

УЖГОРОДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

УДК 539.18

ГЕДЕОН ВИКТОР ФЕДОРОВИЧ

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ВОЗБУЖДЕНИЯ,
ИОНИЗАЦИИ И ДИЭЛЕКТРОННОЙ РЕКОМБИНАЦИИ
ПРИ СТОЛКНОВЕНИЯХ МНОГОЗАРЯДНЫХ ИОНОВ
С ЭЛЕКТРОНАМИ**

Специальность 01.04.02 - теоретическая физика

А в т о р е ф е р а т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

УЖГОРОД - 1993

Робота виконана на кафедрі фізики



00814816 (S)

Ужгородського державного університету

Научний керівник - кандидат фізико-математических наук
Зацаринний О.И.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математических наук
Имре А.И.
кандидат фізико-математических наук
Грум-Гржимайло А.Н.

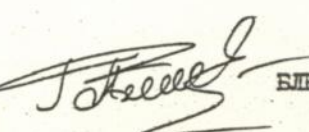
Ведущая организация - Институт общей физики Российской
Академии Наук (ИОФАН)

Защита состоится " 16 " сентября 1993 г. в 14.00 на за-
седании специализированного совета К 068.07.02 по физико-ма-
тематическим наукам в Ужгородском госуниверситете (зуд. № 181).

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке
Ужгородского госуниверситета (ул. Кремлевская, 9).

Автореферат разослан " 24 " мая 1993 г.

УЧЕНЫЙ СЕКРЕТАРЬ
СПЕЦИАЛИЗИРОВАННОГО СОВЕТА


БЛЕЦКАН Д.И.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широкое распространение в физике и технике различных плазменных устройств делает исследования свойств неравновесной плазмы актуальными уже на протяжении нескольких десятилетий. Особое внимание при этом уделяется изучению процессов элементарных столкновений между частицами, входящими в состав плазмы. К важнейшим элементарным процессам соударений, определяющим свойства плазмы, несомненно относятся и процессы возбуждения, ионизации и рекомбинации многозарядных ионов при столкновении с электронами, что является предметом изучения настоящей диссертационной работы.

Исследование взаимодействия электронов с атомными системами имеет и чисто эвристическое значение, поскольку дает возможность получать сведения о строении и свойствах атомов. Электрон можно рассматривать как простейшую пробную частицу, с помощью которой можно изучать атомные ионы. При этом могут исследоваться процессы, недоступные распространенным спектроскопическим методам. Электроны, воздействуя на мишень, могут возбуждать новые неустойчивые состояния ионов, лежащие в непрерывном спектре, - т.н. автоионизационные состояния (АИС). Учет влияния этих состояний на конечные характеристики актов неупругого рассеяния способен иногда в корне изменить всю картину рассматриваемого процесса.

Необходимость иметь полные наборы данных, описывающих процессы элементарных соударений в плазме вызывается насущной потребностью в получении точных характеристик различных плазменных сред, будь то в астрофизике или во всевозможных энергетических и лазерных устройствах.

До настоящего времени практически отсутствовали систематические и точные данные о столкновительных характеристиках многозарядных ионов с электронами, в частности для He^- , Li^- и Be^- подобных ионов. Под систематическими данными понимается набор сечений возбуждения всех переходов между определенным набором уровней конкретного иона, включая переходы между возбужденными состояниями. Без подобной информации нельзя построить адекватных теоретических моделей плазмы и прогнозировать ее характеристики. При этом расчеты должны быть выполнены в рамках одного подхода с одинаковой и контролируемой погрешностью.

Поскольку при столкновении ионов с электронами возможно образование автоионизационных состояний, сильно влияющих на конечные характеристики взаимодействия, в настоящее время большое внимание уделяется исследованиям деталей столкновительного процесса, апробируются различные теоретические модели для адекватного описания процессов неупругих соударений. Всестороннее изучение механизмов неупругих столкновений многозарядных ионов с электронами имеет также важнейшее значение при исследовании устойчивости неравновесной плазмы. Особое внимание при этом уделяется изучению процесса диэлектронной рекомбинации (ДР). Потребности спектроскопической диагностики плазмы, численное моделирование кинетики плазмы для конструирования коротковолновых лазеров также стимулирует исследования ДР.

В связи с вышеизложенным, детальное изучение процессов возбуждения, ионизации и диэлектронной рекомбинации в электрон-ионных столкновениях представляется актуальным как с фундаментальной так и с практической точек зрения.

Цель работы:

1. Получение точных и систематических данных о сечениях и скоростях возбуждения He-, Li- и Be-подобных ионов электронным ударом, учитывая переходы между возбужденными уровнями.

2. Исследование закономерностей ионизации многозарядных ионов с конфигурациями $2p^63s$, $3p^63d$ и $4p^64d$ электронным ударом, с учетом процесса возбужденной автоионизации.

3. Систематический расчет процессов диэлектронной рекомбинации на He-подобных ионах с целью получения не только полной скорости ДР, но и скоростей заселения отдельных ионных уровней.

Научная новизна.

1. Произведены детальные расчеты сечений и скоростей возбуждения для переходов между возбужденными уровнями He-, Li- и Be-подобных ионов. Впервые дан пакет характеристик, включающий все переходы между набором уровней с $n=2+5$.

2. Исследованы основные закономерности и выяснена относительная важность различных каналов ионизации ионов с конфигурациями $2p^63s$ и np^6nd ($n=3,4$) при столкновении с электронами и впервые получено хорошее согласие с экспериментом.

3. Впервые проведено систематическое исследование диэлектронной рекомбинации He-подобных ионов на отдельные уровни.

Научная и практическая ценность.

Представленные в диссертации результаты носят фундаментальный характер, углубляют и обогащают наши представления о строении и свойствах атомных систем. Они позволяют по-новому взглянуть на механизмы протекания процессов элементарных соударений, будь то возбуждение, ионизация или рекомбинация многозарядных ионов при столкновении с электронами в высокотемпературной плазме, оценить относительную роль различных каналов реакции, уточнить важность вклада АИС в конечные характеристики взаимодействия.

Полученные данные по эффективным сечениям элементарных процессов относятся к числу важнейших атомных констант и могут найти применение

- при решении задач диагностики высокотемпературной лабораторной и астрофизической плазмы;
- при расчете и создании новых лазерных сред;
- при конструировании всевозможных плазменных устройств, в частности при осуществлении проблемы управляемого термоядерного синтеза.

Защищаемые положения:

1. При расчете сечений возбуждения He-подобных ионов связь каналов рассеяния существенна только для припороговых энергий. Определяющим фактором при расчете переходов между возбужденными состояниями He-подобных ионов является учет поля атомного остатка (отличие поля атомного остатка от кулоновского).

2. При расчете сечений возбуждения Li-подобных ионов определяющим фактором является связь каналов рассеяния между собой. Ее с хорошей точностью можно учесть в рамках нормировки сечений на K-матрицу.

3. В случае Be-подобных ионов наиболее существенным фактором является точный расчет атомных волновых функций мишени с обязательным учетом межконфигурационного взаимодействия.

4. При расчете сечений возбужденной автоионизации натрие-подобных ионов необходимо учитывать совокупность факторов:

- а) неортогональность волновых функций дискретного и непрерывного спектра; б) влияние обмена; в) зависимость волновых функций АИС от термов. С ростом зарядности иона роль учета неортогональности падает, но становится необходимым рассчитывать точные значения коэффициентов ветвления B_1^a .

5. При расчете скорости ДР на He-подобных ионах необходимо учитывать зависимость волновых функций АИС от термов и применять прямое суммирование. Упрощенная модель, которая до настоящего времени широко использовалась в практических приложениях, приводит к ошибкам вплоть до фактора 1.5 при расчете полных скоростей ДР.

Апробация работы. Основные результаты исследований, изложенных в диссертации, постоянно по мере их получения обсуждались на семинарах кафедры теоретической физики Ужгородского госуниверситета и докладывались на следующих семинарах и конференциях:

- на III научном семинаре по автоионизационным явлениям в атомах (Москва, 1985);
- на IX Всесоюзной конференции по теории атомов и атомных спектров (Ужгород, 1985);
- на XI Всесоюзной конференции по физике электронных и атомных столкновений (Чебоксары, 1991).

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 12 печатных работ.

Структура и объем диссертации. Диссертация содержит 157 страниц, в том числе 12 рисунков, 17 таблиц и список литературы из 110 наименований. Она состоит из введения, четырех глав и заключения.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, кратко изложена характеристика диссертационной работы, сформулированы ее цели, представлены основные положения, выносимые на защиту, приведен список печатных работ, опубликованных по материалам диссертации.

В первой главе дан обзор теоретических и экспериментальных работ по теме диссертации.

В §1.1 рассмотрено состояние исследований по возбуждению многозарядных ионов изоэлектронных рядов He, Li и Be электронным ударом в высоколежащие состояния. Отмечено, что до настоящего времени отсутствовали систематические и точные расчеты сечений и скоростей возбуждения на уровни выше $n=2$. Показано, что имеющиеся в литературе данные получены либо с помощью упрощенных методов, либо не охватывают всего спектра возможных переходов между выбранным классом уровней.

В §1.2 обсуждается проблема несоответствия теоретических расчетов сечений ионизации ионов Al^{2+} , Si^{3+} , Fe^{15+} , Ti^{3+} и Zr^{3+} электронным ударом, выполненных различными методами, с имеющимися экспериментальными данными. Рассмотрены основные механизмы неупругого соударения электрона с многозарядным ионом а также некоторые теоретические модели, используемые для описания этих процессов ионизации. Подчеркнута необходимость учета вклада процесса возбужденной автоионизации, как важнейшего механизма ионизации многозарядных ионов.

В §1.3 дан обзор работ по диэлектронной рекомбинации на He-подобных ионах. Кратко рассмотрены основные положения и обсуждены недостатки упрощенной модели расчета скоростей ДР, а также приведены широко используемые эмпирические формулы Бэрджесса-Мертса. Показана необходимость проведения систематических расчетов скоростей ДР на отдельные уровни.

Во второй главе приводятся основы теории и описываются наиболее распространенные методы расчета столкновительных характеристик (изложенный материал дан только в том объеме, который необходим для пояснения методики проведенных нами расчетов). Там же приведены полученные нами данные по сечениям и скоростям возбуждения He-, Li- и Be-подобных ионов.

В разделе 2.1.1 рассмотрены основные соотношения метода сильной связи, обсуждены их основные достоинства и недостатки. Дан обзор разработанных к настоящему времени численных алгоритмов и программ (IMPACT, RMATRIX, NIEM). В разделе 2.1.2 описаны некоторые приближенные методы, в частности метод искаженных волн (DW), кулон-борновское приближение (КБО), приближение Кулона-Бете (КБе), метод Кулон-Борна в приближении бесконечного заряда ядра. Определены области применимости каждого из этих методов. Обращено внимание на важность нормировки получаемых с помощью приближенных методов сечений по методу К-матрицы. В разделе 2.1.3 приводятся простые ашпроксимационные формулы, обеспечивающие правильную асимптотику сечений и скоростей возбуждения и описывающие результаты численного расчета с помощью трех подгруппочных параметров.

В §2.2 представлены результаты систематических расчетов сечений возбуждения ионов Li^{+} , C^{4+} , Al^{11+} и Ca^{18+} . Рассмотрены все переходы между уровнями конфигураций $1s^2$, $1s2l$ и $1s3l$ и их возбуждения на уровни $1s4l$ и $1s5l$. Расчеты проводились в рамках МСС и КБО-приближении с нормировкой по методу К-матрицы. Отмечено,

что важным моментом, сильно влияющим на точность окончательных результатов, является выбор волновых функций мишени и описана методика их получения. Для решения уравнений сильной связи была использована программа IMPACT, описанная в разделе 2.1.1. Указаны особенности учета различных каналов реакции и расчета сечений возбуждения для различных парциальных волн. Расчеты сечений возбуждения производились в восьми точках по энергии от порога возбуждения до двойного потенциала ионизации рассматриваемого иона.

Полученные силы столкновения аппроксимировались аналитическими зависимостями с правильной асимптотикой, что позволяет использовать полученные данные в широком интервале энергий. Для каждого иона, путем широкого сравнения с результатами различных методов расчета, оценивалась точность и достоверность полученных результатов, обсуждалась важность учета таких факторов, как связь различных каналов рассеяния, резонансы и релятивистские эффекты. Отмечено, что в случае рассеяния на возбужденных состояниях для малых энергий особенно важно учитывать некулоновскую часть поля иона, так как в возбужденных состояниях искажение кулоновского поля иона существенно даже на больших расстояниях от ядра.

В §2.3 приведены конкретные данные по скоростям возбуждения Li-подобных Be^+ , C^{3+} , Al^{10+} и Ca^{17+} . Рассмотрены все переходы между состояниями $1s^2 2l$ и $1s^2 3l$, а также их возбуждение на уровни $1s^2 4l$ и $1s^2 5l$. Сечения и скорости возбуждения рассчитаны в КБО-приближении с нормировкой по методу К-матрицы. Для Be^+ и C^{3+} с целью сравнения и проверки точности КБО-приближения были проведены расчеты в рамках МСС пяти состояний мишени. Волновые функции Li-подобных ионов были рассчитаны в одноконфигурационном хартри-фокковском приближении с использованием замороженных $1s$ орбиталей. Это, обеспечивая необходимую точность расчетов, позволяет получать ортонормированный набор возбужденных атомных орбиталей. Большинство скоростей возбуждения было рассчитано от порога до тех значений энергии налетающего электрона, где сечения достигают своего асимптотического поведения. Подробный анализ проведенных расчетов в рамках МСС и КБО позволяет сделать вывод, что метод КБО с учетом нормировки по методу К-матрицы в случае многоверядных Li-подобных ионов ($Z > 3$) хорошо учитывает связь различных каналов между собой, особенно в случае дипольных и квадрупольных переходов. Причем учет нормировки является необходимым условием в

случае Li-подобных ионов для получения результатов, сравнимых по точности с МСС. По сравнению с He-подобными ионами для Li-подобных ионов наблюдается более быстрая сходимость результатов различных методов расчета с увеличением заряда ядра.

В §2.4 представлены результаты систематических расчетов Be-подобных ионов O^{2+} и O^{4+} электронным ударом. Были рассмотрены все переходы между состояниями конфигураций $2s^2$, $2p^2$, $2s3l$ а также возбуждение этих состояний на уровни $2s4l$, $2s5l$, $2p3l$. Расчеты проведены в КБО-приближении с нормировкой по методу К-матрицы. Волновые функции мишени получены в многоконфигурационном приближении. Здесь же описаны особенности применения этого приближения для нашего случая, в частности использование поляризационного потенциала при расчете валентных орбиталей. Анализ полученных результатов, сравнение с имеющимися теоретическими и экспериментальными данными подтверждают необходимость учета конфигурационного смешивания при расчете волновых функций Be-подобных ионов. Эффекты нормировки также очень важны при расчете рассеяния электронов на этих ионах. Примененный нами способ нормировки, как было показано, позволил значительно улучшить КБО-сечения.

В третьей главе рассмотрены процессы ионизации многозарядных ионов электронным ударом с учетом возбужденной автоионизации. В §3.1 описана использованная нами методика расчета сечений ВА и сечений прямой ионизации. Все сечения ВА определялись в КБО-приближении с учетом неортогональности между волновыми функциями дискретного и непрерывного спектра.

В §3.2 приведены сечения ионизации Na-подобных ионов Al^{2+} , Si^{3+} и Fe^{15+} , рассчитанные в вышеуказанном приближении. Для каждого иона получено хорошее согласие с экспериментальными данными в припороговой области энергий. Здесь же обсуждается точность полученных результатов, влияние обмена, процедуры ортогонализации и других факторов на сечения возбуждения различных АИС. Отмечена необходимость учета всей совокупности этих факторов для получения точных значений сечений возбуждения. Приведены также результаты расчетов по упрощенной схеме сечений ионизации ионов Ag^{7+} , Ti^{11+} и Mo^{31+} и исследована зависимость сечений ВА от заряда иона z . Подтверждена возрастающая роль процессов ВА в сравнении с прямой ионизацией с ростом заряда иона z . В то же время анализ полученных данных приводит к выводу о стабилизации, а в дальнейшем и уменьшении роли процессов ВА в связи с увеличением вероятности

радиационного распада АИС в сравнении с электронным распадом, начиная с $z \approx 40$.

В §3.2 даны результаты расчетов сечений ионизации ионов Ti^{3+} и Zr^{3+} электронным ударом в припороговой области энергий. Впервые получено хорошее согласие с имеющимися экспериментальными данными. Как и в случае Na-подобных ионов большую роль играет определение точных волновых функций мишени, учет обмена и эффектов нормировки. Указано на необходимость учета релятивистских эффектов при определении коэффициентов ветвления B_1^A для переходов, запрещенных в "чистой" LS-связи. Показана также необходимость учета вклада переходов типа $pr^{6nd(n+1)l}$ с $l=0,1,2$, дающих вклад до 30% в полное сечение 4A .

Четвертая глава посвящена другому важному процессу рассеяния электронов на ионах - диэлектронной рекомбинации.

В §4.1 приведены основные соотношения, использованные нами при систематических расчетах процесса ДР. Рассмотрены особенности расчета энергий и волновых функций АИС в методе Хартри-Фока, а также приближения, использованные при расчете радиационного распада АИС и вероятностей автоионизации.

В §4.2. представлены рассчитанные нами данные по диэлектронной рекомбинации на He-подобных ионах Li^+ , C^{4+} , Al^{11+} и Ca^{18+} . Основное внимание было уделено детальным исследованиям этого процесса, которые включают в себя систематические расчеты по определению как полной скорости диэлектронной рекомбинации, так и скоростей заселения отдельных ионных уровней. Расчеты проводились с учетом АИС, расположенных под первым порогом возбуждения соответствующих ионов. Результаты численных расчетов скоростей ДР представлены в виде двухпараметрических аппроксимирующих зависимостей, параметры которых могут использоваться для ионов промежуточной кратности. Поскольку радиальные орбитали отдельных электронов сильно изменяются при переходе от одного состояния к другому и при изменении полного термина АИС, каждое из рассмотренных нами автоионизационных и связанных состояний рассчитывалось с полным самосогласованием по программе O.Froese-Fisher MCHF-77. Проведенные нами расчеты ДР на отдельные уровни позволили проанализировать характер заселенности различных уровней Li-подобных ионов вследствие ДР и вклад различных групп АИС в полную скорость ДР, в зависимости от z .

В заключении сформулированы основные выводы диссертации:

1. Проведены систематические расчеты сечений возбуждения He-подобных ионов Li^+ , C^{4+} , Al^{11+} и Ca^{18+} . Рассмотрены все переходы между уровнями конфигураций $1s^2$, $1s2l$ и $1s3l$ и их возбуждение на уровни $1s4l$ и $1s5l$ (всего 250 переходов на ион). Сечения переходов между и внутри конфигураций $1s^2$, $1s2l$ и $1s3l$ определены в рамках МСС, а для переходов $1s4l$ и $1s5l$ - в КБО-приближении с нормировкой по методу К-матрицы.

2. Рассчитаны сечения и скорости возбуждения Li-подобных ионов Be^+ , C^{3+} , Al^{10+} и Ca^{17+} в приближении КБО с нормировкой по методу К-матрицы. Рассмотрены все переходы между состояниями $1s^22l$ и $1s^23l$ (по 55 переходов на ион). Для Be^+ и C^{3+} были также проведены расчеты в рамках МСС пяти состояний для проверки точности результатов, полученных в рамках КБО.

3. Определены сечения и скорости возбуждения Be-подобных ионов C^{2+} и O^{4+} электронным ударом между состояниями $2s^2$, $2p^2$, $2s3l$ а также возбуждение этих состояний на уровни $4s4l$, $2s5l$ и $2p3l$ (всего по 450 переходов на ион). Расчеты проведены в КБО-приближении с нормировкой по методу К-матрицы.

4. Из анализа проведенных расчетов в рамках МСС и КБО сделан вывод о том, что метод КБО с учетом нормировки по методу К-матрицы в случае He-, Li- и Be-подобных ионов хорошо учитывает связь различных каналов рассеяния между собой и позволяет получать результаты, сравнимые по точности с МСС. Исключение составляют припороговые области в интеркомбинационных и монополярных переходах для ионов невысокой кратности ионизации.

5. Показано, что при столкновении Na-подобных ионов с электронами процессы ВА играют важную роль в широкой области энергий. Прямые расчеты сечений ионизации ионов Al^{2+} , Si^{3+} и Fe^{15+} электронным ударом позволили однозначно интерпретировать ступенчатые структуры в экспериментальных сечениях ионизации вышеуказанных ионов. Исследована зависимость сечений ионизации Na-подобных ионов электронным ударом от заряда иона z .

6. Подтверждена доминирующая роль процессов ВА при ионизации ионов Ti^{3+} и Zr^{3+} электронным ударом. Показана необходимость точного определения коэффициентов ветвления B_1^2 для определения сечений ВА в случае Zr^{3+} . Впервые получено хорошее согласие между теоретическими и экспериментальными сечениями ионизации этих ионов. Обсуждены возможные причины расхождения с экспериментом расчетов в рамках метода DW.

7. Проведены детальные расчеты скоростей ДР на He-подобных ионах $L1^+$, C^{4+} , Al^{11+} и Ca^{18+} . Учитывались АИС, расположенные под первым порогом возбуждения соответствующих ионов с конфигурациями $1s2s(1^3S)n1^2L$ и $1s2p(1^3P)n1^2L$ (всего учтено 92 АИС с квантовыми числами $n=2+7$, $l=0+5$, $L=0+6$). Определены скорости ДР на уровни соответствующих L1-подобных ионов с конфигурациями $1s^2n1^2L$ для $n=2+5$, $L=0+4$. Это дало возможность проанализировать характер заселенности различных уровней L1-подобных ионов вследствие ДР и вклад различных групп АИС в полную скорость ДР.

Проведенные в диссертации исследования были инициированы насущной потребностью в точных и полных данных по рассеянию электронов на многозарядных ионах в практических приложениях физики плазмы. Результаты, полученные в диссертации, были использованы для численного моделирования поведения высокотемпературной плазмы при разработке коротковолновых лазеров. Следует подчеркнуть, что представленные расчеты носят систематический характер и полученные в итоге результаты могут быть использованы как основа базы данных характеристик многозарядных ионов в плазме.

Результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Гедеон В.Ф., Зацаринный О.И., Сабад Е.П. Характеристики автоионизационных состояний натриеподобных ионов. - Труды III научного семинара по автоионизационным явлениям в атомах. Москва, 1985, с.108-109.

2. Гедеон В.Ф., Зацаринный О.И., Сабад Е.П. Вероятности радиационного и электронного распада автоионизационных состояний натриеподобных ионов. - Тезисы докладов IX Всесоюзной конференции по теории атомов и атомных спектров. Ужгород, 1985, с.14.

3. Гедеон В.Ф., Зацаринный О.И., Кривский И.Ю., Сабад Е.П. Влияние возбуждения автоионизационных состояний на сечение ионизации ионов Mg^+ , Al^{2+} , Si^{3+} электронным ударом. - Препринт КИЯИ-84-14, Киев, 1984, с.1-27.

4. Боровский А.В., Гедеон В.Ф., Зацаринный О.И., Заяц Т.М., Коробкин В.В., Лендбел В.И. Сечения и скорости возбуждения He-подобных ионов электронным ударом. - Институт общей физики АН СССР, Препринт No 223, Москва, 1987, с.1-37.

5. Боровский А.В., Гедеон В.Ф., Зацаринный О.И., Заяц Т.М., Коробкин В.В., Лендбел В.И. Сечения и скорости возбуждения He-подобных ионов электронным ударом на уровни с $n = 4, 5$. -

Институт общей физики АН СССР, Препринт No 49, Москва, 1988, с.1-45.

6. Боровский А.В., Гедеон В.Ф., Зацаринный О.И., Кардаш И.В. Физические характеристики гелиеподобных ионов в неравновесной плазме. - Математическое моделирование; 1989, т.1, No 4, с.26-44.

7. Боровский А.В., Гедеон В.Ф., Зацаринный О.И. Сечения и скорости возбуждения Li-подобных ионов электронным ударом. - Институт общей физики АН СССР, Препринт No 85, 1989, Москва, с.1-35.

8. Боровский А.В., Гедеон В.Ф., Зацаринный О.И., Заяц Т.М., Лендзел В.И. Сечения и скорости возбуждения Li⁺ электронным ударом. - Оптика и спектроскопия, 1989, т.66, вып.3, с.501-506.

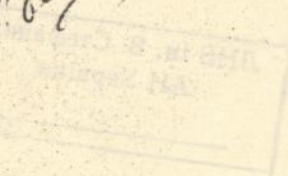
9. Гедеон В.Ф., Зацаринный О.И., Лендзел В.И. Вклад возбужденной автоионизации в сечения ионизации ионов Al²⁺, Si³⁺ и Fe¹⁵⁺ электронным ударом. - Оптика и спектроскопия, 1989, т.67, вып.2, с.257-262.

10. Боровский А.В., Гедеон В.Ф., Зацаринный О.И., Масалович Э.А. Сечения и скорости возбуждения Be-подобных ионов электронным ударом. - Институт общей физики АН СССР, Препринт No 48, Москва, 1990, с.1-45.

11. Гедеон В.Ф., Зацаринный О.И., Масалович Э.А. Сечения и скорости возбуждения Be⁺ электронным ударом. - Оптика и спектроскопия, 1990, т.69, вып.4, с.738-744.

12. Гедеон В.Ф., Зацаринный О.И., Масалович Э.А. Расчет сечений возбуждения Be-подобных ионов электронным ударом. - Тезисы докладов XI ВКЗАС, Чебоксары, 25-28 июня 1991г., с.9.

591607



ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

Подписано в печать: 23.04.93. Формат 60x90/16
Печ. л. 1,0. Заказ 922 Тираж 100

УПІК "Патент", ул. Гагарина, 101

AB 27.662