

УДК 539.19

*А.С. Скублов, В.Б. Совков, В.С. Иванов*

## НАБЛЮДЕНИЕ И АНАЛИЗ ТРИПЛЕТНЫХ СОСТОЯНИЙ ТЯЖЕЛЫХ ДИМЕРОВ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ

*A.S. Skublov, V.B. Sovkov, V.S. Ivanov*

St. Petersburg State University,  
1 Ulyanovskaya St., St. Petersburg, 198504, Russia.

### TRIPLET STATES OF HEAVY ALKALI METAL DIMERS: OBSERVATION AND ANALYSIS

В работе суммированы результаты последних исследований триплетных состояний тяжелых димеров щелочных металлов ( $Rb_2$ ,  $Cs_2$ ). Исследования направлены на анализ экспериментальных данных по спектроскопии двойного оптически-оптического резонанса, облегченного взаимодействием состояний. Описана и продемонстрирована методика обработки таких данных.

ДИМЕРЫ ЩЕЛОЧНЫХ МЕТАЛЛОВ, АДИАБАТИЧЕСКИЕ ПОТЕНЦИАЛЫ, АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ.

The latest results on the study of the triplet states of the heavy alkali metal dimers have been summed up. The investigations were aimed at an analysis of the experimental data on the perturbation facilitated optical-optical double resonance (PFOODR) spectroscopy. The technique of such data treatment was described and demonstrated.

ALKALI METAL DIMERS, ADIABATIC POTENTIALS, EXPERIMENTAL DATA ANALYSIS.

Прецизионное измерение величин колебательно-вращательных термов и интенсивностей оптических переходов в системе квантовых состояний молекул уже давно составляет традиционное применение лазеров в физико-химических исследованиях [1]. Техника двойного оптически-оптического резонанса, облегченного взаимодействием состояний (Perturbation Facilitated Optical-Optical Double Resonance – PFOODR) [2, 3], позволяет достичь триплетных состояний молекул, основное состояние которых является синглетным, хотя последнее обстоятельство препятствует прямому оптическому заселению этих состояний.

Энергетическая схема, поясняющая суть названной экспериментальной техники, приведена на рис. 1 (выбран пример димера цезия). Термодинамически равновесные пары щелочного металла при типичной

температуре  $T \approx 500\text{--}700$  К подвергаются одновременному облучению двумя лазерами, действующими с противоположных сторон: первый предназначен для накачки (частота  $\nu_1$ ), второй – пробный ( $\nu_2$ ).

Энергия накачки  $h\nu_1$  переводит молекулу из основного синглетного состояния  $X^1\Sigma_g^+$  в систему  $A^1\Sigma_u^+ \sim b^3\Pi_u$ , представляющую собой квантовую комбинацию синглетного и триплетного электронных состояний, перемешанных вследствие сильного спин-орбитального взаимодействия. Выбираются такие уровни энергии этой системы (оконные), в которых высоки доли как синглетной, так и триплетной компонент. Энергия излучения пробного лазера с рабочей частотой  $\nu_2$  переводит молекулу из комбинационного в вышележащее триплетное состояние (на рис. 1 это  $Cs_2\ 3^3\Sigma_g^+$ ); ввиду наличия триплетной компоненты в оконном состоянии переход идет с высокой эф-

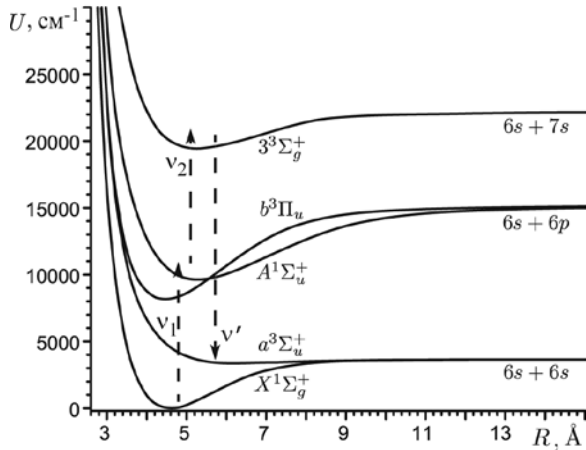


Рис. 1. Типичная энергетическая схема PFOODR-эксперимента на примере молекулы  $\text{Cs}_2$ . Сплошные линии – адиабатические потенциалы  $U(R)$  межъядерного взаимодействия в соответствующих состояниях; пунктирами показаны оптические переходы с соответствующими частотами

фективностью. Данная энергетическая схема переходов позволяет селективно заселить отдельный колебательно-вращательный уровень верхнего состояния; часто удается также разрешить (полностью или частично) его сверхтонкую структуру. Появление флуоресценции с частотой  $\nu'$  вызвано переходом в расположенные ниже триплетные состояния (чаще всего это  $a^3\Sigma_u^+$ ) и свидетельствует о достижении оптического резонанса с таким уровнем; последующее сканирование по частоте пробного лазера  $\nu_2$  позволяет последовательно заселить группу уровней в доступном энергетическом диапазоне и измерить энергии их термов. Регистрация разрешенной по частоте флуоресценции дает большой дополнительный объем данных об интенсивностях переходов и, в частности, существенно упрощает решение задачи о нумерации уровней верхнего состояния колебательным квантовым числом.

Типичный спектр разрешенной флуоресценции вместе с его квантовомеханической симуляцией (выполнена нами), показан на рис. 2. Заметим, что адиабатический потенциал в состоянии  $a^3\Sigma_u^+$ , проявляющий в большей части энергетического диапазона отталкивательное действие, обладает

неглубокой потенциальной ямой. Это обуславливает наличие в спектре флуоресценции не только сплошных, но и дискретных областей.

Эксперименты рассматриваемого типа несут в себе богатую информацию об электронной структуре, а также ядерной и электронной (включая спиновую) динамике. Изначально объектом значительной части экспериментов в этой технике являлись легкие димеры щелочных металлов ( $\text{Li}_2$ ,  $\text{Na}_2$ ,  $\text{K}_2$ ) [2, 3], для чего применялись лазеры видимого и ближнего ультрафиолетового диапазонов. В последние несколько лет основной интерес был перенесен на тяжелые димеры ( $\text{Rb}_2$ ,  $\text{Cs}_2$ ), что потребовало применения инфракрасных лазеров. Интерес к этим соединениям не случаен: они являются одними из основных или даже

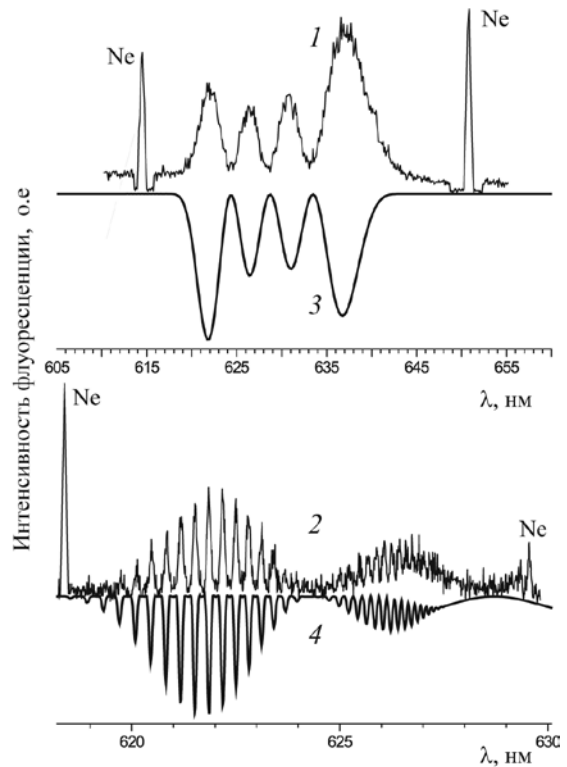


Рис. 2. Спектры флуоресценции  $\text{Cs}_2$  в электронном переходе  $3^3\Sigma_g^+ (\nu = 3, N = 33, T = 19573,262 \text{ см}^{-1}) \rightarrow a^3\Sigma_u^+$ , зарегистрированные со сравнительно низким (1) и более высоким (2) разрешением, а также их квантовомеханическая симуляция (спектры перевернуты) (3, 4). Пики флуоресценции от Ne служат в эксперименте реперными калибровочными линиями

основными объектами в перспективных исследованиях по лазерной ультрахолодной ассоциации, бозе- и ферми-конденсации, по оптическому когерентному управлению квантовой динамикой (см., например, работу [4]). Димер цезия был предложен в качестве тестовой системы для проверки возможной вариации мировых констант (отношение масс электрона и протона, постоянная тонкой структуры) во времени [5, 6]. В связи с этими и другими приложениями, разумеется, оказалась востребованной точная количественная информация об их электронной структуре и параметрах межъядерного взаимодействия.

Весь комплекс исследований выполняется нами в рамках международного сотрудничества. Наше участие традиционно сводилось к планированию части экспериментов и анализу полученных данных.

Целью настоящей работы было суммирование последних результатов таких исследований и демонстрация методов анализа данных рассматриваемых экспериментов.

Типичные задачи, требующие решения при анализе экспериментов, сводятся к классификации зарегистрированных состояний, определению адиабатических потенциалов межъядерного взаимодействия в этих электронных состояниях, а также параметров тонких, сверхтонких и других неадиабатических (различной природы) взаимодействий; при условии аккуратной калибровки интенсивностей могут быть также определены функции дипольного момента конкретного перехода.

Перечисленные задачи относятся к классу обратных задач и чаще всего решаются методами оптимизационного моделирования. Следует обратить внимание на то, что, вследствие сложности эксперимента, редко удается получить исчерпывающую информацию по отдельно взятому состоянию (например, представительный набор колебательно-вращательных термов в полном энергетическом диапазоне). Поэтому в анализ приходится одновременно закладывать разнородные экспериментальные и априорные теоретические данные (энергии термов, распределения интенсивностей, расчетные *ab initio* потенциалы и т. п.), от-

носящиеся к целой группе электронных состояний: только согласие результатов моделирования всех этих данных может служить критерием адекватности построенной модели. При этом требуется применение прецизионных устойчивых алгоритмов и компьютерных программ для расчета наблюдаемых в эксперименте величин по параметрам молекулярного строения, подлежащим определению.

В своей практике мы используем набор утилит на алгоритмическом языке Matlab, написанный нами для создания, отладки и последующей оптимизации сложных моделей, которые строят из более простых «частных» моделей по блочному принципу (пакет Optimizer). В качестве базовых частных моделей используются наши программы решения стационарного уравнения Шредингера (метод Нумерова – Кули – Блатта, ренормированный метод Нумерова), расчета квантовой динамики (метод расщепленного оператора эволюции), в том числе и для многоканальных систем, т. е. для нескольких неадиабатически взаимодействующих электронных состояний (см. работы [1, 7] и ссылки в них). В частности, спектры, показанные на рис. 2, были рассчитаны в технике расщепленного оператора по предварительно определенным нами потенциалам состояний  $3^3P_g$  и  $a^3\Sigma_u^+$ .

Для аппроксимации самих потенциалов используется ряд подходов: поточечный потенциал типа РКР (Ридберг – Клейн – Рисс; см. работу [8]), деформированный *ab initio* потенциал [9], многопараметрические модельные функции [10]. В последнее время повысились требования к способности таких функций корректно описывать область дальнего действия, где доминирующую роль играют так называемые дисперсионные эффекты: эта область важна для описания явлений, в которых происходит медленное сближение (ультрахолодная ассоциация) или разлет атомов.

Из всего множества триплетных состояний димеров щелочных металлов наибольший интерес, на наш взгляд, представляет нижнее триплетное состояние  $a^3\Sigma_u^+$ . Как уже отмечалось, оно обладает неглубокой

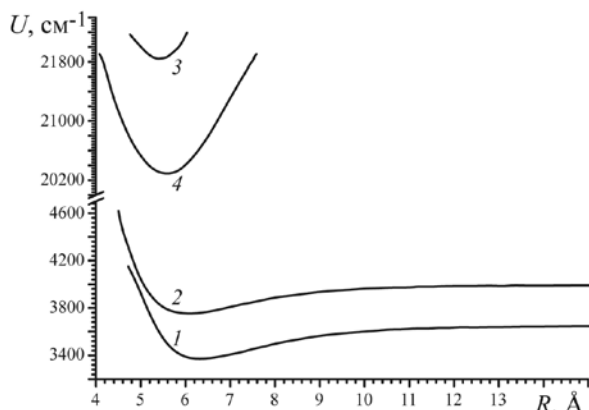


Рис. 3. Потенциалы триплетных состояний молекул  $\text{Cs}_2$  (1, 3) и  $\text{Rb}_2$  (2, 4), определенные по данным PFOODR-спектроскопии. Энергия отсчитывается от дна потенциальной ямы основного состояния  $X^1\Sigma_g^+$  соответствующей молекулы. Основные параметры состояний приведены в таблице

потенциальной ямой, параметры которой могут быть оценены традиционными для спектроскопии методами по колебательно-вращательной структуре ее уровней. Привлечение данных по интенсивностям переходов из верхних состояний позволяет уточнить сведения об этой потенциальной яме, а также получить информацию об «отгалкивательной» ветви потенциала. Потенциалы состояния  $a^3\Sigma_u^+$  в форме многопараметрических модельных функций были получены нами в результате решения обратных задач рассмотренного типа для  $\text{Cs}_2$  в работах [10 – 12] и  $\text{Rb}_2$  [13]. Результаты, относящиеся к молекуле  $\text{Rb}_2$ , были в дальнейшем уточнены (см. далее). Графики указанных функций вместе с потенциалами состояний, которые анализировались совместно с  $a^3\Sigma_u^+$ , показаны на рис. 3; в таблице приведены значения основных спектроскопических параметров этих состояний. Качество воспроизведения экспериментальных спектров с помощью этих функций в случае димера цезия иллюстрирует приведенный выше рис. 2; аналогичное сравнение для димера рубидия представлено на рис. 4.

Результаты исследований по состоянию  $a^3\Sigma_u^+$  димера рубидия, опубликованные нами в работе [13], вызвали некоторую

дискуссию. В работе [14], вышедшей вслед за работой [13], был представлен эксперимент по измерению термов этого состояния с высокой точностью ( $\sim 100$  МГц) в изотопе  $^{87}\text{Rb}_2$ . Для его выполнения использовалась лазерная ультрахолодная ассоциация атомов в магнитооптической ловушке с последующей лазерной спектроскопией темных состояний. Полученные авторами данные относились к низким вращательным состояниям ( $N = 0, 2, 4$ ). На основании их экстраполяции было сделано заключение о необходимости изменения на единицу во вращательном отнесении данных фурье-спектроскопии по энергиям термов изотопа  $^{85}\text{Rb}_2$ , пронумерованных нами в работе [13] как  $N = 68, 70$ . В связи с этим стоит прежде всего заметить, что четность вращательного квантового числа  $N$  в состояниях симметрии  $\Sigma^+$  всегда совпадает с полной инверсионной четностью молекулярного состояния (как  $(-1)^N$ ), а инверсионная четность однозначно определяется схемой оптических переходов; это означает, что коррекция нашего отнесения с изменением четности  $N$  невозможна. В дополнение к прежним в университете Темпл были проведены эксперименты, предварительный анализ которых подтвердил справедливость первоначального отнесения, предложенного в работе [13]. Потенциальная функция состояния  $\text{Rb}_2$   $a^3\Sigma_u^+$ , описывающая всю

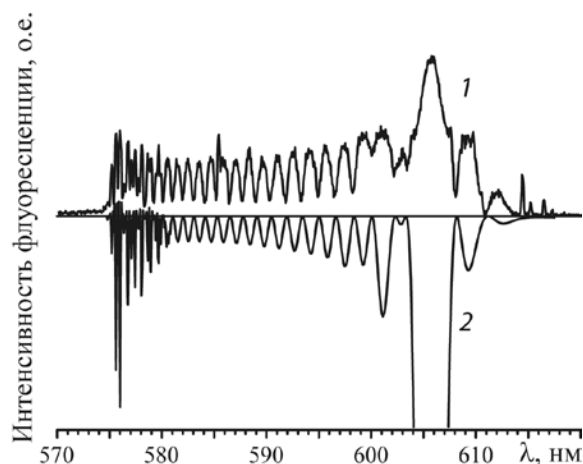


Рис. 4. Спектр флуоресценции  $\text{Rb}_2$  в электронном переходе  $2^3\Pi_g^+ (v = 27, J = 49, T = 21195,149 \text{ см}^{-1}) \rightarrow a^3\Sigma_u^+ (I)$  и его квантово-механическая симуляция (спектр перевернут) (2)

Основные параметры триплетных состояний димеров щелочных металлов, полученные по данным PFOODR-спектроскопии (рис. 3)

Номер кривой на рис. 3	Димер	Состояние	$R_e, \text{Å}$	$T_e, \text{см}^{-1}$	$\omega_e, \text{см}^{-1}$
1	Cs <sub>2</sub>	$a^3\Sigma_u^+$	6,318	3371,349	11,297
2	Rb <sub>2</sub>	$a^3\Sigma_u^+$	6,070	3752,157	13,639
3	Cs <sub>2</sub>	$1_g(3^3\Pi_g)$	5,424	21840,900	39,220
4	Rb <sub>2</sub>	$2^3\Pi_g$	5,591	20287,902	33,258

Обозначения:  $R_e$  – равновесное межъядерное расстояние,  $T_e$  – энергия дна потенциальной ямы,  $\omega_e$  – частота колебаний

доступную совокупность экспериментальных данных при их корректной классификации, будет опубликована нами в ближайшее время. Представленный вариант этой функции (см. рис. 3 и таблицу) является наиболее точным на момент написания настоящей работы.

В заключение еще раз отметим, что эксперименты в технике PFOODR-спектроскопии позволяют получать обширную и детальную информацию о строении молекул, в том числе данные по состояниям, которые недоступны при использовании более традиционных подходов. Анализ этих данных требует применения современных методов прикладной математики и аккуратного количественного моделирования квантовомеханической динамики. Приведенные в настоящей работе примеры не исчерпывают всего объема информации, доступной из PFOODR-экспериментов. В частности, неосвещенными остались во-

просы, связанные с наблюдением и анализом сверхтонкой структуры и неадиабатических возмущений различной природы (см., например, работу [15]). По нашему убеждению, получаемые по данным PFOODR-спектроскопии адиабатические потенциалы триплетных состояний, в том числе приведенные в настоящей работе, являются наиболее надежными из доступных в настоящее время.

Авторы настоящей работы выражают глубокую благодарность профессору L. Li, докторам F. Xie и X. Dai, а также другим сотрудникам исследовательской лаборатории университета Цинхуа (г. Пекин, Китай); профессору А.М. Лууга и другим сотрудникам Темпльского университета (г. Филадельфия, США); профессору S. Magnier университета Лилля (г. Лилль, Франция) за полноценное сотрудничество в проводимых нами исследованиях. В частности, основной объем экспериментальных измерений выполнен на базе университетов Цинхуа и Темпл.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Lefebvre-Brion, H.** The spectra and dynamics of diatomic molecules [Text] / H. Lefebvre-Brion, R.W. Field. – Amsterdam–Boston –Heidelberg –New York–Oxford–Paris–San Diego–San Francisco–Singapore–Sydney–Tokio: Elsevier. Academic Press, 2004. – 766 p.
2. **Li, L.** Direct observation of high-lying  $^3\Pi_g$  states of the Na<sub>2</sub> molecule by optical-optical double resonance [Text] / L. Li, R.W. Field // J. Phys. Chem. – 1983. – Vol. 87. – № 16. – P. 3020–3022.
3. **Li, D.** The K<sub>2</sub>  $2^3\Sigma_g^+$  state: Observation and analysis [Text] / D. Li, F. Xie, L. Li, V.B. Sovkov, [et al.] // J. Chem. Phys. – 2007. – Vol. 126. – № 19. – P. 194314 (9 p.).
4. **Vala, J.** Coherent control of cold-molecule formation through photoassociation using a chirped-pulsed-laser field [Text] / J. Vala, O. Dulieu, F. Masnou-Seeuws, [et al.] // Phys. Rev. A. – 2000. – Vol. 16. – № 1. – P. 013412 (12 p.).
5. **DeMille, D.** Enhanced sensitivity to variation of  $m_e/m_p$  in molecular spectra [Text] / D. DeMille, S. Sainis, J. Sage, [et al.] // Phys. Rev. Lett. – 2008. – Vol. 100. – № 4. – P. 043202 (4 p.).
6. **Beloy, K.** Effect of  $\alpha$  variation on a prospective experiment to detect variation of  $m_e/m_p$  in di-

atomic molecules [Text] / K. Beloy, A. Borschevsky, V.V. Flambaum, P. Schwerdtfeger // *Phys. Rev. A.* – 2011. – Vol. 84. – № 4. – P. 042117(5 p.).

7. **Serov, V.N.** Split operator method for the non-adiabatic ( $J = 0$ ) bound states and ( $A \leftarrow X$ ) absorption spectrum of  $\text{NO}_2$  [Text] / V.N. Serov, V.B. Sovkov, V.S. Ivanov, O. Atabek // *J. Chem. Phys.* – 2001. – Vol. 115. – № 14. – P. 6450–6458.

8. **Rees, A.L.G.** The calculation of potential-energy curves from band-spectroscopic data [Text] / A.L.G. Rees // *Proc. Phys. Soc. London.* – 1947. – Vol. 59. – № 336. – P. 998–1008.

9. **Sovkov, V.B.** Two-photon excitations of the  $\text{Cs}_2$   $3^3\Sigma_g^+$  state: Assignment and analysis with the deformed *ab initio* potential [Text] / V.B. Sovkov, D. Li, V.S. Ivanov, [et al.] // *Chem. Phys. Lett.* – 2013. – Vol. 557. – P. 66–70.

10. **Совков, В.Б.** Многопараметрические модельные функции в задачах аппроксимации *ab initio* потенциалов и спектроскопических данных двухатомных молекул [Текст] / В.Б. Совков, В.С. Иванов, К.В. Минаев, М.С. Александров // *Оптика и спектроскопия.* – 2013. – Т. 114. – № 2. – С. 185–195.

11. **Xie, F.** Experimental investigation of the  $\text{Cs}_2$   $a^3\Sigma_u^+$  triplet ground state: Multiparameter Morse long range potential analysis and molecular constants [Text] / F. Xie, V.B. Sovkov, A.M. Lyyra, [et al.] // *J. Chem. Phys.* – 2009. – Vol. 130. – № 5. – P. 051102 (4 p.).

12. **Xie, F.** Joint analysis of the  $\text{Cs}_2$   $a^3\Sigma_u^+$  and  $1_g$  ( $3^3\Pi_{1g}$ ) states [Text] / F. Xie, Li Li, D. Li, V.B. Sovkov, [et al.] // *J. Chem. Phys.* – 2011. – Vol. 135. – № 2. – P. 024303 (7 p.).

13. **Beser, B.** Experimental investigation of the  $^{85}\text{Rb}_2$   $a^3\Sigma_u^+$  triplet ground state: Multiparameter Morse long range potential analysis [Text] / B. Beser, V.B. Sovkov, J. Bai, [et al.] // *J. Chem. Phys.* – 2009. – Vol. 131. – № 9. – P. 094505 (6 p.).

14. **Strauss, C.** Hyperfine, rotational, and vibrational structure of the  $a^3\Sigma_u^+$  state of  $^{87}\text{Rb}_2$  [Text] / C. Strauss, T. Takekoshi, F. Lang, [et al.] // *Phys. Rev. A.* – 2010. – Vol. 82. – № 5. – P. 052514 (12 p.).

15. **Xie, F.** The hyperfine structure analysis of the  $\text{K}_2$   $2^3\Sigma_g^+$  state [Text] / F. Xie, K.V. Minaev, V.B. Sovkov, [et al.] // *Chem. Phys. Lett.* – 2010. – Vol. 493. – № 4–6. – P. 238–241.

## REFERENCES

1. **Lefebvre-Brion H., Field R.W.** The Spectra and Dynamics of Diatomic Molecules. San Diego, Elsevier, Academic Press, 2004. 766 p.

2. **Li L., Field R.W.** Direct observation of high-lying  $^3\Pi_g$  states of the  $\text{Na}_2$  molecule by optical-optical double resonance. *J. Phys. Chem.*, 1983, Vol. 87, №16, pp. 3020–3022.

3. **Li D., Xie F., Li L., Sovkov V.B., Ivanov V.S., Ahmed E., Lyyra A.M., Huennekens J., Magnier. S.** *J. Chem. Phys.*, 2007, Vol. 126, № 19, p. 194314.

4. **Vala J., Dulieu O., Masnou-Seeuws O.** Coherent control of cold-molecule formation through photoassociation using a chirped-pulsed-laser field. *Phys. Rev. A.*, 2000, Vol. 16, № 1, p. 013412.

5. **DeMille D., Sainis S., Sage J.** Enhanced sensitivity to variation of  $m_e/m_p$  in molecular spectra. *Phys. Rev. Lett.* 2008, Vol. 100, № 4, p. 043202.

6. **Beloy K., Beloy K., Borschevsky A., Flambaum V.V., Schwerdtfeger P.** Effect of  $\alpha$  variation on a prospective experiment to detect variation of  $m_e/m_p$  in diatomic molecules. *Phys. Rev. A.*, 2011, Vol. 84, № 4, p. 042117.

7. **Serov V.N., Sovkov V.B., Ivanov V.S., Atabek O.** Split operator method for the non-adiabatic ( $J = 0$ ) bound states and ( $A \leftarrow X$ ) absorption spectrum of  $\text{NO}_2$ . *J. Chem. Phys.*, 2001, Vol. 115, No. 14, p. 6450–6458.

8. **Rees A.L.G.** The calculation of potential-energy curves from band-spectroscopic data. *Proc. Phys. Soc. London*, 1947, Vol. 59, № 336, pp. 998–1008.

9. **Sovkov V.B., Li D., Ivanov V.S. et al.** Two-photon excitations of the  $\text{Cs}_2$   $3^3\Sigma_g^+$  state: Assignment and analysis with the deformed *ab initio* potential. *Chem. Phys. Lett.*, 2013, Vol. 557, P. 66–70.

10. **Sovkov V.B., Ivanov V.S., Minaev K.V., Aleksandrov M.S.** Mnogoparametricheskie model'nye funktsii v zadachakh approksimatsii *ab initio* potentsialov i spektroskopicheskikh dannykh dvukhatomnykh molekul. *Optics and Spectroscopy*, 2013, Vol. 114, № 2, pp. 185–195. (rus)

11. **Xie F., Sovkov V.B., Lyyra A.M. et al.** Experimental investigation of the  $\text{Cs}_2$   $a^3\Sigma_u^+$  triplet ground state: Multiparameter Morse long range potential analysis and molecular constants. *J. Chem. Phys.*, 2009, Vol. 130, № 5, p. 051102 (4 p.).

12. **Xie F., Li Li, Li D., Sovkov V.B. et al.** Joint analysis of the  $\text{Cs}_2$   $a^3\Sigma_u^+$  and  $1_g$  ( $3^3\Pi_{1g}$ ) states. *J. Chem. Phys.*, 2011, Vol. 135, № 2, p. 024303 (7 p.).

13. **Beser B., Sovkov V.B., Bai J. et al.** Experimental investigation of the  $^{85}\text{Rb}_2$   $a^3\Sigma_u^+$  triplet ground state: Multiparameter Morse long range potential analysis. *J. Chem. Phys.*, 2009, Vol. 131, No. 9, p. 094505.

14. **Strauss C., Takekoshi T., Lang F. et al.** Hyperfine, rotational, and vibrational structure of the

$a^3\Sigma_u^+$  state of  $^{87}\text{Rb}_2$ . *Phys. Rev. A.*, 2010, Vol. 82, № 5, p. 052514.

15. Xie F., Minaev K.V., Sovkov V.B. et al.

The hyperfine structure analysis of the  $\text{K}_2$   $2^3\Sigma_g^+$  state. *Chem. Phys. Lett.*, 2010, Vol. 493, № 4–6, pp. 238–241.

---

**СКУБЛОВ Алексей Сергеевич** – студент Санкт-Петербургского государственного университета.  
198504, г. Санкт-Петербург, Ульяновская ул., 1  
alex.s@018.net.il

**СОВКОВ Владимир Борисович** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного университета.  
198504, г. Санкт-Петербург, Ульяновская ул., 1  
vladimir\_sovkov@mail.ru

**ИВАНОВ Валерий Сергеевич** – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник кафедры фотоники Санкт-Петербургского государственного университета.  
198504, г. Санкт-Петербург, Ульяновская ул., 1  
v\_s\_ivanov@mail.ru