ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ БАРИЕВОЙ ЗВЕЗДЫ ζ ЛЕБЕДЯ

В. Ф. Гопка[1], А. В. Ющенко[1,2], Ч. Х. Ким[2], Ф. А. Мусаев[3,4], Г. А. Галазутдинов[4]

[1] *Астрономическая обсерватория при Одесском национальном университете парк Шевченко, 65014 Одесса, Украина,*
e-mail: gopka@arctur.tenet.odessa.ua

[2] *Кафедра наук о Земле, Чонбук Национальный университет 561-756, Чонджю (Южная) Корея*
e-mail: yua@odessa.net

[3] *Международный центр астрономических и медико-биологических исследований*

[4] *Специальная астрофизическая обсерватория РАН пос. Нижний Архыз, 369167 Карачаево-Черкесская Республика, Россия*
e-mail: faig@sao.ru, gala@sao.ru

Методом синтетического спектра получено детальное содержание химических элементов в атмосфере одной из ярчайших бариевых звезд ζ Cyg. Использовались новые атомные и молекулярные данные. Спектр звезды получен на 2-м телескопе обсерватории Терскол с разрешением около 80 000, в диапазоне длин волн 349.5–1000 нм. Особое внимание уделялось детальному анализу содержания для тяжелых элементов. Определены содержания 51 химического элемента в атмосфере исследуемой звезды.

THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE BARIUM STAR ζ CYGNI, by Gopka V. F., Yushchenko A. V., Kim Chulhee, Musaev F. A., Galazutdinov G. A. – In this paper we report the results of abundance determinations in the atmosphere of the mild-barium star ζ Cyg. The spectrum of this star was obtained with the 2-m telescope of the Terskol Observatory. The spectral resolution was near 80 000, the wavelength range was from 349.5 to 1000 nm. We used the newest atomic data and the spectrum synthesis method. It permitted us to find the abundances of 51 elements in the atmosphere of ζ Cyg.

ВВЕДЕНИЕ

Бариевые звезды как класс пекулярных звезд были открыты Бидельманом и Кинаном в 1951 г. [3], и объяснение пекулярности химического состава их атмосфер является важным с точки зрения подтверждения нашего понимания звездной эволюции, теории нуклеосинтеза элементов. С обнаружением двойственности бариевых звезд [15] стало ясно происхождение этого типа пекулярности у звезд спектральных классов G, K. Спектр ζ Cyg четко показывает наличие дополнительного излучения в ультрафиолетовой части. В работе [18] на основании данных HST эта двойная система разрешена – получены фотографии белого карлика в ультрафиолетовом фильтре. Период обращения белого карлика вокруг яркой звезды составляет 6489 сут [9], это около 18 лет.

Бариевые звезды входят в двойные системы в паре с белым карликом (проэволюционировавшей звездой). Именно результатом сброса вещества, обогащенного элементами s-процесса на стадии AGB, объясняется феномен бариевых звезд. Большинство бариевых звезд имеют избыток в ультрафиолетовой области спектра, что объясняется наличием излучения белого карлика. Спектры бариевых звезд имеют усиленные линии бария и молекулярных соединений с углеродом, таких как CH, CN, C_2. В зависимости от силы линии ионизированного бария Ba λ 455.4 нм, бариевые звезды делятся на пять подклассов. Есть и другое разделение бариевых звезд, когда звезды с избытками бария меньше 1 dex и нормальными, не усиленными линиями молекул, содержащих углерод, по отношению к соответствующим линиям в солнечном спектре еще называют умеренно-бариевыеми (mild-barium) звездами и рассматривают как бариевые звезды, отличающиеся от классических бариевых звезд [19].

Теоретические кривые распространенности элементов s-процесса в бариевых звездах для различных моделей опубликованы в работах [7, 14]. Для сравнения этих кривых с наблюдениями

Химический состав ζ Cyg

n	Z	$* - \odot$	N	Элемент	n	Z	$* - \odot$	N	Элемент
1	6	–0.00±0.21	4	C I	24	39	+0.15±0.15	3	Y I
2	8	–0.46	1	O I			+0.48±0.16	22	Y II
3	11	–0.37±0.16	5	Na I	25	40	+0.24±0.04	8	Zr I
4	12	+0.22±0.22	6	Mg I			+0.61±0.11	7	Zr II
		+0.26	2	Mg II	26	41	+0.13	1	Nb I *
5	13	–0.11±0.06	8	Al I	27	42	+0.13±0.12	3	Mo I
6	14	–0.05±0.13	52	Si I	28	44	–0.02	2	Ru I
7	15	+0.10	1	P I	29	45	<+0.2	2	Rh I *
8	16	+0.20±0.26	5	S I	30	46	+0.36	1	Pd I *
9	19	+0.00±0.26	3	K I	31	49	–0.12	1	In I
10	20	+0.02±0.09	5	Ca I	32	57	+0.51±0.20	12	La II
11	21	+0.06±0.11	4	Sc I	33	58	+0.36±0.16	43	Ce II
		+0.08±0.15	10	Sc II	34	59	+0.19±0.19	6	Pr II
12	22	–0.07±0.06	23	Ti I	35	60	+0.42±0.17	70	Nd II
		+0.00±0.11	31	Ti II	36	62	+0.31±0.15	14	Sm II
13	23	–0.01±0.12	40	V I	37	63	+0.45±0.05	4	Eu II
14	24	–0.11±0.06	26	Cr I	38	64	+0.27±0.19	4	Gd II
		+0.14±0.06	14	Cr II	39	65	+0.12	1	Tb II*
15	25	–0.26±0.15	21	Mn I	40	66	+0.28±0.19	5	Dy II
16	26	+0.02±0.10	92	Fe I	41	68	+0.35	1	Er II
		+0.06±0.08	6	Fe II	42	69	<+0.2	1	Tm II
17	27	–0.02±0.09	11	Co I	43	72	+0.45	1	Hf II*
18	28	+0.04±0.07	28	Ni I	44	76	+0.30	2	Os I *
19	29	+0.44±0.45	3	Cu I	45	77	<+0.5	2	Ir I *
20	30	+0.00±0.24	4	Zn I	46	78	<+0.5	1	Pt 1 *
21	32	+0.28	1	Ge I	47	81	<+0.5	1	Tl I *
22	37	–0.12	1	Rb I	48	82	<+0.2	2	Pb I *
23	38	+0.22±0.10	3	Sr I					

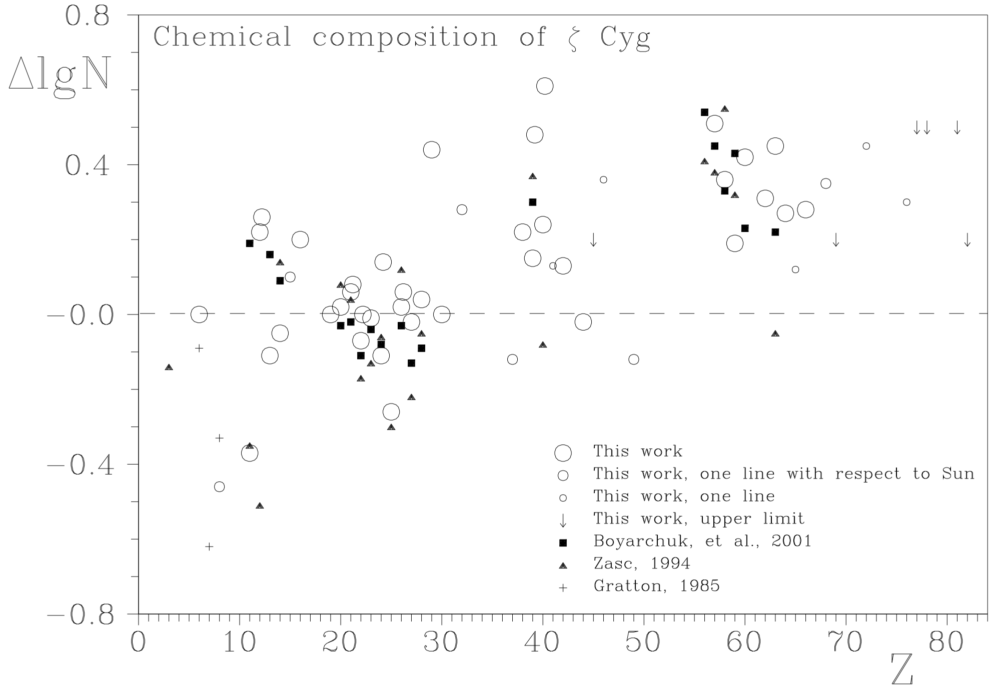
необходимы детальные наблюдаемые кривые распространенности химических элементов в реальных бариевых звездах.

НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ И ОБРАБОТКА

ζ Cyg (HD 202109, HR 8115, GC 29661, спектральный класс G8III-IIIa-Ba0.6SB [9]) является прототипом умеренно-бариевых звезд. В данной работе была поставлена цель наиболее детального исследования химического содержания этой бариевой звезды с хорошо исследованными ранее параметрами [1, 4, 6, 10, 19, 21]. Химический состав этой звезды также уже исследовался, но сейчас появилась возможность более полного исследования с использованием высококачественного спектрального материала, новых атомных данных и новых методик обработки наблюдений.

Нашей задачей было изучение всех элементов, линии которых в исследуемом диапазоне пригодны для анализа с подключением наиболее полных и новых списков атомных и молекулярных данных [5, 13, 16, 17]. Особое внимание уделялось наиболее тяжелым элементам нейтронного захвата, которые образуются в результате s-процесса в звездах на стадии AGB. Для этого использовались списки линий Мортона [16] и другие списки атомных линий, информативные с этой точки зрения, содержащие новые данные для тяжелых элементов.

ζ Cyg является одной из ярчайших бариевых звезд ($m_V = 3.2$ [9]). Мы использовали спектр звезды, полученный на 2-м телескопе обсерватории Терскол. Спектральное разрешение данного спектра $R = 80\,000$, диапазон длин волн 349.5–1000 нм, отношение сигнала к шуму в красной части спектра выше 100. На первом этапе были проверены параметры модели атмосферы для ζ Cyg. В результате нами были приняты следующие значения: $T_{eff} = 5050$ K, lg $g = 2.8$, $v_{micro} = 1.45$ км/с, $v_{macro} = 3$–3.5 км/с. При определении температуры наряду с другими методиками использовалась методика, описанная в работе Ковтюха и Горловой [12]. Мы интерполировали модели Куруца [13],



Содержание химических элементов в атмосфере ζ Cyg относительно их содержаний в атмосфере Солнца

чтобы получить модель с найденными параметрами.

Для идентификации линий были произведены расчеты синтетического спектра для всего наблюдаемого диапазона. Этот синтетический спектр сравнивался с реальным спектром. Были отобраны неблендированные и слабоблендированные линии поглощения в спектре исследуемой звезды. Для расчета химического содержания элементов методом синтетического спектра использовалась программа Куруца SYNTHE [13], модифицированая для работы в режиме автоматической подгонки синтетического спектра к наблюдаемому [20]. Чтобы исключить ошибки, связанные с силами осцилляторов, мы применили дифференциальный метод исследования содержания химических элементов в атмосфере звезды по отношению к солнечному содержанию этих элементов. Использовался атлас спектра центра диска Солнца Дельбуля и др. [8] и модель атмосферы Солнца Холвегера и Мюллер [11].

РЕЗУЛЬТАТЫ

В таблице для исследованных нами элементов приводятся их атомные номера, полученные нами относительные содержания химических элементов в атмосфере ζ Cyg, средние квадратичные ошибки найденных значений и количество спектральных линий, по которым проводилось определение содержания данного элемента. Для элементов, отмеченных звездочкой, соответствующие линии в спектре Солнца слабы и содержание этих элементов получено без сравнения с солнечным спектром.

На рисунке показано содержание химических элементов в атмосфере ζ Cyg по отношению к их содержанию в атмосфере Солнца. Нами найдены значения содержаний 48 элементов. Значения содержаний лития, азота и бария взяты из работ [21, 10, 4]. Всего в атмосфере ζ Cyg известно содержание или верхний предел содержания 51 химического элемента.

Полученные нами наблюдаемые значения содержаний химических элементов в бариевой звезде являются наиболее полными на сегодняшний момент. Сравнение с теоретическими расчетами позволит уточнить, каким образом идет обогащение элементами *s*-процесса, более точно описать явления, происходящие в красных гигантах на определенных стадиях эволюции, моделировать процессы, происходящие в звездах на стадии асимптотической ветви красных гигантов. С нашей точки зрения умеренно-бариевые звезды являются продолжением бариевых звезд. Проблема в том, что можно довольно легко (и ошибочно) причислить к классу умеренно-бариевых звезд и другие звезды с неточно определенными значениями содержания бария, и эти объекты могут замывать свойства группы бариевых звезд с небольшими избытками бария – умеренно-бариевых звезд, типичным представителем которых является ζ Cyg.

Бариевые звезды составляют около одного процента от общего числа всех звезд спектральных классов G, K без аномалий, но исследование и объяснение их природы имеют большое значение в астрофизике.

Данная работа была частично поддержана грантом постдокторантуры Национального университета Чонбук (Южная Корея) за 2002 год.

[1] *Berdyugina S. V.* The abundances of the CNO elements in the atmospheres of normal and mildly barium-enriched G8 to K3 giants // Astron. Lett.–1993.–**19**, N 5.–P. 378–383.

[2] *Barstow M. A., Bond H. E., Burleigh M. R., Holberg J. B.* Resolving Sirius-like binaries with the Hubble Space Telescope // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.–2001.–**322**, N 4.–P. 891–900.

[3] *Bidelman W. P., Keenan P. C.* The Ba II stars // Astrophys. J.–1951.–**114**, N 2.–P. 473–476.

[4] *Boyarchuk A., Antipova L., Boyarchuk M, Savanov I.* A comparative analysis of chemical abundances in the atmospheres red giants of different age group // Astron. Rep.–2001.–**45**, N 4.–P. 301–308.

[5] *Biemont J., Palmeri P., Quinet P.* Database of rare earths at Mons University, 2002, http://www.umh.ac.be/˜astro/dream.html

[6] *Chromey F. R., Faber S. M., Wood A., Danziger I. J.* The BaII star ζ Cygni // Astrophys. J.–1969.–**158**, N 2.–P. 599–606.

[7] *Cowley C. R., Downs P. L.* Barium stars and the s-process // Astrophys. J.–1980.–**236**, N 1.–P. 648–657.

[8] *Delbouille L., Roland G., Neven L.* 1973: Photometric Atlas of the Solar Spectrum from $\lambda\,3000$ to $\lambda\,10000$ // Liege: Institut d'Astrophysique de l'Universite' de Liege. (Digitized version from $\lambda\,3601$ Å to $\lambda\,8400$ Å).

[9] *Griffin R. F., Keenan P. C.* Spectroscopic binary orbits from photoelectric radial velocities. Paper 105: ζ Cygni // The Observatory.–1992.–**112**.–P. 168–182.

[10] *Gratton R. G.* Studies on the spectra of K-giants. III - Carbon, nitrogen, and oxygen abundances // Astron. and Astrophys.–1985.–**148**, N 1.–P. 105–114.

[11] *Holweger H., Muller E. A.* The photospheric Barium spectrum: solar abundance and collision of Ba II lines by hydrogen // Solar Phys.–1974.–**39**.–P. 19–30.

[12] *Kovtyukh V. V., Gorlova N. I.* Precise temperatures of classical Cepheids and yellow supergiants from line-depth ratios // Astron. and Astrophys.–2000.–**358**, N 2.–P. 587–592.

[13] *Kurucz R. L.* An atomic and molecular data bank for stellar spectroscopy // ASP Conf. Ser.–1995.–**81**.–P. 583–588.

[14] *Malaney R.* The s-process nucleosynthesis of barium stars // Astrophys. J.–1987.–**321**.–P. 832–845.

[15] *McClure R. D., Fletcher J. M., Nemec J. M.* The binary nature of the barium stars // Astrophys. J.–1980.–**238**, Part 2.–P. L35–L38.

[16] *Morton D. C.* Atomic Data for Resonance Absorption Lines. II. Wavelengths Longward of the Lyman Limit for Heavy Elements // Astrophys. J. Suppl. Ser.–2000.–**130**, N 2.–P. 403–436.

[17] *Piskunov N., Kupka F., Ryabchikova T., et al.* VALD: The Vienna Atomic Line Data Base // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.–1995.–**112**, N 2.–P. 525–535.

[18] *Pourbaix D., Jorissen A.* Re-processing the Hipparcos Transit Data and Intermediate Astrometric Data of spectroscopic binaries // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.–2000.–**145**, N 1.–P. 161–183.

[19] *Sneden C., Lambert D., Pilachowski C.* A study of CNO elements in barium stars // Astrophys. J.–1981.–**247**, N 3.–P. 1052–1062.

[20] *Yushchenko A. V.* URAN – a software system for the analysis of stellar spectra // Variable star research: Proc. 29th Conf., Brno, Czech Republic, November 5–9, 1997.–P. 202–204.

[21] *Zacs L.* A spectroscopic analysis of barium stars // Astron. and Astrophys.–1994.–**283**.–P. 937–954.