

На правах рукописи



Мохненко Сергей Николаевич

**Межатомные и радиационные эффекты на
ультрахолодных атомах**

01.04.02 – Теоретическая физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Воронеж – 2018

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

Магунов Александр Иванович

кандидат физико-математических наук,
ФГБУН «Институт общей физики
им. А.М. Прохорова РАН», старший научный сотрудник

Ведущая организация: ФГБУН «Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук», г. Москва

Защита состоится «15» марта 2018 г. в 15¹⁰ часов на заседании диссертационного совета *Д 212.038.06* при Воронежском государственном университете, 394018, 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 8 февраля 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дрождин С. Н.

Общая характеристика работы

Актуальность работы.

Разработанные в последние два десятилетия методы лазерного охлаждения атомов до сверхнизких температур заложили основу новейшего направления в теоретической и экспериментальной физике атомов и молекул, направленного на прецизионные исследования фундаментальных характеристик атомных частиц. Начавшееся более сорока лет назад изучение ридберговских состояний атомов приобрело новые возможности для получения и контроля сильно возбужденных атомных частиц. Возможность локализации частиц в оптических решетках позволила существенно повысить точность измерений спектральных свойств изолированных атомов и создать на их основе ультрапрецизионные стандарты частоты и времени.

В настоящее время ансамбли ультрахолодных ридберговских атомов рассматриваются как наиболее перспективные кандидаты на создание устройств для обработки квантовой информации [1–4]. Поэтому важной теоретической задачей является описание взаимодействия между сильно возбужденными атомами. В частности, такое описание необходимо для реализации квантовой логической операции CNOT, которая основана на явлении дипольной блокады процесса возбуждения заданных состояний ридберговских атомов, связанная со сдвигом ридберговского уровня относительно резонанса с возбуждающим лазером. В первой и второй главах настоящей диссертации разработаны методы и представлены результаты количественных расчетов наиболее важных характеристик межатомного взаимодействия атомов в сильно возбужденных ридберговских состояниях.

Поскольку ридберговские атомы очень чувствительны к внешним полям, другой важной задачей является изучение их взаимодействия со сверхслабыми полями, например с остаточными полями лабораторной аппаратуры, а также с полем теплового излучения. Такое взаимодействие приводит к сдвигам и ушире-

ниям ридберговских уровней вклад в которые вносят, в частности, индуцированные излучением абсолютно черного тела процессы вынужденного радиационного распада, возбуждения и ионизации, а также процессы спонтанного распада. Знание количественных характеристик термоиндуцированных сдвигов и уширений требуется для прецизионного измерения и контроля тепловых эффектов в атомных спектрах (ридберговский термометр [5]), необходимых для повышения точности стандартов частоты и времени на нейтральных атомах в оптических решетках. В третьей главе исследованы радиационные свойства ридберговских атомов в циркулярных состояниях с максимальными значениями орбитального и магнитного квантовых чисел. Получены аналитические выражения для амплитуд дипольных переходов в состояния дискретного и непрерывного спектров, необходимые, в частности, для определения сдвига и уширения ридберговских уровней излучением черного тела.

В настоящее время наилучшие результаты по созданию оптических стандартов частоты и времени на холодных атомах и ионах были достигнуты с относительной погрешностью измерений на уровне $10^{-17} - 10^{-18}$ [6–8]. Однако дальнейшее увеличение точности оптических стандартов наталкивается на ряд фундаментальных ограничений, связанных, в частности с влиянием излучения абсолютно черного тела. С другой стороны, достижение погрешности воспроизведения единиц измерения времени и частоты на уровне $10^{-17} - 10^{-18}$ требует оценки влияния эффектов высших порядков во взаимодействии атомов с полем оптической решетки на сдвиг частоты часового перехода. В четвертой главе исследованы свойства и определены стратегии создания и операционного управления стандартом частоты на атомах магния в оптической решетке.

Целью диссертации является теоретическое исследование ван-дер-ваальсовского взаимодействия щелочных атомов в ридберговских состояниях, исследованию радиационных свойств ридберговских атомов в циркулярных состояниях и систематическому учету неопределенностей, индуцируемых нелинейно-оптическими, мультипольными и ангармоническими эффектами в стандартах

частоты на нейтральных атомах магния в оптических решетках. Для достижения поставленной цели сформулированы следующие задачи:

- Расчет энергии ван-дер-ваальсова взаимодействия для щелочных атомов в ридберговских состояниях.
- Определение условий проявления ферстеровских резонансов в энергии межатомного взаимодействия.
- Исследование радиационных свойств циркулярных ридберговских состояний атомов.
- Оценка влияния нелинейных и недипольных эффектов взаимодействия атомов магния с полем оптической решетки на неопределенность частоты часового перехода.

Научная новизна. В диссертационной работе и публикациях по теме диссертации впервые представлены расчеты энергии ван-дер-ваальсова взаимодействия щелочных атомов в ридберговских состояниях для произвольных значений главных квантовых чисел и произвольных ориентаций оси квантования относительно межатомной оси. Для неприводимых компонент тензора Ван-дер-Ваальса получены асимптотические зависимости от главного квантового числа и предложены полиномиальные формулы для их упрощенных оценок. Определены области межатомных расстояний, на которых будет проявляться резонанс Ферстера. Аналитически получены асимптотики для сечений фотоионизации атомов из циркулярных ридберговских состояний. Получены количественные характеристики влияния нелинейных и недипольных эффектов взаимодействия атомов магния с полем оптической решетки на неопределенность частоты часового перехода.

Практическая значимость. Результаты диссертации могут быть использованы для проектирования и разработки квантовых логических элементов. Оценки эффектов высших порядков во взаимодействии атомов с излучением

оптической решетки, будут востребованы для разработки стандартов частоты и времени нового поколения. Результаты диссертации целесообразно использовать в научно-исследовательских организациях и центрах, занимающихся изучением сильно охлажденных атомов, в том числе атомов в ридберговских состояниях и в оптических решетках: Институт лазерной физики СО РАН, Институт физики полупроводников им. А.В. Ржанова СО РАН, Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, Санкт-Петербургский государственный университет, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ». Работа была выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках Госзадания № 3.1761.2017/4.6.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разложение на неприводимые тензорные компоненты постоянной Ван-дер-Ваальса для атомов щелочных металлов в ридберговских состояниях с малыми орбитальными моментами и произвольными главными квантовыми числами. Асимптотические полиномиальные аппроксимации для компонент тензора Ван-дер-Ваальса ридберговских S-, P-, D- и F-состояний атомов рубидия.
2. Определение областей межатомных расстояний для ферстеровского резонансного дисперсионного взаимодействия ридберговских атомов, на которых зависимость от расстояния вида $1/R^6$ превращается в зависимость вида $1/R^3$.
3. Аналитические выражения для сечения ионизации циркулярных ридберговских состояний с произвольными главными квантовыми числами.
4. Количественные характеристики неопределенности частоты оптического стандарта на атомах магния, индуцируемой нелинейными, недипольными и ангармоническими эффектами взаимодействия с полем оптической

решетки.

Апробация работы. Основные результаты диссертации докладывались на следующих конференциях:

- ICONO/LAT 2013 conference, Moscow, Russia, 18-22 June, 2013.
- XX Конференция по фундаментальной атомной спектроскопии (ФАС-XX), Воронеж, 23–27 сентября 2013.
- CEPAS 2014 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems, Bratislava, Slovakia, 9-12 July 2014.
- IFCS-EFTF Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium and European Frequency and Time Forum, Denver, USA, 12-16 April, 2015.
- XXV Съезд по спектроскопии, Троицк, Москва, 3-7 октября 2016.
- Физика ультрахолодных атомов, Новосибирск, 19-21 декабря 2016.

Публикации. Материалы диссертации опубликованы в 14 печатных работах [A1–A14], из них 6 статей в рецензируемых журналах [A1–A6], из числа которых 5 [A1–A5] входят в перечень ВАК РФ и 8 тезисов докладов конференций [A7–A14].

Личный вклад автора. Все результаты расчетов, представленные в диссертации, получены лично автором. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами, причем вклад автора был существенным. Содержание диссертации отражает личный вклад автора в опубликованные работы.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и библиографии. Общий объем диссертации 100 страниц, из них 80 страниц текста, включая 12 рисунков и 2 таблицы. Библиография включает 88 наименований на 12 страницах.

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 изложена теория возмущений для изолированных состояний, которая позволяет описывать асимптотическое взаимодействие между ридберговскими атомами. Проведены численные расчеты для энергии ван-дерваальсова взаимодействия двух щелочных атомов в ридберговских состояниях. Результаты расчетов представлены в виде простых аппроксимационных зависимостей от главного квантового числа для неприводимых компонент тензора Ван-дер-Ваальса.

В разделе 1.1 вводится мультипольное разложение для оператора электростатического взаимодействия между двумя нейтральными атомами A и B :

$$\hat{V}_{AB}(\mathbf{R}) = \sum_{L_A=1}^{\infty} \sum_{L_B=1}^{\infty} \frac{(-1)^{L_B}}{R^{L+1}} \sqrt{\frac{(2L)!}{(2L_A)!(2L_B)!}} \left(\mathbf{C}_L(\mathbf{n}) \cdot \left\{ \hat{\mathbf{Q}}_{L_A}^A \otimes \hat{\mathbf{Q}}_{L_B}^B \right\}_L \right), \quad (1)$$

где $\mathbf{R} = \mathbf{n}R$ – радиус-вектор между атомами, $L = L_A + L_B$ – суммарный электрический момент двух атомов, $\mathbf{C}_{L\mu}(\mathbf{n}_i) = \sqrt{4\pi/(2L+1)} \mathbf{Y}_{L\mu}(\mathbf{n}_i)$ – модифицированная сферическая функция, $\hat{\mathbf{Q}}_{L\mu}^{A(B)}$ – 2^L -польные электрические моменты. Для обозначения скалярных и неприводимых тензорных произведений используются обычные обозначения квантовой теории угловых моментов [9].

Раздел 1.2 посвящен расчету первого порядка теории возмущений для энергии асимптотического взаимодействия ридберговских атомов. В частности, сдвиг первого порядка для суммарной энергии двух ридберговских атомов, индуцированный взаимодействием, представляет собой сумму вкладов от четных мультипольных моментов

$$\Delta E_{AB}^{(1)}(\mathbf{R}) = \sum_{L_A=1}^{l_A} \sum_{L_B=1}^{l_B} C_{l_A m_A 2L_A 0}^{l_A m_A} C_{l_B m_B 2L_B 0}^{l_B m_B} \frac{(2L)! Q_{2L_A}^A Q_{2L_B}^B}{(2L_A)!(2L_B)! R^{2L+1}} P_{2L}(\mathbf{n} \cdot \mathbf{a}). \quad (2)$$

Здесь \mathbf{a} –единичный вектор вдоль оси квантования и используются стандартные обозначения для коэффициентов Клебша-Гордана $C_{a\alpha b\beta}^{c\gamma}$, полинома Лежандра $P_{2L}(\cos \theta) = \mathbf{C}_{2L0}(\theta, \varphi)$ [9] и матричных элементов электромultipольных моментов $Q_{2L_{A(B)}}^{A(B)} = C_{l0\ 2L0}^{l0} \langle nl | r^{2L_{A(B)}} | nl \rangle$.

В разделе **1.3** описаны высшие порядки теории возмущений. В сдвиги высших порядков входит редуцированная двухатомная функция Грина, которая включает в себя суммы по связанным состояниям и интегралы по состояниям непрерывного спектра для невзаимодействующих атомов [10]:

$$G'_{AB}(\mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B; \mathbf{r}'_A, \mathbf{r}'_B) = \sum'_{n_1, n_2} \frac{\langle \mathbf{r}_A | n_1 \rangle \langle n_1 | \mathbf{r}'_A \rangle \langle \mathbf{r}_B | n_2 \rangle \langle n_2 | \mathbf{r}'_B \rangle}{E_{n_1} + E_{n_2} - E_A - E_B - i \cdot 0}, \quad (3)$$

где суммирование выполняется по полному базису собственных векторов $|n_i\rangle \equiv |n_i l_i J_i M_i\rangle$, ($i = 1, 2$) гамильтониана невзаимодействующих атомов $\hat{H}_{AB} = \hat{H}_A + \hat{H}_B$, за исключением собственного вектора $\langle \mathbf{r}_A, \mathbf{r}_B | AB \rangle$, соответствующего собственному значению $E_A + E_B = E_{AB}$, полной энергии изолированных атомов. Главный вклад в такую функцию Грина будут давать состояния, которым соответствуют наименьшие разности энергии $\delta = E_{n_1} + E_{n_2} - E_A - E_B$ в знаменателях и наибольшие значения матричных элементов дипольных переходов в числителях.

В разделе **1.4** обсуждается ионизация одного из ридберговских атомов, индуцированная Ван-дер-Ваальсовым взаимодействием, сопровождающаяся одновременным девозбуждением другого атома с переходом на более низкие энергетические уровни [11]. Для ридберговских состояний, ионизационное уширение на 9-10 порядков меньше по абсолютной величине, чем соответствующий сдвиг двухатомной энергии.

В разделе **1.5** постоянная Ван-дер-Ваальса для идентичных атомов в одинаковых ридберговских состояниях представлена как функция магнитных квантовых чисел M и угла θ между единичными векторами межатомной оси \mathbf{n} и оси

квантования \mathbf{a} , следующим образом [12]:

$$C_6(\theta; nlJM) = R_{ss} - \frac{M^2}{12J^2}(3\cos^2\theta - 2)R_{aa} + \frac{3M^2 - J(J+1)}{2J(2J-1)}(3\cos^2\theta - 1)R_{sT} \\ + \frac{3}{2} \left[\frac{3M^2 - J(J+1)}{2J(2J-1)} \right]^2 (9\cos^4\theta - 8\cos^2\theta + 1)R_{TT}. \quad (4)$$

Детали численных расчетов неприводимых компонент R_{ss} , R_{aa} , R_{sT} и R_{TT} тензора C_6 обсуждаются в разделе **1.6** на примере атомов рубидия. Для расчетов использовался метод модельного потенциала Фьюса [10], который дает возможность записать матричные элементы аналитически в виде обобщенных гипергеометрических функций двух аргументов. Поскольку для данного метода важной характеристикой является спектр атома, для экстраполяции энергии используются самые последние данные для квантовых дефектов [13–16], которые определяются по формуле

$$\mu_{lJ}(n) = \mu_{lJ}^{(0)} + \frac{\mu_{lJ}^{(2)}}{\left(n - \mu_{lJ}^{(0)}\right)^2}, \quad (5)$$

где $\mu_{nlJ} = n - Z/\sqrt{-2E_{nlJ}}$. Результаты расчетов хорошо согласуются с имеющимися в литературе экспериментальными данными [17].

В разделе **1.7** для представления результатов расчетов используется стандартная процедура полиномиальной аппроксимации численно заданных функций. В частности, неприводимые компоненты тензора Ван-дер-Ваальса (4) записываются в виде полиномов:

$$R_{\alpha\beta}(nlJ) = A_{\alpha\beta}(lJ)n^{11} + a_{\alpha\beta}^{(1)}(lJ)x + a_{\alpha\beta}^{(2)}(lJ)x^2 + a_{\alpha\beta}^{(3)}(lJ)x^3, \quad (6)$$

где индексы α и β принимают значения индексов неприводимых компонент из разложения (4) s , a , T . В случае наличия двух резонансов Ферстера, асимптотическое уравнение (6) обобщается следующим образом:

$$R_{\alpha\beta}(nlJ) = \frac{A_{\alpha\beta}(lJ)}{(n - \tilde{n}_{\alpha\beta}^{(1)}(lJ))(n - \tilde{n}_{\alpha\beta}^{(2)}(lJ))} n^{13} \left(a_{\alpha\beta}^{(1)}(lJ)x + a_{\alpha\beta}^{(2)}(lJ)x^2 + a_{\alpha\beta}^{(3)}(lJ)x^3 \right), \quad (7)$$

где $\tilde{n}_{\alpha\beta}^{(1,2)}(lJ)$ - эмпирические значения, в окрестности которых энергетические дефекты δ меняют свои знаки. Численные значения аппроксимационных параметров $\tilde{n}_{\alpha\beta}^{(1,2)}(lJ)$, $A_{\alpha\beta}(lJ)$, $a_{\alpha\beta}^{(1,2,3)}(lJ)$ приведены в диссертации и в работах [А5, А6].

В разделе **1.8** представлены основные выводы к первой главе.

Во второй главе в рамках теории возмущений для вырожденных состояний определены условия превращения зависимости вида $-C_6/R^6$ для энергии асимптотического межатомного взаимодействия в условиях ферстеровского резонанса в зависимость вида C_3/R^3 .

В разделе **2.1** изложена теория возмущений для резонансного асимптотического взаимодействия. Энергия взаимодействия ΔE между атомами в ридберговских состояниях может быть определена в произвольных порядках оператора (1) из решения секулярного уравнения третьего порядка, соответствующего двум слагаемым из спектральной суммы для функции Грина (3) с близкими к нулю знаменателями:

$$\det||W_{ij} + (\varepsilon_i - \Delta E)\delta_{ij}|| = 0, \quad (8)$$

эквивалентного диагонализации матрицы 3×3 (здесь δ_{ij} - символ Кронекера) [18, 19]:

$$W_{ij} = \left\langle i \left| \hat{V}_{AB}(\mathbf{R}) \left\{ 1 + G'_{\bar{E}} \left[\hat{V}_{AB}(\mathbf{R}) - \Delta E \right] \right\}^{-1} \right| j \right\rangle, \quad (9)$$

$i, j = 1, 2, 3$ нумеруют близкие по энергии состояния двухатомной системы, которые исключаются из двукратного спектрального суммирования в функции Грина (3), $G'_{\bar{E}}$ - двухатомная функция Грина с энергией \bar{E} . В отсутствие взаимодействия атомов решения секулярного уравнения (8) $\varepsilon_i = E_i - \bar{E}$ ($i = 1, 2, 3$) определяют энергию i -го "резонансного" состояния относительно энергии функции Грина, в качестве которой удобно выбрать суммарную энергию невзаимодействующих атомов $\bar{E} = E_1$, при этом $\varepsilon_1 = 0$, $\varepsilon_2 = \varepsilon_3 = \delta$.

Решения уравнения (8) могут быть представлены в виде (предполагая $\delta > 0$):

$$\begin{aligned}\Delta E_{1(2)} &\equiv \Delta E_{-(+)} = W_{11}^{(2)} + \frac{\Delta(\mathbf{R})}{2} - (+)\sqrt{\left(\frac{\Delta(\mathbf{R})}{2}\right)^2 + 2|W_{12}^{(1)}|^2}, \\ \Delta E_3 &= \delta + W_{22}^{(2)} - W_{23}^{(2)},\end{aligned}\quad (10)$$

где $\Delta(\mathbf{R}) = \delta - W_{11}^{(2)} + W_{22}^{(2)} + W_{23}^{(2)}$ дефект энергий вырожденных состояний с учетом "нерезонансных" ван-дер-ваальсовских сдвигов. Решение (10) определяет сдвиги энергии близких ("резонансных") уровней, смешиваемых в первом порядке по межатомному взаимодействию (1), с учетом поправок второго порядка. Матричный элемент первого порядка зависит от ориентации межатомного вектора \mathbf{R} (от угла θ):

$$W_{12}^{(1)}(R, \theta) = \frac{d^{AB}}{R^3} \mathcal{Z}_{J_1; J_2}^{J, M}(\theta), \quad (11)$$

где редуцированный матричный элемент диполь-дипольного взаимодействия $d^{AB} \equiv \langle 1 || \mathbf{Q}_1^A \mathbf{Q}_1^B || 2 \rangle$ выделен в отдельный коэффициент и выполнено суммирование по магнитным квантовым числам M_1, M_2 при расчете квадрата матричного элемента $W_{12}^{(1)}$ в подкоренном выражении решения (10). На рисунке (1) представлен множитель угловой зависимости для двух атомов рубидия в одинаковых состояниях $nD_{5/2}$. Поскольку в $\Delta(\mathbf{R})$ наибольший вклад дает зависимость от R вида $1/R^6$, то на больших расстояниях между атомами $|\Delta(\mathbf{R})|^2 \gg 8|W_{12}^{(1)}|^2$ будет доминировать закон Ван-дер-Ваальса $\Delta E \approx -C_6/R^6$, в то время как на малых $8|W_{12}^{(1)}|^2 \gg |\Delta(\mathbf{R})|^2$ будет преобладать зависимость от межатомного расстояния вида $\Delta E \approx C_3/R^3$.

В разделе 2.2 описано резонансное взаимодействие атомов рубидия в ридберговских состояниях, определены расстояния на которых будет проявляться резонанс Ферстера. В частности для двух атомов рубидия в одинаковых состояниях $38P_{3/2}$ взаимодействие вида C_3/R^3 будет преобладать в диапазоне межатомных расстояний от 1.5 до 6 мкм, в то время как в состояниях $43D_{5/2}$ этот диапазон локализован в области от 2.5 до 6 мкм.

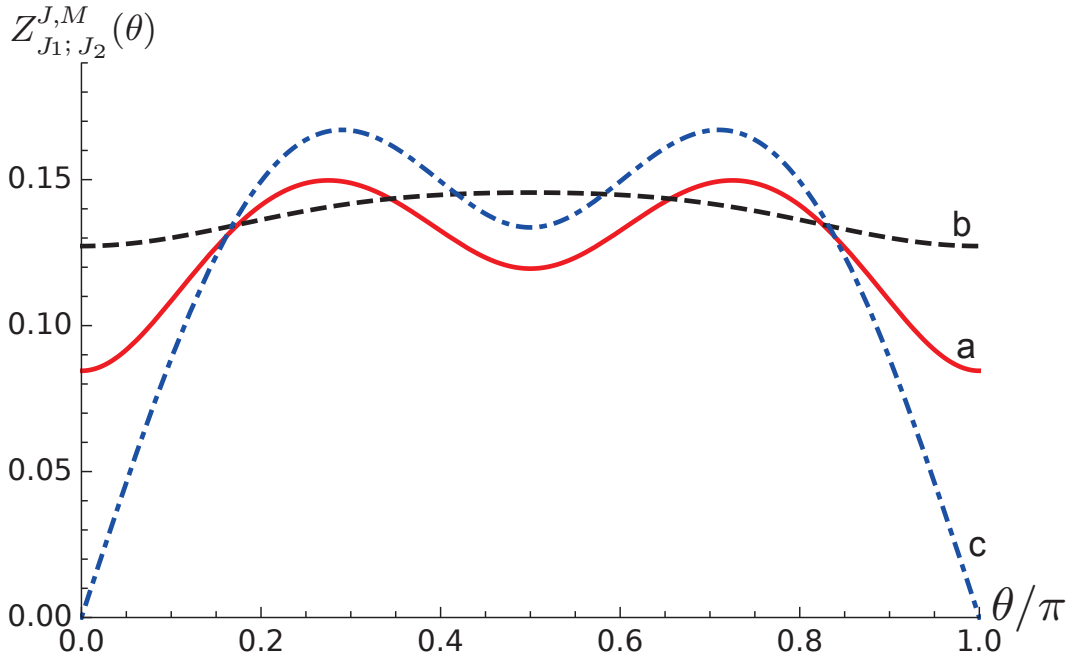


Рис. 1. Множитель угловой зависимости $Z_{5/2; 3/2}^{5/2, M}(\theta)$ матричного элемента (11) для диполь-дипольного резонанса между близкими двухатомными состояниями: $2 \times (nD_{5/2, M}) \rightarrow n_1F_{5/2} + n_2P_{3/2}$ с магнитными квантовыми числами: $M = 1/2$ (a), $M = 3/2$ (b), $M = 5/2$ (c).

Третья глава посвящена изучению радиационных свойств атомов в циркулярных ридберговских состояниях.

В разделе **3.1** получены асимптотики для амплитуд дискретно-дискретных переходов из циркулярных состояний.

В разделе **3.2** получены асимптотики для амплитуд дискретно-пороговых переходов из циркулярных ридберговских состояний и выведена аналитическая зависимость сечения пороговой ионизации циркулярных состояний от главного квантового числа $n \gg 1$:

$$\sigma_{n, l=n-1}^{thr} = \frac{16\pi^{3/2} n^{5/2}}{3Z^2 c} \left(\frac{2}{e}\right)^{2n} \left(1 + \frac{1}{2n} + \frac{1}{2n^2} + o\left(\frac{1}{n^3}\right)\right), \quad (12)$$

где e -основание натурального логарифма, Z -заряд остова, c -скорость света.

В разделе **3.2** получена аналитическая зависимость сечения надпороговой ионизации циркулярных ридберговских состояний:

$$\sigma_{n, l=n-1} = \sigma_{n, l=n-1}^{thr} f_n(\omega), \quad (13)$$

где $\sigma_{n, l=n-1}^{thr}$ -сечение пороговой ионизации (12),

$$f_n(\omega) = \frac{1}{\Omega^{5/2}} \left(\frac{\exp\left(1 - \frac{\arctan\sqrt{\Omega-1}}{\sqrt{\Omega-1}}\right)}{\sqrt{\Omega}} \right)^{2n}, \quad (14)$$

где $\Omega = \omega/|E_{nl}|$.

На основании результатов **главы 3** делается вывод о том, что основной вклад в скорость спонтанного распада и депопуляции индуцированной излучением черного тела для состояний с большими орбитальными моментами l , дают переходы в ближайшие верхние и нижние состояния $n' = n \pm 1$. Поскольку сечения ионизации таких состояний быстро убывают с ростом n , вклад термоиндуцированных переходов в выше лежащие состояния дискретного спектра и континуума в сдвиги и уширения состояний с высокими l и n будет пренебрежимо мал.

В четвертой главе изложена теория нелинейных, недипольных и ангармонических эффектов, на основе которой получены оценки неопределенности стандарта частоты на атомах магния, индуцируемые взаимодействием атома с полем оптической решетки магической частоты.

В разделе **4.1** вводится понятие магической частоты. Наиболее часто используемое в литературе определение соответствует эквивалентности дипольных поляризуемостей для основных (g) и возбужденных (e) состояний [20]:

$$\alpha_g^{E1}(\omega_{mag}^d) = \alpha_e^{E1}(\omega_{mag}^d). \quad (15)$$

В разделе **4.2** обсуждаются нелинейные, недипольные и ангармонические эффекты во взаимодействии атома с полем оптической решетки магической частоты. Неопределенность частоты стандарта связана с различием энергий колебаний нормального и метастабильного атома в поле стоячей волны оптической решетки. Эти энергии можно представить в виде:

$$\mathcal{E}_{g(e)}^{vib}(I, n) = -D_{g(e)}(I) + \Omega_{g(e)}(I) \left(n + \frac{1}{2} \right) - \mathcal{E}_{g(e)}^{anh}(I) \left(n^2 + n + \frac{1}{2} \right), \quad (16)$$

где первое слагаемое в правой части определяет глубину захватывающего атом

потенциала, второе слагаемое представляет собой энергию гармонического осциллятора в состоянии с колебательным квантовым числом n , а третье учитывает ангармонические поправки, с отличием потенциала решетки от параболы гармонического осциллятора. В режиме Лэмба-Дике колебательные квантовые числа n для атома на верхнем и нижнем часовом уровне одинаковы, так что сдвиг частоты часового перехода определяется выражением

$$\begin{aligned} \Delta\nu_{cl}^{latt}(I, n) &= \mathcal{E}_e^{vib}(I, n) - \mathcal{E}_g^{vib}(I, n) = \\ &= -\Delta D(I) + \Delta\Omega(I) \left(n + \frac{1}{2} \right) - \Delta\mathcal{E}^{anh}(I) \left(n^2 + n + \frac{1}{2} \right). \end{aligned} \quad (17)$$

В разделе 4.3 рассмотрены различные способы прецизионного определения магической частоты через спектроскопические характеристики атомов.

В разделе 4.4 определены верхние и нижние границы интенсивности поля оптической решетки для разных операционных магических частот, обеспечивающих точность измерения частоты стандарта на атомах магния на уровне 17-18-го десятичного знака. Чтобы уменьшить неопределенность $\Delta\nu_{cl}^{latt}$ до уровня 0.5 мГц, относительная неопределенность распределения операционной интенсивности по позициям атомов магния в решетке не должна превышать 2% в окрестности $I = 145$ кВт/см².

В Заключение сформулированы основные результаты диссертации:

1. Получены аналитические выражения для зависимости постоянной ван-дер-ваальсова взаимодействия двух одинаковых ридберговских атомов от ориентации межатомной оси и орбитальных моментов. Тензорные компоненты постоянной Ван-дер-Ваальса для щелочных атомов в ридберговских состояниях представлены в виде полиномов от главных квантовых чисел. Для S-, P-, D- и F-серий атомов рубидия получены численные значения коэффициентов асимптотических полиномов.
2. Определены количественные критерии проявления резонансов Ферстера в энергиях ван-дер-ваальсова взаимодействия ридберговских атомов.

3. Получены аналитические выражения для амплитуд радиационных переходов из циркулярных ридберговских состояний, с помощью которых могут быть определены вклады состояний дискретного и непрерывного спектров в сдвиг и уширение ридберговских уровней излучением черного тела. Продемонстрировано быстрое уменьшение относительного вклада удаленных дискретных состояний и континуума в термоиндуцированные сдвиги и уширения ридберговских состояний с ростом главного квантового числа.
4. Получены количественные характеристики неопределенностей частоты часового перехода в атомах магния, индуцируемых взаимодействием атомов с оптической решеткой магической частоты.

Список публикаций

- [A1] 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 // The European Physical Journal D. — 2015. — Jan. — Vol. 69, no. 1. — P. 1. — <https://doi.org/10.1140/epjd/e2014-50648-6>.
- [A2] Higher-order effects on uncertainties of clocks of mg atoms in an optical lattice / V. D. Ovsianikov, S. I. Marmo, S. N. Mokhnenko, V. G. Palchikov // Journal of Physics: Conference Series. — 2017. — Vol. 793, no. 1. — P. 012020. — <http://stacks.iop.org/1742-6596/793/i=1/a=012020>.
- [A3] Каменский, А. А. Резонансное дисперсионное взаимодействие атомов щелочных металлов в ридберговских состояниях / А. А. Каменский, С. Н. Мохненко, В. Д. Овсянников // Квантовая электроника. — 2017. — Т. 47, № 5. — С. 467. — <http://mi.mathnet.ru/qs16610>.

- [A4] Нелинейно-оптические эффекты высшего порядка в оптических решеточных часах / В. Д. Овсянников, С. И. Мармо, С. Н. Мохненко, В. Г. Пальчиков // Квантовая электроника. — 2017. — Т. 47, № 5. — С. 412. — <http://mi.mathnet.ru/qe16604>.
- [A5] Energy of van der Waals and dipole-dipole interactions between atoms in Rydberg states / A. A. Kamenski, N. L. Manakov, S. N. Mokhnenko, V. D. Ovsiannikov // Phys. Rev. A. — 2017. — Sep. — Vol. 96. — P. 032716. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.96.032716>.
- [A6] Kamenski, A. A. Asymptotic approximations to the energy of dispersion interaction between rubidium atoms in rydberg states / A. A. Kamenski, S. N. Mokhnenko, V. D. Ovsiannikov // Journal of Physics Communications. — 2017. — Vol. 1, no. 1. — P. 015006. — <http://stacks.iop.org/2399-6528/1/i=1/a=015006>.
- [A7] Thermal shifts and broadening of energy levels in the group II ions / V. V. Chernushkin, I. L. Glukhov, S. N. Mokhnenko et al. // ICONO/LAT Conf. Program. — IWR11. — P. 66. — Moscow, June 18-22, 2013. — Technical Digest ICONO-03. — P. 55–56.
- [A8] Овсянников, В. Д. Прецизионная спектроскопия атомов в оптических решетках / В. Д. Овсянников, С. Н. Мохненко, А. В. Щербаков // Сборник тезисов докладов конференции и школы молодых ученых по фундаментальной атомной спектроскопии ФАС-XX 23–27 сентября 2013 г. — Воронеж, Россия. — С. 151.
- [A9] Стандарты частоты нового поколения на основе ионов алюминия и магния / В. В. Чернушкин, Е. А. Никитина, С. Н. Мохненко, В. Д. Овсянников // Сборник тезисов докладов конференции и школы молодых ученых по фундаментальной атомной спектроскопии ФАС-XX 23–27 сентября 2013 г. — Воронеж, Россия. — С. 210.

- [A10] 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 // 6th Conference on Elementary Processes in Atomic Systems. – CEPAS 2014. Contributed papers. Bratislava – 2014. – P. 179–186.
- [A11] BBR-induced shifts and broadening of states in atoms and ions of alkaline-earth elements / V. D. Ovsianikov, V. G. Palchikov, A. A. Kamenski et al. // 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.
- [A12] Higher-order constraints on precision of optical-lattice clocks of the group II atoms / V. D. Ovsianikov, S. I. Marmo, S. N. Mokhnenko и др. // Материалы VIII Международного симпозиума «МЕТРОЛОГИЯ ВРЕМЕНИ И ПРОСТРАНСТВА» 14-16 сентября 2016. – Санкт-Петербург, Россия. – С. 92–97.
- [A13] Неопределенности стандарта частоты на ионах алюминия, индуцированные полем ионной ловушки, излучением черного тела и симпатическим ионом / И. Л. Глухов, А. А. Каменский, С. Н. Мохненко и др. // Материалы VIII Международного симпозиума «МЕТРОЛОГИЯ ВРЕМЕНИ И ПРОСТРАНСТВА» 14-16 сентября 2016. – Санкт-Петербург, Россия. – С. 271-281.
- [A14] Каменский, А. А. Ван-дер-ваальсово взаимодействие атомов рубидия в ридберговских состояниях / А. А. Каменский, С. Н. Мохненко, В. Д. Овсянников // XV съезд по спектроскопии. Сборник тезисов. – Москва 2016. – С. 130-131.

Цитированная литература

- [1] Walker, T. G. Consequences of Zeeman degeneracy for the van der Waals blockade between Rydberg atoms / T. G. Walker, M. Saffman // *Phys. Rev. A.* — 2008. — Mar. — Vol. 77. — P. 032723. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.77.032723>.
- [2] Saffman, M. Quantum information with Rydberg atoms / M. Saffman, T. G. Walker, K. Mølmer // *Rev. Mod. Phys.* — 2010. — Aug. — Vol. 82. — P. 2313–2363. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.82.2313>.
- [3] Browaeys, A. Experimental investigations of dipole–dipole interactions between a few Rydberg atoms / A. Browaeys, D. Barredo, T. Lahaye // *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics.* — 2016. — Vol. 49, no. 15. — P. 152001. — <http://stacks.iop.org/0953-4075/49/i=15/a=152001>.
- [4] Спектроскопия холодных ридберговских атомов рубидия для применений в квантовой информатике / И. И. Рябцев, И. И. Бетеров, Д. Б. Третьяков и др. // *Усп. физ. наук.* — 2016. — Т. 186, № 2. — С. 206–219. — <https://ufn.ru/ru/articles/2016/2/1/>.
- [5] 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. — Aug. — Vol. 107. — P. 093003. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.107.093003>.
- [6] An optical lattice clock with accuracy and stability at the 10^{-18} level / B. J. Bloom, T. L. Nicholson, J. R. Williams et al. // *Nature.* — 2014. — Feb. — Vol. 506, no. 7486. — P. 71–75. — Letter. <http://dx.doi.org/10.1038/nature12941>.

- [7] A fermi-degenerate three-dimensional optical lattice clock / S. L. Campbell, R. B. Hutson, G. E. Marti et al. // Science. — 2017. — Vol. 358, no. 6359. — P. 90–94. — <http://science.sciencemag.org/content/358/6359/90>.
- [8] Optical atomic clocks / A. D. Ludlow, M. M. Boyd, J. Ye et al. // Rev. Mod. Phys. — 2015. — Jun. — Vol. 87. — P. 637–701. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/RevModPhys.87.637>.
- [9] Варшалович, Д. А. Квантовая теория углового момента / Д. А. Варшалович, А. Н. Москалёв, В. К. Херсонский. — Л.: Наука, 1975.
- [10] Manakov, N. L. Atoms in a laser field / N. L. Manakov, V. D. Ovsianikov, L. P. Rapoport // Physics Reports. — 1986. — Vol. 141, no. 6. — P. 320 – 433. — <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0370157386800011>.
- [11] Rydberg-Rydberg collisions: resonant enhancement of state mixing and Penning ionization / A. Reinhard, T. Cubel Liebisch, K. C. Younge et al. // Phys. Rev. Lett. — 2008. — Mar. — Vol. 100. — P. 123007. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.100.123007>.
- [12] Овсянников, В. Д. Дисперсионное взаимодействие возбужденных атомов / В. Д. Овсянников // Оптика и спектроскопия. — 1982. — Т. 53. — С. 600.
- [13] Measurement of absolute transition frequencies of ^{87}Rb to $n\text{S}$ and $n\text{D}$ Rydberg states by means of electromagnetically induced transparency / M. Mack, F. Karlewski, H. Hattermann et al. // Phys. Rev. A. — 2011. — May. — Vol. 83. — P. 052515. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.83.052515>.
- [14] Precision measurements of quantum defects in the $n\text{P}_{3/2}$ Rydberg states of ^{85}Rb / B. Sanguinetti, H. O. Majeed, M. L. Jones, B. T. H. Varcoe // Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. — 2009. —

- Vol. 42, no. 16. — P. 165004. — <http://stacks.iop.org/0953-4075/42/i=16/a=165004>.
- [15] Millimeter-wave spectroscopy of cold Rb Rydberg atoms in a magneto-optical trap: Quantum defects of the nS , nP , and nD series / W. Li, I. Mourachko, M. W. Noel, T. F. Gallagher // Phys. Rev. A. — 2003. — May. — Vol. 67. — P. 052502. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.67.052502>.
- [16] Rb nF quantum defects from millimeter-wave spectroscopy of cold ^{85}Rb Rydberg atoms / J. Han, Y. Jamil, D. V. L. Norum et al. // Phys. Rev. A. — 2006. — Nov. — Vol. 74. — P. 054502. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevA.74.054502>.
- [17] Direct measurement of the van der waals interaction between two rydberg atoms / L. Béguin, A. Vernier, R. Chicireanu et al. // Phys. Rev. Lett. — 2013. — Jun. — Vol. 110. — P. 263201. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.110.263201>.
- [18] Higher orders of perturbation theory for the stark effect on an atomic multiplet / I. L. Bolgova, V. D. Ovsyannikov, V. G. Pal'chikov et al. // Journal of Experimental and Theoretical Physics. — 2003. — Vol. 96, no. 6. — P. 1006–1018. — <http://dx.doi.org/10.1134/1.1591213>.
- [19] Ovsyannikov, V. D. Diamagnetic shift and splitting of Rydberg levels in atoms / V. D. Ovsyannikov, S. V. Goossev // Physica Scripta. — 1998. — Vol. 57, no. 4. — P. 506. — <http://stacks.iop.org/1402-4896/57/i=4/a=007>.
- [20] Ultrastable optical clock with neutral atoms in an engineered light shift trap / H. Katori, M. Takamoto, V. G. Pal'chikov, V. D. Ovsyannikov // Phys. Rev. Lett. — 2003. — Oct. — Vol. 91. — P. 173005. — <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.91.173005>.