



004616946

На правах рукописи

КОНДРАТЬЕВ ДМИТРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

АТОМЫ И ИОНЫ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ: ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ, ПЕРЕХОДЫ ПРИ СТОЛКНОВЕНИИ С ПРОТОНАМИ И ПРИЛОЖЕНИЯ К КИНЕТИКЕ ПЛАЗМЫ

Специальность 01.04.21 – лазерная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2010

- 9 ДЕК 2010

Работа выполнена на кафедре квантовой радиофизики
(Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН)
Московского физико-технического института
(государственного университета)

Научный руководитель:

доктор физ.-мат. наук, профессор
Бейгман Израиль Львович

Официальные оппоненты:

доктор физ.-мат. наук,
Скобелев Игорь Юрьевич

кандидат физ.-мат. наук,
Демура Александр Викторович

Ведущая организация:

Учреждение Российской академии наук
Институт спектроскопии РАН

Защита состоится «17» декабря 2010 года в 10 часов на
заседании диссертационного совета Д 212.156.07 в Московском
физико-техническом институте (государственном университете) по
адресу: 141700, г. Долгопрудный Московской обл., Институтский
пер., д. 9.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МФТИ.

Автореферат разослан «12» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета Д 212.156.07
кандидат физико-математических наук

Коршунов С.М.

Общая характеристика работы

Актуальность работы

Свойства атомов и ионов во внешних электрических полях являются предметом интенсивных экспериментальных и теоретических исследований.

Статическая дипольная поляризуемость атомов и ионов представляет интерес как с фундаментальной точки зрения (например, исследование Т-нечетного электрического дипольного момента атомов [1]), так и для ряда приложений атомной физики, таких как прецизионная лазерная спектроскопия, разработка высокоточных стандартов частоты оптического диапазона (оптических часов) или измерение абсолютных значений напряженностей электрических полей. В последние годы интенсивно развивались методы теоретического расчета численных значений атомной поляризуемости основного и возбужденных состояний с различными значениями углового момента. Однако до сих пор имеются расхождения между теоретическими предсказаниями поляризуемости и данными экспериментальных исследований для возбужденных состояний. Поэтому теоретические вычисления атомной поляризуемости по-прежнему актуальны. Предлагаемый в настоящей диссертации метод расчета статических поляризуемостей позволяет расширить возможности количественного описания эффектов взаимодействия атомов и ионов с электрическими полями.

Излучение плазмы в основном определяется электронными процессами. Тем не менее существуют случаи, когда столкновения с тяжелыми частицами могут играть заметную роль: например, поляризационное излучение в плазме [2], переходы между компонентами тонкой структуры и др. Для переходов между компонентами тонкой структуры (когда рас-

щепление по энергии мало) соответствующие скорости переходов могут быть сравнимы и даже большие, чем для переходов, вызванных столкновениями с электронами. С точки зрения приложений в физике плазмы и астрофизике специальный интерес представляют переходы между компонентами тонкой структуры уровней с $n = 2, 3$ (поскольку для них имеет место LS -связь) в атоме He и He-подобных ионах.

Впервые линии многозарядных ионов наблюдались Милликенем [3] и Эдленом [4]. Новый этап в спектроскопических исследованиях горячей астрофизической и лабораторной плазмы в далеком ультрафиолетовом и рентгеновском диапазонах спектра связан с работами Алана Габриэля и Кэрл Джордан [5]. Спектроскопические методы являются наиболее универсальными, а зачастую (в случае астрофизической плазмы) и единственно возможными. Качество и точность спектроскопических методов диагностики и даже сама возможность их использования зависят от точности атомных данных и моделей излучающей плазмы. В настоящее время одним из объектов лабораторных исследований является горячая плазма токамаков, в которой электронная температура существенно превышает температуру ионизационного равновесия. Такая ионизирующаяся плазма и рассматривается в диссертации.

Цели и задачи диссертации

1. Разработка на базе программы АТОМ [6] сравнительно простого метода расчета поляризуемости, примененного к широкому классу уровней атомов и ионов.
2. Получение атомных данных для использования в кинетических расчетах (вероятностей, сечений и скоростей переходов между компонентами тонкой структуры атома He и He-подобных ионов, вызванных столкновениями с протонами).

3. Построение на базе программы GKU [7] столкновительно-радиационной модели He-подобных ионов C^{4+} , Mg^{10+} , Si^{12+} , Fe^{24+} и расчет на её основе отношений интенсивностей линий, представляющих интерес для диагностики плотности и температуры плазмы.

Научная новизна и достоверность

1. Впервые формулы для поляризуемостей атомов и ионов записаны в факторизованной форме.
2. Вычислены поляризуемости возбужденных состояний ряда щелочноподобных ионов.
3. Приведены оценки тензорной части поляризуемости для основного состояния атомов щелочных металлов Na, Rb, Cs.
4. Указаны случаи переходов между компонентами тонкой структуры, в которых вклад протонов значителен, и предложены соответствующие аппроксимационные формулы для скоростей переходов.
5. Исследована зависимость отношений интенсивностей линий $1s2l - 1s^2$ He-подобных ионов от параметров столкновительно-радиационной модели. Для рассмотренных отношений приведены аппроксимационные формулы. Предложены линии $1s3l - 1s2l'$, открывающие новые возможности для диагностики плотности и температуры плазмы.

Достоверность и обоснованность полученных результатов базируется на использовании апробированных методик и подтверждается публикациями в рецензируемых научных журналах и обсуждениями на конференциях.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Создание на базе программы АТОМ [6] программы для расчета скалярных и тензорных частей поляризуемостей атомов и ионов. Расчет на ее основе поляризуемостей основного и первых возбужденных состояний атомов He, Li, Na, K, Rb, Cs и их изоэлектронных ионов.
2. Расчеты сечений и скоростей возбуждения протонным ударом для переходов между компонентами тонкой структуры уровней с $n = 2, 3$ в He и He-подобных ионах C^{4+} и Fe^{24+} .
3. Создание столкновительно-радиационной модели ионов C^{4+} , Mg^{10+} , Si^{12+} , Fe^{24+} , включая расчет и оценку точности атомных данных. Применение построенной модели для диагностики плотности и температуры плазмы. Аппроксимационные формулы для отношений интенсивностей линий.

Практическая значимость работы

Созданное в ходе выполнения работы дополнение к программе АТОМ [6] дает возможность простой и быстрой оценки поляризуемости для широкого класса состояний, атомов и ионов.

Результаты этой работы также могут быть использованы для создания спектроскопических диагностик астрофизической и лабораторной плазмы, исследования и моделирования происходящих в ней процессов. В работе приведены конкретные рекомендации для диагностики плотности и температуры плазмы с помощью He-подобных ионов.

Апробация результатов работы

Основные результаты исследования опубликованы в журналах “Краткие сообщения по физике”, “Journal of Russian Laser Research” и “Журнал Экспериментальной и Теоретической Физики”, а также доложены на следующих конференциях: XXIV съезд и молодежная школа по оптике

и спектроскопии, 28 февраля - 5 марта 2010, Москва-Троицк; 52-ая научная конференция МФТИ, 2009, Москва-Долгопрудный; 10th European Conference on Atoms, Molecules and Photons (ECAMP X), 4-9 July, 2010, Salamanca, Spain. По материалам третьей главы в ноябре 2010 г. сделан семинарский доклад в Институте Физики Плазмы (исследовательский центр Юлих, ФРГ).

Личный вклад автора

Все результаты, представленные в этой работе, получены автором самостоятельно, или при его непосредственном участии.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и приложения. Общий объем диссертации составляет 99 страниц машинопечатного текста, включая 39 таблиц и 28 рисунков, а также список цитируемой литературы из 97 наименований.

Краткое содержание работы

Во введении представлен обзор исследований в областях, связанных с темой диссертации, перечислены области возможного применения полученных результатов, формулируются основные проблемы, рассматриваемые в диссертации и приведено краткое содержание ее отдельных глав.

Первая глава посвящена статической дипольной поляризуемости атомов и ионов. В рамках второго порядка теории возмущений поляризуемость уровня $|\gamma JM\rangle$ представлена в следующей, слегка отличающейся от “стандартной” (см., например, [8]) форме:

$$\alpha_{\gamma JM} = \alpha_{\gamma J}^{(0)} + \alpha_{\gamma J}^{(2)} \xi(M), \quad \xi(M) = (-1)^{J-M} \sqrt{5} [J] \begin{pmatrix} J & J & 2 \\ M & -M & 0 \end{pmatrix} \quad (1)$$

Здесь $\alpha_{\gamma J}^{(0)}$, $\alpha_{\gamma J}^{(2)}$ - скалярная и тензорная части поляризуемости соответственно, которые могут быть выражены через силу осциллятора $f(\gamma J, \gamma' J')$ и энергию перехода $\Delta E(\gamma' J', \gamma J) = E_{\gamma' J'} - E_{\gamma J}$ (используются атомные единицы с единицей Ry для энергии):

$$\alpha_{\gamma J}^{(0)} = \sum_{\gamma' J'} \frac{4f(\gamma J, \gamma' J')}{\Delta E(\gamma' J', \gamma J)^2}, \quad \alpha_{\gamma J}^{(2)} = \sum_{\gamma' J'} \phi(J, J') \frac{4f(\gamma J, \gamma' J')}{\Delta E(\gamma' J', \gamma J)^2} \quad (2)$$

$$\phi(J, J') = (-1)^{J+J'} \sqrt{6} [J] \begin{Bmatrix} 1 & 1 & 2 \\ J & J & J' \end{Bmatrix} \quad (3)$$

Тензорная часть определяет относительное расщепление подуровней с различными M и для состояний с $J = 0, 1/2$ равна нулю. Преимущество формы (1) состоит в удобстве аналитического суммирования по тем угловым моментам, различием в энергии для которых можно пренебречь. При этом в выражении для тензорной части появляется множитель χ , зависящий от угловых моментов, но всегда имеющий одну и ту же структуру. Например, если тонкое расщепление состояний γ' таково, что $\delta E(\gamma' J', \gamma' J'') \ll |E_{\gamma'} - E_{\gamma J}|$, сумма по J' в (2) автоматически дает выражения в приближении LS -связи:

$$\alpha_{\gamma J}^{(0)} = \sum_{\gamma'} \frac{4f(\gamma J, \gamma')}{\Delta E(\gamma', \gamma J)^2}, \quad \alpha_{\gamma J}^{(2)} = \chi(SLJ) \sum_{\gamma'} \phi(L, L') \frac{4f(\gamma J, \gamma')}{\Delta E(\gamma', \gamma J)^2} \quad (4)$$

$$\chi(SLJ) = (-1)^{L+S+J} [J] \begin{Bmatrix} J & J & 2 \\ L & L & S \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Если конечное состояние принадлежит непрерывному спектру, вместо сил осцилляторов используются сечения фотоионизации.

Аналогичным образом получаются формулы для поляризуемостей термов и компонент сверхтонкой структуры.

На основании полученных формул на базе комплекса АТОМ [6] была разработана программа, позволяющая путем прямого суммирования

матричных элементов с интегрированием по непрерывному спектру вычислять значения скалярных и тензорных частей поляризуемости. Приведены результаты расчетов для компонент тонкой структуры уровней S , P и D атомов He, Li, Na, K, Rb, Cs и их изоэлектронных ионов. При расчетах принималась во внимание поляризация атомного остова [9], отражающая взаимодействие остова с валентным электроном. Эффект поляризации оказывает заметное влияние на величину сил осцилляторов оптических переходов. В особенности это касается нерезонансных переходов, для которых вследствие интерференции волновых функций начального и конечного состояний значения f очень малы.

Анализ результатов показывает, что основной вклад в поляризуемость дают ближайшие возмущающие уровни. Вклад непрерывного спектра почти всегда мал (исключение – основное состояние He и Li^+). Вследствие наличия вкладов разных знаков тензорная часть более чувствительна к используемым приближениям. В некоторых случаях имеет место сильная компенсация положительных и отрицательных вкладов, что приводит к заметной погрешности при вычислении тензорной части. В большинстве случаев различие результатов с известными экспериментальными данными и значениями, полученными другими теоретическими методами, не превышает 10%.

Также приведены оценки тензорной части поляризуемости компонент сверхтонкой структуры для щелочных атомов, отличной от нуля вследствие сверхтонкого расщепления.

Во второй главе рассмотрены сечения переходов между компонентами тонкой структуры триплетных уровней с $n = 2, 3$ в He и He-подобных ионах при столкновениях с протонами. Специфика задачи состоит в присутствии виртуального уровня, связанного с компонентами мультиплета дипольно-разрешенными переходами. Квантовомеханический под-

ход в задачах о столкновительном возбуждении тяжелыми частицами требует учета чрезмерно большого числа парциальных волн. Поэтому более целесообразным оказывается метод параметра столкновения, в котором атом или ион (“мишень”) рассматривается как квантовая система, а налетающая частица - как точечный заряд Ze , движущийся по классической траектории. Возмущением является электростатическое взаимодействие $\hat{V} = Ze^2/|R - r|$ между оптическим электроном атома или иона и налетающей частицей. Расчет вероятностей и сечений возбуждения проводился методом сильной связи [10] для атома He и He-подобных ионов C^{4+} и Fe^{24+} . Волновые функции и соответствующие потенциалы взаимодействия вычислялись с помощью программы АТОМ [6]. В результате в сечении при средних скоростях столкновения ($v \sim v_0$, где v_0 - скорость на борновской орбите) возникает пик (см. рисунок 1), величина которого в ряде случаев значительно превышает сечение перехода при столкновениях с электронами. Также показано, что борновское приближение (с учетом нормировки) применимо при скоростях столкновений $v > 5v_0$.

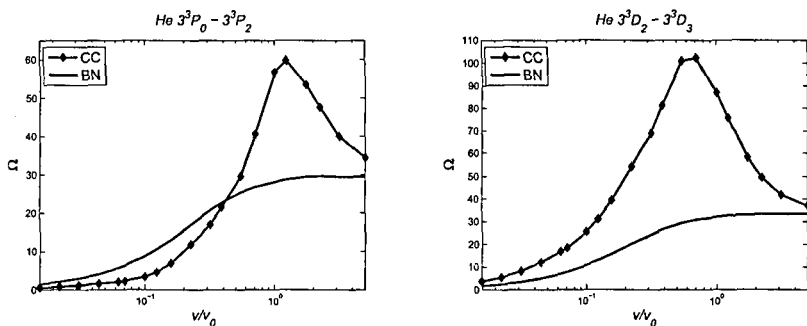


Рис. 1. Силы столкновения $\Omega = g_0\sigma \times (v/v_0)^2$ в He как функции скорости. CC - метод сильной связи, BN - приближение Борна (с нормировкой).

С помощью полученных сечений были вычислены скорости перехода

дов при столкновениях с протонами. Наличие пика в сечениях приводит к широкому максимуму в зависимости скоростей перехода от температуры (см. рисунок 2). Показано, что для переходов между компонентами тонкой структуры в среднем выполняется зависимость $\langle v\sigma \rangle \sim 1/Z^2$ (здесь Z - спектроскопический символ). Также определены значения температур, для которых скорости переходов из-за столкновений с протонами превышают соответствующие скорости при столкновениях с электронами. Для скоростей переходов предложена аппроксимационная формула с тремя параметрами. Приведены таблицы сечений, скоростей переходов и параметров аппроксимационной формулы.

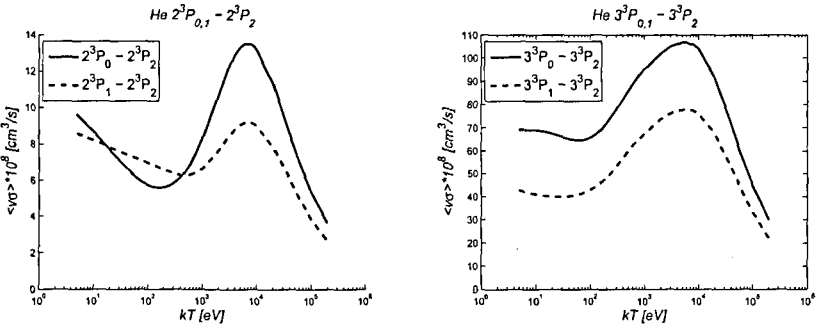


Рис. 2. Скорости переходов $2^3P_{0,1} - 2^3P_2$ и $3^3P_{0,1} - 3^3P_2$ в He при столкновении с протонами.

На рисунке 3 в качестве иллюстрации приведены скорости переходов $3^3P_0 - 3^3P_2$, $3^3P_1 - 3^3P_2$ в C^{4+} при столкновении с протонами и электронами. Можно видеть, что в области малых температур электронное возбуждение доминирует, однако с ростом температуры возбуждение протонными ударами становится существенным.

Глава 3 посвящена кинетическим приложениям. Для He-подобных ионов C V, Mg XI, Si XIII и Fe XXV в случае ионизирующей плазмы построены столкновительно-радиационные модели и вычислены относи-

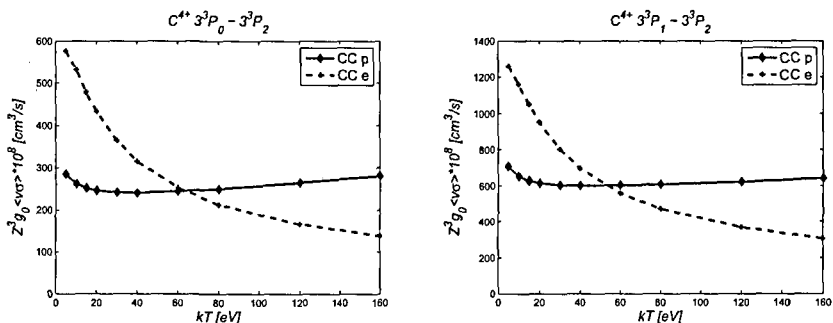


Рис. 3. Скорости переходов $3^3P_0 - 3^3P_2$, $3^3P_1 - 3^3P_2$ в C^{4+} при столкновении с протонами и электронами.

тельные интенсивности линий $1s2l - 1s^2$, представляющих интерес с точки зрения диагностики плотности и температуры. Линии $1s2l - 1s^2$ He-подобных ионов достаточно интенсивны и свободны от перекрывания с другими линиями. Для диагностики используются резонансная w ($1s2p^1P - 1s^2^1S$), запрещенная z ($1s2s^3S - 1s^2^1S$), магнитоквадрупольная и интеркомбинационная: x, y ($1s2p^3P_{2,1} - 1s^2^1S$). Относительная сила линий даётся отношениями $R = I_z / (I_x + I_y)$ и $G = (I_z + I_x + I_y) / I_w$ [5]. Благодаря столкновительным переходам $1s2s^3S - 1s2p^3P_{2,1}$ отношение R чувствительно к электронной плотности. Величина G чувствительна к температуре, поскольку зависимость от энергии сечений возбуждения триплетных ($\sigma \sim 1/E^3$) и синглетных ($\sigma \sim \ln E/E$) уровней существенно разная. При расчетах принимались во внимание радиационные распады, электрон-ионные столкновения и ионизация из возбужденных состояний. В модель были включены состояния $1s nlSL$ ($n \leq 5$) для всех SL . Тонкая структура учитывалась для уровней с $l < 3$. Уровни $4f$ и $5f$ рассматривались без детализации по J . Сечения и вероятности столкновительных переходов при столкновениях с электронами вычислялись в кулон-борновском приближении с помощью программы

АТОМ [6]. Приведены оценки точности атомных параметров. Расчет населенностей уровней и интенсивностей спектральных линий выполнялся с помощью программы GKU [7].

Исследование системы кинетических уравнений проводилось на примере иона Mg XI. Для простейшей 7-уровневой схемы, включающей состояния с $n = 1, 2$, качественно исследована зависимость отношений R и G от электронной плотности. Показано, что учет каскадных переходов через уровни с $n > 2$ изменяет результат количественно, не меняя его качественно. В качестве иллюстрации на рисунке 4 изображены R и G в зависимости от n_e при разном числе учитываемых уровней.

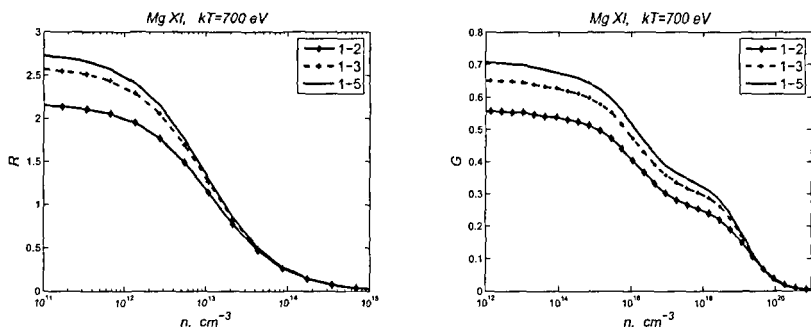


Рис. 4. Величины R и G для Mg XI при разном числе учитываемых уровней.

Для отношений R и G предложены аппроксимационные формулы и указаны области их применимости. Для диагностики плотности и температуры предложено использование следующих отношений интенсивностей линий $1s3l - 1s2l'$:

$$\frac{I(3^3P_{0,1,2} - 2^3S_1)}{I(3^1P_1 - 2^1S_0)}, \quad \frac{I(3^1S_0 - 2^1P_1)}{I(3^1P_1 - 2^1S_0)}, \quad \frac{I(3^3P_{0,1,2} - 2^3S_1)}{I(3^3D_{1,2,3} - 2^3P_{0,1,2})}$$

Выделены соответствующие области чувствительности. Показано, что в большинстве случаев учет столкновений с протонами не существен.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы диссертации.

В приложение вынесены формулы для угловых факторов, используемые при выводе выражений для поляризуемости.

Основные результаты диссертации

1. Формулы для расчета поляризуемостей термов, а также компонент тонкой и сверхтонкой структуры получены в факторизованной форме, удобной для последующего анализа и программирования. Для вычисления поляризуемостей создано дополнение к программе АТОМ [6]. Расчеты проведены для основного и первых возбужденных состояний S , P и D атомов He, Li, Na, K, Rb, Cs и щелочноподобных ионов Li^+ , Be^+ , B^{2+} , C^{3+} , Ne^{7+} , Mg^+ , Al^{2+} , Si^{3+} , Ar^{7+} , Ca^+ , Sc^{2+} , Ti^{3+} , Sr^+ и Ba^+ . Сравнение с имеющимися экспериментальными данными и результатами других расчетов показывает, что за исключением некоторых специальных случаев (аномальная компенсация) погрешность метода составляет порядка 10%. Также исследовано влияние поляризации атомного остова на общую поляризуемость системы. Развитый метод дает возможность простой и быстрой оценки поляризуемости для широкого класса состояний, атомов и ионов.
2. Вычислены сечения и скорости переходов (в зависимости от ионной температуры) между компонентами тонкой структуры уровней 2^3P , 3^3P , 3^3D атома He и He-подобных ионов C^{4+} и Fe^{24+} при столкновениях с протонами. Исследованы эффекты нормировки, взаимодействия каналов и ступенчатого механизма возбуждения. Сравнение результатов показывает, что борновское приближение применимо при скоростях столкновений $v > 5v_0$. В области $v \sim v_0$

силы столкновений для разрешенных переходов имеют пик, отсутствующий при расчете методом Борна. Предложены аппроксимационные формулы для скоростей переходов. Определены области температур, в которых столкновения с протонами доминируют над столкновениями с электронами. Для скоростей переходов в среднем выполняется зависимость $\langle v\sigma \rangle \sim 1/Z^2$.

3. Построены столкновительно-радиационные модели ионов C^{4+} , Mg^{10+} , Si^{12+} , Fe^{24+} и проведены расчеты относительных интенсивностей линий, представляющих интерес с точки зрения диагностики плотности и температуры плазмы. Исследована зависимость относительных интенсивностей линий от параметров столкновительно-радиационной модели. Для используемых отношений предложены аппроксимационные формулы. Показано, что в случае малых температур плазмы влияние протонов слабое. Исследована возможность использования линий $1s3l - 1s2l'$. Для рассмотренных отношений интенсивностей выделены области чувствительности к плотности и температуре.

Публикации по теме диссертации

1. Д.А.Кондратьев, И.Л.Бейгман, Л.А.Вайнштейн, *Поляризуемость щелочных атомов*, Краткие сообщения по физике, № 12, 2008 - С. 3-13.
2. D.A.Kondratjev, I.L.Beigman, and L.A.Vainshtein, *Static polarizabilities of Helium and alkali atoms, and their isoelectronic ions*, Journal of Russian Laser Research, Vol. 31, No. 3, 2010.
3. Д.А.Кондратьев, И.Л.Бейгман, *Переходы между компонентами тонкой структуры в He и He-подобных ионах при столкновениях*

с протонами, ЖЭТФ, вып. 5, том 138, 2010.

4. Д.А.Кондратьев, И.Л.Бейгман, *Скорости переходов между компонентами тонкой структуры в He и He-подобных ионах при столкновениях с протонами*, Краткие сообщения по физике, № 11, 2010 - С. 37-46.
5. Д.А.Кондратьев, И.Л.Бейгман, *Диагностика горячей плазмы по спектрам He-подобных ионов*, Краткие сообщения по физике, № 12, 2010 - С. 3-13.
6. Д.А.Кондратьев, И.Л.Бейгман, Л.А.Вайнштейн, *Статическая поляризуемость щелочноподобных атомов и ионов*, XXIV съезд и молодежная школа по оптике и спектроскопии, 28 февраля - 5 марта 2010, Москва-Троицк. Тезисы докладов - С. 32-33.
7. Д.А.Кондратьев, И.Л.Бейгман, Л.А.Вайнштейн, *Статическая поляризуемость гелия, щелочных атомов и ионов*, 52-ая научная конференция МФТИ, Москва-Долгопрудный, 2009. Тезисы докладов - С. 54-57.
8. D.A.Kondratjev, I.L.Beigman, *The transitions between the fine-structure components of the triplet levels in He and He-like ions induced by collisions with protons*, 10th European Conference on Atoms, Molecules and Photons (ECAMP X), 4-9 July, 2010, Salamanca, Spain, Book of abstracts - P. 62.

Работы [1-5] опубликованы в изданиях, соответствующих перечню ВАК РФ.

Литература

- [1] *И.И.Собельман, В.Н.Сорокин // УФН. — 2005. — Т. 175. — С. 978.*
- [2] *М.Я.Амусья, В.М.Буймистров, Б.А.Зои. Поляризационное тормозное излучение частиц и атомов. — Москва, Наука, 1987.*
- [3] *I.S.Bowen, R.A.Millikan // Phys. Rev. — 1925. — Vol. 25. — P. 591.*
- [4] *B.Edlén, F.Tyrén // Nature. — 1939. — Vol. 143. — P. 940.*
- [5] *A.H.Gabriel, C.Jordan // MNRAS. — 1969. — Vol. 145. — P. 241.*
- [6] *V.P.Shevelko, L.A.Vainshtein. Atomic Physics for Hot Plasmas. — IOP, Bristol, 1993.*
- [7] *I.L.Beigman, G.Kocsis, A.Pospieszczyk, L.A.Vainshtein // Plasma Phys. Control. Fusion. — 1998. — Vol. 40. — P. 1689.*
- [8] *Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Теоретическая физика, том III. Квантовая механика. — Москва, Наука, 1989.*
- [9] *S.Hameed, A.Herzenberg, M.James // J. Phys. B (Proc. Phys. Soc.). — 1968. — Vol. 2. — P. 822.*
- [10] *D.Borodin, I.Beigman, L.Vainshtein, A.Pospieszczyk // Phys. Scripta. — 2006. — Vol. 74. — P. 464.*

Кондратьев Дмитрий Александрович

**АТОМЫ И ИОНЫ ВО ВНЕШНЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПО-
ЛЕ: ПОЛЯРИЗУЕМОСТЬ, ПЕРЕХОДЫ ПРИ СТОЛКНОВЕ-
НИИ С ПРОТОНАМИ И ПРИЛОЖЕНИЯ К КИНЕТИКЕ
ПЛАЗМЫ**

АВТОРЕФЕРАТ

Подписано в печать 10.11.10. Формат 60 × 84 $\frac{1}{16}$.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 60 экз. Заказ № ф-174.

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Московский физико-технический институт (государственный университет)»
Отдел автоматизированных издательских систем «ФИЗТЕХ-ПОЛИГРАФ»
141700, Московская обл., г. Долгопрудный, Институтский пер., 9