

# ЛАЗЕРНАЯ ДИАГНОСТИКА СПЕКТРА ЭНЕРГИИ РИДБЕРГОВСКИХ СОСТОЯНИЙ АТОМА ЛИТИЯ-7

*Б. Б. Зеленер\*, С. А. Саакян, В. А. Саутенков,  
Э. А. Манькин, Б. В. Зеленер, В. Е. Фортвов*

*Объединенный институт высоких температур Российской академии наук  
127412, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 3 июля 2015 г.

Целью настоящей работы является экспериментальное изучение спектров высоковозбужденных атомов лития-7, приготовленных при помощи магнитооптической ловушки и лазерной УФ-системы. Разработан метод диагностики энергии ридберговских атомов по изменению интенсивности резонансной флуоресценции ультрахолодных атомов при прохождении частоты возбуждающего УФ-излучения через частоту ридберговского перехода. Получены величины энергий для различных  $nS$ -конфигураций в широком диапазоне значений главного квантового числа  $n$  от 38 до 165. Обсуждаются значения квантового дефекта и порога ионизации, полученные в различных экспериментах и предсказанные теоретически.

DOI: 10.7868/S0044451015120032

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследования ультрахолодной неидеальной плазмы и ультрахолодного газа ридберговских атомов [1–3] важны как для фундаментальной физики, так и для применений в современных квантовых технологиях. Аналитические и численные расчеты показывают существенное замедление рекомбинации в таких системах в случае достаточно высоких плотностей и низких температур, когда параметр взаимодействия больше единицы [4, 5]. Особенно сильно рекомбинация замедляется в случае сильного магнитного поля [6–8]. Такие условия возникают в экспериментах по созданию антиводорода [9–11]. Аналитические оценки и термодинамические расчеты численным методом Монте-Карло указывают на возможность существования как ближнего, так и дальнего порядка в сильно взаимодействующей ультрахолодной плазме, а также в ультрахолодном плотном ансамбле ридберговских атомов [1–3, 12–16]. Существование пространственных структур, а также возможность при помощи резонансного лазерного излучения манипулировать уровнями возбуждения и степенью взаимодействия ридберговских атомов открывает возможность создания компонент для квантовых компьютеров [17–23]. Для реализации этих проектов желательно иметь простую и

надежную диагностику ридберговских состояний. Стандартные экспериментальные методы используют технику диагностики, основанную на ионизации при помощи электрического поля [3, 24, 25]. В последних работах для диагностики использовалась электромагнитно-индуцированная прозрачность (ЭИП) [26] и техника четырехволнового смешения [27].

В наших предыдущих публикациях изложено описание нашей магнитооптической ловушки для ультрахолодных атомов лития [28–30] и предложен новый метод эффективной диагностики ридберговских переходов, основанный на регистрации изменения интенсивности резонансной флуоресценции атомов в ловушке [31, 32]. Этот метод не разрушает ридберговских состояний.

В настоящей работе при помощи развитого нами метода экспериментально получен энергетический спектр высоковозбужденных атомов лития-7 в  $nS$ -конфигурациях в диапазоне значений главного квантового числа  $n$  от 38 до 165. По данным эксперимента рассчитаны значения квантового дефекта, порога ионизации и величины остаточного электрического поля.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

В нашем эксперименте исследуется спектр ридберговских состояний атомов лития-7. Заметим, что

\*E-mail: bobozel@mail.ru

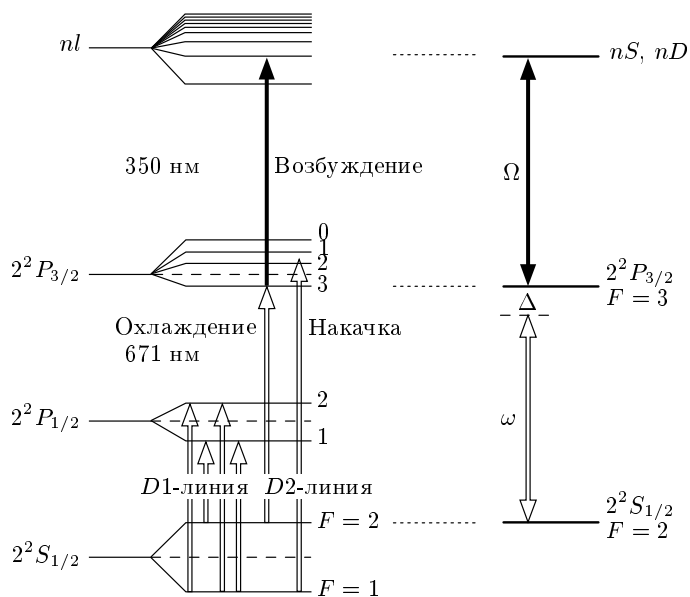


Рис. 1. Схема энергетических уровней атомов лития-7

ограниченное число данных можно найти в базе NIST [33]. На рис. 1 представлена схема уровней атома лития-7.

Сверхтонкие переходы в *D1*-линии уверенно разрешаются, а в случае *D2*-линии сверхтонкая структура возбужденного состояния  $2^2P_{3/2}$  не разрешается, поскольку спектральные интервалы между подуровнями возбужденного состояния меньше или сравнимы с естественной шириной переходов. При охлаждении только на *D2*-линии температура ограничена доплеровским пределом. Возможность стабилизации охлаждающего лазерного излучения на разных резонансных переходах на *D1*- и *D2*-линиях позволяет получить температуру ниже доплеровского предела за счет сизифова охлаждения,  $T < 140$  мК [34]. Для получения ультрахолодного газа высоковозбужденных (ридберговских) атомов лития, а также для получения ультрахолодной плазмы, была создана экспериментальная установка. Эта установка дает возможность осуществить лазерное охлаждение атомов лития и их удержание в магнитооптической ловушке (МОЛ) при ультранизкой температуре. Согласно правилам отбора с *P*-уровня возможны переходы только в *S*- и *D*-состояния. Принципиальная схема окончательного охлаждения и удержания атомов в ловушке представлена на рис. 2. Предварительное охлаждение атомов осуществляется с помощью зеемановского замедлителя.

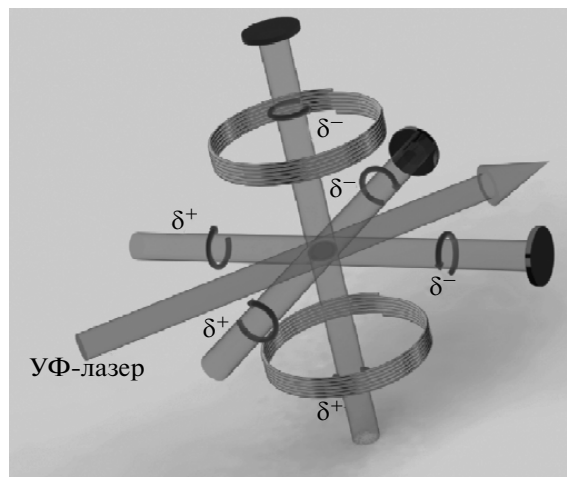


Рис. 2. Принципиальная схема лазерного охлаждения атомов лития-7 в МОЛ

Для получения ридберговских атомов использовалась лазерная система от производителя Spectra Physics с выходной мощностью непрерывного УФ-излучения до 100 мВт на длине волны 349–351 нм. Частота лазера могла плавно перестраиваться в спектральной окрестности ридберговских переходов. Пучок УФ-излучения диаметром 1 см направлялся на облако ультрахолодных атомов в МОЛ. При прохождении значения частоты УФ-лазера через резонанс с ридберговским уровнем происходит уменьшение флюоресценции облака атомов до его частичного или полного исчезновения в зависимости от мощности УФ-лазера и перехода. После прохождения резонанса ультрахолодные атомы лития начинают заново набираться в магнитооптическую ловушку. Для регистрации и определения частоты перехода, кроме регистрации на CCD-камере, мы используем фотоприемник, на который фокусируем часть флюоресценции облака ультрахолодных атомов. Одновременно мы следим за частотой УФ-излучения с помощью измерителя длины волны компании Angstrom High Finesse WS-U с точностью до 2 МГц [35]. Измеритель длины волны откалиброван по лазеру, частота которого стабилизирована по внутридоплеровскому резонансу насыщения паров рубидия-85 (780 нм).

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

Первые наши эксперименты по непрерывному двухфотонному возбуждению ультрахолодных атомов лития-7 описаны в работе [31]. Особенностью

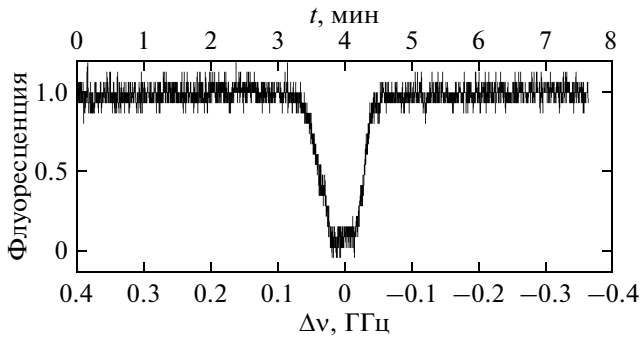


Рис. 3. Сигнал флуоресценции в зависимости от перестройки частоты УФ-излучения при интенсивности УФ-излучения  $10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup> на входе в вакуумную камеру

проведенных экспериментов являлась высокая скорость сканирования частоты лазерного излучения. При такой высокой скорости сканирования спектральное разрешение было низким. При более медленном сканировании, когда время набора облака ультрахолодных атомов было меньше времени изменения частоты, удалось улучшить спектральное разрешение [32]. Мы исследовали переходы из состояния  $2P_{3/2}$  на высоковозбужденные  $S$ - и  $D$ -состояния с  $n$  от 38 до 165. Сигнал флуоресценции при перестройке частоты УФ-излучения в окрестности перехода в состояние  $114S$  представлен на рис. 3.

На рисунках по оси ординат нуль соответствует полному отсутствию флуоресценции облака ультрахолодных атомов лития-7, а единица соответствует максимальному сигналу флуоресценции, когда облако холодных атомов для УФ-лазера становится прозрачным. По оси абсцисс отложено относительное расстояние между уровнями в ГГц. Изолированный резонанс на рис. 3 соответствует переходу  $2P_{3/2}$ - $114S$ . Ширина резонанса составляет примерно 0.1 ГГц.

Поляризуемость  $D$ -состояний быстро увеличивается с увеличением квантового числа. Растет наблюдаемая ширина переходов  $2P_{3/2}$ - $nD$ . На высоких ридберговских уровнях уширение  $D$ -конфигурации настолько высоко, что сравнимо с расстояниями между соседними уровнями с главными квантовыми числами  $n$  и  $(n + 1)$  (рис. 4).

При  $n = 157$ - $165$  резонансы, соответствующие переходам в состояния  $nS$ , уверенно разрешаются, тогда как  $nD$ -состояния, при больших  $n$ , сильно уширены (плоские участки на рис. 4). Выше по энергии все уровни сливаются, образуя непрерывный спектр.

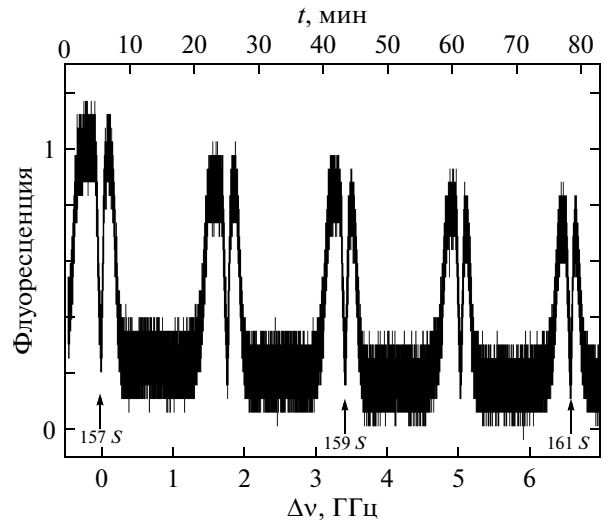


Рис. 4. Изменение флуоресценции облака ультрахолодных атомов лития-7 для уровней 157-161, в  $S$ - и  $D$ -конфигурациях при интенсивности УФ-излучения  $3 \cdot 10^{-2}$  Вт/см<sup>2</sup> на входе в вакуумную камеру

Обратимся теперь к исследованию спектров для  $S$ -конфигурации. Для этого вычислим энергию уровня  $nS$ :

$$E_n = E_{uv} + E_c - \Delta + \Delta_{cg}, \quad (1)$$

где  $E_{uv}$  — экспериментально измеренная частота УФ-лазера,  $E_c = 14903.9730012$  см<sup>-1</sup> — значение частоты перехода  $2^2S_{1/2}$ - $2^2P_{3/2}$  [36] с учетом того, что охлаждающий лазер сдвинут на  $\Delta = 10$  МГц ниже и то, что потенциал ионизации отсчитывается от центра тяжести уровней находящегося на  $\Delta_{cg} = 301.31$  МГц ниже уровня  $2^2S_{1/2}$  ( $F = 2$ ) [37].

Полученные нами значения энергий уровней  $E_n$  можно аппроксимировать формулой [27]

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

где  $E_I$  — порог ионизации лития-7,  $R_m = 109728.735348$  см<sup>-1</sup> — постоянная Ридберга для лития-7 [27],  $\delta$  — квантовый дефект,  $c_s$  — коэффициент, связанный с квадратичным эффектом Штарка. Экстраполяция производится методом наименьших квадратов (алгоритм Левенберга-Марквардта), где  $\delta$ ,  $c_s$ ,  $E_I$  — свободные параметры.

Экспериментальные точки и линия экстраполяции представлены на рис. 5. Свободные параметры, полученные из экстраполяции по формуле (2), приведены в табл. 1.

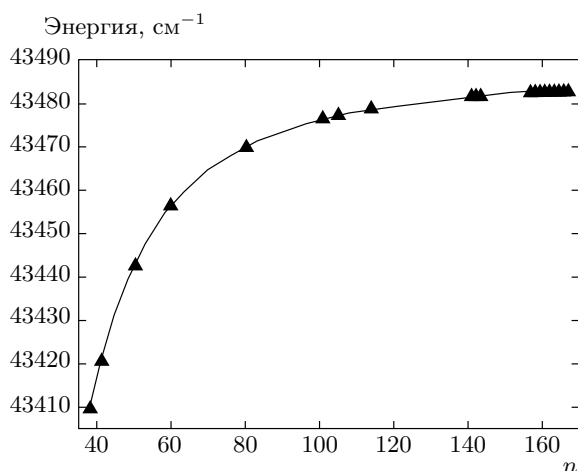


Рис. 5. Экспериментальная зависимость энергии уровней от главного квантового числа (треугольники) и экстраполяция по формуле (2) (сплошная кривая)

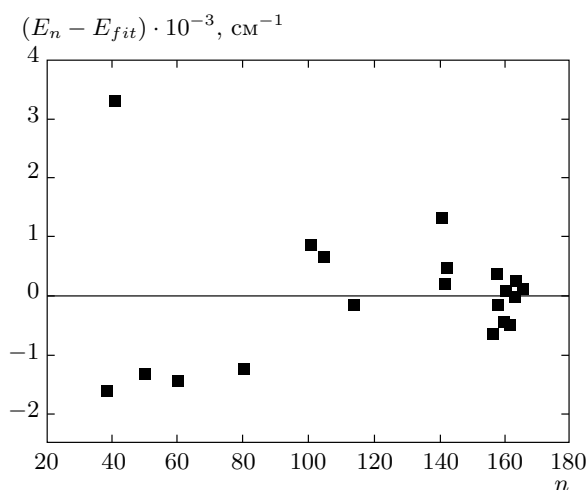


Рис. 6. Точки — разности экспериментальных и расчетных значений энергий уровней  $nS$ -конфигураций атомов лития-7

Таблица 1. Свободные параметры, полученные из эксперимента:  $E_I$  — порог ионизации,  $\delta$  — дефект  $nS$ -конфигурации,  $c_s$  — коэффициент, связанный с квадратичным эффектом Штарка

Параметр	Значения
$E_I, \text{см}^{-1}$	43487.15739(53)
$\delta$	0.39940(28)
$c_s, \text{см}^{-1}$	$-1.69(24) \cdot 10^{-18}$

Значение квантового дефекта в статье [38] для  $nS$ -конфигурации лития-7 соответствует  $\delta = 0.399510(2)$ . Это значение хорошо согласуется с нашими данными. 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,  $\alpha$  — безразмерный коэффициент порядка единицы.

Из нашего значения  $c_s$  и формулы (3) мы можем оценить остаточное поле  $E \approx 10^{-2}$  В/см. В табл. 2 приведены наши экспериментальные данные по энергиям  $nS$ -уровней и расчетные данные с учетом поправки на квадратичный эффект Штарка и наших измерений порога ионизации и дефекта.

По результатам табл. 2 можно построить зави-

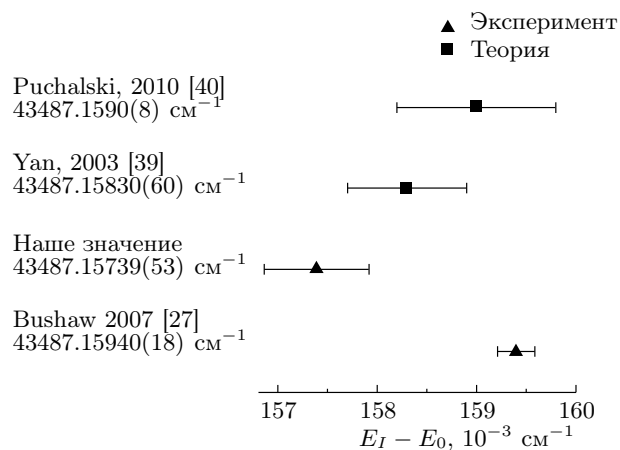


Рис. 7. Порог ионизации для атомов лития-7. Сравнение результатов различных экспериментальных и теоретических работ.  $E_0 = 43487 \text{ см}^{-1}$

симость разности экспериментальных и расчетных значений энергий уровней от номера уровня (рис. 6). При  $n < 80$  наблюдается систематическое отклонение измеренных величин от расчетных, а при  $n > 100$  отклонения носят случайный характер.

На рис. 7 приведено сравнение теоретических и экспериментальных данных о пороге ионизации для атомов лития-7 с нашим результатом. На рисунке видно хорошее согласие результата нашего эксперимента и теоретических данных.

**Таблица 2.** Экспериментальные данные и энергии, рассчитанные с использованием наших параметров из табл. 1 для  $nS$ -уровней

$n$	Измеряемая длина волны УФ-лазера, нм	Энергия $E_n$ , см <sup>-1</sup>	Расчетное значение $E_{fit}$ , см <sup>-1</sup>
38	350.8087458	43409.54343	43409.54504
41	350.6728000	43420.59421	43420.59093
50	350.4029548	43442.55485	43442.55619
60	350.2346890	43456.26584	43456.2673
80	350.0682799	43469.83851	43469.83976
101	349.9889200	43476.31581	43476.31497
105	349.9789600	43477.12894	43477.12829
114	349.9602800	43478.65411	43478.65423
141	349.9241290	43481.60618	43481.60487
142	349.9231870	43481.68312	43481.6829
143	349.9222489	43481.75973	43481.75929
157	349.9110000	43482.67844	43482.67909
158	349.9102968	43482.73588	43482.73552
159	349.9096258	43482.79068	43482.79087
160	349.9089639	43482.84474	43482.84517
161	349.9083056	43482.89851	43482.89845
162	349.9076723	43482.95023	43482.95073
163	349.9070380	43483.00204	43483.00204
164	349.9064189	43483.0526	43483.0524
165	349.9058148	43483.10195	43483.10183

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Нами изучены спектры высоковозбужденных атомов лития-7, приготовленных при помощи магнитооптической ловушки. Разработан метод диагностики энергии ридберговских атомов при помощи непрерывного УФ-лазера. Получены значения энергии для различных  $nS$ -конфигураций в широком диапазоне значений главного квантового числа от  $n = 38$  до  $n = 165$  для ультрахолодных атомов лития-7. Из экспериментальных данных получены величины порога ионизации, квантового дефекта и величина остаточного электрического поля. Наблюдается хорошее согласие с другими тео-

ретическими и экспериментальными работами. Есть возможность дальнейшего увеличения точности измерений с помощью представленной методики за счет увеличения статистики и компенсации остаточных электрических полей.

Авторы благодарны С. Я. Бронину, Л. Г. Дьячкову, Е. В. Вильшанской, Н. Б. Буянову, В. В. Васильеву, В. Л. Величанскому, М. А. Губину, С. А. Зиброву, И. И. Рябцеву, А. И. Сидорову и М. Н. Шнейдеру за полезные обсуждения, замечания и помощь. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант № 14-50-00124).

## ЛИТЕРАТУРА

1. T. Pohl, C. S. Adams, and H. R. Sadephpour, *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* **44**, 180201 (2011).
2. V. Fortov, I. Iakubov, and A. Khrapak, *Physics of Strongly Coupled Plasma*, Oxford Univ. Press, Oxford (2006).
3. T. F. Gallagher, *Rydberg Atoms*, Cambridge Univ. Press, Cambridge (2005).
4. А. А. Бобров, С. Я. Бронин, Б. Б. Зеленер и др., *ЖЭТФ* **139**, 605 (2011).
5. С. Я. Бронин, Б. Б. Зеленер, Б. В. Зеленер и др., *ЖЭТФ* **139**, 822 (2011).
6. Б. Б. Зеленер, Б. В. Зеленер, Э. А. Маныкин, *Письма в ЖЭТФ* **94**, 565 (2011).
7. Б. Б. Зеленер, Б. В. Зеленер, Э. А. Маныкин, *Письма в ЖЭТФ* **96**, 29 (2012).
8. А. А. Бобров, С. Я. Бронин, Б. Б. Зеленер и др., *ЖЭТФ* **144**, 185 (2013).
9. M. Amoretti et al. (ATHENA Collab.), *Phys. Lett. B* **23**, 578 (2004).
10. G. Gabrielse et al. (ATRAP Collab.), *Phys. Rev. Lett.* **89**, 233401 (2002).
11. G. V. Andresen et al. (ALPHA Collab.), *Nature Phys.* **7**, 558 (2011).
12. Э. А. Маныкин, М. И. Ожован, П. П. Полуэктов, *ДАН СССР* **260**, 1096 (1981).
13. Э. А. Маныкин, М. И. Ожован, П. П. Полуэктов, *ЖЭТФ* **84**, 442(1983).
14. Э. А. Маныкин, М. И. Ожован, П. П. Полуэктов, *ЖЭТФ* **102**, 804 (1992).
15. Б. Б. Зеленер, Б. В. Зеленер, Э. А. Маныкин, *Письма в ЖЭТФ* **9**, 696 (2010).
16. M. A. Butlitsky, B. V. Zelener, and B. V. Zelener, *J. Chem. Phys.* **141**(2), 024511 (2014).
17. R. P. Feynman, *Internat. J. Theor. Phys.* **21**(6), 467 (1982).
18. T. Pohl, E. Demler, and M. D. Lukin, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 043002 (2010).
19. M. Viteau et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 060402 (2011).
20. P. Schaus, M. Cheneau, M. Endres et al., *Nature* **491**, 87 (2012).
21. I. I. Ryabtsev, I. I. Beterov, D. B. Tretyakov et al., *Phys. Rev. Lett.* **104**, 073003 (2010).
22. D. B. Tretyakov, V. M. Entin, E. A. Yakshina et al., *Phys. Rev. A* **90**(4), 041403 (2014).
23. I. I. Beterov, T. Andrijauskas, D. B. Tretyakov et al., *Phys. Rev. A* **90**(4), 043413 (2014).
24. B. A. Bushaw, W. Nörtershäuser, G. W. F. Drake et al., *Phys. Rev. A* **75**, 052503 (2007).
25. S. Ye, X. Zhang, T. C. Killian et al., *Phys. Rev. A* **88**, 043430 (2013).
26. J. Deiglmaier, M. Reetz-Lamour, T. Amthor et al., *Opt. Commun.* **264**, 293 (2006).
27. B. A. Bushaw, W. Nörtershäuser, G. W. F. Drake et al., *Phys. Rev. A* **75**, 052503 (2007).
28. Б. Б. Зеленер, С. А. Саакян, В. А. Саутенков и др., *Письма в ЖЭТФ* **98**, 762 (2013).
29. Б. Б. Зеленер, С. А. Саакян, В. А. Саутенков и др., *ЖЭТФ* **146**, (2014).
30. B. V. Zelener, S. A. Saakyan, V. A. Sautenkov et al., *Coherent Opt. Phen.* **2**(1), 29 (2015).
31. Б. Б. Зеленер, С. А. Саакян, В. А. Саутенков и др., *Письма в ЖЭТФ* **100**, 408 (2014).
32. V. A. Sautenkov, S. A. Saakyan, E. V. Vilshanskaya et al., *J. Russ. Laser Res.* **36**(2), 193 (2015).
33. A. Kramida, Yu. Ralchenko, J. Reader, and NIST ASD Team (2013). NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.1); <http://physics.nist.gov/asd> [2014, July 17]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
34. A. T. Grier, I. Ferrier-Barbut, B. S. Rem et al., *Phys. Rev. A* **87**, 063411 (2013).
35. С. А. Саакян, В. А. Саутенков, Е. В. Вильшанская и др., *КЭ* **45**, 828 (2015).
36. C. J. Sansonetti et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 023001 (2011).
37. И. И. Соболевман, *Введение в теорию атомных спектров*, Наука, Москва (1977), с. 167.
38. P. Goy, J. Liang, M. Gross et al., *Phys. Rev. A* **34**, 2889 (1986).
39. Z. C. Yan and G. W. Drake, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 113004 (2003).
40. M. Puchalski, D. Kędziera, and K. Pachucki, *Phys. Rev. A* **82**(6), 062509 (2010).