

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕР А-ЗВЕЗД ГАЛО

В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук

По спектрограммам высокого разрешения, полученным на 6-м телескопе, определены параметры атмосфер и химический состав 11 звезд горизонтальной ветви в поле Галактики. Сделан вывод о высокой степени однородности исследованной выборки по металличности: $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.34 \pm 0.10$.

Из сравнения кривых распространенности химических элементов для А-звезд гало и А-звезд диска следует статистически значимый сверхдефицит элементов s-процесса ($[\text{Sr}/\text{Fe}] = -0.56$, $[\text{Ba}/\text{Fe}] = -0.75$) и избыток элемента α -процесса ($[\text{Mg}/\text{Fe}] = +0.47$) у А-звезд гало. Выполнено сравнение химического состава исследованных звезд и К-гигантов гало.

The atmosphere parameters and chemical composition of 11 horizontal-branch stars in the field of Galaxy are determined using the high resolution spectra obtained on the 6-meter telescope. A conclusion is drawn on high homogeneity of the investigated sample relative to its metallicity: $[\text{Fe}/\text{H}] = -1.34 \pm 0.10$.

Comparing the curves of chemical element abundances for halo A-stars and for disk A-stars a statistically confidential overdeficiency of the s-process elements ($[\text{Sr}/\text{Fe}] = -0.56$, $[\text{Ba}/\text{Fe}] = -0.75$) and overabundance of the α -process element ($[\text{Mg}/\text{Fe}] = +0.47$) are determined for halo A-stars.

We have compared the chemical composition of the investigated stars and that of halo K-giants.

Данная работа продолжает исследования авторов по звездам горизонтальной ветви (НВ).

По современным представлениям эволюция звезды в стадии красного гиганта может окончиться гелиевой вспышкой, после чего, потеряв часть массы, звезда с вершины ветви гигантов быстро попадает на горизонтальную ветвь, занимая на ней положение, определяемое массой и химическим составом ядра. Теория достаточно хорошо описывает эту стадию звездной эволюции; объясняются, в частности, наблюдаемые в шаровых скоплениях средние относительные населенности НВ и ветви гигантов. Поэтому и оценку продолжительности жизни звезды в стадии НВ ($\sim 10^8$ лет) [1], по-видимому, можно считать надежной. Столь малая (по сравнению с возрастом сферической составляющей Галактики $\sim 10^{10}$ лет) длительность стадии НВ объясняет редкую встречаемость объектов этого типа в окрестностях Солнца. Малая наблюдаемая численность звезд НВ объясняется также и трудностями их выделения фотометрическими методами на фоне нормальных А-звезд главной последовательности (MS), принадлежащих дисковой составляющей Галактики. Спектроскопическим наблюдениям с хорошим спектральным разрешением ($\delta\lambda = 0.2 \text{ \AA}$) доступна чрезвычайно ограниченная выборка звезд. Так, например, в окрестностях Солнца ($\sim 1 \text{ кпк}$) спектроскопическими методами исследовано около 50 К-гигантов гало [2, 3] и только 5 звезд НВ [4]. Для исследования ряда аспектов химической эволюции Галактики удобными объектами являются F- и G-карлики, но из-за их низкой абсолютной светимости статистический подход к исследованию этих звезд методом моделей атмосфер только начинает реализовываться [5, 6]. В такой ситуации, казалось бы, выгодней развивать исследования наиболее доступного типа звезд высокой светимости — К-гигантов гало. Но при анализе атмосфер К-гигантов возникает проблема спектроскопического определения их светимости с необходимой точностью; низкая точность не позволяет уверенно разделить в гало совокупности К-гигантов трех типов: членов ветви гигантов, членов асимптотической ветви гигантов и звезд красной части горизонтальной ветви (РНВ).

Кроме того, на стадии К-гиганта возможен синтез тяжелых элементов [7], что в сочетании с неопределенностями в светимости затрудняет интерпретацию кривой распространенности химических элементов. Изучение химического состава звезд горячей части НВ как объектов, находящихся на соседней с К-гигантами стадии эволюции, имеющих надежно определяемую по профилям водородных линий светимость, может исключить некоторые из перечисленных трудностей. Исследование параметров атмосфер звезд НВ может оказаться полезным и в проблеме химического состава атмосфер звезд типа RR Лиры.

Результаты наблюдений. В нашу программу были включены 13 звезд НВ (и заподозренных в принадлежности к НВ) из списков [8, 9]. Все наблюдения выполнены на Основном звездном спектрографе БТА в области λ 3900—4900 Å с обратной дисперсией 9 Å/мм, звезда HD 86986 наблюдалась, кроме того, с $D = 14$ Å/мм в области 3600—4500 Å. Для каждой звезды на фотопластинках Kodak ПаО получено по 2—3 спектрограммы, при анализе химического состава использовались контуры и эквивалентные ширины W линий, усредненные по всем имеющимся для данной звезды спектрам. Результаты обработки спектрограмм приведены в табл. 1 и 2, сведения о фотометрической точности спектрального материала можно найти в [10].

Определение параметров и химического состава атмосфер. Для определения эффективной температуры T_e , ускорения силы тяжести g и микротурбулентной скорости ξ_t (все эти параметры даны в табл. 3) мы применили методику, достаточно подробно изложенную в наших предыдущих работах по исследованию звезд НВ [11, 12], где приведены результаты анализа для 10 звезд программы. Кратко напомним, что T_e и g определены с привлечением только спектроскопической информации, а именно: контуров водородных линий H_γ , H_δ и линии ионизационного равновесия для атомов железа Fe. Эта методика представляется нам перспективной при спектроскопическом изучении более слабых далеких звезд, фотометрические индексы которых уже существенно искажены межзвездным поглощением.

Поскольку при исследовании А-звезд методом моделей атмосфер для определения T_e и g часто используются результаты UBV - и wby , β -фотометрии, нами был рассмотрен вопрос о возможных систематических ошибках определения металличности, возникающих при фиксировании параметров атмосфер с помощью только фотометрических или спектроскопических данных. Так, в работах [11, 12] показано, что использование условия ионизационного равновесия по сравнению с использованием фотометрических индексов $b-y$ и c_1 дает систематическую разницу в величине ускорения силы тяжести ($\Delta \lg g \approx 0.5$), что, однако, не вызывает значимых различий химического состава. Ранее [13] при изучении химического состава А-звезд диска мы обнаружили, что эффективные температуры T_e , определенные для этих звезд по исправленным за межзвездное покраснение показателям цвета $B-V$, на уровне значимости $Q_0 = 0.01$ совпадают с T_e , полученными из условия ионизационного равновесия для атомов железа. Микротурбулентная скорость ξ_t , км/с, определялась по линиям из условия независимости содержания железа $\lg \epsilon(\text{Fe})$ от эквивалентной ширины W . В табл. 3 даны значения проекции скорости осевого вращения звезды $v \sin i$, км/с, определенные по полуширине $\Delta \lambda$ линии MgII 4481 с применением зависимости $\Delta \lambda(v \sin i)$, построенной по данным Слеттебака [14].

Все наши исследования химического состава мы проводим в неизменной шкале сил осцилляторов. Для линий FeI, FeII мы используем сведения из [15, 16], для линий других элементов используемые литературные источники указаны в [13, 17]. Отбор спектральных линий выполнен из условия минимального блендирования при используемом спектральном разрешении $\delta \lambda \approx 0.25$ Å.

Определение химического состава выполнено методом моделей атмосфер с применением хорошо известной сетки моделей [18] по программе WIDTH 6. В табл. 3 представлены результаты определения содержания 12 химических элементов. В случае железа мы приводим величину, среднюю из определений $\lg \epsilon(X)$ по линиям нейтральных и однократно ионизованных атомов.

Т А Б Л И Ц А 1
Эквивалентные ширины W линий металлов в спектрах исследованных звезд, мÅ

Элемент, λ , Å	HD, BD												
	2857	60778	64488	74721	85504	86986	93329	100363	105262	109995	161817	281679	+20°5009 ^a
MgI													
4167.27	76	35	101	13	26	27	29	100	35	19	41	39	
4702.99	44	45	147	46	35	29	58	175	25	43	93	42	153
MgII													
4481.13 *	198			269		216	294		194	245	214	330	611
AlI													
3944.01	100	85	88		25	49	72	240	35	61	160		
SiI													
3905.53								53					
SiII													
3856.02								74					
3862.52								31					
4128.05	44	35	132	48	95	35	37	117	46	17		129	141
4130.88	39	39	166	48	83	33	43	65	47	16		123	203
CaI													
4226.73	143	102		53	15	104	112	310	9	81	137	74	135
4302.53	76	31		19	25	38	20	199		36	65		
4318.65								70					
ScII													
4246.83		72											
4314.08								147					
TiII													
4028.33		30			41			54					
4163.64	76	44	132	32	42	29	60	87	37	44	75	106	49
4184.33	21	12			19	12		68	10		33		
4287.89	28	22		25	28	13	41	65	27	18	63	33	68
4290.22	116	75	193	62	47	66	88	305	38	67	120	49	101
4300.05	147	125	237	92	70	124	140	260	56	111	146	49	86
4301.93	76	58		43	30	44	81	114	19	68	83		124
4386.86	29	18		3	26	4	30	64	10	10	54	27	76
4394.06	38	29		13	21	12	31	164	19		33		
4395.03	137	115	160	94	61	83	120	164	47	104	163	115	147
4395.85		19		21	25	15	12	38	12	20	26		
4417.72	94	47		34	35	26	62	94	28	34	100	53	
4418.34		5											
4443.80	141	99		80	48	63	121	173	48	82	130	71	132
4444.56					12			150					
4450.49	24	32	78	36	30	26	44	100	15	17	74	36	84
4464.46					24			68					
4468.49	117	105	184	68	50		112	197	57	81	149	67	183
4470.86		13			36			70					
4488.32	53	14		33	58	23	25	114	7		41		
4501.27	119	76	202	67	53	79	98	165	54	72	142	104	134
4529.47		13			29			131					
4563.76	83	100	150	66	48	62	105	152	44	62	126	62	157
4571.97	102	112	90	88	59	89	133	233	53	98	165	48	175
VII													
4023.39		10											
CrI													
4254.35	35	10	63		18	17	31	93	10	10	56	28	
4274.80	45	25		6	22	19	31	76	16	19	48		
4289.72		22			15		22		10	22	47		
CrII													
4145.77	35			3		12	8			21	7	33	
4207.35	9				20	8		22		19			

* Для определения содержания Mg линия не использовалась.

Т А Б Л И Ц А 1 (продолжение)

Элемент, λ , Å	HD, BD												
	2857	60778	64488	74721	85504	86986	93329	100363	105262	109995	161817	291679	+20°5 009
4224.85	24	13		3	10	10	11	65	4	5	43		
4242.38		21	83	10	38	9	21		18	16	54	44	
4252.62				8	16	13			22	15	34		
4261.92		12		8	28	9	13	50	10	5	31	53	28
4269.28	31	12		22	22		6		12	8	12		
4275.57	29		114	16	27	14	21	114	10		20	36	35
4284.21	38	8	103	25	30	8				23		41	
4555.02		17		13	34	13		72	24	11	21		
4558.66	66	38		46	64	44	54	64	19	31	77	56	75
4588.22	54	24	129	24	45	19	40	76	52	35	79		169
4592.09	43		120	17		15	28		26	28	33		130
4616.64	34	13	114	23	39	10	14	51	24	14	30	60	69
4618.82	40	22	98	14	49	21	47	54	24	23	54	49	84
4634.11	20	27	109	22	42	8	23	87	18	29	18	31	97
FeI													
4071.74	89	63		58	35	60	83	245	34	32	108	54	114
4147.68		6		11				27					
4187.04	30	13		13	22	14	18	122	12	11	40		
4187.80	41	5		15	25	11	30	90	12	25	36		0
4198.31		26		19	23	17			26	29	52		
4202.03	89	49	209	26	30	35	38	139	10	39	82	70	
4222.22	31	6		9	15		5	60	12	15	9		31
4235.94	49	25		15	15	26	40	63	8	10	57		42
4250.13		20		14	18	17			16	27	58		
4271.16	75	35		28	29	31	25		18	34	41		
4271.76	136	74		54	49	68	83	179		55	112		105
4375.93				68									
4383.55	113	114			53	77	117	210	28	65	157		138
4404.75	126	76	120	45	52	68	77	190	18	55	115	68	85
4415.13	78	42		21	49	37	47	170	13	25	99	45	126
4430.62	13				6			27		18	33		
4447.72	18		45	12	11	17	10	54	22	14	28		
FeII													
4122.67	40	13		28	19	11	20	87	11	26	19		
4178.86	85	55		41	53	38	65	100	48	43	63	78	78
4233.17	119			80	90	79	133		68	88	134	138	104
4303.18	75	48		51	50	38		218	32	46	68	65	108
4384.33		15			71		15	77	25	41	14		
4413.60	18	3		9	20	8	17		20	14	4		
4491.40	28	30	201	37	36	37	29	108	16	18	58	56	87
4508.29	64	54	146	54	56	49	56	106	44	53	117	90	158
4541.52	41	45		20	35	15	41		32	16	66		
4555.89	56	53		65	62	24	59	100	40	43	92	54	49
4576.33	45	26		18	47	14			27	12	56		119
4582.84		21		20	85	10			25	22	36		
4620.51	41			20	30	18	23	32	25	13	19		50
SrII													
4077.71	134	86	144	75	28	48	69	305	23	41	140	60	113
4215.52	101	66	126	36	22	39	63	188	5	55	122	78	90
ZrII													
4496.96		12											
BaII													
4554.03	48	10	133	27	22	33	23	129		30	71		65

ТАБЛИЦА 2

Профиль линии H_γ в остаточных интенсивностях

HD, BD	$r_\lambda (\Delta\lambda)$											
	0	1	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
2857	0.18	0.40	0.48	0.60	0.68	0.75	0.80	0.83	0.87	0.89	0.91	0.93
60778	9	36	45	56	64	69	75	79	83	86	90	92
64488	28	31	39	53	62	68	74	78	83	86	89	91
74721	13	35	47	60	69	77	83	87	90	93	94	96
85504	36	47	54	63	71	78	83	87	90	93	95	96
86986	16	40	49	60	68	74	79	83	86	89	92	93
93329	7	30	35	51	60	68	75	80	85	88	91	93
100363	26	45	55	66	74	79	83	86	88	90	91	93
105262	18	50	64	81	90	94	98	99				
109995	16	34	43	54	63	68	74	79	83	87	91	93
161817	17	38	48	62	70	76	81	84	88	91	93	94
281679	35	40	49	62	72	79	85	89	92	94	96	98
+20°5009	19	23	30	42	51	58	65	71	76	80	84	87

В работе [17] на примере звезды θ Leo (A2V) мы рассмотрели ошибки в содержании химических элементов, возникающие из-за неопределенностей в значениях параметров атмосферы T_e , g , ξ_t и измеренных эквивалентных ширин W . Систематические же ошибки определения химического состава невозможно выявить, имея данные анализа одной звезды, такие ошибки необходимо изучать, анализируя единообразно выборку звезд. Как следует из табл. 4, где представлены коэффициенты корреляции r между химическим составом звезд HB и их параметрами атмосферы, систематические ошибки применяемой методики несущественны. Подобную процедуру поиска корреляций мы выполнили и для A-звезд диска из [13], полученные при этом коэффициенты корреляции содержания элементов и параметров атмосфер не превышают значения 0.5.

Исследуя кривую распространенности химических элементов для F-карликов [19], мы обратили внимание на систематическую разницу в содержаниях хрома, определенных по линиям нейтральных и ионизованных атомов этого элемента. Результаты изучения звезд HB, которые по T_e занимают промежуточное положение между A-звездами из [13] и F-карликами из [19], дают возможность рассмотреть это явление детально. На рис. 1 показана зависимость разности $\lg \epsilon(\text{CrI}) - \lg \epsilon(\text{CrII})$ от эффективной температуры звезд. Эта разность не коррелирует с величиной $\lg g$, следовательно, основную причину таких различий можно связывать с поведением линий нейтрального хрома. Действительно, используемые нами линии CrI имеют потенциал возбуждения нижнего

ТАБЛИЦА 3

Параметры атмосфер и химический состав звезд горизонтальной ветви

HD	T_e	$\lg g$	ξ_t	$\epsilon \sin i$	$-\lg \epsilon$											
					Mg	Al	Si	Ca	Sc	Ti	V	CrI	CrII	Fe	Sr	Be
2857	7500	2.5	2.8	17	5.28	6.42	5.22	6.90		8.26		8.03	7.52	5.97	11.08	11.64
60778	8400	2.9	2.8	9	4.99	6.67	5.85	7.42	10.29	8.08	9.17	7.69	7.46	5.80	10.97	11.57
74721	8400	2.2	0.5	9	5.91		5.35	6.73		8.04		7.90	7.69	5.68	10.54	10.73
85504	8600	2.4	0.1	26	4.72	7.07	4.69	7.55		7.99		7.22	6.84	5.26	10.41	10.58
86986	7800	2.2	1.2	20	5.43	5.56	5.79	7.70		8.45		8.44	8.01	6.18	11.58	11.38
93329	8000	2.5	2.8	9	5.20	7.09	5.56	7.14		8.13		7.71	7.77	5.95	11.37	11.54
100363	7500	2.7	4.5	57	4.61	5.96	4.89	6.34	9.78	7.72		7.76	7.15	5.45	10.12	10.99
105262	8500	1.5	0.5	9	4.62	6.62	5.59	7.63		8.41		7.86	7.72	5.70	11.60	
109995	8000	2.4	1.0	15	4.93	7.03	6.24	6.30		8.08		7.29	7.65	5.60	11.08	10.77
161817	7500	2.4	2.8	10	5.54	6.11		7.51		8.80		6.43	8.30	6.54	8.96	11.38
281679	8500	2.5	4.0	58	4.85		4.62	7.04		8.28		7.28	7.26	5.76	10.87	
Среднее					5.10	6.50	5.38	7.11	10.0:	8.20	9.2:	7.60	7.58	5.81	10.78	11.17
σ^2					0.16	0.26	0.25	0.23		0.07		0.25	0.15	0.11	0.53	0.15

ТАБЛИЦА 4

Коэффициент корреляции r параметров атмосфер исследованных звезд и их химического состава

x	y				x	y			
	$T_e \cdot 10^{-4}$	$\lg g$	ξ_t	$v \sin i$		$T_e \cdot 10^{-4}$	$\lg g$	ξ_t	$v \sin i$
$-\lg \varepsilon (\text{Mg})$	-0.24	0.00	-0.18	-0.49	$T_e \cdot 10^{-4}$		-0.27	-0.47	-0.06
$-\lg \varepsilon (\text{Fe})$	-0.52	-0.03	0.22	-0.37	$\lg g$			0.63	0.31
$-\lg \varepsilon (\text{Sr})$	0.01	-0.49	-0.25	-0.54	ξ_t				0.60
$-\lg \varepsilon (\text{Ba})$	-0.47	0.37	0.58	-0.30					

уровня $\chi_L=0.0$ эВ, а линии CrII — 4 эВ. Таким образом, в случае CrII используются линии, формирующиеся в более глубоких слоях атмосферы, чем в случае CrI, т. е. в слоях, лучше описываемых моделью атмосферы. Для проверки этого предположения мы построили зависимости от T_e для $\lg \varepsilon (\text{CrI})$ и $\lg \varepsilon (\text{CrII})$ отдельно, при этом оказалось, что содержание хрома, определенное по ионам, не коррелирует с температурой. Это дает основание считать более реальным

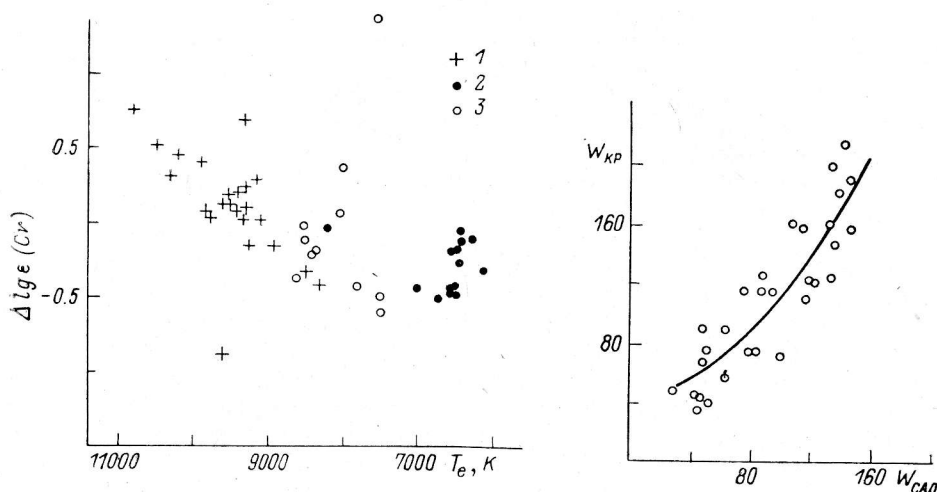


Рис. 1. Зависимость разности содержаний $\lg \varepsilon (\text{Cr})$, определенных по линиям нейтрального и однократно ионизованного хрома, от эффективной температуры.

1 — A-звезды из [13]; 2 — F-карлики из [19]; 3 — звезды HB из табл. 3.

Рис. 2. Сравнение эквивалентных ширин звезд HB, измеренных на наших спектрограммах (W_{CAO}), с наблюдениями, выполненными на спектрографе с электронно-оптическим преобразователем ($W_{\text{КР}}$) — [20, 21].

обилие хрома, определяемое по линиям ионов CrII. Подчеркнем, что потенциалы возбуждения используемых в анализе линий FeI и FeII различаются в среднем менее, чем на 1 эВ, поэтому при определении параметров атмосфер T_e и g мы применяем только линию ионизационного равновесия для атомов Fe, игнорируя линию ионизационного равновесия для хрома.

Химический состав звезд HB в шаровом скоплении M4. Получив достаточный опыт анализа звезд HB поля, мы имеем основание критически подойти к результатам других авторов. Особый интерес для изучения ранних стадий химической эволюции Галактики представляет исследование звезд HB, членов шаровых скоплений. Во-первых, важно уяснить, являются ли звезды HB в поле Галактики в полной мере аналогами этих объектов, входящих в состав шаровых скоплений. Это можно сделать, сравнивая химический состав и параметры атмосфер звезд обеих групп. Во-вторых, интересно сравнить кривую распространенности химических элементов в атмосферах звезд горизонтальной ветви и ветви ги-

гантов одного и того же скопления. Подобное сравнение может оказаться полезным при исследовании обстоятельств нуклеосинтеза до и после гелиевой вспышки.

Мы воспользовались результатами наблюдений двух звезд НВ в скоплении М4 [20]. В работах [20, 21] исследованы также звезды НВ в поле, две из них (HD 2857 и HD 161817) являются общими с нашей программой, что позволяет построить зависимость (рис. 2), необходимую для перевода эквивалентных ширин [20, 21] в нашу систему. После такой редукции по формуле $W_{\text{САО}} = -0.002W_{\text{КР}}^2 + 1.1802W_{\text{КР}} - 0.390$ (W в ангстремах) мы переопределили химический состав звезд НВ М4-206 и М4-553, пренебрегая теми линиями, для которых в [20] указана лишь верхняя граница W . Контуры водородных линий из [20, 21] для HD 2857 и HD 161817 согласуются с нашими определениями в пределах ошибок, типичных для фотографического метода регистрации, поэтому для определения T_e и g мы использовали контуры H_β из [20] без какой-либо дополнительной редукции. Микротурбулентная скорость ξ_t определена нами из условия независимости $\lg \varepsilon(\text{Fe})$ от W , индивидуально для каждой из звезд (для М4-206 из-за ограниченного числа линий FeI привлекались также линии TiII), тогда как в [20] значение $\xi_t = 4$ км/с принято для обеих звезд из общих соображений. Этим частично объясняется различие результатов определений химического состава, приведенных в табл. 5 (первая строка — наши определе-

ТАБЛИЦА 5
Параметры атмосфер и химический состав звезд НВ из М4

Звезда	T_e	$\lg g$	ξ_t	-lg $\varepsilon(X)$									Источник
				Al	SiI	SiII	Ca	Sc	Ti	V	Fe	Sr	
М4-206	9150	3.25	7.0	6.34	5.39	5.63	6.32	10.22	7.76	8.46	5.62	10.45	Авторы [20]
	9250	3.27	4.0	5.9		4.6	6.0	9.9	7.0	7.8	5.1	9.9	
М4-553	7900	2.6	3.5	7.15	5.85	5.04	7.37	10.35	8.42	9.18	5.78	10.68	Авторы [20]
	9000	3.00	4.0	6.0		5.1	5.8	9.4	7.3	8.0	4.9	8.9	

ния, вторая — результаты [20]). Такой способ определения ξ_t не позволил нам исследовать другие звезды из [20], спектры которых представлены ограниченным числом линий. Вследствие того, что линии металлов в спектрах горячих звезд НВ в основном слабы, упомянутые различия в ξ_t играют второстепенную роль, а основным источником различия является процедура определения T_e . В отличие от [20] для определения T_e и g мы использовали контуры водородных линий и условие ионизационного равновесия для железа. Из-за неопределенностей в величине межзвездного покраснения для М4 [22] использование результатов фотометрии может привести к грубым ошибкам в T_e .

Сравнение средних значений содержания химических элементов для звезд НВ поля (табл. 3) и вычисленных нами $\lg \varepsilon(X)$ для звезд НВ из М4 (табл. 5) позволяет сделать вывод о совпадении химического состава обеих групп. Отметим, что полученная нами оценка металличности звезд НВ из М4 совпадает с результатами определения металличности звезд типа RR Лиры в этом скоплении по индексу ΔS [20]. Таким образом, противоречие между результатами спектроскопических исследований объектов разных типов в М4, отмеченное в [20], снято.

Сравнение результатов исследования с химическим составом К-гигантов гало и А-звезд диска. Сравнение с перечисленными группами целесообразно из-за: а) эволюционной связи К-гигантов гало и звезд НВ; б) полного совпадения методики исследования атмосфер А-звезд НВ и А-звезд MS диска и близости их эффективных температур.

На рис. 3 приведены образцы корреляций содержания химических элементов в атмосферах К-гигантов гало из [2] и в атмосферах звезд НВ. Для сравнения наших определений с результатами [2] данные табл. 3 и 5 преобразованы в форму $[X/H] = \lg \varepsilon(X) - \lg \varepsilon(X)_\odot$. Наиболее существенной деталью рис. 3

является отсутствие звезд НВ, имеющих сильный дефицит металлов ($[X/H] < -2$). Общепринятым является утверждение, что металличность $[Fe/H]$ звезд гало тесно коррелирует с их возрастом. В этом смысле рис. 3 можно интерпретировать как указание на отсутствие в настоящее время звезд НВ, образовавшихся из очень старых звезд гало. Этот эффект не связан с тем обстоятельством, что использованный наблюдательный вариант позволил нам просмотреть ограниченный объем Галактики, так как за время $\sim 10^{10}$ лет, превосходящее время изменения структуры Галактики, в окрестностях Солнца невозможно сохранить химически однородную группу звезд, имеющих существенно различающиеся кинематические характеристики.

Отсутствие звезд НВ с $[Fe/H] < -2$ можно объяснить двумя причинами. Во-первых, доля всех звезд гало в данном диапазоне металличностей невелика [23], и вследствие того что время жизни звезды в стадии НВ приблизительно

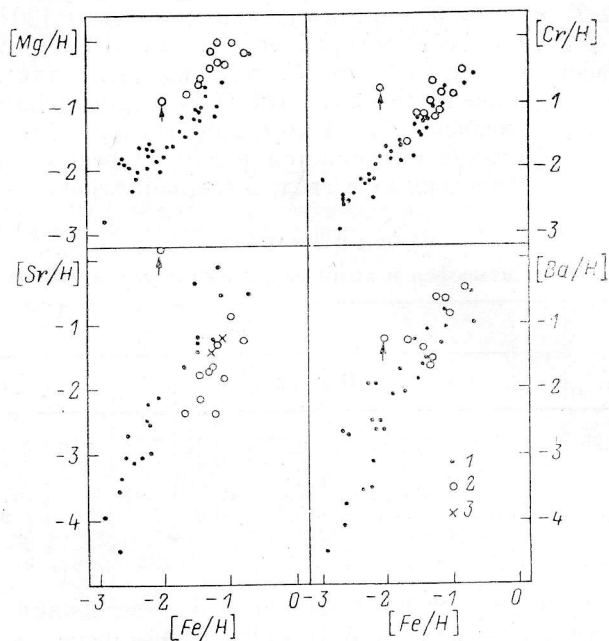


Рис. 3. Корреляция содержания химических элементов в атмосферах звезд гало.

1 — К-гиганты из [3]; 2 — наши исследования звезд НВ (табл. 3); 3 — наши определения химического состава для звезд НВ из М4 с использованием наблюдений из [20].

на два порядка меньше, чем время эволюции звезды гало от главной последовательности до стадии НВ, вероятность обнаружить звезду НВ с $[Fe/H] < -2$ крайне низка. Во-вторых, возможны варианты, когда после стадии красного гиганта стадия НВ не реализуется. Например, известно, что темп потери массы красным гигантом зависит от его светимости, а максимальная светимость ветви гигантов зависит от металличности. В работе [24] показано, что при большом дефиците металлов темп потери вещества настолько велик, что масса красного гиганта может стать меньше минимальной массы гелиевого ядра, необходимой для включения реакций горения гелия. Следует отметить, что поиск и выделение звезд НВ с металличностью $[Fe/H] < -2$ фотометрическими методами невозможны, так как спектры А-звезд данной металличности содержат небольшое число слабых линий, вклад которых в индекс металличности столь же невелик, как и при $[Fe/H] = -1$.

Второй важной особенностью рис. 3 мы считаем хорошее совпадение величин $[X/H]$ для двух групп звезд в районе $[Fe/H] \approx -1$, это совпадение тем лучше, чем больше линий использовано при получении соответствующих величин $\lg \epsilon(X)$. Следует подчеркнуть, что К-гиганты гало исследованы в [2] по красному диапазону спектра, а звезды НВ — по синему, т. е. исследования выполнены по неперекрывающимся спискам линий. Поэтому совпадение результатов на диаграмме $[Cr/H]$ можно рассматривать как свидетельство отсутствия

систематических ошибок, связанных с использованием нами и в [2] различающихся сеток моделей атмосфер и разных спектральных диапазонов. Систематическое различие результатов на диаграммах [Mg/H] и [Sr/H] может быть связано со случайными ошибками сил осцилляторов, которые могут проявляться, если число используемых линий данного элемента невелико (по две для Mg и Sr, см. табл. 1). Аналогичная ситуация описана в [25], когда ожидаемый эффект сверхобилия Mg и сверхдефицита Al у карликов гало трудно отделить от методических ошибок, связанных с тем, что содержание этих элементов у звезд разной металличности определялось по разным линиям разной интенсивности, расположенным в разных спектральных диапазонах.

Третьей особенностью рис. 3 является выделенное положение звезды HD 161817 (отмечено стрелкой). В работе [12] мы высказали предположение, что аномальное (относительно железа) поведение Cr и Sr в спектре этой звезды может быть связано с феноменом химически пекулярных звезд, проявляющемся при низких металличностях. Теоретически наличие звезд A_p на горизонтальной ветви допускается [26]. Обнаружение A_p и B_p -звезд среди объектов старого населения Галактики, прошедших стадию потери значительной части оболочки, может оказаться решающим при выборе схемы возникновения феномена химической пекулярности.

Ранее [11] мы уже сравнивали кривую распространенности химических элементов в атмосферах A-звезд диска и A-звезд НВ, но небольшое число (4) исследованных тогда звезд не позволило получить статистически значимые выводы относительно поведения элементов s-процесса. Эффект сверхдефицита элементов s-процесса, обнаруженный и детально исследованный для атмосфер K-гигантов гало, проявляется только для [Fe/H] < -1.5 [25], что интерпретируется как свидетельство вторичного (по отношению к элементам железного пика) характера происхождения элементов s-процесса. Ввиду того что спектры редкоземельных элементов представлены в основном линиями ионов, выводы относительно сверхдефицита этих элементов чувствительны к процедуре определения светимости K-гигантов гало. Поэтому исследование A-звезд НВ относительно A-звезд MS-диска из [13] можно рассматривать как независимую, лишенную указанной трудности попытку оценки эффекта сверхдефицита.

ТАБЛИЦА 6

Проверка гипотезы о величине разности между средними характеристиками химического состава A-звезд диска и гало

Параметр	Mg	Si	Ca	Ti	Cr	Fe	Sr	Ba	
$-\lg \epsilon$	4.23	4.16	5.52	6.80	6.26	4.47	9.06	9.08	Диск
σ^2	0.19	0.32	0.40	0.21	0.09	0.12	0.48	0.58	
n_1	22	23	22	24	23	24	22	18	
$-\lg \epsilon$	5.10	5.38	7.11	8.20	7.58	5.81	10.96 *	11.17	Гало
σ^2	0.16	0.25	0.23	0.07	0.09	0.11	0.22 *	0.15	
n_2	11	10	11	11	11	11	10 *	9	
t_1	-3.03	-0.57	1.23	0.48	-0.18	0.00	2.62	3.29	
Q	0.005	0.571	0.227	0.636	0.857	0.999	0.014	0.003	
[X/Fe]	+0.47						-0.56	-0.75	

* Без HD 161817.

В табл. 6 даны результаты статистического анализа совокупностей молодых и старых A-звезд. Кроме данных работы [13] (табл. 3 и 4) мы использовали результаты исследования химического состава двух звезд — кандидатов в НВ, которые после исследования методом моделей атмосфер [12] мы причислили к молодым A-звездам MS. Для элементов Ti, Cr, Fe использованы также результаты исследования [17]. Наряду со средними значениями химического состава и дисперсией в табл. 6 указано число звезд n , статистика t_1 , имеющая распределение Стьюдента с n_1+n_2-2 степенью свободы и уровень значимости $Q [t/(n_1+n_2-2)]$. Проверялась гипотеза о величине разности между средними

характеристиками $\overline{\lg \varepsilon (X)}$ А-звезд диска и гало. Эта разность определена по спектру железа: $\lg \varepsilon (Fe)_{\text{диск}} - \lg \varepsilon (Fe)_{\text{гало}} = 1.338$, т. е. мы проверяли, сохраняется ли указанный дефицит для остальных элементов. Для критического значения уровня значимости $Q_0 = 0.02$ гипотезу об указанной величине разности между средними следует отвергнуть для Mg, Sr и Ba, таким образом мы надежно зафиксировали избыток элемента α -процесса: $[Mg/Fe] = +0.47$ и сверхдефицит элементов s-процесса: $[Sr/Fe] = -0.56$, $[Ba/Fe] = -0.75$. Отметим, что учет пекулярной звезды HD 161817 резко увеличивает дисперсию $\sigma^2 [\lg \varepsilon (Sr)] = 0.53$ и вывод относительно сверхдефицита стронция становится статистически незначимым.

Выводы. Для 11 звезд горизонтальной ветви в галактическом поле определены параметры атмосфер и химический состав. Получен сверхдефицит элементов s-процесса, важно отметить, что, в отличие от работы [25], сверхдефицит наблюдается для $[\overline{Fe/H}] > -1.5$. Можно сделать вывод, что эффект сверхдефицита элементов s-процесса является общей характеристикой химического состава звезд гало, независимо от конкретной стадии звездной эволюции. Получен сверхизбыток элемента α -процесса, что в совокупности с результатами исследования химического состава карликов [27] и гигантов [25] гало позволяет утверждать о наличии еще одной общей для всех старых звезд закономерности на кривой распространенности. Следующим результатом работы мы считаем отсутствие звезд НВ с металличностью $[Fe/H] < -2$. Если этот эффект связан с интенсивной потерей массы у малометаллических звезд в стадии красного гиганта, то и среди более массивных звезд красной части горизонтальной ветви также должны отсутствовать объекты с $[Fe/H] < -2$. В связи с этим интересным является также исследование химического состава звезд, находящихся в провале Герцшпрунга. Химический состав звезд НВ поля и звезд НВ в шаровом скоплении М4 совпадает в пределах ошибок, что может указывать на единую химическую историю звезд обеих групп.

Литература

1. Maeder A., Renzini A., ed. Observational tests of the stellar evolution theory // Symp. IAU. No. 105. P. 1—590. Dordrecht Reidel Publ. Co., 1984.
2. Luck R. E., Bond H. E. Extremely metal-deficient red giants. III: Chemical abundance patterns in field halo giants // Astrophys. J. 1985. 292. P. 559—577.
3. Gratton R. G., Ortolani S. Metal abundances in 26 halo stars // Astron. Astrophys. 1984. 137. P. 6—16.
4. Danford S. C., Lea S. M. Abundance determination of field horizontal-branch stars // Astron. J. 1981. 86. P. 1909—1915.
5. Edvardsson B., Gustafsson B., Nissen P. E. Light element abundances in F stars and the chemical evolution of the Galactic disk // ESO Messenger. 1984. Nr 38. P. 33—38.
6. Бикмаев И. Ф. Спектроскопическое исследование F- и G-карликов с пониженным содержанием металлов. 1: Анализ спектра железа // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1987. 25. С. 3—12.
7. Truran J. W. Nucleosynthesis // Ann. Rev. Nucl. Part. Sci. 1984. 34. P. 53—97.
8. Philip A. G. D., Hayes D. S. Scanner observations of field horizontal-branch A-stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1983. Vol. 53, nr 4. P. 751—758.
9. Newell E. B. The evolutionary status of the blue halo stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1973. Vol. 26, nr 228. P. 37—82.
10. Бикмаев И. Ф., Клочкова В. Г., Панчук В. Е. Фотометрические характеристики Основного звездного спектрографа 6-м телескопа (БТА) // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1986. 23. С. 118—126.
11. Клочкова В. Г., Панчук В. Е. Химический состав звезд горизонтальной ветви шаровых скоплений в галактическом поле. I // Астрон. журн. 1985. 62. С. 552—557.
12. Клочкова В. Г., Панчук В. Е. Химический состав звезд горизонтальной ветви шаровых скоплений в галактическом поле. II // Астрон. журн. 1987. 64. С. 74—78.
13. Клочкова В. Г., Панчук В. Е. Спектроскопическое определение металличности звезд молодых рассеянных скоплений // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1985. 20. С. 16—21.
14. A system of standart stars for rotational velocity determinations / A. Slettebak, G. W. II Collins, P. B. Boyce et al. // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1975. Vol. 29, nr 281. P. 137—460.
15. Боярчук А. А., Саванов И. С. Силы осцилляторов для нейтрального железа и его содержание в атмосфере Солнца // Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. 1985. 70. С. 57—129.

16. Б о я р ч у к А. А., С а в а н о в И. С. Силы осцилляторов для линий пониженного железа // Изв. Крымск. астрофиз. обсерв. 1986. 74. С. 49—68.
17. К л о ч к о в а В. Г., П а н ч у к В. Е., Ц ы м б а л В. В. Параметры атмосферы и металличность θ Leo (A2 V) // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1985. 19. С. 22—27.
18. K u r c z R. L. Model atmospheres for G, F, A, B and O stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1979. 40. P. 1—340.
19. К л о ч к о в а В. Г., П а н ч у к В. Е. Кривая распространенности химических элементов в атмосферах F-карликов // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1988. 26. С. 14—26.
20. K o d a i r a K., P h i l i p A. G. D. On the metallicity of blue horizontal-branch stars in M4 and NGC 6397 // Astrophys. J. 1984. 278. P. 201—207.
21. K o d a i r a K., P h i l i p A. G. D. High-dispersion spectroscopic investigation of field horizontal-branch, high-luminosity, and main-sequence stars // Astrophys. J. 1984. 278. P. 208—214.
22. Near-infrared photometry of red giant and horizontal branch stars in M4 / J. P. Phillips, R. C. Martinez, M. C. Sanchez, V. C. Lazaro // Astron. Astrophys. 1986. 161. P. 257—263.
23. P r e s t o n G. W. Annual Report of the Director, the Mount Wilson and Las Campanas Observatories, 1984—1985 / Carnegie Inst. of Washington.
24. F u s i - P e c c i F., R e n z i n i A. On mass loss by stellar wind in population II red giants // Astron. Astrophys. 1975. 39. P. 413—419.
25. S p i t e M., S p i t e F. The composition of field halo stars and the chemical evolution of the halo // Ann. Rev. Astron. Astrophys. 1985. 23. P. 225—238.
26. M i c h a u d G., V a u c l a i r G., V a u c l a i r S. Chemical separation in horizontal-branch stars // Astrophys. J. 1983. 267. P. 256—270.
27. F r a n ç o i s P. Chemical evolution of the Galaxy: a comparizon of the metal abundances of light metals in disk and halo stars // Astron. Astrophys. 1986. 160. P. 264—276.

Поступила в редакцию 4 сентября 1986 г.
