочноземельных металлов и полярными молекулами с энергиями сродства в несколько десятков миллиэлектронвольт корректное качественное описание экспериментальных данных возможно только с учётом эффектов дальнедействия [10–12]. Строгой теории, учитывающей дальнедействующее взаимодействие и размеры волновой функции аниона, до недавнего времени не имелось. В большинстве подобных случаев приходилось использовать полуэмпирические подходы. Кроме того, теоретические и экспериментальные исследования в основном были сосредоточены на канале образования ионной пары. Они не принимали во внимание информацию, которую можно извлечь из дополнительного к нему канала тушения.

Отдельным классом объектов, породившим ряд современных направлений исследований, являются циркулярные ридберговские состояния, в которых волновая функция внешнего электрона локализована в узком торе с центром на ядре — аналог боровской орбиты. Если процессы взаимодействия атомов в циркулярных состояниях с электромагнитным излучением и заряженными частицами неплохо изучены, то единственное теоретическое описание их соударений с нейтральными атомами при тепловых скоростях было выполнено в ранних работах [13, 14] по расчёту сечений столкновительных переходов в рамках традиционной модели квазисвободного электрона. Рассмотрение проводилось с помощью импульсного приближения, так что использованный подход применим лишь в области достаточно высоких значений главного квантового числа n и не учитывает всех возможных физических механизмов опустошения циркулярных состояний.

Цель работы и решаемые задачи

Основной целью работы является теоретическое исследование нового физического механизма резонансного опустошения селективно возбуждённых ридберговских состояний атомов при тепловых столкновениях с атомами и молекулами, способными к образованию отрицательных ионов с малой энергией связи. В диссертации решены следующие задачи:

– Разработка эффективных методов теоретического описания и создание ал-

горитмов расчёта резонансных процессов, связанных с неадиабатическими переходами между ионным и ридберговскими ковалентными термами квази-молекулы, образующейся в ходе столкновения ридберговского атома с возмущающим атомом или молекулой, которые обладают малой энергией сродства к электрону.

- Сравнительный анализ вкладов каналов тушения и образования ионной пары в процессы резонансного опустошения ридберговских атомов атомами щелочноземельных элементов, а также исследование зависимости сечений каналов от главного и орбитального квантовых чисел ридберговских состояний, относительной скорости столкновений и энергии сродства возмущающей частицы к электрону.
- Сравнение величин сечений тушения циркулярных и близких к ним состояний с сечениями для состояний с $l \sim 1$; исследование ориентационных эффектов в столкновениях циркулярных ридберговских атомов и атомов с малой энергией сродства к электрону.
- Анализ зависимости сечений резонансных процессов от параметров сталкивающихся частиц в случае столкновений с сильнополярными молекулами. Получение полуэмпирического выражения, связывающего координату максимума зависимости сечений тушения от эффективного главного квантового числа ридберговского состояния и энергию сродства молекулы к электрону.
- Сравнение полученных в диссертации результатов расчётов с имеющимися экспериментальными данными.

Научная новизна работы

В диссертации разработан оригинальный самосогласованный теоретический подход для описания динамики резонансных процессов, сопровождающихся неадиабатическими переходами между ионным и ридберговским ковалентным термами квази-молекулы. Подход основан на интегрировании связанных уравнений для амплитуд вероятностей с учётом возможности распада аниона в кулоновском поле положительного ионного остова высоковозбуждённого атома. Его новизна состоит в том, что он учитывает структуру волновой функции ридберговского электрона, а также эффекты дальнего взаимодействия слабосвязанного электрона с возмущающей нейтральной частицей. На его основе удаётся существенно точнее, чем в рамках модифицированной квазиклассической модели Ландау-Зинера, описать динамику электронных переходов, сопровождающих столкновения атомов, и эффективно учесть многоканальность решаемой задачи.

На основе разработанного подхода впервые проведены систематические рас-

чѣты вероятностей, сечений и констант скоростей исследуемых процессов для тепловых столкновений ридберговских атомов щелочных металлов с атомами Ca, Sr, Ba в основном состоянии и рядом многоатомных молекул. К принципиально новым результатам относится проведѣнное в работе исследование резонансного механизма тушения ридберговских уровней сильнополярными молекулами и демонстрация доминирующего характера этого канала реакции по сравнению с конкурирующим каналом образования положительного иона и дипольно связанного аниона. Впервые изучена зависимость сечений резонансного тушения и образования ионной пары от орбитального квантового числа ридберговского атома в столкновениях с атомами щелочноземельных элементов и сильнополярными молекулами. Продемонстрирована большая устойчивость циркулярных состояний атомов по отношению к их возмущению нейтральными частицами по сравнению с селективно возбуждѣнными ридберговскими состояниями с малыми значениями $l \ll n$. Ориентационные эффекты в таких столкновениях, исследованные ранее лишь в рамках импульсного приближения для рассеяния электрона на возмущающей частице, здесь впервые численно проанализированы для резонансного механизма тушения циркулярных и близких к ним ридберговских состояний.

Научная и практическая ценность работы

Изученный в диссертации новый резонансный механизм столкновительного тушения ридберговских атомных уровней расширяет традиционные представления о возможных эффективных механизмах взаимодействия высоковозбуждѣнных атомов с нейтральными частицами. Разработанные методы описания физических процессов, происходящих в результате переноса слабосвязанного электрона при столкновениях невозбуждѣнных атомов и молекул с атомами в ридберговских состояниях, необходимы для количественного объяснения результатов экспериментальных работ по образованию атомарных (молекулярных) анионов с малой энергией связи. Полученное в диссертации простое выражение, связывающее положение максимума зависимости сечений резонансного тушения от эффективного главного квантового числа ридберговского атома и энергию сродства молекулы к электрону, может быть использовано для определения энергии связи отрицательных молекулярных ионов в миллиэлектронвольтном диапазоне.

Результаты диссертации могут быть использованы в работах по оптике и спектроскопии циркулярных и около-циркулярных ридберговских атомных состояний, а также для разработки новых методов охлаждения полярных молекул посредством их трансформации в отрицательные ионы. Ряд полученных

в работе результатов в перспективе может быть обобщён и использован в теоретических и экспериментальных исследованиях по физике «тяжелых ридберговских систем». При определённой модификации разрабатываемые в диссертации подходы могут быть применены для изучения процессов переноса заряда в ультрахолодных газах.

Достоверность полученных результатов

Расчёты характеристик столкновительных процессов выполнены на основе самосогласованных теоретических подходов атомной и молекулярной физики и с помощью эффективных численных методов. Достоверность результатов работы подтверждена сравнением с экспериментальными данными, а также с результатами расчётов других авторов для канала образования ионной пары. Сечения, полученные в рамках модифицированной теории Ландау-Зинера, дополненной расчётами факторов выживания анионов в кулоновском поле положительного ионного остова, совпадают в области применимости теории с результатами более общего метода уравнений сильной связи для амплитуд вероятностей переходов.

Основные положения, выносимые на защиту

Автор выносит на защиту:

1. Разработанные в диссертации методики и численные алгоритмы расчётов вероятностей и сечений столкновительных процессов, происходящих в результате переноса слабосвязанного электрона в системе «высоковозбуждённый атом + атом/молекула», которые сопровождаются неадиабатическими переходами между ионным и ковалентными термами квазимолекулы, образующейся в ходе столкновения ридберговского атома и нейтральной частицы с малым сродством к электрону.
2. Результаты численных расчётов и детального теоретического исследования полученных зависимостей матричных элементов перехода, вероятностей, сечений и констант скоростей резонансного тушения и образования ионной пары от квантовых чисел ридберговского атома в исходном состоянии, относительной скорости столкновения и энергии сродства возмущающей нейтральной частицы к электрону.
3. Результаты сравнительного анализа вкладов каналов резонансного тушения и образования ионной пары в полные (усреднённые по магнитному квантовому числу m) сечения опустошения ридберговских состояний атомами $\text{Ca}(4s^2)$, $\text{Sr}(5s^2)$, $\text{Ba}(6s^2)$ и полярными молекулами с закритическими значениями дипольного момента.

4. Теоретическое описание исследуемых резонансных процессов для случаев селективно-возбуждённых состояний с фиксированными значениями главного n , орбитального $l = n - 1$ и магнитного m квантовых чисел (в том числе для циркулярных ридберговских состояний с $l = |m| = n - 1$), а также полученные на этой основе зависимости сечений от величины m и угла между осью квантования и вектором относительной скорости столкновения частиц.
5. Полуэмпирическую формулу для определения энергий связи дипольно-связанных отрицательных молекулярных ионов по положениям максимумов в зависимостях сечений резонансного тушения от эффективного главного квантового числа ридберговского состояния атома. Предложенный на её основе спектроскопический метод определения значений положительного сродства молекул к электрону в диапазоне энергий $\sim 1 - 100$ мэВ.

Личный вклад автора диссертации

Диссертация представляет собой результат самостоятельной научной работы автора, выполненной под руководством его научного руководителя и научного консультанта. Личный вклад автора диссертации состоит в проведении всех расчётов, в подборе и анализе литературы по теме диссертации, в активном участии в обсуждении постановки задач, в совместном с соавторами анализе полученных результатов и написании статей, в самостоятельной формулировке выводов диссертации.

Апробация работы

Результаты работы были доложены на следующих конференциях: 54-я научная конференция МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе», Москва-Долгопрудный-Жуковский, 10–30 ноября 2011 г.; 44th Conference of the European Group for Atomic Systems (EGAS), University of Gothenburg, Sweden, July 9–13, 2012; 55-я научная конференция МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных, естественных и технических наук в современном информационном обществе», Москва–Долгопрудный–Жуковский, 22–25 ноября 2012 г.; XIV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», Звенигород, 11–15 ноября 2012 года; XX Конференция по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС-XX), Воронеж, 23–27 сентября 2013 г.; V Всероссийская молодёжная конференция по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики, Москва, ФИАН, 10–15 ноября 2013г.; First International Moscow Institute of Physics and Technology (Moscow, Russia) – University of

Electro-Communications (Tokyo, Japan) Work-shop (MIPT-UEC): Atomic, Molecular and Optical Physics, Moscow, October 30 - November 1, Russia (2013); Second MIPT - UEC Joint Workshop on Optical Science, University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo, Japan, October 16–21 (2014); XV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики», ФИАН-Москва, 16–20 ноября 2014 г.; 57-я научная конференции МФТИ с международным участием, посвященная 120-летию со дня рождения П. Л. Капицы «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики», Москва-Долгопрудный-Жуковский, 24–29 ноября 2014 г.; III International Workshop MIPT – UEC: Atomic, Molecular and Optical Physics, Moscow Institute of Physics and Thechnology – P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia, 20–23 October, 2015; 6 Всероссийская молодежная конференция «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики», ФИАН, Москва, 15–20 ноября 2015 г.; 58-я научная конференции МФТИ с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики», Москва–Долгопрудный–Жуковский, 23–28 ноября 2015 г.

Публикации

Материалы диссертации опубликованы в 6 статьях в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК, и 13 работах, опубликованных в тезисах докладов на российских и международных конференциях и симпозиумах.

Структура и объём диссертации

Диссертация состоит из Введения, четырёх Глав, Выводов и Списка литературы. Объём диссертации составляет 172 стр., в т. ч. 54 рисунка, 5 таблиц, 200 наименований в списке литературы.

Содержание диссертации

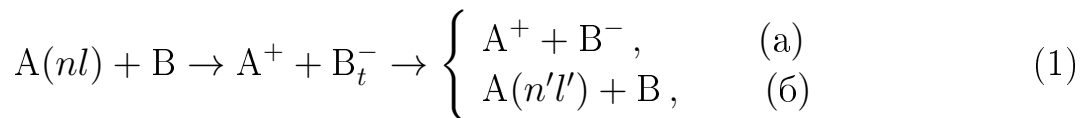
Во **Введении** обоснована актуальность темы исследований, сформулированы цель работы и решаемые в ней задачи, аргументированы её научная новизна, достоверность и ценность для физических приложений, представлены выносимые на защиту положения и список публикаций по теме диссертации.

Глава 1 посвящена обзору состояния исследований по теме диссертации. Дана общая характеристика атомов в ридберговских состояниях и образующихся в ходе их взаимодействия с нейтральными частицами слабосвязанных атомарных и молекулярных анионов; перечислены методы получения и детектирования таких частиц, а также отрасли науки, для которых данные объекты

представляют особый интерес. Приведена классификация столкновительных процессов с участием ридберговских атомов, перечислены основные теоретические методы их описания и ключевые результаты данных подходов.

В **Главе 2** рассмотрен резонансный механизм тепловых столкновений ридберговского атома (на примере Li, Rb, Cs) в состоянии с заданными квантовыми числами n, l , неселективном по m , с невозбуждёнными атомами Ca, Sr, Ba, способными к образованию слабосвязанных отрицательных ионов (т.е. обладающими малой положительной энергией средства к электрону).

Исследуемые реакции протекают по схеме:



где канал (1а) соответствует образованию ионной пары, а канал (1б) — резонансному тушению, то есть неупругому переходу между состояниями $nl \rightarrow n'l'$ ридберговского атома А. Оба канала реакции есть результат неадиабатических переходов между ионными и ковалентными термами квазимолекулы АВ. Асимптотические выражения для кривых потенциальной энергии термов вдали от точек перехода имеют вид:

$$U_i(R) = E_{n_i l_i} + U_{\text{пол}}(R) \quad (2)$$

для электрона в составе ридберговского атома и

$$U_f(R) = \varepsilon_f - \frac{1}{R} \quad (3)$$

для электрона в составе отрицательного иона. Здесь $E_{n_i l_i} = -1/[2(n_i - \delta_{l_i})]^2$ — энергия водородоподобного атома с главным квантовым числом n_i и квантовым дефектом δ_{l_i} , зависящим от значения орбитального квантового числа l_i . $U_{\text{пол}}(R) = -\tilde{\alpha}/(2R^4)$ — поляризационный потенциал, $\tilde{\alpha}$ — поляризуемость атома В, $\varepsilon_f < 0$ — энергия связи отрицательного иона, а $-1/R$ — кулоновский потенциал взаимодействия.

Переходы между ионными и начальным ковалентным термами при тепловых скоростях столкновения $v \sim 10^{-4} - 10^{-3}$ ат. ед. рассмотрены в рамках квазиклассического подхода Ландау–Зинера и предположения о линейности траектории относительного движения частиц (см. [11]): $\mathbf{R}(t) = \boldsymbol{\rho} + \mathbf{v}t$, где $\boldsymbol{\rho}$ — прицельный параметр. Для учёта переходов с ионного терма на множество ковалентных, отличных от начального, введены факторы выживания, или S -факторы [15–17], — вероятности ионной пары не распасться под действием кулоновского поля ионного остова A^+ на данном интервале времени.

Ключевым моментом для решения поставленной задачи является точное

определение матричных элементов перехода $|i\rangle \rightarrow |f\rangle$ [11]:

$$V_{fi}(\mathbf{R}) = \int \Phi_f^*(\mathbf{r}) V_{eB}(\mathbf{r}) \psi_i(\mathbf{r} - \mathbf{R}) d\mathbf{r}. \quad (4)$$

Здесь $\psi_i(\mathbf{r}')$ — волновая функция внешнего электрона в ридберговском атоме A^* ; $\Phi_f(\mathbf{r})$ — волновая функция слабосвязанного электрона в отрицательном ионе B^- ; $V_{eB}(\mathbf{r})$ — потенциал взаимодействия электрона с нейтральным остовом аниона B^- . В статье [18] было получено точное аналитическое выражение для матричного элемента перехода с произвольным видом зависимости $V_{eB}(r)$, которое сводит задачу его нахождения к аккуратному вычислению радиальных частей волновых функций аниона и ридберговского атома в широком диапазоне координат $\lesssim 1500$ ат. ед. Для нахождения радиальной части волновой функции отрицательного иона был использован метод R -матрицы с разбиением на секторы и базисом из DVR-функций (discrete variable representation) [19]. Волновые функции ридберговского атома в случае пренебрежимо малого квантового дефекта $\delta_l \lesssim 10^{-2}$ ($l \geq 2$ для Li, Na и $l \geq 3$ для K, Rb, Cs) имеют аналитическое представление, а в случае существенно ненулевого квантового дефекта вычислялись с использованием метода квантового дефекта [20].

Квадрат модуля матричного элемента перехода в точке пересечения термов $|V_{cp}(R_c)|^2$ (усреднённый по магнитному квантовому числу m) является одним из определяющих факторов для величин вероятностей и сечений резонансных процессов. В результате проведённых расчётов было установлено, что зависимость параметра $|V_{cp}(R_c)|^2$ от эффективного главного квантового числа $n_* = n - \delta_l$ носит резко спадающий характер. Значения квадрата модуля матричного элемента при фиксированном n_* убывают с уменьшением орбитального квантового числа l начального ридберговского состояния. Если для $l = 0 - 3$ различия этих значений находятся в пределах одного порядка величины, то для селективно возбуждённых состояний с $l = n - 1$ отличие квадрата параметра ионно-ковалентной связи от состояний с $l = 0$ достигают $10^2 - 10^3$.

На рис. 1 представлен характерный вид зависимостей сечений образования ионной пары $\sigma^{(i)}$ (1а) и резонансного тушения $\sigma^{(q)}$ (1б) от главного квантового числа ридберговского атома на примере столкновений $Cs(ns) + Ca(4s^2)$ при нескольких скоростях относительного движения частиц. Обе зависимости $\sigma^{(i)}(n)$ и $\sigma^{(q)}(n)$ имеют колоколообразный вид с достаточно узким пиком. Вид кривых определяется уменьшением эффективности взаимодействия между ионным и ковалентным термами (спадом величины $|V_{cp}(R_c)|^2$) с увеличением расстояния, на котором они пересекаются, и ростом с n факторов выживания. Общей чертой зависимости сечений обоих каналов реакции от скорости является уменьшение их значений и сдвиг положений максимумов в сторону меньших

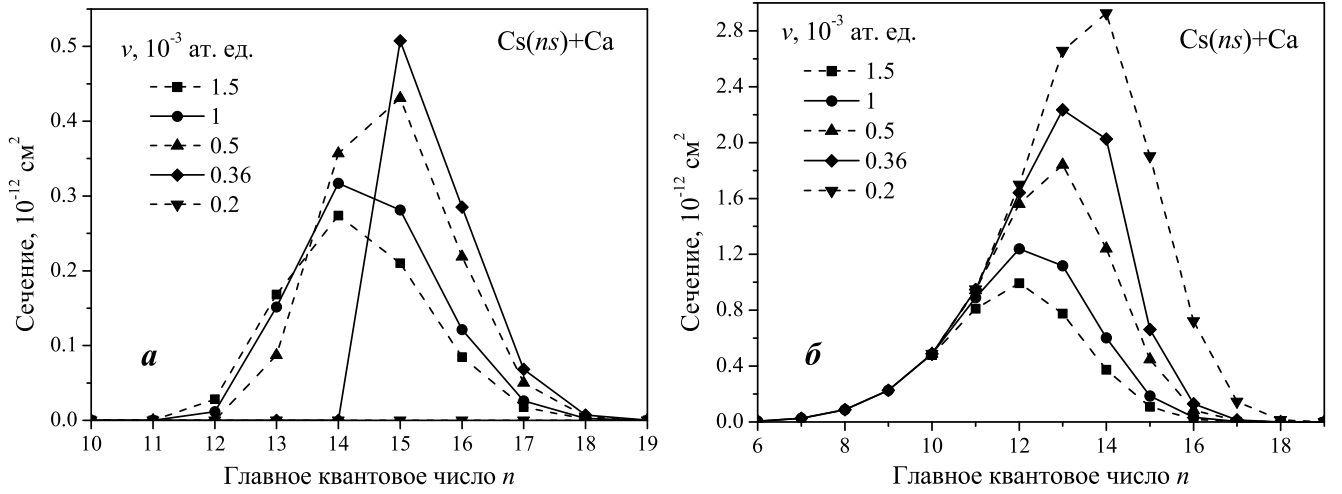


Рис. 1: Сечения образования ионной пары (а) и резонансного тушения (б) в системе $\text{Cs}(ns)+\text{Ca}(4s^2)$ при различных скоростях относительного движения атомов.

главных квантовых чисел с ростом относительной скорости сталкивающихся частиц. В отличие от тушения, канал образования ионной пары имеет порог — минимальную скорость, при которой возможно протекание реакции.

Впервые продемонстрирована высокая эффективность процессов тушения при сравнительно небольших n_* , где сечения данного канала реакции в 3 — 4 раза превышают максимальные сечения альтернативного канала образования ионной пары (что видно из сравнения графиков на рис. 1а и 1б). Данный результат подтверждается расчётом относительных вкладов сечений тушения и образования ионной пары в полное сечение резонансного механизма. В области максимума сечения образования ионной пары вклады обоих каналов сравнимы по величине. Поэтому надёжное количественное описание процесса образования ионной пары, интенсивно исследуемого экспериментально, невозможно без корректного учёта вклада изученного здесь альтернативного канала резонансного тушения.

Анализ зависимости сечений от орбитального квантового числа показывает, что с ростом l величины и координаты пиков графиков $\sigma^{(q)}(n_*)$ уменьшаются, что связано с уменьшением соответствующих величин модулей матричных элементов перехода. Если рассмотреть n_* как непрерывную переменную, величины сечений вблизи максимумов для малых l отличаются не более чем на 10 — 20%, а положения пиков $n_{*\text{max}}$ смещены менее чем на 10%. Значительные отличия от случая малых l наблюдаются для селективно возбуждённых состояний с $l = n - 1$. Здесь сечения уменьшаются почти на порядок величины, что даёт основания ожидать повышенную устойчивость по отношению к резонансному тушению циркулярных ($l = |m| = n - 1$) и близких к ним состояний.

Было проведено исследование влияния на вид зависимости $\sigma(n_*)$ величины энергии сродства атома к электрону $|\varepsilon_f|$. Для каждого из каналов реакции с

ростом $|\varepsilon_f|$ максимум сечения смещается в сторону меньших n_* , а его величина спадает. Такой эффект успешно использовался [10] для экспериментального определения энергии связи отрицательного иона по положению пика сечений канала образования ионной пары.

Проведено сравнение экспериментальных значений константы скорости $K^{(i)} = \langle v\sigma^{(i)} \rangle$ реакции $\text{Ne}(nl) + \text{Ca} \rightarrow \text{Ne}^+ + \text{Ca}^-$ для $l = 0, 2$, полученных в статье [21], и результатов расчётов в рамках изложенной в диссертации теории. В пределах погрешности результаты неплохо согласуются. Найденное абсолютное значение константы скорости в максимуме для системы $\text{Ne}(ns) + \text{Ca}(4s^2)$ находится в хорошем согласии и с результатами расчётов, проведенных в работах [11, 21].

Проанализирована возможность рассмотрения резонансного механизма тушения селективно возбуждённых ридберговских состояний отдельно от нерезонансного, обусловленного рассеянием слабосвязанного электрона на возмущающей частице. При существенно ненулевой дробной части квантового дефекта ридберговских состояний сечения нерезонансного механизма достигают максимальных значений при $n \sim 50 - 100$ и практически не перекрываются с сечениями резонансного тушения. В случае, когда дробная часть δ_l близка к нулю, значения сечений нерезонансного механизма тушения резко возрастают в области малых $n \sim 10 - 20$. Появляется область перекрытия графиков, для точного теоретического описания которой необходимо решение уравнений сильной связи, одновременно учитывающих вклады обоих механизмов.

В **Главе 3** рассмотрен резонансный механизм разрушения циркулярных ($l = |m| = n - 1$) и около-циркулярных ($l = n - 1 > |m|$) ридберговских атомных состояний атомами щелочноземельных элементов, обладающих малой энергией сродства к электрону. В силу особенностей пространственной структуры циркулярных ридберговских состояний теория, основанная на модифицированной квазиклассической модели Ландау – Зинера и корректно описывающая процессы с участием nl -состояний с $l \ll n$, в данном случае формально оказывается неприменимой. Поэтому для расчёта сечений резонансного тушения таких состояний в диссертации разработан более общий теоретический подход.

Разложение решения нестационарного уравнения Шрёдингера для волновой функции слабосвязанного электрона по диабатическому базису, состоящему из волновых функций отрицательного иона B^- и ридберговского атома A^* , приводит к системе уравнений сильной связи для амплитуд вероятностей, позволяющей определить вероятность опустошения начального ридберговского состояния [22, 23]. Для численного решения данной системы были введены некоторые упрощения. Прямые переходы между ковалентными термами не учитывались, поскольку для изучаемых процессов они играют существенную роль лишь при достаточно высоких значениях n , а рассмотрение ограничивалось взаимодей-

ствия ионных термов квазимолекулы только с одним (начальным) ковалентным термом $|i\rangle = |n_i l_i m_i\rangle$. Для учёта многоканального характера задачи в систему уравнений вводился член типа $\frac{i}{2}\Gamma_{\ell_f m_f}(t) a_f(t)$, описывающий возможность распада в ходе реакции (1) временно образующегося отрицательного иона V_t^- в кулоновском поле положительного ионного остова A^+ ридберговского атома. В результате таких упрощений система уравнений сильной связи преобразуется к виду

$$\begin{aligned} i\frac{da_{m_f}}{dt} &= b_i(t)V_{fi}^{(m_f)}(\mathbf{R}(t)) \exp\left\{-i(E_{n_i l_i} - \varepsilon_f)t - i\int_{-\infty}^t \frac{dt'}{R(t')}\right\} - \frac{i\Gamma_{\ell_f m_f}(t)}{2} a_{m_f}(t), \\ i\frac{db_i}{dt} &= \sum_{m_f} a_{m_f}(t) \left[V_{fi}^{(m_f)}(\mathbf{R}(t))\right]^* \exp\left\{i(E_{n_i l_i} - \varepsilon_f)t + i\int_{-\infty}^t \frac{dt'}{R(t')}\right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Здесь $V_{fi}^{(m_f)}(\mathbf{R})$ — матричный элемент перехода между начальным (ковалентным) и конечным (ионным) термами; a_{m_f} и b_i — амплитуды вероятности ионных и начального ковалентного состояний, соответственно. Индекс m_f подчёркивает, что суммирование происходит по вырожденным m_f -подуровням данного ионного состояния $|j\ell_f m_f\rangle$. В настоящей главе рассмотрено образование щелочноземельных анионов $\text{Ca}^-(4s^2 4p^2 P_{3/2})$ и $\text{Sr}^-(5s^2 5p^2 P_{1/2})$.

Преимуществом использования системы (5) является возможность корректного учёта вкладов достаточно широких окрестностей точек квазипересечения термов; также в силу её специфики величина интеграла для матричного элемента $V_{fi}^{(m_f)}(\mathbf{R})$ определяется главным образом областью $r \gg 1$, для которой хорошо известно асимптотическое поведение потенциала $V_{\text{eB}}(\mathbf{r})$. Общее выражение для матричных элементов перехода, не усреднённых по магнитному квантовому числу m_i , было взято из работы [18]. Вероятности тушения и образования ионной пары вычисляются в рамках используемого подхода по формулам

$$W^{(i)} = \sum_{m_f} |a_{m_f}(t \rightarrow +\infty)|^2, \quad W^{(q)} = 1 - |b_i(t \rightarrow +\infty)|^2 - W^{(i)} \quad (6)$$

при заданных начальных условиях:

$$b_i(t \rightarrow -\infty) = 1, \quad a_{m_f}(t \rightarrow -\infty) = 0. \quad (7)$$

Сечения процессов образования ионной пары и резонансного тушения могут быть получены в результате интегрирования выражений (6) по прицельному параметру ρ и азимутальному углу φ . При рассмотрении столкновений с уча-

ствием ридберговского атома в состоянии с заданным m сечения также зависят от величины угла столкновения α , т. е. угла между вектором относительной скорости \mathbf{v} сталкивающихся частиц и осью квантования z , которая для циркулярного состояния перпендикулярна плоскости орбиты внешнего электрона.

Как было показано в предыдущей главе, сечения резонансного тушения имеют колоколообразную зависимость от главного квантового числа ридберговского атома. В случае ридберговских состояний с $l_i = n_i - 1$ максимум колокола сдвигается в сторону главных квантовых чисел $n_i \sim 6 - 7$, меньших по сравнению с состояниями с $l_i \sim 0$. Такой характер зависимостей $\sigma^{(q)}(n)$ обусловлен, в первую очередь, поведением матричных элементов $V_{fi}^{(m_f)}(\mathbf{R})$, которые для состояний с $l_i = n_i - 1$ в целом по модулю меньше, чем для состояний с $l_i \sim 0$. Отметим, что применение модифицированной теории Ландау–Зинера приводит к сильно заниженным значениям сечений тушения циркулярных состояний.

Значительное внимание в работах, посвящённых исследованию нерезонансного механизма столкновительного тушения ридберговских состояний с высокими значениями орбитального квантового числа, уделяется изучению ориентационных эффектов, связанных с зависимостью вероятностей и сечений процесса от величин угла столкновения α и магнитного квантового числа. На рис. 2 представлены результаты расчётов сечений для альтернативного резонансного механизма тушения атомов $\text{Li}(n, l = n - 1, m)$ при взаимодействии с атомами Ca для различных значений $|m|$. Рассматривается случай фиксированного угла столкновения $\alpha = 0$ и результат усреднения по α , а величины n соответствуют максимальным значениям сечений $\sigma^{(q)}(n, l = n - 1)$, усреднённых по m . Зависимость $\sigma^{(q)}(|m|)$ имеет слабо осциллирующий характер. Сечения состояний с $|m| = n - 1$ оказываются максимальными из-за эффективного взаимодействия атомов в области их наибольшего сближения. При $\alpha = 0$ отношение $\sigma_{|m|=n-1}/\sigma_{|m|=0}$ находится в пределах 1.6 – 2.0. Графики $\langle \sigma^{(q)} \rangle_\alpha(m)$ имеют менее ярко выраженные максимумы при $|m| = n - 1$.

Циркулярные состояния ($l = |m| = n - 1$) имеют наиболее ярко выраженную зависимость сечений резонансного тушения от угла столкновения α среди nlm -состояний с $l = n - 1$ вследствие сильной локализации волновой функции внешнего электрона в таких состояниях. Угловая зависимость для циркулярных состояний имеет вид плавно спадающей кривой, причём величины сечений при $\alpha = 0$ и $\pi/2$ отличаются примерно в полтора раза. Следовательно, сечения тушения циркулярных состояний, усреднённые по углу столкновения, оказываются меньшими соответствующих сечений при $\alpha = 0$, то есть усреднение по углу повышает устойчивость данных ридберговских состояний к столкновительному опустошению. Вместе с тем, даже с учётом усреднения эффективность резонансного механизма тушения оказывается достаточно высокой:

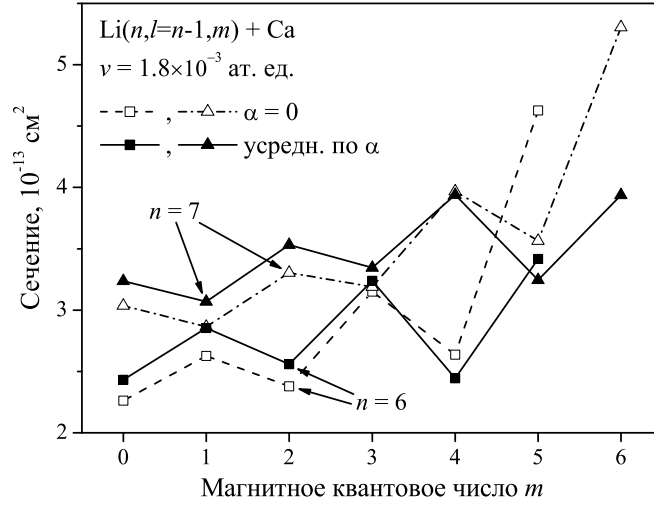


Рис. 2: Зависимости от магнитного квантового числа m сечений резонансного тушения $\text{Li}(n, l = n - 1, m)$ в столкновениях с атомами $\text{Ca}(4s^2)$ при угле столкновения $\alpha = 0$, а также усреднённые по α , вычисленные при $n = 6$ и $n = 7$.

максимальные значения сечений состояний с $l = n - 1$ в рассмотренном случае в два раза меньше, чем соответствующая величина для ns -состояния.

В **Главе 4** диссертации теоретические методы, разработанные в предыдущих главах, применены для описания процессов резонансного взаимодействия ридберговских атомов с сильнополярными молекулами, способными образовывать дипольно-связанные анионы с малой энергией связи. Дальнедействующая часть потенциала взаимодействия V_{eB} между электроном и полярной молекулой описана в рамках приближения сферически-симметричного диполя, образующего в процессе реакции отрицательный ион в состоянии с орбитальным квантовым числом $\ell_f = 0$:

$$V_{eB}(r) = -\frac{d_{\text{eff}}}{r^2}, \quad r \rightarrow \infty, \quad (8)$$

где d_{eff} — эффективный дипольный момент, значение которого обычно близко к дипольному моменту d . Такое приближение успешно использовалось во многих теоретических работах, посвящённых реакциям зарядового переноса [10, 24, 25].

Для аниона в s -состоянии ($\ell_f = m_f = 0$) система уравнений сильной связи (5) сводится к двум уравнениям. Её решение с начальными условиями (7) даёт вероятности образования ионной пары $W^{(i)}$ и резонансного тушения $W^{(q)}$ (6). В случае $l_i \neq 0$ необходимо вычислить вероятности для каждого значения m_i и провести усреднение. Сечения находятся путём интегрирования вероятностей по прицельному параметру и азимутальному углу.

Результаты вычислений проиллюстрированы на примере столкновений атомов $\text{Rb}(nl)$ с рядом органических молекул, энергии сродства к электрону которых лежат в диапазоне 8.5 – 49 мэВ. В данной главе рассмотрены состояния

с малыми орбитальными квантовыми числами $l_i = 0 \div 3$, обладающие ненулевым квантовым дефектом δ_{l_i} . Рис. 3 демонстрирует зависимости $\sigma^{(q,i)}(n_*)$ для нитрометана (3а) и винилен карбоната (3б) при различных значениях орбитального квантового числа рубидия $l = 0, 2, 3$ и фиксированной относительной скорости $v = 10^{-3}$ ат. ед. Сечения обоих каналов реакции имеют характерный колоколообразный вид, причём максимумы сечений тушения смещены влево, а их величины при разных l в 5 – 8 раз выше, чем для канала образования ионной пары.

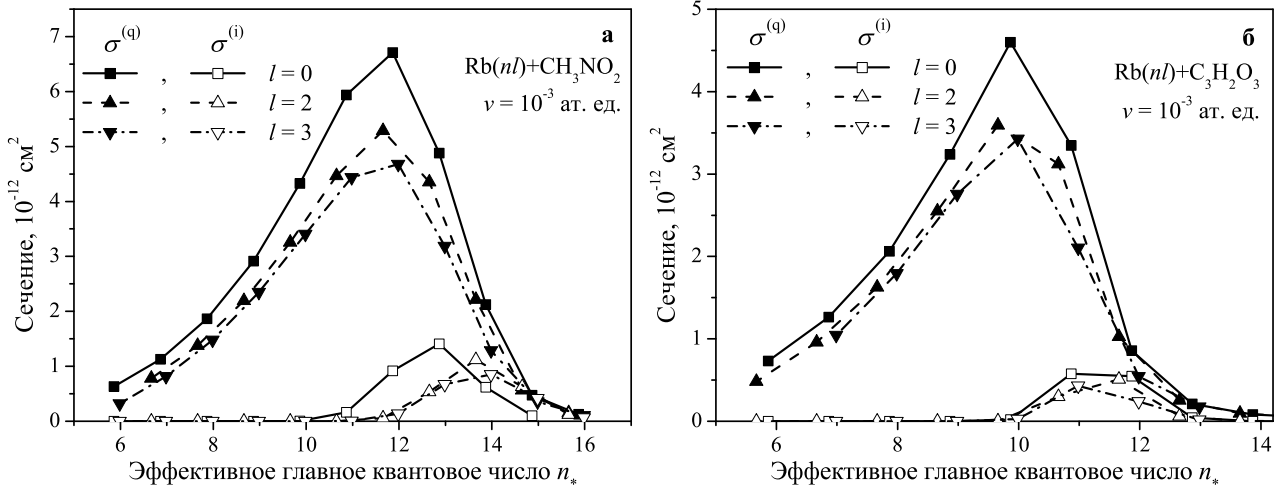


Рис. 3: Зависимость сечений резонансного тушения (тёмные символы) и образования ионной пары (светлые символы) от эффективного главного квантового числа $n_* = n - \delta_l$ в тепловых столкновениях ридберговского атома $\text{Rb}(nl)$ ($l = 0, 2, 3$) с нитрометаном (а) и винилен карбонатом (б).

Положения пиков для канала резонансного тушения оказываются менее чувствительными к величине орбитального квантового числа: в рамках используемого подхода для формирования стабильного иона необходимо дважды пересечь область неадиабатичности, в то время как для реализации тушения достаточно одного прохождения. С увеличением относительной скорости сечения обоих каналов реакции спадают, а максимумы сдвигаются в сторону меньших n_* . Скоростная зависимость сечений образования ионной пары оказывается немонотонной из-за конкуренции с альтернативным каналом.

Расчёт сечений тушения и образования ионной пары был проведён как в рамках модели Ландау – Зинера, так и на основе решения системы связанных уравнений (5). Он показал, что первая качественно верно воспроизводит вид зависимостей $\sigma^{(q,i)}(n)$, в то время как количественные отличия в величинах сечений составляют десятки процентов и зависят от энергии сродства молекулы к электрону. Заметная разница наблюдается в поведении относительных сечений $\sigma^{(q,i)} / (\sigma^{(q)} + \sigma^{(i)})$, полученных в рамках двух подходов, в области максимума сечения образования ионной пары. В случае модифицированной теории

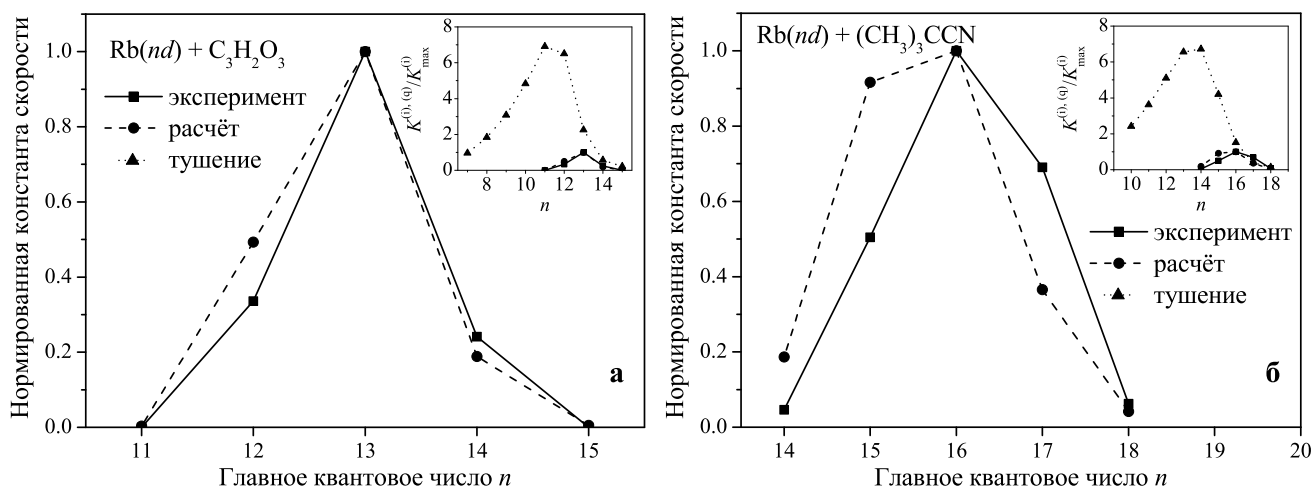


Рис. 4: Сравнение результатов расчётов относительной константы скорости $K^{(i)}(n)/K_{\max}^{(i)}$ реакции образования ионной пары с экспериментальными данными источников [26, 27]: (а) $\text{Rb}(nd) + \text{C}_3\text{H}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Rb}^+ + \text{C}_3\text{H}_2\text{O}_3^-$, [26]; (б) $\text{Rb}(nd) + (\text{CH}_3)_3\text{CCN} \rightarrow \text{Rb}^+ + (\text{CH}_3)_3\text{CCN}^-$, [27]. Расчёты проведены на основе системы связанных уравнений (5). На вставках приведены нормированные константы скорости реакции резонансного тушения $K^{(q)}(n)/K_{\max}^{(q)}$.

Ландау–Зинера относительный вклад канала образования ионной пары увеличивается монотонно, тогда как результат применение более точного подхода демонстрирует спад этой величины после достижения максимального значения. Можно заключить, что хотя модифицированный подход Ландау–Зинера даёт неплохую качественную оценку абсолютных и относительных сечений резонансных процессов, для надёжного количественного описания необходим корректный учёт динамики неадиабатических переходов.

На рис. 4 приведено сравнение нормированных констант скорости образования ионной пары $K^{(i)}(n)/K_{\max}^{(i)}$ в столкновениях $\text{Rb}(nd)$ с молекулами $\text{C}_3\text{H}_2\text{O}_3$ и $(\text{CH}_3)_3\text{CCN}$ с экспериментальными данными источников [26, 27]. Несмотря на небольшой сдвиг экспериментального положения максимума в случае 2,2-диметилпропаннитрила, результаты эксперимента и вычислений согласуются с приемлемой точностью. Экспериментальных данных по сечениям канала резонансного тушения не имеется. Для сравнения на вставках к рисункам приведены графики нормированных констант скорости этого канала реакции $K^{(q)}(n)/K_{\max}^{(q)}$. Процесс резонансного тушения оказывается ожидаемо более эффективным, чем образование пары ионов, профиль зависимости $K^{(q)}(n)$ шире, а его максимум смещён в область меньших главных квантовых чисел.

В задачи диссертационной работы входило нахождение удобной для практического применения формулы, связывающей величину энергии сродства полярной молекулы к электрону и положение максимума зависимости сечений резонансного тушения от эффективного главного квантового числа. Подобное выражение для канала образования ионной пары было предложено в рабо-

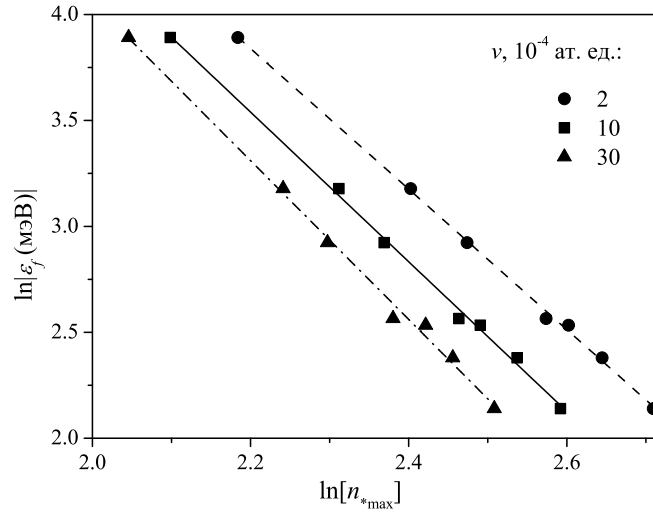


Рис. 5: Зависимость энергии связи молекулярного аниона $|\varepsilon_f|$ от положения максимума n_*^{\max} сечения резонансного тушения $\sigma^{(q)}(n_*)$. Относительные скорости сталкивающихся частиц равны $2 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-3}$, $3 \cdot 10^{-3}$ ат. ед. Символы — результаты вычислений для начального ns -состояния ридберговского атома; прямые проведены по методу наименьших квадратов.

те [10] и успешно использовалось её авторами при обработке результатов так называемых RET-экспериментов (Rydberg electron transfer).

Расчёты максимальных сечений были проведены для ридберговских состояний с $l = 0$ и трёх значений относительной скорости столкновений, охватывающих диапазон тепловых скоростей: $v = 0.2$, 1 и $3 \cdot 10^{-3}$ ат. ед. Результаты приведены на рис. 5. Для точного определения положения максимума величина n_* должна пробегать непрерывный ряд значений. С этой целью в данной работе вычислялись сечения для ридберговских атомов, обладающих различными квантовыми дефектами (Cs, Ne, Rb и Li), а полученная зависимость интерполировалась непрерывной кривой.

Точки на рис. 5 ложатся на прямые в двойном логарифмическом масштабе. Найденные зависимости описываются простой формулой:

$$|\varepsilon_f| = \frac{E_0}{(n_*^{\max})^\kappa}. \quad (9)$$

Значения параметров E_0 и κ были вычислены по методу наименьших квадратов и приводятся в Табл. 1 для указанных выше скоростей. Из графиков рис. 5 и Табл. 1 следует, что увеличение скорости приводит к увеличению угла наклона прямой и росту погрешностей, поэтому предпочтительными являются скорости $v \lesssim 10^{-3}$ ат. ед.

Таблица 1. Параметры E_0 и κ , входящие в формулу (9), для различных относительных скоростей столкновений v .

$v, 10^{-4}$ ат. ед.	$\ln(E_0, \text{мэВ})$	κ
2	11.14 ± 0.13	3.32 ± 0.05
10	11.31 ± 0.19	3.53 ± 0.08
30	11.6 ± 0.3	3.75 ± 0.11

В **Заключении** сформулированы основные результаты работы.

Основные результаты диссертации

1. Разработаны оригинальные методики и численные алгоритмы расчёта динамики процессов переноса слабосвязанного электрона при тепловых столкновениях высоковозбуждённых атомов с нейтральными частицами с малым сродством к электрону. В рамках использованного подхода учтена возможность распада образующегося в ходе столкновения отрицательного иона в кулоновском поле положительного ионного остова ридберговского атома и корректно описаны эффекты дальнего взаимодействия электрона с нейтральным остовом аниона. Проведено обобщение развитых ранее моделей переноса электрона на случай, когда модифицированная теория Ландау – Зинера, дополненная расчётами факторов выживания аниона, оказывается неприменимой.
2. Проведены расчёты сечений и констант скоростей образования ионной пары и резонансного тушения ридберговских уровней в столкновениях высоковозбуждённых атомов с атомами $\text{Ca}(4s^2)$, $\text{Sr}(5s^2)$ и $\text{Ba}(6s^2)$. Выяснено, что зависимости сечений обоих каналов реакции от эффективного главного квантового числа имеют колоколообразный характер. Впервые продемонстрировано, что процесс тушения преобладает при малых n_* и даёт сравнимый вклад с каналом образования ионной пары, когда соответствующие сечения $\sigma^{(i)}(n_*)$ достигают максимума.
3. Установлено, что положения и величины максимумов зависимостей сечений резонансного тушения и образования ионной пары от эффективного главного квантового числа ридберговского состояния слабо зависят от орбитального момента при малых $l = 0 - 3$ и значительно уменьшаются при больших значениях $l \sim n-1$. Показано, что с увеличением скорости столкновения атомов величины сечений спадают, а максимумы сдвигаются в сторону меньших n_* .
4. Для случая ридберговских состояний с большими значениями орбитального момента $l = n-1$ и фиксированным значением магнитного квантового числа m показано, что зависимости сечений $\sigma^{(q)}$ от величины m имеют ярко выраженные максимумы при $|m| = n-1$, что соответствует циркулярному состоянию. В зависимостях сечений тушения от угла α между осью квантования и вектором относительной скорости атомов минимумы и максимумы возникают

соответственно при $\alpha = \pi/2$ и $\alpha = 0$. Результаты указывают на увеличение устойчивости циркулярных состояний по отношению к резонансному тушению нейтральными частицами по сравнению с nl -состояниями с $l \ll n$.

5. Проведено обобщение разработанной теории на случай резонансных процессов переноса электрона при столкновениях ридберговских атомов с полярными молекулами, способными к образованию дипольно-связанных анионов. На основе расчётов дано количественное объяснение экспериментальных данных по процессам образования ионной пары. Впервые установлен доминирующий характер канала резонансного тушения в опустошении ридберговских состояний сильнополярными молекулами.

6. Получено простое полуэмпирическое соотношение между энергией связи дипольно-связанного аниона и положением максимума в зависимости сечения резонансного тушения ридберговского состояния атома сильнополярной молекулой от эффективного главного квантового числа n_* . Предложен эффективный спектроскопический метод определения малых значений энергии сродства к электрону полярных молекул и кластеров по экспериментальным данным для зависимостей сечений тушения ридберговских состояний от величины n_* .

Список публикаций автора по теме диссертации

Статьи в рецензируемых журналах:

1. Перенос слабосвязанного электрона при столкновениях ридберговских атомов с нейтральными частицами. II. Образование ионной пары и резонансное тушение уровней $Rb(nl)$ и $Ne(nl)$ атомами Ca, Sr и Ba / А.А. Нарич, Е.С. Мирончук, В.С. Лебедев // ЖЭТФ – 2013. – Том 144. – No 4. – сс. 699-717.
2. Comparative studies of ion-pair formation and resonant quenching processes in collisions of Rydberg atoms with the alkaline-earth atoms / А.А. Narits, Е.С. Mironchuk, V.S. Lebedev // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2014. – Vol. 47. – No 1. – P. 015202.
3. Collisional destruction of circular Rydberg states by atoms with small electron affinities / Е.С. Mironchuk, А.А. Narits, V.S. Lebedev // The European Physical Journal D – 2014. – Vol. 68: 368. – 11 pages.
4. О механизмах тушения ридберговских состояний атомов при столкновениях с атомами щелочноземельных элементов / Е.С. Мирончук, А.А. Нарич // Краткие сообщения по физике – 2015. – Том 42. – No 3. – сс. 25-35 [Bulletin of the Lebedev Physics Institute – 2015. – Vol. 42. – No. 3. – pp. 81-87].
5. Взаимодействие ридберговских атомов в циркулярных состояниях с атомами щелочноземельных элементов $Ca(4s^2)$ и $Sr(5s^2)$ / Е.С. Мирончук, А.А. Нарич, В.С. Лебедев // ЖЭТФ – 2015. – Том 148. – вып. 5(11). – сс. 914-930.

6. Resonant quenching of Rydberg atomic states by highly polar molecules / A.A. Narits, E.S. Mironchuk, V.S. Lebedev // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2016. – Vol. 49 – No. 12 – 124001.

Все перечисленные работы опубликованы в изданиях, соответствующих перечню ВАК.

Тезисы докладов на конференциях и симпозиумах:

1. Е.С. Мирончук, А.А. Наритц, В.С. Лебедев. Тушение ридберговских состояний атомов при медленных столкновениях с атомами щелочноземельных элементов. – В сборнике трудов 54-й научной конференции МФТИ «Проблемы фундаментальных и прикладных естественных и технических наук в современном информационном обществе» – 10 - 30 ноября 2011 г. – сс. 149-150.
2. E.S. Mironchuk, A.A. Narits, V.S. Lebedev. Collisional quenching of Rydberg atomic states by the ground-state alkaline-earth atoms. – 44th Conference of the European Group for Atomic Systems (EGAS) – University of Gothenburg, Sweeden – July 9 - 13, 2012. – Book of Abstracts – PO-043. – P. 118.
3. Е.С. Мирончук, В.С. Лебедев, А.А. Наритц, А.Д. Кондорский. Механизмы столкновительного тушения ридберговских атомных состояний атомами с малой энергией сродства к электрону. – В сборнике трудов 55-й научной конференции МФТИ «Современные проблемы фундаментальных и прикладных, естественных и технических наук в современном информационном обществе» – 22 - 25 ноября 2012 г. – сс. 64-66.
4. Е.С. Мирончук, А.А. Наритц, А.Д. Кондорский, В.С. Лебедев. Столкновительное тушение ридберговских состояний атомов атомами щелочноземельных элементов. – XIV Школа молодых ученых «Актуальные проблемы физики» – Звенигород – 11 - 15 ноября 2012 г. – сс. 155-156.
5. А.А. Наритц, Е.С. Мирончук, В.С. Лебедев. Образование ионной пары и столкновительное тушение ридберговских уровней атомов щелочных металлов атомами щелочноземельных элементов Ca, Sr и Ba. – В сборнике тезисов докладов XX конференции по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС-XX) – Воронеж – 23 - 27 сентября 2013 г. – сс. 234-236.
6. Е.С. Мирончук, В.С. Лебедев, А.А. Наритц. Опустошение ридберговских уровней атомов в столкновениях с атомами щелочноземельных элементов. – В сборнике трудов V Всероссийской молодёжной конференции по фундаментальным и инновационным вопросам современной физики – Москва, ФИАН – 10 - 15 ноября 2013г. – с. 56.
7. E.S. Mironchuk. Resonant electron-transfer processes in collisions of Rydberg atoms with electron-attaching neutral targets. – First International Moscow Institute

- of Physics and Technology (Moscow, Russia) - University of Electro-Communications (Tokyo, Japan) Workshop (MIPT-UEC): Atomic, Molecular and Optical Physics – Moscow, Russia – October 30 - November 1, 2013. – MIPT-UEC International Workshop Program.
8. E.S. Mironchuk. Destruction of circular Rydberg states in thermal collisions with atoms possessing small electron affinities. – Second MIPT - UEC Joint Workshop on Optical Science – University of Electro-Communications, Chofu, Tokyo, Japan – October 16 - 21, 2014. – Book of Abstracts – P. 17.
 9. Е.С. Мирончук, А.А. Нарич, В.С. Лебедев. Резонансное взаимодействие атомов в циркулярных ридберговских состояниях с нейтральными частицами. – В сборнике трудов XV Школы молодых ученых «Актуальные проблемы физики» – ФИАН-Москва – 16 - 20 ноября 2014 г. – РИИС ФИАН – сс. 174-175.
 10. Е.С. Мирончук, В.С. Лебедев, А.А. Нарич. Исследование устойчивости циркулярных ридберговских состояний к столкновительному разрушению нейтральными атомами. – В сборнике трудов 57-й научной конференции МФТИ с международным участием, посвященной 120-летию со дня рождения П.Л.Капицы «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики» – 24 - 29 ноября 2014 г. – сс. 54-55.
 11. E.S. Mironchuk, A.A. Narits, V.S. Lebedev. Resonant quenching of Rydberg atomic states by alkaline-earth atoms and strongly polar molecules. – III International Workshop MIPT - UEC: Atomic, Molecular and Optical Physics – Moscow Institute of Physics and Thechnology - P.N. Lebedev Physical Institute, Moscow, Russia – October 20 - 23, 2015 – Book of Abstracts – P. 18.
 12. Е.С. Мирончук, А.А. Нарич, В.С. Лебедев. Резонансное тушение ридберговских состояний атомов сильно полярными молекулами с малым сродством к электрону. – Тезисы докладов на 6 Всероссийской молодежной конференции «Фундаментальные и инновационные вопросы современной физики» – ФИАН, Москва – 15-20 ноября 2015 г. – с. 69.
 13. Е.С. Мирончук, А.А. Нарич, В.С. Лебедев. Опустошение циркулярных ридберговских состояний атомов атомами щелочноземельных элементов $\text{Ca}(4s^2)$ и $\text{Sr}(5s^2)$. – В сборнике трудов 58-й научной конференции МФТИ с международным участием «Актуальные проблемы фундаментальных и прикладных наук в области физики» – Москва - Долгопрудный - Жуковский – 23 - 28 ноября 2015 г.

Список цитированной литературы

- [1] Rydberg atoms / T. F. Gallagher. // Cambridge University Press, Cambridge, 1994.

- [2] Physics of highly excited atoms and ions / V. S. Lebedev, I. L. Beigman // Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 1998.
- [3] Динамика волновых пакетов высоковозбужденных состояний атомов и молекул / И. Ш. Авербух, Н. Ф. Перельман // УФН – 1991. – Т. 161. – No. 7. – сс. 41–81.
- [4] Observation of Rydberg blockade between two atoms / E. Urban, T. A. Johnson, T. Henage, L. Isenhower, D. D. Yavuz, T. G. Walker, M. Saffman // Nature Phys. – 2009. – Vol. 5. – pp. 110–114.
- [5] Quantum information with Rydberg atoms / M. Saffman, T.G. Walker, K. Mølmer // Rev. Mod. Phys. – 2010. – Vol. 82. – P. 2313.
- [6] Экспериментальная квантовая информатика с одиночными атомами и фотонами / И. И. Рябцев, И. И. Бетеров, Д. Б. Третьяков, В. М. Энтин, В. Л. Курочкин, А. В. Зверев, И. Г. Неизвестный // Вестник РАН – 2013. – Т. 83. – No 7. – сс. 606-615.
- [7] Rydberg atoms in astrophysics / Yu. N. Gnedin, A. A. Mihajlov, Lj. M. Ignjatović, N. M. Sakan, V. A. Srećković, M. Yu. Zakharov, N. N. Bezuglov, A. N. Klycharev // New Astronomy Reviews – 2009. – Vol. 53. – Iss. 7–10. – pp. 259–265.
- [8] Кинетика неравновесной низкотемпературной плазмы / Л. М. Биберман, В. С. Воробьев, И. Т. Якубов // М.: Наука, 1982.
- [9] Universal deceleration of highly polar molecules / M. Hamamda, P. Pillet, H. Lignier, D. Comparat // New J. Phys. – 2015. – Vol. 17 – P. 045018.
- [10] Determination of electron binding energies of ground-state dipole-bound molecular anions / C. Desfrancois // Phys. Rev. A – 1995. – Vol. 51. – No. 5. – P. 3667.
- [11] Formation of Ca^- ions by charge transfer from Rydberg atoms / I.I. Fabrikant // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 1998. – Vol. 31. – P. 2921.
- [12] Quenching of Rydberg states by atoms with small electron affinities / I. I. Fabrikant, V. S. Lebedev // J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. – 2000. – Vol. 33. – P. 1521.
- [13] Orientation effects in thermal collisions between "circular"–Rydberg-state atoms and ground-state helium / E. de Prunelé // Phys. Rev. A – 1985. – Vol. 31. – P. 3593.
- [14] m - and l -changing collisions of high-Rydberg atoms with rare-gas atoms / T. Yoshizawa, M. Matsuzawa // J. Phys. Soc. Japan – 1985. – Vol. 54. – P. 918.
- [15] Разрушение атомных частиц электрическим полем и электронным ударом / Б.М. Смирнов, М.И. Чибисов // ЖЭТФ – 1965. – Т. 49. – С. 841.

- [16] Перезарядка отрицательного иона на положительном / А.А. Радциг, Б.М. Смирнов // ЖЭТФ – 1971. – Т. 60. – С. 521-526.
- [17] Слабосвязанная частица с ненулевым орбитальным моментом в электрическом или магнитном поле / Ю.Н. Демков, Г.Ф. Друкарев // ЖЭТФ – 1981. – Т. 81. – С. 1218-1231.
- [18] V.S. Lebedev, A.A. Narits // Atomic processes in basic and applied physics / ed V. Shevelko and H. Tawara; Springer Series on Atomic, Optical, and Plasma Physics (Berlin: Springer) – 2012. – Vol. 68. – Chapter 9. – P. 211–45.
- [19] Nonadiabatic calculations of ultraviolet absorption cross section of sulfur monoxide: Isotopic effects on the photodissociation reaction / S.O. Danielache, S. Tomoya, A. Kondorsky, I. Tokue, S. Nanbu // J. Chem. Phys. – 2014. – Vol. 140. – P. 044319.
- [20] Coulomb functions for attractive and repulsive potentials and for positive and negative energies / M.J. Seaton // Comput. Phys. Commun. – 2002. Vol. 146. – P. 225.
- [21] Controlled formation of weakly bound atomic negative ions by electron transfer from state-selected Rydberg atoms / M. Reicherts, T. Roth, A. Gopalan, M.-W. Ruf, H. Hotop, C. Desfrancois, I.I. Fabrikant // Europhys. Lett. – 1997. – Vol. 40. – P. 129.
- [22] Close-coupling calculations of Ca^- formation by charge transfer from Rydberg atoms / I.I. Fabrikant, M.I. Chibisov // Phys. Rev. A – 2000. Vol. 61. – P. 022718.
- [23] Перенос слабосвязанного электрона при столкновениях ридберговских атомов с нейтральными частицами. II. Образование ионной пары и резонансное тушение уровней $\text{Rb}(nl)$ и $\text{Ne}(nl)$ атомами Ca , Sr и Ba / А.А. Нариз, Е.С. Мирончук, В.С. Лебедев // ЖЭТФ – 2013. – Т. 144. – С. 699.
- [24] Electron exchange between a dipole-bound anion and a polar molecule and dimer formation in dipole-bound anions / V.E. Chernov, A.V. Danilyan, B.A. Zon // Phys. Rev. A – 2009. – Vol. 80. – P. 022702.
- [25] Dipole threshold laws for single and double detachment from negative ions / C.H. Greene, A.R.P. Rau // Phys. Rev. A – 1985. – Vol. 32. – P. 1352.
- [26] Dipole-bound anions of highly polar molecules: Ethylene carbonate and vinylene carbonate / N.I. Hammer, R.J. Hinde, R.N. Compton // J. Chem. Phys. – 2004. – Vol. 120. – No. 2. – P. 685.
- [27] Dipole-bound anions of carbonyl, nitrile, and sulfoxide containing molecules / N.I. Hammer, K. Diri, K.D. Jordan, C. Desfrancois, R.N. Compton // J. Chem. Phys. – 2003. – Vol. 119. – No. 7. – P. 3650.