

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Мирончук Елены Сергеевны «Резонансное тушение ридберговских состояний атомов нейтральными частицами с малым сродством к электрону», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

Радиационные и столкновительные процессы с участием высоковозбужденных (ридберговских) состояний атомов играют важную роль в спектроскопии и кинетике низкотемпературной плазмы, в астрофизике и радиоастрономии, а также в таких быстро развивающихся новых областях, как химическая физика ионосферы и физика ультрахолодных газов. Значительное внимание исследователей уделяется изучению свойств разнообразных слабосвязанных и экзотических атомно-молекулярных систем, в том числе так называемых "тяжелых" ридберговских атомов, ридберговских молекул с предельно низкими энергиями связи и др., в которых важную роль играют эффекты дальнедействующего взаимодействия.

В этой связи диссертационная работа Мирончук Е.С. посвящена изучению нового физического механизма столкновительного тушения ридберговских состояний атомов нейтральными частицами с малой энергией сродства к электрону и альтернативного канала реакции – образования катиона и слабосвязанного отрицательного иона с энергиями связи в диапазоне от единиц до сотни миллиэлектронвольт. Тема диссертации Е.С. Мирончук несомненно актуальна и представляет интерес для широкого круга приложений в современной оптике, включая квантовую, атомно-молекулярной физике и физике плазмы.

Основным результатом работы является детальное исследование процессов резонансного тушения ридберговских состояний атомов атомами щелочноземельных элементов и рядом сильнополярных молекул, способных к образованию дипольно-связанных анионов. В ходе решения данной задачи показано, что практически не изучавшийся ранее канал резонансного тушения в области относительно невысоких значений главного квантового числа является определяющим и должен приниматься во внимание при анализе столкновительных процессов, происходящих с участием высоковозбужденных атомов и нейтральных частиц.

Диссертация изложена на 172 страницах и состоит из введения, четырех глав основного текста, заключения и списка литературы.

Во **введении** обоснованы актуальность, научная новизна, научная и практическая ценность работы, достоверность полученных результатов, сформулированы защищаемые положения и личный вклад автора.

Глава 1 представляет довольно подробный обзор современного состояния исследований ридберговских атомов, в том числе в циркулярных и эллиптических состояниях, слабосвязанных отрицательных атомарных и молекулярных ионов. Дана классификация основных столкновительных процессов с их участием и представлено описание теоретических подходов, используемых для моделирования данных процессов.

В **главе 2** изложен использованный в диссертации теоретический подход и алгоритм расчета вероятностей и сечений неадиабатических переходов, приводящих к резонансному опустошению ридберговских состояний атомов щелочных элементов в столкновениях с невозбужденными атомами щелочноземельных металлов. Подход, основанный на модели Ландау-Зинера и вычислении точных аналитических выражений для матричных элементов перехода, дополнен факторами выживания, учитывающими многоканальность рассмотренной реакции. Автором продемонстрирован колоколообразный характер зависимости вычисленных сечений двух каналов реакции от главного квантового числа. Установлено, что положение максимумов и величины максимальных сечений исследуемых процессов существенно зависят от орбитального квантового числа ридберговского атома, энергии сродства возмущающего атома к электрону и скорости столкновения. Ключевым выводом является преобладание канала резонансного тушения над каналом образования ионной пары в области сравнительно невысоких главных квантовых чисел $n \sim 5-10$, где резонансный механизм снятия возбуждения определенно доминирует над традиционным нерезонансным механизмом, обусловленным рассеянием внешнего (квазисвободного) электрона на возмущающей нейтральной частице.

Резонансное тушение циркулярных и близких к ним состояний с $l=n-1$ и произвольным фиксированным значением магнитного квантового числа m рассмотрено в **главе 3**. Показана неприменимость формулы Ландау-Зинера для расчета вероятности перехода и сечений реакции. Разработан более точный подход на основе решения связанных уравнений для амплитуд вероятностей, который позволяет учесть динамику нелокальных неадиабатических переходов. Значительное внимание здесь уделено также исследованию ориентационных эффектов, в частности, установлению

конкретных зависимостей сечений от взаимной ориентации орбиты внешнего электрона ридберговского атома в циркулярном состоянии и направления вектора скорости относительного движения частиц. Продемонстрирована сильная зависимость эффективности исследуемого процесса от величины магнитного квантового числа ридберговского состояния.

Глава 4 посвящена изучению процессов резонансного тушения высоковозбужденных состояний атомов сильнополярными молекулами, способными к образованию дипольно-связанных анионов. На основе развитых в предыдущих главах теоретических подходов автор показывает, что канал резонансного тушения может быть применен, наряду с широко использованным ранее каналом образования ионной пары, для определения энергии связи дипольно-связанных отрицательных молекулярных ионов. При этом в работе получена полуэмпирическая формула, связывающая энергию сродства полярных молекул к электрону и положение пика сечений канала тушения ридберговского состояния. Автор демонстрирует состоятельность используемого теоретического подхода путем сравнения результатов расчетов констант скорости реакции образования ионной пары с имеющимися в литературе экспериментальными данными.

В заключении сформулированы основные результаты диссертации.

Перечислим наиболее важные и интересные результаты работы:

- развит оригинальный теоретический подход к исследованию неадиабатических переходов между электронными термами квазимолекул, происходящих с участием высоковозбужденных атомов в начальном канале реакции и слабосвязанных отрицательных ионов в конечном канале;
- впервые продемонстрировано преобладание канала резонансного тушения над каналом образования ионной пары в тепловых столкновениях ридберговских атомов с атомами и молекулами, способными к образованию поляризационно- и дипольно-связанных анионов;
- получена удобная для практических приложений полуэмпирическая формула, связывающая положение пика зависимости сечения резонансного тушения от эффективного главного квантового числа атома и энергию сродства возмущающих молекул к электрону;
- впервые исследовано резонансное столкновительное тушение циркулярных ридберговских состояний, обусловленное неадиабатическими переходами между ридберговскими ковалентными и ионным термом квазимолекулы; определена область главных квантовых чисел, в которой процессы

резонансного тушения существенно влияют на устойчивость данных состояний.

Диссертация хорошо оформлена, написана хорошим языком.

По диссертации можно высказать следующие замечания:

1. При изложении в главах 2 и 3 результатов расчета эффективности резонансного механизма тушения ридберговских состояний атомными частицами автор ограничивает рассмотрение атомами кальция, стронция и бария. При этом не указано, применим ли развитый подход для описания процесса резонансного тушения высоковозбужденных состояний атомов при столкновениях с другими атомами, обладающими положительным сродством к электрону?

2. В главе 4 диссертации рассматриваются столкновения с молекулами, способными к образованию дипольно-связанных анионов с энергией связи в диапазоне от 8.5 до 49 мэВ. Вместе с тем, из литературы известны дипольно-связанные анионы с меньшими энергиями связи вплоть до долей миллиэлектронвольта. Из текста диссертации неясно, возможно ли использование предложенного автором подхода для описания процессов, связанных с образованием подобных анионов?

3. При сравнении результатов расчета с экспериментом автор приводит результаты для относительных величин констант скоростей процессов образования ионной пары. При этом в диссертации не приводятся данных по абсолютным значениям констант скоростей реакции. С чем связан такой выбор формы представления результатов, и каковы по порядку величины абсолютные значения констант скоростей исследуемых процессов?

4. В тексте диссертации недостаточно подробно обсуждены приложения результатов к современной оптике.

Отмеченные недостатки, однако, не снижают общую высокую оценку работы.

Диссертационная работа Е.С. Мирончук выполнена на высоком научном уровне и содержит ряд новых интересных результатов в интенсивно развивающейся области, лежащей на стыке атомной спектроскопии, атомно-молекулярной физики и теории столкновений. Достоверность полученных теоретических результатов определяется их согласием с имеющимися экспериментальными данными, внутренней непротиворечивостью использованного самосогласованного подхода и применением современных вычислительных методов и алгоритмов расчета. Результаты работы

представляют научную и практическую ценность для решения ряда актуальных проблем спектроскопии и атомно-молекулярной физики, в том числе физики высоковозбужденных атомов и других слабосвязанных систем с дальнедействующим характером взаимодействия.

Основные результаты работы опубликованы в статьях, входящих в перечень научных изданий ВАК, тезисах российских и международных конференций и симпозиумов.

На основании текста диссертации можно сделать вывод, что по актуальности, новизне и важности практических выводов и рекомендаций работа «Резонансное тушение ридберговских состояний атомов нейтральными частицами с малым сродством к электрону» Мирончук Елены Сергеевны полностью соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а автор заслуживает присвоения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика».

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Ведущий научный сотрудник
физического факультета МГУ,
ведущий научный сотрудник,
доктор ф.-м. наук

Владимир Львович Бычков

Декан Физического факультета МГУ

профессор
20 сентября 2016 г.



Николай Николаевич Сысоев

Адрес:

ФГБОУ ВО «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова»,
119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, Тел: +7-916-025-70-91; e-mail:
bychvl@gmail.com

Список основных научных публикаций в.н.с кафедры физической электроники физического факультета Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова» по теме диссертации Мирончук Елены Сергеевны «Резонансное тушение ридберговских состояний атомов нейтральными частицами с малым сродством к электрону», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.05. – «Оптика»

1. Бычков В.Л., Елецкий А.В. Механизмы рекомбинации в плотном молекулярном газе, возбуждаемом электронным пучком. Журнал технич. Физики. 1984. Т.54. С. 1829-1831.
2. Александров Н.Л., Бычков В.Л. Образование и разрушение ионов NO^+ при столкновении с молекулами. Теплофиз. Высок. Темпер. 1986. Т.24. С.631-638.
3. Бычков В.Л., Гордеев О.А. Сечения электрон-молекулярных столкновений, приводящих к диссоциации молекул, входящих в состав воздуха. Химическая физика. 1993. Т.11. № 8, С.1064-1074.
4. Bychkov V.L., Yurovski V.A. The modeling of water vapor beam plasma. *Teplofizika Vysokikh Temperatur (High Temperature in English edition)*. 1993. V.31. P.8-17.
5. Александров А.Ф., Бычков В.Л., Грачев Л.П., Есаков И.И., Ломтева А.Ю. Ионизация воздуха в околокритическом электрическом поле. Журнал Технической Физики. 2006. Т.76. В.3. С. 38-43.
6. Александров А. Ф., Бычков В. Л., Грачев Л.П., Есаков И.И., Ломтева А.Ю. ЭФФЕКТИВНАЯ ИОНИЗАЦИЯ ВОЗДУХА И КИСЛОРОДА В ОКОЛОКРИТИЧЕСКОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ. Химическая Физика. 2008. Т.27. №1. С.5-11.;
7. Bychkov V. L., Kochetov I.V., Bychkov D. V., and Volkov S.A. Air-Propane Mixture Ionization Processes in Gas Discharges . *IEEE Trans on Plasma Science*. 2009. December. V.37. N.12, P.2280-2285.
8. Ф. Александров, В.Л. Бычков, С.А. Волков. Околопробойные характеристики воздуха в нижних слоях атмосферы. Вестник Московского Университета. Серия 3. Физика. Астрономия. 2011 №. 1, pp. 80–83.
9. N.V. Ardelyan, V.L. Bychkov, I.V. Kochetov, K.V. Kosmachevskii, Prebreakdown air ionization in the atmosphere. *The Atmosphere and Ionosphere: Elementary Processes, Monitoring and Ball Lightning*. Eds. V. Bychkov, G. Golubkov, A. Nikitin. Springer. 2014. P.69-111.
10. Арделян Н. В., Бычков В. Л., Волков С. А., Космачевский К. В., Кочетов И. В. ПРЕДПРОБОЙНАЯ ИОНИЗАЦИЯ ВОЗДУХА В АТМОСФЕРЕ. ХИМИЧЕСКАЯ ФИЗИКА, 2015, том 34, № 10, с. 63–75.
11. Арделян Н. В., Бычков В. Л., Космачевский К. В., Максимов Д. С. Ионизация воздуха в предгрозовых атмосферных условиях. Успехи прикладной физики, 2015, том 3, № 6, с. 553-558.

«31» мая 2016 г.



В.Л. Бычков