

УДК: 524.387—36

ЭВОЛЮЦИОННЫЕ ИЗМЕНЕНИЯ ХИМИЧЕСКОГО
СОСТАВА ν Sgr

В. В. ЛЕУШИН, Г. П. ТОПИЛЬСКАЯ

Поступила 5 мая 1987

Принята к печати 20 декабря 1987

Анализируется химический состав атмосферы главного компонента тесной двойной системы ν Sgr, утратившего водородную оболочку в результате прошедшего обмена массой. Наряду с дефицитом водорода, избытком гелия и изменениями в содержаниях углерода, азота и кислорода, вызванных выгоранием водорода в гелий через CNO-цикл и частично гелия в углерод через тройной α -процесс, найдены избытки в содержаниях многих других элементов. Содержания элементов от водорода до никеля подобны тем, что получены для ряда других звезд с экстремально большими избытками гелия, хотя для ν Sgr имеются некоторые особенности, связанные с двойственностью. Для элементов с $Z > 30$ наблюдается тенденция увеличения избытка с увеличением атомного номера, подобная той, что отмечается для Ат-звезд.

1. *Введение.* Возрастание интереса к изучению химического состава атмосфер химически пекулярных звезд связано с существующим мнением о том, что эти пекулярности обусловлены ядерными реакциями, которые протекали и протекают в недрах звезд. Современные представления о ядерных реакциях на этапах горения водорода в CNO-цикле и гелия в тройном α -процессе в основном описывают энергетическую сторону этих процессов, уделяя мало внимания вопросам химической эволюции вещества, особенно тяжелых элементов, не являющихся основным горючим или катализаторами соответствующих циклов. Ядерные процессы, формирующие тяжелые элементы, вследствие малых количеств этих элементов в веществе звезд, могут привести к наблюдаемым аномалиям в их содержаниях даже на ранних этапах эволюции, когда эти процессы не играют практически никакой роли в энергетике и эволюции звезд. Появившиеся в последнее время работы по химическому составу экстремально гелиевых звезд [1—5] показывают, что на этих этапах возникают обнаружимые изменения содержаний многих элементов. Более поздние стадии звездной эволюции, с одной стороны, сравнительно слабо изучены экспериментально, с другой

стороны, обладают большим числом степеней свободы из-за большого количества исходных параметров.

Исследование химического состава атмосферы ν Sgr дает уникальную возможность делать выводы об особенностях ядерных реакций, прошедших в недрах звезды на этапе превращения водорода в гелий и гелия в углерод, поскольку водородная оболочка этой двойной системы была потеряна в результате перетекания вещества на спутник. Точное изучение содержаний тяжелых элементов в атмосферах звезд, подобных ν Sgr, позволит получить важную информацию о малоизученных термоядерных реакциях, приводящих к возникновению тех или иных аномалий. В этом плане критичным является точность определения содержаний и полнота набора исследуемых элементов.

Задача получения точного и обширного описки содержаний элементов в атмосфере ν Sgr была решена в предыдущих наших работах. В работах [6, 7] была построена модель атмосферы, определены параметры T_e и $\lg g$ и содержания легких элементов — H, He, C, N, O, в работе [8] были получены содержания элементов, тяжелее кислорода. На основе этих определений здесь проводится анализ особенностей химического состава ν Sgr и делаются предположения о прошедших в звезде термоядерных реакциях.

2. *Анализ химического состава ν Sgr.* Относительные содержания элементов в атмосфере ν Sgr по сравнению с Солнцем приведены на рис. 1 и в табл. 1. В 3 и 4 столбцах табл. 1 содержания элементов выражены в логарифмах относительно полного числа атомов, $\lg(N_{\text{эл}}/\Sigma N)$; в 5 и 6 столбцах таблицы и на рис. 1 — нормированы на единицу массы, $\lg(\mu_i N_i / \Sigma \mu_i N_i)$. Анализируя эти данные, можно отметить следующие основные особенности химического состава атмосферы ν Sgr:

1. Значительный дефицит водорода и избыток гелия.
2. Обратное, по сравнению с солнечным, отношение содержаний C : N : O, избыток углерода и азота при нормальном содержании кислорода.
3. Почти нормальные содержания Mg, Si, S, Fe, Ni.
4. Примерно одинаковые избытки, на $1 \div 1.5$ dex, Ne, Na, P, Cl, Ar, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn.
5. Большие избытки, > 2 dex, тяжелых элементов с $Z > 30$, причем, имеется тенденция к увеличению избытка с увеличением атомного номера элемента.

Если предположить, что исходный химический состав ν Sgr был близок к солнечному, то наблюдаемое соотношение содержаний H, He, C,

Таблица 1

СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В АТМОСФЕРЕ ν Sgr

№	Элемент	$-\lg(N_{\text{эл}}/\Sigma N)$		$-\lg(\mu_i N_i / \Sigma \mu_i N_i)$	
		☉	ν Sgr	☉	ν Sgr
1	H	0.05	3.3	-0.07	3.93
2	He	1.00	0.02	0.52	0.04
6	C	3.50	2.27 ± 0.13	2.54	1.85
7	N	4.12	1.87 ± 0.07	3.07	1.38
8	O	3.28	2.7	2.21	2.15
10	Ne	3.50	1.7	2.08	1.05
12	Mg	4.57	4.07 ± 0.07	3.24	3.34
13	Al	5.65	4.75 ± 0.25	4.34	3.48
14	Si	4.50	4.13 ± 0.07	3.17	3.34
15	P	6.62	4.90 ± 0.20	5.25	4.07
16	S	4.84	4.54 ± 0.04	3.41	3.69
17	Cl	6.60	4.1	5.71	3.21
18	Ar	5.30	3.58 ± 0.09	3.82	2.64
19	K	7.00	4.0	6.07	3.07
20	Ca	5.72	4.3	4.24	3.36
21	Sc	9.01	7.35 ± 0.15	7.48	6.36
22	Ti	7.55	5.66 ± 0.07	5.94	4.64
23	V	8.13	6.70 ± 0.10	6.51	5.65
24	Cr	6.58	5.16 ± 0.05	5.00	4.10
25	Mn	7.17	5.55 ± 0.05	5.55	4.47
26	Fe	4.50	3.33 ± 0.10	2.87	2.24
28	Ni	5.42	4.78 ± 0.09	3.77	3.67
30	Zn	7.63	5.6	5.69	4.42
38	Sr	9.23	8.0	7.41	6.72
39	Y	9.60	8.1	7.77	6.81
40	Zr	9.60	7.50 ± 0.14	7.76	6.20
42	Mo	10.00	7.3	7.90	5.98
56	Ba	10.15	7.0	7.89	5.52
57	La	10.60	5.35 ± 0.25	8.58	3.87
58	Ce	10.40	7.27 ± 0.07	8.37	5.81
60	Nd	10.50	6.0	8.46	4.50
62	Sm	11.00	7.0	8.70	5.48
63	Eu	11.30	8.3	9.00	6.78
64	Gd	10.90	6.6	8.82	5.06
71	Ta	11.70	12.2	9.32	10.60

N, O может быть следствием преобразования водорода в гелий через CNO-цикл, однако, существенной особенностью является то, что суммарное количество нуклонов в C, N и O здесь больше первоначального. Увеличение содержания азота может быть получено на этапе работы CNO-цикла за счет уменьшения содержаний углерода и кислорода. Поскольку содержание кислорода в ν Sgr практически нормальное (реакции преобразования кислорода в азот самые медленные в тройном CNO-цикле), то максимальное количество азота не должно было бы превышать первоначальное количество углерода, равное примерно —2.50 (по массе).

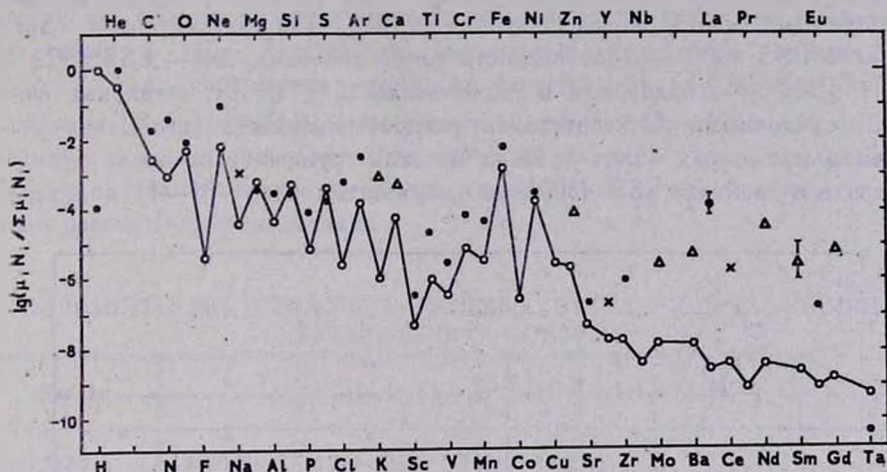


Рис. 1. Относительная распространенность химических элементов в атмосфере ν Sgr по сравнению с Солнцем, кружки, сплошная линия. Крестики — верхняя граница, треугольники — определения по одной линии, точки — по нескольким линиям.

Наблюдаемое содержание азота на порядок больше, —1.5, одновременно наблюдается и значительный, на 0.8 dex, избыток углерода. Такие изменения содержаний CNO-элементов можно объяснить, если предположить, что в ν Sgr одновременно протекали два процесса: синтез углерода в тройном α -процессе в ядре и синтез гелия через CNO-цикл в слоевом источнике с постоянным подмешиванием в эти слои образующегося в ядре углерода. Равновесное соотношение между углеродом и азотом в слоях горения водорода будет определяться условиями протекания CNO-цикла, а общее их количество — интенсивностью перемешивания, выносящего углерод в слой горящего водорода. Фактором, обуславливающим перемешивание вещества и тем самым приводящим к наблюдаемому соотношению H, He, C, N, O в атмосфере ν Sgr, может быть двойственность звезды.

Таким образом, одновременное горение гелия в тройном α -процессе в ядре и водорода в CNO-цикле в слоевом источнике в двойных звездах

может приводить к одновременному увеличению содержания углерода и азота, причем, содержание азота может превышать первоначальное содержание углерода; содержание кислорода будет определяться только временем действия CNO-цикла.

3. Сравнение с экстремально гелиевыми звездами. Результаты нашего анализа химического состава ν Sgr интересно сравнить с определениями содержаний элементов в атмосферах ряда других звезд с аномально низким содержанием водорода. Сейчас известно 18 таких звезд в области параметров T_e от 11000 K до 40000 K, $\lg g$ — от 1.0 до 4.0 и содержанием водорода меньше 10% по числу атомов [9, 10]. Для трех из них — ν Sgr, KS Per и LSS 4300 — двойственность точно доказана, две — LSS 1922 и BD + 13°3224 — заподозрены в двойственности [11, 12], остальные считаются одиночными. Относительная распространенность химических элементов в атмосферах шести звезд из этой группы (в их числе одна — спектрально-двойная, LSS 4300) по результатам работ [1–4] в сравне-

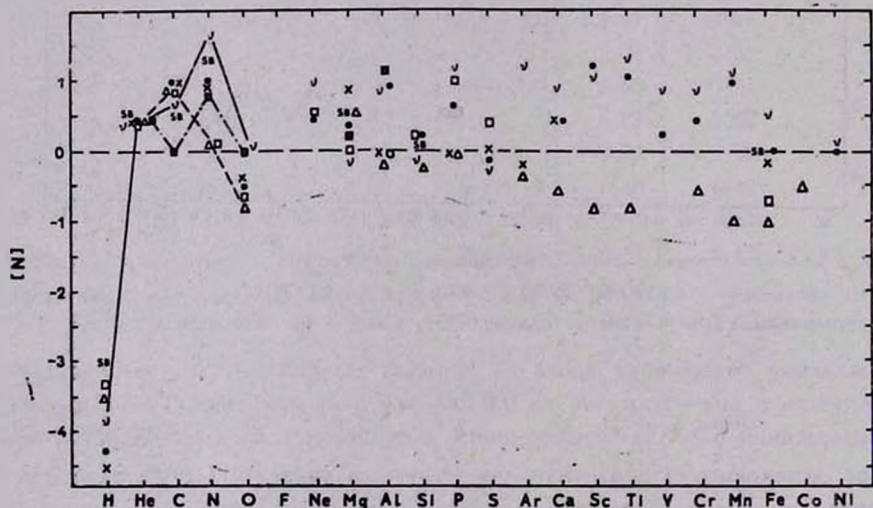


Рис. 2. Относительная распространенность химических элементов в атмосферах экстремально гелиевых звезд: ● — HD 168476, ■ — HD 160641, △ — BD + 10° 2179, □ — BD - 9° 4395, × — HD 124448, SB — LSS 4300, ν — ν Sgr. $[N] = \lg \left(\frac{N_i \mu_i}{\sum N_i \mu_i} \right) -$

$$- \lg \left(\frac{N_i \mu_i}{\sum N_i \mu_i} \right)_{\odot}$$

нии с Солнцем показана на рис. 2. Там же приведены наши результаты для ν Sgr. Нормировка такая же, как на рис. 1. Параметры звезд даны в табл. 2, где указаны номер или название каждой звезды, эффективная тем-

пература и ошибка ее определения, $\lg g$, расстояние до галактической плоскости, Z , лучевая скорость, V_r , содержание элементов H, He, C, N, O относительно Солнца и источник этих данных. Для звезды BD + 10°2179 приведены два ряда определений по разным работам (обе выполнены методом моделей атмосфер), их различие может характеризовать точность определения содержаний элементов для экстремально гелиевых звезд в этих работах. Точность крайне низкая, что в основном обусловлено тем, что эти звезды очень слабые, $m_v \sim 10^m$, поэтому делать какие-либо точные заключения на основе этих данных пока преждевременно. Тем удивительнее кажется тот факт, что содержания ряда элементов в звездах, указанных в табл. 2 и на рис. 2, совпадают с очень малым разбросом. Так, содержание гелия варьируется от -0.05 до -0.01 (в единицах $\lg(\mu_i N_i / \Sigma \mu_i N_i)$), содержания кремния, серы везде почти нормальные, в то же время наблюдаются избытки ряда тяжелых элементов. Все это позволяет сделать некоторые выводы о характере ядерных процессов в рассматриваемых звездах.

Таблица 2

ПАРАМЕТРЫ ЭКСТРЕМАЛЬНО ГЕЛИЕВЫХ ЗВЕЗД С ОПРЕДЕЛЕНИЯМИ
ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА

Звезда	T_e	$\lg g$	Z , пк	V_r , $\frac{\text{км}}{\text{с}}$	[H]	[He]	[C]	[N]	[O]	Литература
HD 168476	14000 $\pm$ 500	1.5	—1580	—165	—4.24	0.45	1.	1.0	—0.5	[4]
HD 124448	15750 $\pm$ 500	3.7	1650	— 66	—4.5	0.48	0.95	0.9	—0.4	[2]
BD+10° 2179	16250 $\pm$ 1000	3.6	5580	155	—3.8	0.45	1.5	0.9	—0.7	[2]
BD+10° 2179	16800 $\pm$ 600	2.6			—3.5	0.48	0.9	0.1	—0.8	[5]
BD—9° 4395	32000 $\pm$ 6000	2.6	1600		—3.3	0.49	0.8	0.1	—0.65	[3]
HD 160641	40000	3.5		100		0.48	0.	0.8	0.	[11]
LSS 4300	14700 $\pm$ 300	1.4	—59		—3.0	0.50	0.5	1.3		[13]
σ Sgr	13500 $\pm$ 300	1.5			—3.85	0.48	0.7	1.7	0.06	

Эволюционный статус одиночных экстремально гелиевых звезд до сих пор не определен. Имеется два ряда эволюционных расчетов, которые дают значения T_e , $\lg g$, $N(\text{He})$, соответствующие наблюдаемым для этих звезд. Расчеты [14] выполнены для однородных гелиевых звезд с массами от 0.5 до 16 $M_\odot$, по ним экстремально гелиевые звезды имеют массы от 1 до 2 $M_\odot$ и эволюционируют от начальной гелиевой последовательности к области красных гигантов с уменьшением T_e и постоянной светимостью после выгорания гелия в ядре и перед началом горения углерода. По расчетам [15] экстремально гелиевые звезды имеют массы от 0.6 до 1 $M_\odot$ и эволю-

дионируют от красных гигантов к белым карликам с ростом T_e и уменьшением светимости, имея вырожденное углеродно-кислородное ядро и слоевой источник горения гелия. Однако оба эволюционных сценария не отвечают на ряд вопросов: не объясняют предысторию этих звезд, механизм потери водородной оболочки и большие лучевые скорости. Эти неясности могут быть объяснены предположением, что первоначально экстремально гелиевые звезды являлись компонентами двойных систем, в которых наблюдаемые сейчас компоненты потеряли свою водородную оболочку после заполнения полости Роша, перетекание массы на второй компонент привело к резкому ускорению его эволюции, взрыву и увеличению скорости движения наблюдаемого компонента (эффект пращи). Причем, не исключено, что остаток взорвавшегося компонента, превратившись в релятивистский объект, движется вместе с наблюдаемым.

С другой стороны, сравнение содержаний химических элементов в атмосферах этих звезд между собой и Солнцем показывает, что они не составляют однородной группы. В звездах HD 168476, HD 124448, HD 160641, LSS 4330 наряду с дефицитом водорода и избытком гелия наблюдается значительный избыток азота, что свидетельствует о том, что выгорание водорода в их ядрах шло через CNO-цикл. Следовательно, в начале своей эволюции эти звезды имели массу больше солнечной. В то же время, в атмосферах звезд BD + 10°2179 (по результатам работы [5]) и BD — 9°4395 содержание азота такое же, как на Солнце, поэтому вероятно, что процесс превращения водорода в гелий шел здесь через *pp*-цикл, не затрагивая более тяжелых элементов, что могло произойти, если их массы были равны или меньше солнечной.

Избытки углерода в большинстве экстремально гелиевых звезд, за исключением HD 160641, вероятно, являются следствием выгорания гелия в α -процессе. Избыток азота в двойной звезде LSS 4300 почти так же велик, как в ν Sgr и не может быть объяснен только действием CNO-цикла. Одинаковый характер избытков в ν Sgr и LSS 4300 подтверждает высказанное выше предположение о имевшем место перемешивании между зоной горения водорода в слое и гелия в ядре, которое, по-видимому, стимулировалось двойственностью.

Содержание неона определено только для двух экстремально гелиевых звезд, HD 168476 и HD 160640, как и в ν Sgr оно значительно превышает солнечное, что может быть следствием действия неон-натриевого цикла.

Содержание элементов от неона до никеля в атмосфере ν Sgr очень похоже на наблюдаемое в других экстремально гелиевых звездах (см. рис. 2), особенно тесное совпадение наблюдается между ν Sgr и HD 168476, в то же время здесь, как указывалось выше, в среднем содержания элементов незначительно отличаются от солнечных. Обращает на себя внимание и

тот факт, что обилие такого «пекулярного» элемента, как кремний, для всех экстремально гелиевых звезд и ν Sgr не отличается от солнечного.

4. *Тяжелые элементы в ν Sgr.* К сожалению, по более тяжелым элементам данные для экстремально гелиевых звезд отсутствуют, а здесь для ν Sgr наблюдается довольно интересная закономерность: избытки содержания элементов, начиная от стронция, возрастают с увеличением атомного веса. Но для самого тяжелого из наблюдаемых элементов, тантала, получен дефицит (по сравнению с Солнцем) на порядок. Интересно, что такой же характер роста избытков тяжелых элементов при одновременно нормальном в среднем содержании промежуточных элементов, от магния до цинка включительно, наблюдается в металлических (Am) звездах [16]. И, наконец, на рис. 3 представлено сопоставление величин отличий содер-

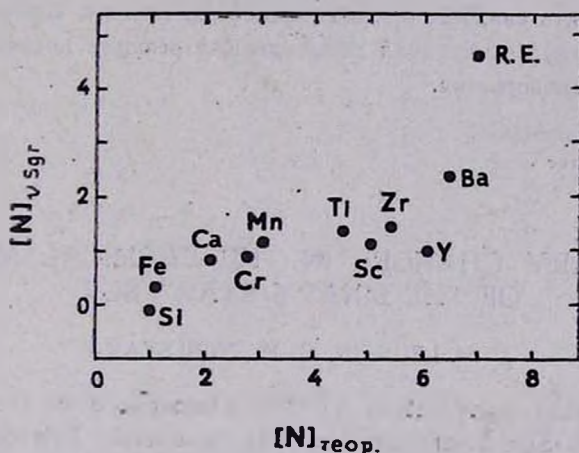


Рис. 3. Сравнение величин избытков в содержаниях элементов в атмосфере ν Sgr с рассчитанными в работе [17].

жений некоторых элементов в ν Sgr от солнечных с рассчитанными в работе [17] максимальными избытками, получаемыми в результате бомбардировки вещества нормального химического состава α -частицами. Наличие корреляции этих величин может свидетельствовать о том, что наблюдаемые особенности химического состава ν Sgr в определенной степени обусловлены и ядерными процессами, связанными с выгоранием гелия.

5. *Заключение.* Определение содержаний большого количества химических элементов в атмосфере главного компонента двойной системы ν Sgr, лишенного водородной оболочки, позволило сделать следующие заключения.

1. Наряду с аномалиями в содержаниях H, He, C, N, O, которые объясняются реакциями горения водорода через CNO-цикл и гелия через тройной α -процесс, в атмосфере ν Sgr присутствуют аномалии в содержаниях многих других элементов, которые также имеют безусловно эволюционную природу.

2. Относительная распространенность химических элементов в атмосфере ν Sgr подобна той, что наблюдается в атмосферах Am-звезд.

3. Распределение содержаний элементов от водорода до никеля включительно во многом сходно с тем, что получено для группы экстремально-гелиевых звезд, что может свидетельствовать об общности термоядерных реакций, обусловивших их эволюцию.

4. Некоторые особенности химического состава (большой избыток азота) могут быть связаны с двойственностью звезды, которая оказывает влияние на условия протекания термоядерных реакций посредством дополнительного перемешивания.

Ростовский государственный
университет

EVOLUTIONARY CHANGES IN THE CHEMICAL ABUNDANCE. OF THE BINARY STAR ν SGR

V. V. LEUSHIN, G. P. TOPILSKAYA

The chemical composition of the atmosphere of the bright component in the ν Sgr binary system was analysed. This component has lost its hydrogen envelope as a result of mass transfer. Parallel with the hydrogen deficit, helium over-abundance and CNO-anomalies mainly engendered by the hydrogen burning in the CNO-cycle (and partly caused by the hydrogen burning in the course of the 3α process), the anomalies abundances of many other elements were revealed. The abundances of the chemical elements from H to Ni are similar to those observed for the extreme helium stars. However, there do exist certain differences in the ν Sgr binary system. For the elements with $Z > 30$ an increase in the abundances with the growth of the atomic number has been noted. Such a tendency has also been observed in Am-stars.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. Aller, Liege Coll. 8 XV, N357, 353, 1954.
2. D. Schönberner, R. Wolf, Astron. and Astrophys., 37, 87, 1974.

3. *J. Kaufmann, D. Schönberner*, *Astron. and Astrophys.*, 57, 169, 1977.
4. *H. Walker, D. Schönberner*, *Astron. and Astrophys.*, 97, 291, 1981.
5. *U. Heber*, *Astron. and Astrophys.*, 118, 39, 1983.
6. *В. В. Леушин, Г. П. Топильская*, *Астрофизика*, 22, 121, 1985.
7. *В. В. Леушин, Г. П. Топильская*, *Астрофизика*, 28, 195, 1987.
8. *В. В. Леушин, Г. П. Топильская*, *Астрофизика*, 28, 363, 1988.
9. *J. S. Drilling*, *Astrophys. J.*, 242, L 43, 1980.
10. *A. E. Lynas-Gray*, *Irich. Astron. J.*, 15, 42, 1981.
11. *J. S. Drilling, A. U. Landolt, D. Schönberner*, *Astrophys. J.*, 279, 748, 1984.
12. *A. E. Lynas-Gray*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 209, 387, 1984.
13. *D. Schönberner, J. Drilling*, *Astrophys. J.*, 276, 229, 1984.
14. *B. Paczynski*, *Acta Astron.*, 21, 1, 1971.
15. *D. Schönberner*, *Astron. and Astrophys.*, 57, 437, 1977.
16. *S. C. Wolff*, *The A-Stars: Problems and Perspectives*, NASA, Washington, 1983.
17. *P. J. Branczalo, A. G. W. Cameron*, *Can. J. Phys.*, 45, 3297, 1967.