

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур РАН

На правах рукописи

Саакян Сергей Арамович

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ГАЗА
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ ВЫСОКОВОЗБУЖДЕННЫХ И ЧАСТИЧНО
ИОНИЗОВАННЫХ АТОМОВ ЛИТИЯ-7**

01.04.08 – физика плазмы

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединённом институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель: к.ф.–м. н., зав. лаб. 1.2.3.3 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединённого института высоких температур РАН, г. Москва,
Зеленер Борис Борисович

Официальные оппоненты: д. ф.–м. н., профессор кафедры теоретической физики Московского физико-технического института (государственного университета), г. Москва,
Крайнов Владимир Павлович

к. ф.–м. н., младший научный сотрудник Лаборатории стандартов частоты Физического института им. П.Н. Лебедева Российской академии наук, г. Москва,
Зибров Сергей Александрович

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт спектроскопии Российской академии наук (ИСАН), г. Троицк.

Защита состоится _____ 2016 г. в 11 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 002.110.02 Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединённого института высоких температур Российской академии наук по адресу: 1254112, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ОИВТ РАН. Отзывы на автореферат просьба присылать по адресу: 125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, ОИВТ РАН.

Автореферат разослан _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
Д 002.110.02, канд. физ.-мат. наук

М. М. Васильев

© Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединённый институт высоких температур Российской академии наук, 2016

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Первые эксперименты с высоковозбужденными атомами были реализованы ещё в конце 19 века. Спектры высоковозбужденных атомов были получены в результате обобщения астрономических наблюдений. В 1890 году Ридберг опубликовал свою работу о структуре спектров химических элементов [1]. Одно из первых подробных измерений спектров высоковозбужденных ридберговских состояний для атомов лития можно найти в работе 1930 года [2], в которой исследовались ридберговские состояния в парах лития с главными квантовыми числами до $n = 31$.

Высоковозбужденные атомы имеют большое время жизни, огромный дипольный момент и очень чувствительны к электрическим и магнитным полям. Благодаря своим уникальным особенностям Ридберговские состояния атомов представляют большой интерес для физики и химии. Отсутствие удобного экспериментального способа возбуждать атомы в заданное квантовое состояние мешало систематическому изучению ридберговских атомов. В 1950-х и 1960-х одним из распространенных способов получения ридберговских атомов было возбуждение электронным ударом [3]. Данный способ не позволял возбуждать атомы в определенном состоянии. Новым толчком к изучению ридберговских атомов стало появление в 70-х перестраиваемых лазеров на красителях. По мере развития методов диагностики и возбуждения ридберговских атомов интерес к ним все более возрастал.

На сегодняшний день, одним из самых распространенных методов исследования газа атомов при температурах ниже 1 мК, является лазерное охлаждение и захват атомов в магнито-оптическую ловушку (МОЛ). С появлением лазерного охлаждения и пленения атомов в МОЛ, изучение высоковозбужденных атомов выделилось в отдельное направление, которое включает в себя широкий круг задач, от изучения ультрахолодной плазмы [4,5] до квантовой информатики [6-8]. Теоретические исследования кинетики и термодинамики газа ультрахолодных атомов и плазмы, представленные в работах [9-14], указывают на возможность существования пространственных структур в холодном газе ридберговских атомов. Данная работа является первым шагом к получению и изучению коллективов высоковозбужденных ридберговских атомов.

Существует несколько различных путей получения ридберговских атомов в МОЛ. Чаще всего используется двух- или более фотонное импульсное возбуждение [15,16], которое позволяет перевести до 100% атомов в выбранное состояние. При помощи двух π -импульсов можно перевести электрон сначала на промежуточный уровень, а потом на высоколежащий ридберговский. Данный метод очень чувствителен к длительности и мощности импульсов, поэтому удобнее возбуждать атомы при помощи комбинационного

адиабатического заселения (STIRAP - stimulated raman adiabatic passage) [17-19]. В данном методе два перекрывающихся возбуждающих импульса имеют порядок обратный по сравнению с каскадным возбуждением.

Традиционным способом детектирования ридберговских атомов является их ионизация электрическим полем с последующим детектированием электронов и ионов [8]. В эксперименте [20] для диагностики ридберговских атомов использовались слабое пробное поле на резонансном переходе и сильное управляющее поле на переходах между возбужденными состояниями. Регистрировалась электромагнито-индуцированная прозрачность (EIT) в спектре поглощения пробного поля.

Данная работа посвящена экспериментальным исследованиям газа ультрахолодных высоковозбужденных и частично ионизованных атомов лития-7. В работе реализовано возбуждение атомов лития-7 в ридберговские состояния с использованием непрерывного лазерного излучения. Для диагностики энергии высоковозбужденных состояний непосредственно регистрировалось изменение резонансной флуоресценции ультрахолодных атомов лития-7 в магнитооптической ловушке. Данный метод диагностики не разрушает ридберговские состояния.

Цель работы

Целью данной работы являлось создание экспериментальной установки для изучения ультрахолодного газа высоковозбужденных атомов.

Для достижения этих целей были решены следующие задачи:

1. Создана установка по лазерному охлаждению и захвату в МОЛ атомов лития-7.
2. Реализовано возбуждение захваченных в МОЛ атомов в ридберговские состояния при помощи непрерывного ультрафиолетового лазера.
3. Предложена новая неразрушающая методика диагностики энергетических спектров ридберговских состояний по спаду флуоресценции облака атомов в МОЛ.

Научная новизна

Впервые в России создана установка по лазерному охлаждению и пленению в магнито-оптическую ловушку атомов лития-7. Разработана новая методика регистрации энергетических спектров высоковозбужденных состояний атомов. При помощи данной методики впервые измерены энергии для различных nS -конфигураций в широком диапазоне значений главного квантового числа от $n = 38$ до $n = 165$, для холодных атомов лития-7.

Практическая значимость работы

Предложенная в данной работе методика регистрации энергетических спектров высоковозбужденных атомов универсальна для всех атомов, которые

можно захватить в МОЛ. По измеренным значениям энергий различных конфигураций, можно рассчитать квантовый дефект и порог ионизации атома.

В работе разработана экспериментальная установка для дальнейших исследований ультрахолодной плазмы и газа высоковозбужденных атомов.

Научные положения, выносимые на защиту

1. Захват более 10^9 лазерно охлажденных атомов лития-7 в магнито-оптическую ловушку.
2. Измерения концентрации и количества холодных атомов лития-7 в МОЛ на разных подуровнях основного состояния в зависимости от отстройки охлаждающего излучения и градиента магнитного поля.
3. Новая неразрушающая методика исследования и диагностики энергетических спектров холодных высоковозбужденных атомов по регистрации изменения флуоресценции облака в МОЛ.
4. Впервые измеренные энергии для различных nS -конфигураций в широком диапазоне значений главного квантового числа от $n=38$ до $n=165$, для холодных атомов лития-7.

Апробация работы

Основные результаты по теме диссертации докладывались и обсуждались на Международной конференции XXIX International Conference on Equations of State for Matter (Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 2014); всероссийском семинаре «Физика ультрахолодных атомов – 2014» (Новосибирск, 2014); IV международной молодежной научной школе-конференции «Современные проблемы физики и технологий» НИЯУ МИФИ (Москва, 2015); Международной конференции Interaction of intense energy fluxes with matter (Эльбрус, Кабардино-Балкария, Россия, 2015).

За данную работу на юбилейном конкурсе научных работ, посвященном 100-летию чл.-корр. РАН Л.М. Бибермана, автору была присуждена вторая премия в номинации: Работы аспирантов и молодых ученых без степени в возрасте до 28 лет.

Работа поддержана грантом Российского Научного Фонда № 14-12-01279.

Публикации

Основные результаты работы изложены в 8 публикациях в рецензируемых журналах, из них 6 входящих в перечень ВАК.

Личный вклад

Содержание диссертации и основные положения, выносимые на защиту, отражают персональный вклад автора в опубликованные работы. Анализ и интерпретация полученных экспериментальных данных проводились автором лично или при его непосредственном участии.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. Полный объем диссертации 104 страницы текста с 58 рисунками и 3 таблицами. Список литературы содержит 85 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы её цели и задачи, кратко изложены разделы и полученные в диссертации результаты.

В **Главе 1 «Магнито-оптическая ловушка для атомов лития-7»** дано описание созданной впервые в стране экспериментальной установки по лазерному охлаждению и захвату в магнито-оптическую ловушку атомов лития-7.

Экспериментальная установка для захвата атомов в МОЛ состоит из вакуумной системы, двух источников лазерного излучения и оптической схемы. Вакуумная система включает в себя печь, которая является источником атомного пучка, нагретую до температуры порядка 400°C. Формируемый печкой коллимированный атомный пучок замедляется при помощи зеemanовского замедлителя и встречного лазерного излучения суммарной мощностью 100 мВт. Скорость атомов на выходе из источника атомного пучка составляет порядка 1 км/с, на выходе из трубы зеemanовского замедлителя атомы имеют скорость порядка 30 м/с. Медленные атомы попадают в основную вакуумную камеру, где они и локализируются в магнито-оптической ловушке, представляющей из себя комбинацию оптической патоки и градиента магнитного поля. Оптическую патоку создают три пары взаимно ортогональных лазерных пучков, а градиент магнитного поля формируют катушки Гельмгольца, ток в которых течет в противоположных направлениях. Таким образом, в точке пересечения удерживающих атомы лазерных пучков (в области локализации облака) магнитное поле равняется нулю.

На рисунке 1 представлена схема вакуумной системы, в которой после длительного отжига и многоступенчатой откачки поддерживается вакуум на уровне 3×10^{-10} торр.

Оптическая часть состоит из двух полупроводниковых лазеров с внешним резонатором мощностью 500 и 300 мВт и длиной волны 671 нм. Охлаждение происходит на переходе $2S_{1/2}$ ($F=2$) – $2P_{3/2}$ ($F'=3$). Стабилизация охлаждающего лазера осуществляется по резонансам пропускания сканирующего термостабилизированного интерферометра Фабри-Перо, который позволяет менять отстройку частоты охлаждающего излучения в широком диапазоне. Дрейф интерферометра составляет менее 2 МГц/ч.

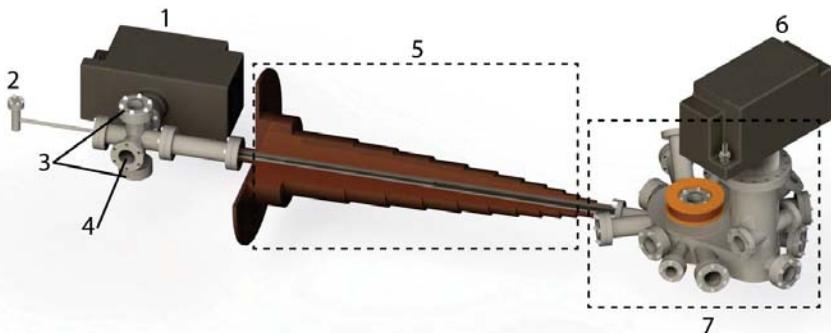


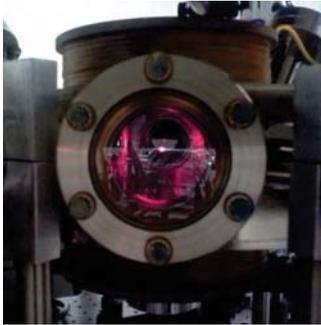
Рисунок 1. Схема вакуумной системы: 1 – Ионный (магниторазрядный) насос VacIon 40; 2 – Печка (источник атомного пучка) с металлическим литием; 3 – оптические порты для ввода излучения и диагностики атомного пучка; 4 – Фланец для подключения турбомолекулярного и форвакуумного насосов; 5 – Зеемановский замедлитель; 6 – Ионный (магниторазрядный) насос VacIon 75; 7 – Основная вакуумная камера.

Из-за наличия сверхтонкого расщепления основного состояния, охлаждающий переход не является замкнутым и атомы из возбужденного состояния $2P_{3/2}$ могут распасться в состояние $2S_{1/2}$ ($F=1$). Второй лазер, стабилизированный по внутридоплеровскому резонансу насыщенного поглощения паров лития в ячейке, обеспечивает возврат атомов в процесс охлаждения. Он переводит атомы из “темного” для охлаждающего лазера состояния $F=1$ в возбужденное состояние $2P_{3/2}$, откуда они могут распасться на подуровень основного состояния $F=2$.

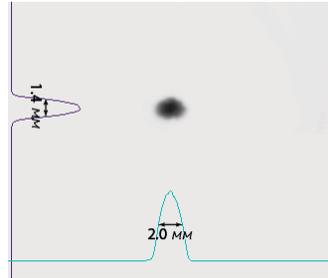
В **Главе 2 «Характеристика облака газа холодных атомов»** дано описание экспериментальных методик, при помощи которых исследовались характеристики облака газа атомов в магнито-оптической ловушке.

Для контроля профиля интенсивности и размера облака газа холодных атомов использовалась ПЗС-камера, на матрицу которой при помощи объектива фокусировалась часть флуоресценции облака. На рисунке 2 представлены фотографии облака атомов лития-7 выполненные при помощи обычной фотокамеры (а) и ПЗС-камеры (б).

В пп. 3 и 4 описано как при помощи диагностического резонансного лазера для атомов лития-7 в МОЛ получена независимая информация о плотности и количестве атомов на разных подуровнях основного состояния в зависимости от отстройки охлаждающего излучения и градиента магнитного поля. Максимальная суммарная концентрация атомов полученная в ловушке 10^{11} см^{-3} при отстройке охлаждающего излучения 20 МГц и градиенте магнитного поля 35 Гс/см, а максимальное число атомов в МОЛ более 10^9 .



(a)



(б)

Рисунок 2. (а) Фотография вакуумной камеры и облака атомов лития-7, (б) фотография облака, полученная при помощи ПЗС-камеры и распределение интенсивности флуоресценции облака атомов лития-7.

На рисунке 3 представлена зависимость суммарной концентрации атомов N от отстройки охлаждающего излучения для различных значений градиента магнитного поля.

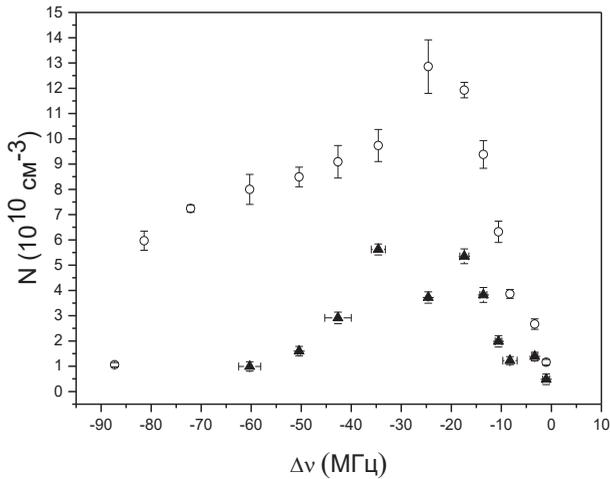


Рисунок 3. Суммарная концентрация атомов в МОЛ в зависимости от отстройки охлаждающего излучения для двух значений градиента магнитного поля. Треугольники – 21 Гс/см, кружки – 35 Гс/см.

В п. 5 проведено экспериментальное исследование пространственного распределения плотности атомов в МОЛ и сравнение его с профилем

интенсивности флуоресценции, показано, что распределение можно считать Гауссовым.

Считая что распределение плотности в облаке является Гауссовым и исходя из предположения, что в каждой точке облака скоростное распределение описывается максвелловским распределением, была построена простая модель, позволяющая оценить температуру атомов в МОЛ. В п. 6 описана методика и приведены результаты эксперимента по измерению температуры облака газа атомов методом баллистического разлета. Наименьшая наблюдаемая температура 380 ± 30 мкК.

В п. 7 исследовалась скорость загрузки и время жизни атомов в МОЛ. Время жизни атомов в ловушке $\tau_{\text{МОЛ}} = 21$ с, а число атомов, захватываемых в единицу времени $R = 1.6 \times 10^8 \text{ с}^{-1}$. Для измерения скорости загрузки и времени жизни атомов в ловушке флуоресценция облака атомов фокусировалась на фотоприемник. После включения всех лазерных пучков измерялась скорость заполнения атомов в ловушку, после полного заполнения ловушки отключалось охлаждающее излучение, т.е. прекращалась подача новых медленных атомов в область МОЛ. После выключения охлаждающего атомный пучок излучения измерялось время жизни оставшихся в ловушке атомов. Результаты измерений представлены на рисунке 4.

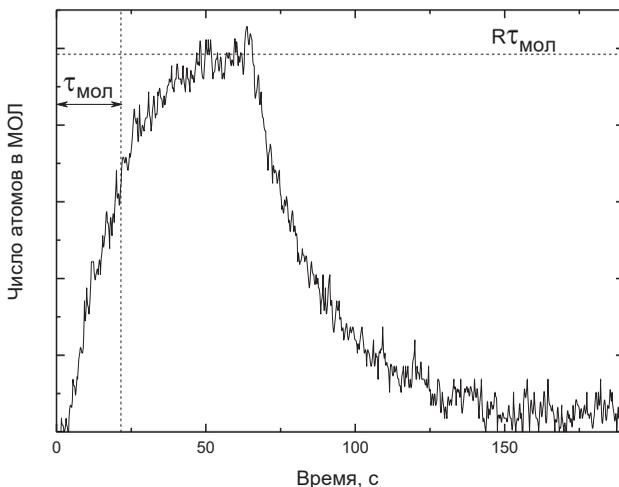


Рисунок 4. Скорость загрузки и время жизни атомов в ловушке. На рисунке показано время жизни атомов в МОЛ — $\tau_{\text{МОЛ}}$ и стационарное значение числа атомов $R\tau_{\text{МОЛ}}$.

В Главе 3 «Эффективное детектирование ридберговских состояний атомов лития-7» описана развитая в данной работе методика диагностики энергетических спектров ридберговских атомов на примере МОЛ с литием-7.

В пп. 2 и 3 дан обзор экспериментальных методик возбуждения и детектирования ридберговских состояний.

В п. 4 приведена теоретическая модель непрерывного возбуждения ридберговских атомов в МОЛ.

Для измерения энергии ридберговских переходов необходимо иметь возможность измерять частоту возбуждающего ридберговские состояния УФ лазера с очень большой абсолютной точностью. Для этого в работе используется измеритель длины волны. В п. 5 описано устройство и процедура калибровки измерителя длины волны при помощи лазера, стабилизированного на резонансах насыщенного поглощения паров ^{85}Rb . Данный прибор, после калибровки, позволяет измерять частоту с абсолютной точностью 2 МГц. Было проведено исследование частотного дрейфа измерителя длины волны, за 3.5 часа дрейф оставил примерно 2 МГц.

В п. 6 подробно описан предложенный в данной работе, метод регистрации энергетических спектров ридберговских переходов по спаду флуоресценции облака атомов в МОЛ.

На рисунке 5 представлена схема уровней атома лития-7. Охлаждающее лазерное излучение, формирующее МОЛ, является первой ступенью возбуждения в промежуточное состояние $2P_{3/2}$, с которого атомы возбуждаются УФ излучением в ридберговские состояния. Для надежной регистрации и определения частоты перехода кроме регистрации ПЗС-камерой использовался фотоприемник, на который с помощью линзы собиралась часть флуоресценции облака атомов в МОЛ.

В п. 7 Описаны эксперименты по измерению энергий для различных nS -конфигураций в широком диапазоне значений главного квантового числа для холодных атомов лития-7. Исследовались переходы с уровня $2P_{3/2}$ на высоковозбужденные nS состояния с $n=38$ до $n=165$. Сигнал флуоресценции при перестройке частоты УФ излучения в окрестности перехода в состояние $114S$ представлен на рисунке 6.

На рисунке по оси ординат ноль соответствует полному отсутствию флуоресценции облака ультрахолодных атомов лития-7, а единица соответствует максимальному сигналу флуоресценции, когда облако холодных атомов для УФ лазера становится прозрачным. При этом в ловушку продолжают непрерывно поступать и захватываться атомы со скоростью 1.6×10^8 атомов/с.

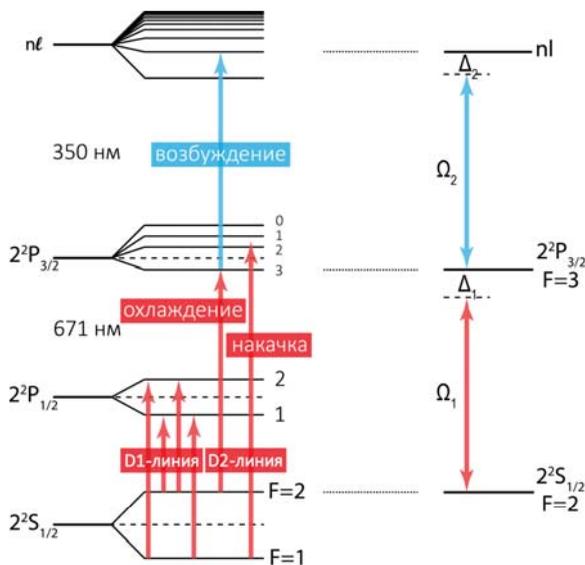


Рисунок 5. Схема уровней атома лития и эквивалентная трехуровневая схема возбуждения в ридберговские состояния.

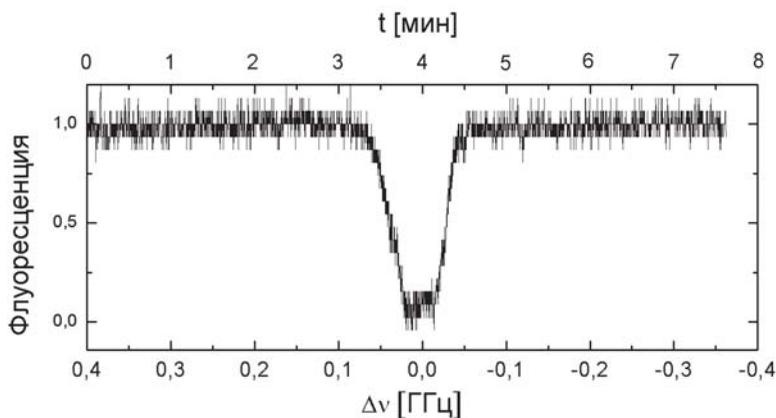


Рисунок 6. Сигнал флуоресценции в зависимости от частоты перестройки УФ излучения.

Энергия перехода из основного состояния в высоковозбужденное ридберговское рассчитывалась следующим образом:

$$E_n = E_{uv} + \frac{\nu_c - \Delta + \Delta_{c.g.}}{c}, \quad (1)$$

где E_{uv} – экспериментально измеренная частота УФ-лазера, $\nu_c = 446\,809\,874.988(27)$ МГц – значение частоты перехода $2^2S_{1/2}(F=2) - 2^2P_{3/2}(F=3)$ [21], $\Delta = 10$ МГц – отстройка охлаждающего лазера от резонанса, $\Delta_{c.g.} = 301.31$ МГц – учитывает что потенциал ионизации отсчитывается от центра тяжести уровней основного состояния, находящегося ниже уровня $2^2S_{1/2}(F=2)$.

Полученные значения энергий уровней E_n можно аппроксимировать выражением [16]:

$$E_n = E_I - \frac{R_m}{(n - \delta)^2} + c_s(n - \delta)^7, \quad (2)$$

где E_I – порог ионизации лития-7, $R_m = 109728,735348 \text{ см}^{-1}$ – постоянная Ридберга для лития-7 [16], δ – квантовый дефект, c_s – коэффициент, связанный с квадратичным эффектом Штарка. Аппроксимация производится методом наименьших квадратов, где δ , c_s и E_I – свободные параметры.

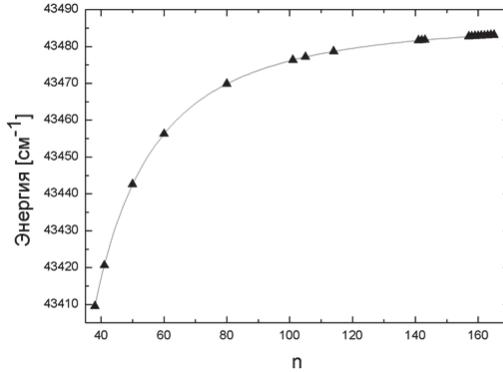


Рисунок 7. Экспериментальная зависимость энергии уровней от главного квантового числа (треугольники) и экстраполяция по формуле (2) (сплошная кривая).

Экспериментальные точки и линия экстраполяции представлены на рисунке 7.

При слабом остаточном поле для квадратичного эффекта Штарка справедливо выражение для смещения уровня энергии:

$$\delta E_0 = c_s n^7 = -\alpha \frac{|E|^2 e^2 a_0^2}{R_m} n^7, \quad (3)$$

где e – заряд электрона, a_0 – радиус Бора, E – напряженность остаточного поля, α – безразмерный коэффициент порядка единицы. Из экспериментального значения s , используя выражение (3), можно оценить остаточное поле в вакуумной камере $E \approx 10^{-2}$ В/см.

На рисунке 8 представлено сравнение порога ионизации полученного при помощи развитой в данной работе методики с результатами других экспериментальных и теоретических работ.

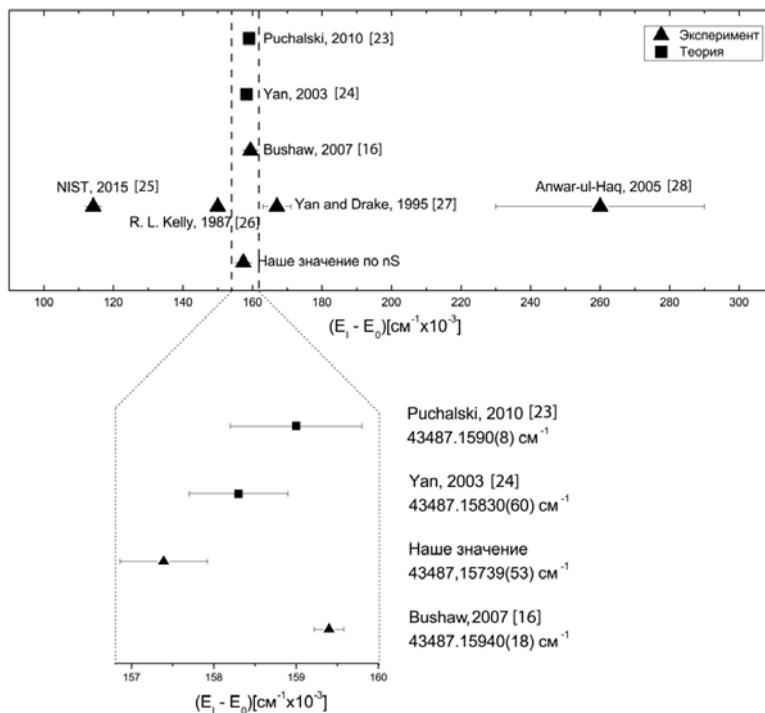


Рисунок 8. Порог ионизации для атомов лития-7. Сравнение результатов различных экспериментальных и теоретических работ. $E_0 = 43487 \text{ см}^{-1}$.

Стоит отметить, что методика определения порога ионизации в данной работе имеет принципиальные отличия от всех экспериментальных работ, представленных на рисунке 8. Во всех предыдущих работах высоковозбужденные состояния ионизировались электрическим полем, тогда как в данной работе измерялось резонансное падение флуоресценции. Значение квантового дефекта в статье [22] для nS-конфигурации лития-7 соответствует $\delta=0.399510(2)$. Это значение хорошо согласуется со значением, полученным в данной работе $\delta=0.39940(28)$.

В **Заключении** обобщены основные результаты, полученные в диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Основные результаты работы сводятся к следующему:

1. Создана экспериментальная установка, на которой осуществлено лазерное охлаждение и захват более 10^9 атомов лития-7 в магнито-оптическую ловушку.
2. При помощи дополнительного пробного лазера впервые получена независимая информация о концентрации и количестве холодных атомов лития-7 в МОЛ на разных подуровнях основного состояния в зависимости от отстройки охлаждающего излучения и градиента магнитного поля.
3. Полученная максимальная суммарная концентрация атомов в ловушке 10^{11} см^{-3} при отстройке охлаждающего излучения 20 МГц и градиенте магнитного поля 35 Гс/см.
4. Разработана новая неразрушающая методика исследования и диагностики энергетических спектров холодных высоковозбужденных атомов по регистрации изменения флуоресценции облака в МОЛ.
5. Впервые измерены энергии для различных nS-конфигураций в широком диапазоне значений главного квантового числа от $n = 38$ до $n = 165$, для холодных атомов лития-7.
6. С использованием развитой в работе методики получены значения порога ионизации, квантового дефекта S-состояния и оценена величина остаточного электрического поля в области возбуждения.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ:

1. Б.Б. Зеленер, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, А.М. Акульшин, Э.А. Манькин, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов «Лазерное охлаждение атомов ${}^7\text{Li}$ в магнитооптической ловушке», Письма в ЖЭТФ, том 98, вып. 11, с. 762-766 (2013).
2. Б.Б. Зеленер, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Э.А. Манькин, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов «О реализации высокой концентрации атомов лития-7 в магнитооптической ловушке», ЖЭТФ, том 146, вып. 5, с. 909 (2014).
3. Б.Б. Зеленер, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Э.А. Манькин, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов «Эффективное возбуждение ридберговских состояний ультрахолодных атомов лития-7», Письма в ЖЭТФ, том 100, вып. 6, с. 408-412 (2014).
4. V.A. Sautenkov, S.A. Saakyan, E.V. Vilshanskaya, B.B. Zelener, B.V. Zelener «Observation of Rydberg Transitions in Resonance Fluorescence of Ultracold Lithium-7 Atoms», Journal of Russian Laser Research, 36(2), pp. 193-199 (2015).
5. Б.Б. Зеленер, С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Э.А. Манькин, Б.В. Зеленер, В.Е. Фортов «Лазерная диагностика спектра энергии ридберговских состояний атома лития-7», ЖЭТФ, т. 148, вып. 6(12), с. 1086-1091 (2015).
6. С.А. Саакян, В.А. Саутенков, Е.В. Вильшанская, В.В. Васильев, Б.Б. Зеленер, Б.В. Зеленер «Контроль частоты перестраиваемых лазеров с помощью частотно-калиброванного лямбда-метра в эксперименте по приготовлению ридберговских атомов в магнитооптической ловушке», Квантовая Электроника, т. 45(9), с. 828-832 (2015).
7. B.B. Zelener, S.A. Saakyan, V.A. Sautenkov, A.M. Akulshin, E.A. Manykin, B.V. Zelener, V.E. Fortov «Magneto-Optical Trap for Preparation and Study of Rydberg Matter», Coherent Phenomena, V. 2, I. 1 (2015).
8. S.A. Saakyan, V.A. Sautenkov, E.V. Vilshanskaya, B.B. Zelener, B.V. Zelener «Two-photon excitation of ultracold atoms to Rydberg states», Journal of Physics: Conference Series, V. 653, I. 1, p. 012123 (2015).

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ В АВТОРЕФЕРАТЕ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Rydberg J. R. On the structure of the line-spectra of the chemical elements //The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. – 1890. – Т. 29. – №. 179. – С. 331-337.
2. France R. W. The absorption spectrum of lithium vapour //Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character. – 1930. – С. 354-360.
3. Moiseiwitsch B. L., Smith S. J. Electron impact excitation of atoms //Reviews of Modern Physics. – 1968. – Т. 40. – №. 2. – С. 238.

4. Killian T. C. et al. Formation of Rydberg atoms in an expanding ultracold neutral plasma //Physical review letters. – 2001. – Т. 86. – №. 17. – С. 3759.
5. Robinson M. P. et al. Spontaneous evolution of Rydberg atoms into an ultracold plasma //Physical review letters. – 2000. – Т. 85. – №. 21. – С. 4466.
6. Jaksch D. et al. Fast quantum gates for neutral atoms //Physical Review Letters. – 2000. – Т. 85. – №. 10. – С. 2208.
7. Lukin M. D. et al. Dipole blockade and quantum information processing in mesoscopic atomic ensembles //Physical Review Letters. – 2001. – Т. 87. – №. 3. – С. 037901.
8. Gallagher T. F. Rydberg atoms. – Cambridge University Press, 2005. – Т. 3.
9. Бобров А. А. и др. The collisional recombination coefficient in the ultracold plasma, the calculation by the molecular dynamics method //JETP. – 2011. – Т. 139. – №. 3. – С. 605-612.
10. Бронин С. Я., Зеленер Б. Б., Зеленер В. В. и др. // ЖЭТФ. – 2011. – Т. 139. – С. 822.
11. Зеленер Б. Б., Зеленер В. В., Манькин Э. А. Коэффициент трехчастичной рекомбинации слабонеидеальной ультрахолодной плазмы в сильном магнитном поле //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2011. – Т. 94. – №. 7. – С. 565-569.
12. Зеленер Б. Б., Зеленер В. В., Манькин Э. А. Эффект магнитной стабилизации ридберговских атомов и многочастичных комплексов в ультрахолодной плазме //Письма в Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 2012. – Т. 96. – №. 1. – С. 29-32.
13. Бобров А. А., Бронин С. Я., Зеленер Б. Б. и др. //ЖЭТФ. – 2013. – Т. 144. – С. 185.
14. Butlitsky M. A., Zelener V. B., Zelener V. V. Critical point of gas-liquid type phase transition and phase equilibrium functions in developed two-component plasma model //The Journal of chemical physics. – 2014. – Т. 141. – №. 2. – С. 024511.
15. Bushaw B. A. et al. Ionization energy of Li 6, 7 determined by triple-resonance laser spectroscopy //Physical Review A. – 2007. – Т. 75. – №. 5. – С. 052503.
16. Deiglmayr J. et al. Coherent excitation of Rydberg atoms in an ultracold gas //Optics communications. – 2006. – Т. 264. – №. 2. – С. 293-298.
17. Kis Z., Stenholm S. Optimal control approach for a degenerate STIRAP //Journal of Modern Optics. – 2002. – Т. 49. – №. 1-2. – С. 111-124.
18. Snigirev S. A. et al. Coherent excitation of the 5D5/2 level of ultra-cold rubidium atoms with short laser pulses //Quantum Electronics. – 2012. – Т. 42. – №. 8. – С. 714.
19. Lu X., Sun Y., Metcalf H. Rydberg atom spectroscopy enabled by blackbody radiation ionization //Physical Review A. – 2011. – Т. 84. – №. 3. – С. 033402.
20. Mohapatra A. K., Jackson T. R., Adams C. S. Coherent optical detection of highly excited Rydberg states using electromagnetically induced transparency //Physical review letters. – 2007. – Т. 98. – №. 11. – С. 113003.

21. Sansonetti C. J. et al. Absolute Transition Frequencies and Quantum Interference in a Frequency Comb Based Measurement of the Li 6, 7 D Lines //Physical review letters. – 2011. – Т. 107. – №. 2. – С. 023001.
22. Goy P. et al. Quantum defects and specific-isotopic-shift measurements in ns and np highly excited states of lithium: Exchange effects between Rydberg and core electrons //Physical Review A. – 1986. – Т. 34. – №. 4. – С. 2889.
23. Puchalski M., Kędziera D., Pachucki K. Ionization potential for excited S states of the lithium atom //Physical Review A. – 2010. – Т. 82. – №. 6. – С. 062509.
24. Yan Z. C., Drake G. W. F. Bethe logarithm and QED shift for Lithium //Physical review letters. – 2003. – Т. 91. – №. 11. – С. 113004.
25. Kramida, A., Ralchenko, Yu., Reader, J., and NIST ASD Team (2013). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.1), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2014, July 17]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
26. Kelly R. L. Atomic and ionic spectrum lines below 2000 Angstroms. hydrogen through krypton //Journal of Physical and Chemical Reference Data. – 1987. – Т. 16.
27. Yan Z. C., Drake G. W. F. Eigenvalues and expectation values for the $1s^2 2s^2 S$, $1s^2 2p^2 P$, and $1s^2 3d^2 D$ states of lithium //Physical Review A. – 1995. – Т. 52. – №. 5. – С. 3711.
28. Anwar-ul-Haq M. et al. On the first ionization potential of lithium //Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics. – 2005. – Т. 38. – №. 2. – С. S77.

Саакян Сергей Арамович
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ГАЗА
УЛЬТРАХОЛОДНЫХ ВЫСОКОВОЗБУЖДЕННЫХ И ЧАСТИЧНО
ИОНИЗОВАННЫХ АТОМОВ ЛИТИЯ-7

Автореферат

Подписано в печать	00.00.2016	Формат 60x84/16
Печать офсетная	Уч.-изд.л. 1,5	Усл.-печ.л. 1,37
Тираж 100 экз.	Заказ 215	Бесплатно
ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2		