



На правах рукописи

Никитина Елизавета Андреевна

**Оптические свойства ридберговских ионов
щелочноземельных элементов**

01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2016

Работа выполнена в *ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет»*.

Научный руководитель: *доктор физико-математических наук, профессор Овсянников Виталий Дмитриевич*

Официальные оппоненты: *Лисица Валерий Степанович, доктор физико-математических наук, профессор, Национальный исследовательский центр (НИЦ) "Курчатовский институт", начальник лаборатории*

Преображенский Михаил Артемьевич, кандидат физико-математических наук, ФГБОУ ВО «Воронежский государственный архитектурно-строительный университет», строительно-технологический институт, кафедра физики, доцент

Ведущая организация: *ФГАОУ ВПО «Московский физико-технический институт (государственный университет)»*

Защита состоится 2 июня 2016 г. в 15¹⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.038.06 при Воронежском государственном университете, 394006, г. Воронеж, Университетская пл., д. 1, ауд. 428.

С диссертацией можно ознакомиться в Зональной научной библиотеке Воронежского государственного университета и на сайте вуза по адресу <http://www.science.vsu.ru/disser>.

Автореферат разослан 29 апреля 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,

доктор физико-математических наук, профессор

Дроздин С.Н.

Общая характеристика работы

Актуальность работы. В последние годы многие международные исследовательские группы проявляют интерес к изучению оптических характеристик ионов групп IIa и IIb. Ионы щелочноземельных элементов являются подходящими объектами для создания новых стандартов частоты и времени, активно используются в экспериментах с квантовыми затворами, а также играют большую роль в астрофизических исследованиях, а структура энергетического спектра щелочноземельных ионов позволяет выполнить аналитический расчет их оптических характеристик и провести оценку влияния внешних полей на эти характеристики [1], [2], [3],[4].

Щелочноземельные ионы достаточно удобны для исследования: ионы группы IIa содержат только один электрон на внешней оболочке, что позволяет значительно упростить расчеты и применять для вычислений водородоподобные волновые функции, наличие же метастабильных D -уровней в энергетическом спектре ионов Ca^+ , Sr^+ , Ba^+ дает возможность использовать эти ионы при создании новейших стандартов частоты-времени в ионных ловушках [5],[6],[7].

Особое место как в атомной физике в целом, так и в экспериментах с щелочноземельными ионами в частности, занимают исследования высоковозбужденных, ридберговских уровней ионов, что обусловлено некоторыми присущими им специфическими свойствами.

Атомы, молекулы и ионы, в которых один или более электронов находятся в высоковозбужденных состояниях с главным квантовым числом $n \gg 1$, принято называть ридберговскими. Такие специфические объекты характеризуются высокой чувствительностью к внешним полям и большими дипольными моментами, благодаря чему при взаимодействии ридберговских объектов проявляются уникальные особенности, не характерные для взаимодей-

ствия атомов, ионов и молекул в низковозбужденных состояниях – квантовая спутанность и дипольная ридберговская блокада [8], лавинное тушение ридберговских электронов [9, 10]. Кроме того, высоковозбужденные состояния обладают большими временами жизни, что способствует их применению в тех экспериментах, где время манипуляции с атомами сравнимо со временем распада низковозбужденного состояния.

Высокая чувствительность ридберговских состояний к внешним полям, в том числе к полю теплового излучения, находит применение в экспериментах по прецизионному измерению температуры, в случае, когда классические методы не могут быть применены [11].

Дополнительным преимуществом исследования ридберговских состояний представляется возможность квазиклассического подхода к описанию движения электрона, что позволяет не только выполнить расчет оптических характеристик таких состояний, но и выявить асимптотические закономерности и построить новые модели внутриатомных и межатомных взаимодействий.

Цель диссертационной работы – теоретическое исследование влияния теплового излучения на оптические свойства ионов группы IIa периодической системы элементов; численные расчеты и построение асимптотических формул для достоверных оценок спонтанных ширин и термоиндуцированных сдвигов и уширений ридберговских уровней энергии ионов. Для достижения поставленной цели проведены следующие исследования:

1. Выполнено сравнение эффективности методов квантового дефекта (МКД) и модельного потенциала Фьюса (МПФ) в расчетах одноэлектронных амплитуд радиационных переходов.
2. Выявлено нарушение правила Томаса-Райхе-Куна [12] в расчетах сумм сил осцилляторов одноэлектронных радиационных переходов, приводя-

щее к некорректности оценок количественных характеристик термоиндуцированных процессов в формализме МПФ, определены области эквивалентности и границы применимости МКД и МПФ.

3. Проведены численные расчеты естественных времен жизни, а также термоиндуцированных сдвига и уширения для уровней щелочноземельных ионов в широком диапазоне главных квантовых чисел n при температуре теплового излучения $T = 100 - 2000$ К.
4. Построены простые аппроксимационные формулы для определения естественных ширин уровней щелочноземельных ионов, определена зависимость времени жизни уровней ионов от главного квантового числа n , орбитального момента l , температуры окружающей среды T .

Научная новизна. В диссертационной работе и публикациях по теме диссертации впервые представлены расчеты времен жизни, термоиндуцированных сдвигов и уширений для большого числа возбужденных состояний, в том числе ридберговских, ионов группы IIa ; для всех оптических характеристик выявлены и построены простые аппроксимационные зависимости свойств от главного квантового числа и температуры, предложен простой способ оценки вкладов процессов ионизации в штарковский сдвиг и уширение. В процессе исследования выявлены пределы применимости метода квантового дефекта и метода модельного потенциала Фьюса для расчета оптических свойств энергетических состояний.

Практическая значимость. Результаты, полученные в работе, представляют интерес для экспериментов, при проведении которых нужна одновременная оценка оптических характеристик большого количества уровней, например, при выборе вспомогательных объектов, в частности, для построения стандарта частоты-времени на ионах в ловушках, прецизионных изме-

рений слабых остаточных полей при конструировании мазеров в среде ридберговских ионов. Оценка времени жизни и термоиндуцированных эффектов может быть полезна при выборе наиболее долгоживущих, но при этом наименее подверженных влиянию внешних полей состояний, например, в процессе проектирования квантовых логических устройств.

Исследование ридберговских состояний, не затрудненное решением многочастичных задач, способствует усовершенствованию моделей внутриатомных потенциалов и межатомных взаимодействий. Кроме того, характеристики некоторых низковозбужденных состояний могут быть получены интерполяцией из ридберговской области с большими главными квантовыми числами.

На защиту выносятся следующие основные результаты и положения:

1. Определение границ применимости модельного потенциала Фьюса в расчетах спонтанных и термоиндуцированных радиационных переходов в ионах щелочноземельных элементов.
2. Зависимость результатов расчета сумм сил осцилляторов от параметров модельного потенциала Фьюса.
3. Использование правила суммирования сил осцилляторов для оценки вклада состояний континуума в штарковские сдвиг и уширение высоковозбужденных энергетических уровней.
4. Асимптотические формулы для достоверной оценки скоростей термоиндуцированных переходов из ридберговских состояний ионов щелочноземельных элементов.
5. Асимптотические аппроксимации для термоиндуцированных энергетических сдвигов.

Апробация работы.

Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

1. ICOM 2012. The 3d Int. Conf. On the Physics of Optical Materials and Devices. September 2-6, 2012, Belgrade, Serbia.
2. 6-й Международный симпозиум «Метрология времени и пространства», 17-19 сентября, 2012, Россия, Менделеево.
3. ICONO/LAT, June 18-22, 2013, Russia, Moscow.
4. 11th International Colloquium on Atomic Spectra and Oscillator Strengths for Astrophysical and Laboratory Plasma, August 5-9, 2013, Mons Belgium.
5. XX Конференция по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС-XX), 23 – 27 сентября, 2013, Россия, Воронеж.
6. Совещание по прецизионной физике и фундаментальным физическим константам, 7-11 октября, 2013, Санкт-Петербург, Пулковое.
7. 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems – CEPAS 2014, July 9-12, 2014, Bratislava, Slovakia.
8. IFCS-EFTF Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum, April 12-16, 2015, USA, Denver, Colorado.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах, из них 5 статей в рецензируемых журналах [A1]-[A5] и 9 тезисов докладов [A6]-[A14].

Личный вклад автора.

Определение основной концепции, целей и задач исследования осуществлялось научным руководителем Овсянниковым В.Д. Анализ методов и интерпретация результатов проведены автором совместно с научным руководителем. Практически все представленные результаты расчетов и алгоритмы их реализации получены лично автором независимо от соавторов публикаций. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад диссертанта был существенным. Содержание диссертации отражает персональный вклад автора в опубликованные работы.

Структура и объем диссертации.

Диссертация состоит из введения, 3 глав, заключения, библиографии и приложений. Общий объем диссертации 111 страница, включая 22 таблицы, 4 рисунка. Библиография включает 96 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулирована цель и аргументирована научная новизна исследований, показана практическая значимость полученных результатов, представлены выносимые на защиту научные положения.

В первой главе описаны основные оптические характеристики энергетических состояний ионов, исследовано влияние теплового излучения на атомные и ионные энергетические уровни.

В разделе **1.1** вводятся понятия естественной ширины уровня Γ_{nl} и естественного времени жизни τ_{nl} , приведены аналитические выражения для численных расчетов этих оптических характеристик, основывающиеся на общей формуле теории квантовых переходов [13], которую в атомной системе единиц

$e = m = \hbar = 1$ можно записать в виде

$$\Gamma_{nl} = \frac{4}{3c^3} \sum_{n', l' = l \pm 1} \omega_{nn'}^3 |M_{nn'}|^2 = \frac{1}{\tau_{nl}}, \quad (1)$$

где $\omega_{nn'} = E_{nlj} - E_{n'l'j'}$ – частота радиационного перехода, $M_{nn'} = \langle nlj | \mathbf{D} | n'l'j' \rangle$ – дипольный матричный элемент.

Раздел **1.2** посвящен описанию терминдуцированных внутриатомных переходов, определяющих комплексный штарковский сдвиг уровня в рамках метода квазиэнергетических состояний. Обсуждаются индуцированные тепловым излучением черного тела сокращение времени жизни и энергетический сдвиг уровня, выделяется вклад отдельных типов внутриатомных переходов в итоговые значения исследуемых свойств.

Комплексный штарковский сдвиг в поле теплового излучения можно представить в виде:

$$\Delta E_{nl}(T) = \varepsilon_{nl}^{BBR}(T) - i \frac{\Gamma_{nl}^{BBR}(T)}{2}. \quad (2)$$

С помощью спектрального разложения функции Грина для квазиэнергетических состояний [14] и с использованием функции Фарлея-Винга $F(x)$ [15], получим штарковские сдвиг и уширение в следующей форме:

$$\varepsilon_{nl}^{BBR} = -\frac{2(kT)^3}{3\pi c^3(2l+1)} \sum_{l'=l\pm 1} l_{>} \left\{ \sum_{n'} |\langle n'l' | r | nl \rangle|^2 F\left(\frac{\omega_{nn'}}{kT}\right) + \int_0^{\infty} |\langle \varepsilon l' | r | nl \rangle|^2 F\left(\frac{\varepsilon + |E_{nl}|}{kT}\right) d\varepsilon \right\}, \quad (3)$$

$$\Gamma_{nl}^{BBR} = \frac{4}{3c^3(2l+1)} \sum_{l'=l\pm 1} l_{>} \left\{ \sum_{n'} \frac{|\omega_{nn'}|^3 |\langle n'l' | r | nl \rangle|^2}{e^{|\omega_{nn'}|/kT} - 1} + \int_0^{\infty} \frac{|\langle \varepsilon l' | r | nl \rangle|^2 (\varepsilon + |E_{nl}|)^3}{e^{(\varepsilon + |E_{nl}|)/kT} - 1} d\varepsilon \right\}. \quad (4)$$

Постоянную Больцмана k , определяющую количество энергии на единицу температуры T , в атомных единицах можно представить в виде $k = 1/T_a$, где $T_a = 315776$ К — атомная единица температуры.

Термоиндуцированный сдвиг ε_{nl}^{BBR} определяет смещение положения энергетического уровня, а уширение уровня Γ_{nl}^{BBR} обуславливает сокращение естественного времени жизни τ_{nl} , происходящее за счет роста скорости распада в поле теплового излучения. В выражениях (3), (4) содержатся рассмотренные в диссертации вклады переходов в дискретные состояния с энергией $E_{n'l'} < E_{nl}$ (распады) и с $E_{n'l'} > E_{nl}$ (возбуждения), а также вклад переходов в непрерывный спектр (ионизация).

В разделе 1.3 представлены основные выводы к первой главе, обозначены дальнейшие этапы исследования, необходимые для выполнения численных расчетов.

Во второй главе исследованы модели атомного потенциала, позволяющие получить аналитические выражения для радиальных матричных элементов дискретно-дискретных и дискретно-непрерывных переходов; соответствующие аналитические зависимости необходимы для описания свойств уровней, выражающихся через матричные элементы. Численные методы, не предполагающие получения аналитических выражений для волновых функций, оказываются непригодными для расчетов матричных элементов радиационных переходов между состояниями с достаточно большими главными квантовыми числами n .

В разделе 2.1 главы 2 описан метод квантового дефекта и его модификации [14, 16, 17], сформулирован класс объектов и процессов, для расчетов которых применение МКД позволяет получить хорошую точность.

Раздел 2.2 посвящен теории псевдопотенциала, позволяющей построить модель взаимодействия ядра и остаточных электронов с оптическим электроном и перейти к рассмотрению движения оптического электрона в поле

псевдопотенциала; сформулированы основные требования, которым должен удовлетворять модельный потенциал [18].

В разделе **2.3** описан потенциал, учитывающий кулоновское и виртуально "дипольное" взаимодействия, определены основные параметры этого потенциала [19]. Анализ показал, что метод достаточно хорошо применим к описанию спонтанных переходов в атомах и ионах, однако в расчетах термоиндуцированных переходов по методу МПФ могут быть значительные погрешности в случаях, если параметры B_l "дипольного" слагаемого потенциала велики. С этим обстоятельством связано отклонение суммы сил осцилляторов, рассчитанной с волновыми функциями МПФ, от правила сумм Томаса-Райхе-Куна (раздел **2.4**).

В разделе **2.5** приведено сравнение результатов численных расчетов времен жизни низковозбужденных состояний, выполненных методами МПФ и МКД, с наиболее достоверными данными литературы [20, 21].

Модельный потенциал, предложенный Г. Саймонсом [19], выглядит следующим образом:

$$\hat{V}_F(\mathbf{r}) = -\frac{Z}{r} + \sum_l \frac{B_l \hat{P}_l}{r^2}. \quad (5)$$

При решении уравнения Шредингера с потенциалом такого вида орбитальный момент l замещается эффективным орбитальным параметром λ , определяемым выражением

$$\lambda = \sqrt{\left(l + \frac{1}{2}\right)^2 + 2B_l} - \frac{1}{2}. \quad (6)$$

Для ридберговских состояний с энергией связи $|E_{nl}| \ll kT$ термоиндуцированные сдвиг и уширение ридберговских состояний могут быть выражены через суммы сил осцилляторов:

$$S_{nl}(q) = \sum 2\omega_{n'l'nl}^{q+1} |\langle n'l' | z | nl \rangle|^2. \quad (7)$$

Тепловой сдвиг ε_{nl}^{BBR} пропорционален $S_{nl}(0)$, тепловое уширение Γ_{nl}^{BBR} пропорционально $S_{nl}(1)$, (подробнее этот вопрос рассмотрен в разделах **3.2**, **3.3**). Полученные выражения, демонстрируют зависимость $S_{nl}(q)$ от параметров модельного потенциала, и, как следствие, нарушение правила сумм:

$$S_{nl}(0) = 1 + \frac{2}{3(2l+1)} \sum_{l'=l\pm 1} l_{>} (B_{l'} - B_l), \quad (8)$$

$$S_{nl}(1) = \frac{2Z^2}{3\nu_{nl}^2} \left[1 + \frac{1}{\nu_{nl}(\lambda + 1/2)(2l+1)} \sum_{l'=l\pm 1} l_{>} ((B_l - B_{l'})^2 + (-1)^{l_{>}-l+1} (l_{>} + 2l + 1) B_{l'} - 2B_l) \right]. \quad (9)$$

Здесь $l_{>} = (l + l' + 1)/2$ - бóльшая из величин l и l' : $l_{>} = l + 1$ ($l_{>} = l$) для $l' = l + 1$ ($l' = l - 1$).

Результатом **главы 2** стал вывод о том, что методы модельного потенциала и квантового дефекта имеют сопоставимую точность при расчете естественных ширин уровней, а также могут применяться альтернативно при расчетах термоиндуцированных переходов из состояний, для которых параметры модельного потенциала B_l , B_{l-1} , B_{l+1} невелики, однако в общем случае расчеты по методу МПФ внутриатомных процессов, порождаемых тепловым излучением, могут содержать существенные погрешности.

Третья глава диссертации посвящена расчетам вероятностей радиационных переходов, спонтанных и индуцированных излучением черного тела, анализу их зависимостей от n и T , построению асимптотических аппроксимаций. Представлены таблицы с результатами расчетов методом МКД естественной и термоиндуцированной скоростей распада, причем в последней выделен вклад переходов на нижележащие и вышележащие энергетические уровни, приведены графики зависимости величины энергетического сдвига от главного квантового числа при фиксированных температурах для уровней с $n \leq 40$. Рассматривается изменение времени жизни уровня с ростом главного квантового числа n , зависимость от n и T отдельных компонент

штарковского уширения при высоких n . Предложен метод оценки вклада переходов в непрерывный спектр в термоиндуцированные сдвиг ε_{nl}^c и уширение Γ_{nl}^c энергетических состояний ридберговских ионов с достаточно большим главным квантовым числом n используя прямую пропорциональность вкладу непрерывного спектра в соответствующую сумму сил осцилляторов $S_{nl}^c(q) = S_{nl}(q) - S_{nl}^d(q)$, определяемого по сумме $S_{nl}^d(q)$ конечного числа членов ряда по дискретным состояниям

$$\begin{aligned} S_{nl}(0) &= 1, \quad S_{nl}(1) = 2Z^2/3\nu_{nl}^2, \\ \frac{\varepsilon_{nl}^c}{\varepsilon_{nl}^{BBR}} &= \frac{S_{nl}^c(0)}{S_{nl}(0)}, \quad \frac{\Gamma_{nl}^c}{\Gamma_{nl}^{BBR}} = \frac{S_{nl}^c(1)}{S_{nl}(1)}. \end{aligned} \quad (10)$$

Для оценки скоростей распадов, возбуждений, ионизации введены относительные скорости, впервые представленные в работе [22], полиномиальные зависимости этих коэффициентов модифицированы для перехода от атомов к ионам, показано отклонение термоиндуцированного сдвига от зависимости, представленной в работе Куке-Галагера [23],

$$R^{d,e} = \frac{a_0(T)^{d,e} + a_1^{d,e}(T)x + a_2^{d,e}(T)x^2}{(n/2)^2 \left(e^{\frac{Z^2 T_a}{n^3 T}} - 1 \right)}, \quad R^c = \frac{a_0(T)^c + a_1(T)^c y + a_2(T)^c y^2}{(n)^{4/3} \left(e^{\frac{Z^2 T_a}{2n^2 T}} - 1 \right)}, \quad (11)$$

выявлена слабая зависимость сдвига от главного квантового числа n , аппроксимируемая выражением вида:

$$\varepsilon = \varepsilon_0 (T/300)^2 (b_0(T) + b_1(T)z + b_2(T)z^2) \quad (12)$$

В выражениях (11, 12) аргументы x , y , z зависят от главного квантового числа n и температуры излучения T .

На рисунке 1 представлены зависимости относительных скоростей термоиндуцируемых переходов от температуры и номера уровня, а также соответствующие зависимости для полного времени жизни энергетических уровней ионов Ca^+ .

$$\tau_{nl} = (\Gamma_{nl} + \Gamma_{nl}^d + \Gamma_{nl}^e + \Gamma_{nl}^c)^{-1}. \quad (13)$$

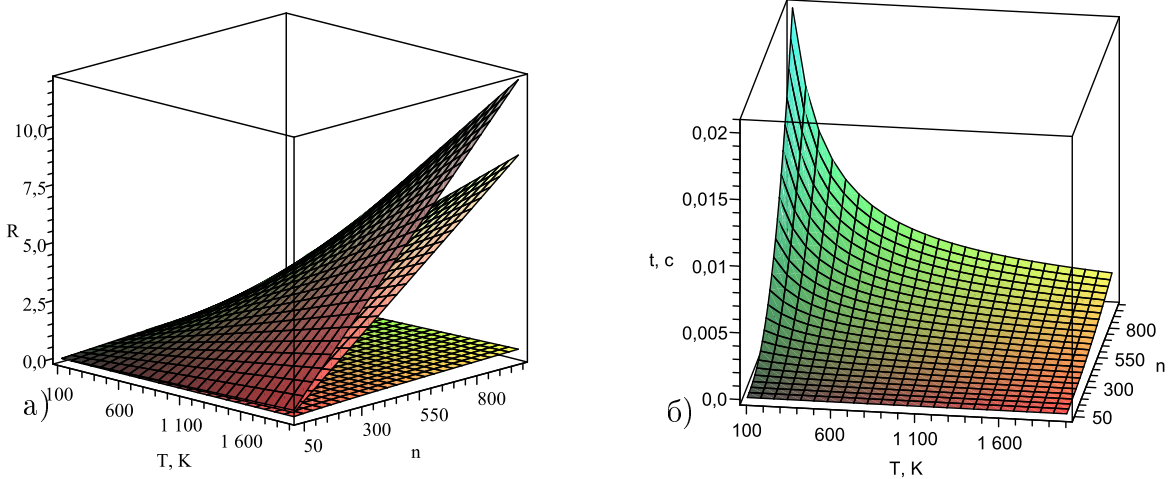


Рис. 1. а) Зависимости от главного квантового числа и температуры относительных вкладов вероятностей переходов в состояния дискретного спектра $|n'l\pm 1\rangle - E_{nl} > E_{n'l'}$ (верхняя поверхность, R^d), $E_{nl} < E_{n'l'}$ (средняя поверхность, R^e) и переходов в непрерывный спектр $|El \pm 1\rangle$ (нижняя поверхность R^c) в полную ширину уровня $|nl\rangle$ для nS -состояний Ca^+ . б) Полное время жизни nS -уровня Ca^+ при различных n и T

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации:

1. Определен критерий применимости полуэмпирических моделей атомного потенциала в расчетах амплитуд спонтанных и термоиндуцированных радиационных переходов.
2. Выявлены существенные различия в применимости полуэмпирических методов МПФ и МКД в расчетах оптических характеристик, определяющихся численными значениями спектральных сумм сил осцилляторов атомов и ионов.
3. Определены вклады различных компонент дискретного спектра и континуума в количественные характеристики термоиндуцированных сдвигов и уширений ридберговских состояний.
4. Получены аналитические соотношения для оценки вклада непрерывно-

го спектра в сдвиг и уширение ридберговских уровней энергии тепловым излучением.

5. Предложены асимптотические аппроксимации и определены численные значения коэффициентов аппроксимационных полиномов, определяющих количественные характеристики спонтанных и термоиндуцированных радиационных процессов в ридберговских ионах щелочноземельных элементов.

Список публикаций

Публикации в изданиях, входящих в Перечень ВАК РФ

- A1. Глухов, И. Л. Времена жизни ридберговских состояний ионов II группы / И. Л. Глухов, Е. А. Никитина, В. Д. Овсянников // Оптика и Спектроскопия. — 2013. — Т. 115. — № 1. — С. 12–21. (Optics and Spectr. — 2013. — Vol. 115. — №.1. — P. 9–17).
- A2. Glukhov, I. L. Natural lifetimes of excited states in the group II ions // I. L. Gluhov, E. A. Nikitina, V. D. Ovsianikov // Вестник ВГУ. Серия Физика. Математика. — 2013. — № 2. — С. 33–53.
- A3. Glukhov, I. L. Thermal shifts and broadening of Rydberg levels in Be II ions / I. L. Gluhov, E. A. Nikitina, V. D. Ovsianikov // Phys. Scr. — 2013. — Vol. 157. — 6pp.
- A4. Gluhov, I. L. Natural widths and blackbody radiation induced shift and broadening of Rydberg levels in magnesium ions / I. L. Glukhov, S. N. Mokhnenko, E. A. Nikitina, V. D. Ovsianikov // Eur. Phys. J. D. — 2015. — Vol. 69, № 1. — 7 pp.

A5. Glukhov, I. L. Blackbody-radiation-induced shifts and the broadening of Rydberg states in the ions of group IIa elements / I. L. Gluhov, E. A. Nikitina, V. D. Ovsyannikov // J. Phys. B. — 2016. — Vol. 49. — 16 pp.

Другие статьи и материалы конференций

A6. Glukhov, I. L. Thermal shifts and broadening of Rydberg levels in Be II ions / I. L. Glukhov, E. A. Nikitina and V. D. Ovsyannikov // ICOM 2012. The 3d Int. Conf. On the Physics of Optical Materials and Devices. Belgrade, Serbia. Book of abstracts. — P. 169.

A7. Овсянников, В. Д. Тепловые сдвиги и уширения энергетических уровней в ионах Be II / В. Д. Овсянников, И. Л. Глухов, Е. А. Никитина // Материалы 6-го Международного симпозиума «Метрология времени и пространства». 17—19 сентября 2012, Россия, Менделеево, — С. 94—98.

A8. Chernushkin, V. V. Thermal Shifts and Broadening of Energy Levels in the Group II Ions / V. V. Chernushkin, I. L. Glukhov, S. N. Mokhnenko, E. A. Nikitina, V. D. Ovsyannikov // ICONO/LAT Conf. Program. — IWR11. — P. 66. — Moscow, June 18—22, 2013. — Technical Digest ICONO-03. — P. 55—56.

A9. Nikitina E. A. Lifetimes of rydberg states in ions of the group II elements / E. A. Nikitina, I. L. Gluhov, V. D. Ovsyannikov // 11th International Colloquium on Atomic Spectra and Oscillator Strengths for Astrophysical and Laboratory Plasma. — ASOS 2013. Contributed papers. Mons — 2013. — P. 87.

A10. Глухов, И. Л. Термоиндуцированные сдвиги и уширения уровней энергии в ионах II группы / И. Л. Глухов, Е. А. Никитина, В. Д. Овсянников //

XX Конференция по фундаментальной атомной спектроскопии — ФАС-XX. Воронеж — 2014. — С. 158—160 23—27 сентября, 2013, Воронеж.

A11. Чернушкин, В. В. Стандарты частоты нового поколения на основе ионов алюминия и магния / В. В. Чернушкин, С. Н. Мохненко, Е. А. Никитина, В. Д. Овсянников // Сборник тезисов докладов конференции и школы молодых ученых по фундаментальной атомной спектроскопии ФАС-XX 23—27 сентября 2013 г. — Воронеж. — С. 210.

A12. Чернушкин, В. В. Влияние теплового излучения на оптические характеристики ионов щелочноземельных атомов в стандартах частоты нового поколения / В. В. Чернушкин, Е. А. Никитина, И. Л. Глухов, В. Д. Овсянников // Совещание по прецизионной физике и фундаментальным физическим константам. Пулковое, 7—11 октября 2013. — Тезисы докладов. — Санкт-Петербург. — 2013. — С. 49.

A13. Glukhov, I. L. Natural Widths and Blackbody-radiation-induced shift and broadening of Rydberg levels in Magnesium ions. / I. L. Glukhov, S. N. Mokhnenko, E. A. Nikitina and V. D. Ovsiannikov // 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems. — CEPAS 2014. Contributed papers. Bratislava — 2014. — P. 179—186.

A14. Ovsiannikov, V. D. BBR-Induced Shifts and Broadening of States in Atoms and Ions of Alkaline-Earth Elements / V. D. Ovsiannikov, V. G. Palchikov, A. A. Kamenski, I. L. Glukhov, S. N. Mokhnenko, E. A. Nikitina, V. V. Chernushkin // IFCS-EFTF Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum. Topic 6: Optical Frequency Standards and Applications. Optical clocks session. Monday April 13, 2015. Paper 5353. Abstract Book — P. 119.

Список цитированной литературы

1. Saffman, M. Analysis of a quantum logic device based on dipole-dipole interactions of optically trapped Rydberg atoms / M. Saffman, T. G. Walker // Phys. Rev. A. — 2005. — Vol. 72. — P. 022347.
2. Третьяков, Д. Б. Исследование квантовой интерференции и диполь-дипольного взаимодействия ридберговских атомов для применения в квантовых компьютерах: Дис. к.ф.-м.н./ НГУ, 2005. — 123 с.
3. Amini, J. M. Toward scalable ion traps for quantum information processing / J.M. Amini, H. Uys, J. H. Wesenberg, S. Seidelin, J. Britton, J. J. Bollinger, D. Leibfried, C. Ospelkaus, A. P. VanDevender, D. J. Wineland // New J. Phys. — 2010. — P. 12 033031.
4. Benhelm J. Experimental quantum-information processing with $^{43}\text{Ca}^+$ ions/ J. Benhelm, G. Kirchmair, C. F. Roos, R. Blatt // Phys. Rev. A. — 2008. — A 77. — P. 062306.
5. Rosenband, T. Frequency Ratio of Al^+ and Hg^+ Single-Ion Optical Clocks; Metrology at the 17th Decimal Place/ T. Rosenband et al // Science — 2008. — Vol.319. — P. 1808–1812.
6. Риле, Ф. Стандарты частоты. Принципы и приложения / Ф. Риле. — Пер. с англ. — М.: Физматлит, 2009. — 512 с.
7. Ludlow, A. D. Quantum metrology with lattice-confined ultracold Sr atoms / A .D. Ludlow [et al] // Conference Paper, Seventh Symposium on Frequency Standards and Metrology. — Singapore, 2009. — P. 73–81.
8. Weibin, Li. Entangling quantum gate in trapped ions via Rydberg blockade /

- Li Weibin, I. Lesanovsky // *Applied Physics B*. — 2014. — Vol. 114, 1–2. — P. 37–44.
9. Brewer R. G. Two-ion superradiance theory / R. G. Brewer // *Phys. Rev.* — 1995. — A 52, 4. — P 2965–2970.
 10. Gross, M. Maser Oscillation and Microwave Superradiance in Small Systems of Rydberg Atoms / M. Gross, P. Goy, C. Fabre, S. Haroche, J. M. Raimond // *Phys. Rev. Lett.* — 1979. — Vol. 43, 5. — P 343–346.
 11. Ovsianikov, V. D. Rydberg spectroscopy in an optical lattice: Blackbody thermometry for atomic clocks / V. D. Ovsianikov, A. Derevianko, K. Gibble // *Phys. Rev. Lett.* — 2011. — Vol. 107. — P. 093003.
 12. Fano, U. Spectral distribution of atomic oscillator strength / U. Fano, J.W. Cooper // *Rev. of Modern Phys.* — 1968. — Vol. 8, №5. — P. 441–507.
 13. Собельман, И. И. Введение в теорию атомных спектров / И. И. Собельман // М: Физматгиз, 1963. - 640 с.
 14. Рапопорт, Л. П. Теория многофотонных процессов в атомах / Л. П. Рапопорт, Б. А. Зон, Н. Л. Манаков // В — М.: Атомиздат, 1978. — 184 с.
 15. Farley, J. W. Accurate calculation of dynamic Stark shifts and depopulation rates of Rydberg energy levels induced by blackbody radiation. Hydrogen, helium, and alkali-metal atoms / J. W. Farley and W. H. Wing // *Phys. Rev. A*. — 1981. — Vol. 23. — P. 2397–2424.
 16. Манаков, Н. Л. Атомные расчеты по теории возмущений с модельным потенциалом / Н. Л. Манаков, В. Д. Овсянников, Л. П. Рапопорт. // *Оптика и спектроскопия*. — 1975. — Т. 38, вып. 2. — С. 206–211.

17. Кретинин, И. Ю. Динамические поляризуемости атомов в теории квантового дефекта: дисс. канд. физ.-мат. наук: 01.04.05 / И. Ю. Кретинин; Вор. гос. ун-т — ВГУ, 2010. — 100 с.
18. Magri, R. Pseudopotential for band structure calculations/ R. Magri // CNR-Nano-S³, — contributed papers. Modena, Italy — 2012.
19. Simons, G. New model potential for pseudopotential calculations // J. Chem. Phys. — 1971. — Vol. 55. — P. 756–761.
20. Новосибирский государственный университет, Мультимедиа центр. Информационная система «Электронная структура атомов» <http://asd.nsu.ru>.
21. Ralchenko Yu, Kramida A. E. and Reader J. NIST ASD Team 2008 NIST Atomic Spectra Database (version 3.1.5) (Gaithersburg, MD: National Institute of Standards and Technology) available at <http://physics.nist.gov/asd3>
22. Глухов, И. Л. Радиационные переходы в ридберговских атомах, индуцируемые тепловым излучением: дисс. канд. физ.-мат. наук: 01.04.02 / И. Л. Глухов; Вор. гос. ун-т. — ВГУ, 2010 — 107 с.
23. Galagher, T. F. Interactions of blackbody radiation with atoms / T. F. Galagher, W. E. Cooke // Amer. Phys. Society — 1979. — Vol. 42, №5. — P. 835–839.