

АНАЛИЗ СПЕКТРА Hg-Mn ЗВЕЗДЫ HR 4072

В. М. Добричев*, В. Г. Клочкова, В. Е. Панчук, Д. В. Райкова*

По спектрам с обратной дисперсией 4.2 Å/мм (спектральное разрешение 0.08 Å), полученным в кудэ-спектрографе 2-м телескопа НАО Болгарской академии наук, исследована ртутно-марганцевая звезда с предельно узкими линиями HR 4072. В диапазоне 3600—4800 Å выполнено детальное отождествление спектра и измерены эквивалентные ширины линий первичного и вторичного компонентов.

Методом моделей атмосфер определены основные параметры ($T_0=10\ 100$ К, $\lg g=3.8$, $\xi_t=2.2$ км/с) и химический состав атмосферы звезды. Найдено практически нормальное содержание Fe, слабый дефицит (-0.24 dex) элементов α -процесса, избыток элементов s -процесса ($+1.15$ dex). Содержание Sm, Gd, Hg в 1000 раз превышает солнечное, существенно повышено также содержание Mn ($+1.4$ dex). Особенности кривой распространенности (повышенное содержание тяжелых элементов, отклонения от закона четности) качественно согласуются с гипотезой диффузионного разделения элементов. Нет статистически значимой корреляции содержания Fe и Ti с величиной факторов Ланде, что указывает на отсутствие заметного магнитного усиления линий. Аргументируется применение моделей атмосфер солнечных химического состава для анализа химического состава атмосфер ртутно-марганцевых звезд.

Using the spectra with a dispersion of 4.2 Å/mm (0.08 Å spectral resolution), obtained at the Rojen observatory of Bulgarian Academy of Sciences with the Coude-spectrograph of the 2-m telescope, the Hg-Mn extremely sharp line star HR 4072 has been studied. In the spectral range 3600—4800 Å the lines of the primary and the secondary have been identified and their equivalent widths have been measured.

The fundamental parameters ($T_0=10\ 100$ K, $\lg g=3.8$, $\xi_t=2.2$ km/s) and chemical composition of the atmospheres have been determined using the method of the model atmospheres. We have found practically normal Fe-abundance, the poor deficiency (-0.24 dex) for the « α -process» elements, the overabundance for the « s -process» elements ($+1.15$ dex). The Sm, Gd, Hg abundance is enhanced thousand times as compared with that for the sun, the Mn overabundance ($+1.4$ dex). The particularities of the chemical abundance pattern (enhancement of the heavy element abundance, infringement of the old-even effect) agree qualitatively with the hypothesis about diffuse separation of the elements. The statistically significant correlation of the Fe, Ti abundance and with the value of the Lande factors is absent, that indicates the absence of the noticeable magnetic intensification of lines. The application of the model stellar atmospheres with solar chemical abundance for the analysis of the atmospheres of the mercury-manganese stars is argued.

Среди химически пекулярных (CP) звезд верхней части главной последовательности в интервале температур $T_0 \approx 9500-16000$ К [1] существует тип ртутно-марганцевых звезд, для спектров которых характерны существенное усиление линий марганца и, как правило, присутствие линии ртути HgII 3984 Å. Последнее обстоятельство уже указывает на пекулярность спектра, поскольку в спектрах нормальных звезд в том же диапазоне температур и светимостей данная линия не наблюдается. Ртутно-марганцевые звезды — типичные медленные ротаторы, среднее значение проекции скорости осевого вращения на луч зрения для них равно: $v \sin i = (29 \pm 20)$ км/с [2], что составляет в среднем около 30 % от $v \sin i$ нормальных звезд в том же температурном интервале [2]. Низкие значения $v \sin i$ в спектрах Hg-Mn звезд значительно снижают степень блендирования линий, что облегчает и уточняет решение задачи

* Сектор астрономии Болгарской академии наук.

определения химического состава этих звезд. Кроме того, ртутно-марганцевые звезды относятся к классу немагнитных CP-звезд, что оправдывает применение при изучении их спектров моделей атмосфер и методов анализа, разработанных для нормальных звезд [3, 4].

В нашем распоряжении имеются спектрограммы примерно 20 Hg-Mn звезд, полученные на ОЗСП БТА с хорошим спектральным разрешением в процессе выполнения программы исследования CP-звезд в составе галактических группировок разного возраста (см. [1, 2] и ссылки в них). В настоящей работе приводим результаты определения параметров атмосферы яркой, хорошо изученной Hg-Mn звезды HR 4072 с предельно узкими спектральными линиями, рассматривая этот объект как стандарт для оценки применимости метода анализа и его точности.

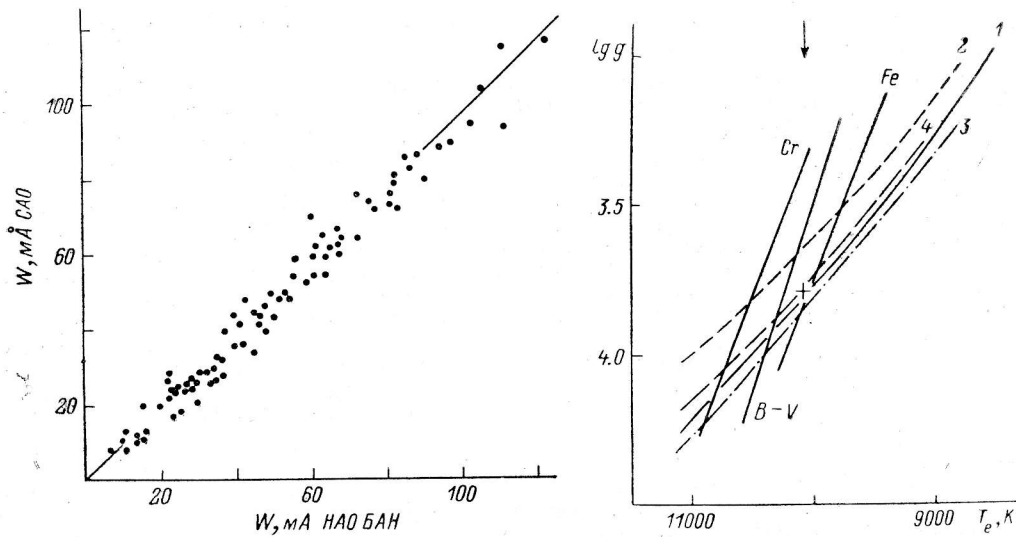


Рис. 1. Сравнение эквивалентных ширин HR 4072, измеренных в НАО БАН и САО АН СССР.

Рис. 2. Определение параметров модели атмосферы HR 4072.

1 — $W(H\gamma)$ и $W(H\delta)$; 2 — $\Delta\lambda$ ($\tau=0.9 H\gamma$ и $H\delta$); 3 — то же, $\tau=0.8$; 4 — то же, $\tau=0.7$. Ионизационное равновесие: Cr — для Cr; Fe — для Fe; + — принятые параметры атмосферы.

Наблюдения и обработка спектров. Две спектрограммы HR 4072 получены в кудэ-спектрографе 2-метрового телескопа НАО БАН на фотопластинках Kodak ПаО в области λ 3600—4800 Å с обратной дисперсией 4.2 Å/мм (спектральное разрешение $\delta\lambda=0.08$ Å). Высота спектров около 1 мм. Детальное отождествление линий в спектре выполнено с применением известных списков [5, 6], линии платины отождествлены с учетом результатов работы [7]. Отметим, что при отождествлении использовалась также коллекция спектров высокого разрешения для звезд экстремальных типов пекулярности с резкими линиями, собранная в течение ряда лет одним из авторов (В. М. Добричев) на 2-м телескопе НАО БАН. Спектрофотометрическая обработка была проведена дважды: в НАО по записям в пропусканиях с применением методики [8] и в САО по записям спектров в интенсивностях. На рис. 1 представлено сравнение эквивалентных ширин, полученных по первому и второму способам. Можно отметить хорошее совпадение результатов, разброс точек на рисунке ниже, чем типичные ошибки фотографической спектрофотометрии, причем его можно объяснить совершенно независимой процедурой проведения континуума, выделения линий, в том числе и линий вторичного компонента. Следует отметить также, что эквивалентные ширины W , измеренные по спектрам разных дат (25.11.81 и 30.04.83), совпадают. В табл. 1 приведены результаты отождествления и измерения W линий первичного и вторичного компонентов. Ниже мы будем говорить о количественном анализе только спектров первичного компо-

Т А Б Л И Ц А 1
Спектры первичного (W_1) и вторичного компонентов HR 4072

$\lambda, \text{Å}$	Элемент, мультиплет	$W_1,$ мÅ	$W_2,$ мÅ	$-\lg \epsilon (X)_1$	$\lambda, \text{Å}$	Элемент, мультиплет	$W_1,$ мÅ	$W_2,$ мÅ	$-\lg \epsilon (X)_1$
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
3710.30	YII 7	46			3935.95	FeII 173	50		4.54
3715.19	CrII 20	34			3938.29	FeII 3	35	17	4.64
3727.09	YII 74	35			3938.97	FeII 190	33		
3727.62	FeI 21	24			3944.01	AlI 1		21	
3741.64	TiII 72	75			3945.21	FeII 3	24		
3745.56	FeI 5	28:			3947.30	OI 3	16		
3745.90	FeI 5	26			3950.35	YII 6	72	15	
3747.55	YII 8	30			3951.59	YII 16	23		
3754.61	CrII 20	24			3951.97	VII 10	10:		
3757.68	TiII 72	58			3956.68	FeI 278	8:		
3758.24	FeI 21	44			3958.24	ZrII 16	16		
3759.29	TiII 13	100	15		3961.52	AlI 1	8:		
3761.32	TiII 13	90	19		3968.47	CaII 1	125		
3761.69	CrII 11	17			3979.53	CrII 183	31		
3764.09	FeII 29	21			3982.00	TiII 11	12		
3774.33	YII 7	53			3982.59	YII 6	59		
3776.06	TiII 72	25			3983.96	HgII	97		7.65
3776.56	YII 8	41			3987.63	TiII 11	20		
3778.32	MnII	19			3991.14	ZrII 30	19		
3779.58	FeII 23	12			3998.98	ZrII 16	16		
3781.51	FeII 130	20			4002.07	FeII 29	21		
3782.30	YII 61	31			4002.94	VII 9	21		7.43
3783.35	FeII 14	33			4003.33	CrII 194	24		
3786.33	TiII 12	20			4005.25	FeI 43	23	19:	
3788.70	YII 7	61			4005.71	VII 32	6:		
3805.35	FeI 608	22			4023.39	VII 32	10		8.15
3813.39	TiII 12	34			4023.81	PtII	18		
3814.58	TiII 12	44			4024.55	FeII 127	38		
3815.84	FeI 45	47	27		4025.14	TiII 11	27		6.99
3818.34	YII 7	51			4026.19	HeI 18	*		
3820.43	FeI 20	66	40		4028.33	TiII 87	48	20	
3825.88	FeI 20	49			4030.28	CrII 19	10		
3827.83	FeI 45	41			4030.75	MnI 2	14	15	6.53
3829.35	MgI 3	46	14		4031.46	FeII 151	7:		
3832.30	MgI 3	45			4033.07	MnI 2	33		5.74
3832.89	YII 7	46			4034.10	ZrII 42	11		7.58
3838.29	MgI 3	50			4034.47	PtII	16		
3841.05	FeI 45	28			4034.49	MnI 2	6:		
3844.21	MnII	17			4034.49	CrII 194	26		
3845.18	FeII 127	29			4038.03	CrII 194	26		
3849.97	FeI 20	29	18		4041.36	MnI 5	8:	8	
3853.66	SiII 1	78	10:		4044.01	FeII 172	17		
3856.02	SiII 1	113	13		4045.82	FeI 43	55	35	
3856.37	FeI 4	23	17		4046.45	PtII	51		
3859.91	FeI 4	42			4048.67	ZrII 43	13		
3862.59	SiII 1	110	16		4048.82	FeII 172	26		
3872.50	FeI 20	22			4049.14	CrII 193	17		
3872.76	FeII 29	28			4050.33	ZrII 43	8:		
3878.02	FeI 20	30	14		4051.97	CrII 19	29		
3878.28	YII 7	35			4053.81	TiII 87	42		
3882.27	TiII 34	24			4054.11	CrII 19	23		
3900.55	TiII 34	78			4061.66	PtII	49		
3902.95	FeI 45	28	16	4.77	4063.60	FeI 43	52	28	
3906.04	FeII 173	37			4064.35	TiII 106	9		
3913.46	TiII 34	85	29	7.35	4066.16	CrII 182	15		
3914.48	FeII 3	22			4067.05	NiII 11	16		
3915.94	ZrII 17	16		8.30	4071.74	FeI 43	48		4.89
3920.26	FeI 4	17	25		4075.45	SiII	17		
3922.91	FeI 4	24	33	4.66	4077.71	SrII 1	110		7.99
3927.92	FeI 4	20	19		4082.30	CrII 165	11		6.63
3930.30	FeI 4	24		4.55	4086.14	CrII 26	10		6.26
3930.66	YII 16	39			4111.01	FeII 188	10		
3932.01	TiII 34	49		6.83	4118.55	FeI 801	20		
3933.66	CaII 1	500			4119.53	FeII 21	9		
					4122.64	FeII 28	37	7:	4.18

* Линия очень слабая.

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

λ , Å	Элемент, мультиплет	W_1 , мÅ	W_2 , мÅ	$-\lg \varepsilon (X)_1$	λ , Å	Элемент, мультиплет	W_1 , мÅ	W_2 , мÅ	$-\lg \varepsilon (X)_1$
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
4124.91	YII 14	39		7.10	4275.57	CrII 31	41		5.79
4128.05	SiII 3	122	20	4.56	4278.13	FeII 32	23	8:	
4128.74	FeII 27	30			4279.3	YII 70	14		
4130.89	SiII 3	105	20	4.92	4284.21	CrII 31	40	7:	5.84
4132.41	CrII 26	11			4286.31	FeII 16			
4136.96	MnII 25				4287.89	TiII 20	33	14	6.64
4143.87	FeI 43	25	23:	5.06	4288.40	PtII 21			
4145.77	CrII 162	31			4289.72	CrI 1	13:		6.07
4148.30	PtII 14				4290.22	TiII 41	82		6.72
4149.22	ZrII 41	24		8.63	4292.25	MnII 6	20		5.96
4156.80	FeI 354	17		4.00	4294.10	TiII 20	72	26	
4161.20	ZrII 42	12			4296.58	FeII 28	55	28	
4161.52	TiII 21	17			4299.24	FeI 152	30		4.17
4161.80	SrII 3	36			4300.05	TiII 41	86		6.84
4163.64	TiII 105	60	30:	6.64	4301.93	TiII 41	56	25	6.64
4167.27	MgI 15	8		4.37	4302.53	CaI 5	15		6.24
4171.90	TiII 105	65	32		4303.17	FeII 27	67	20:	4.86
4174.09	TiII 105	24		7.01	4305.45	SrII 3	54	16	
4174.32	MnII 2	14			4307.90	TiII 41	81		6.69
4177.54	YII 14	85			4309.62	YII 5	59	26	8.56
4178.47	PtII 22	22			4312.86	TiII 41	67	30	6.97
4178.86	FeII 28	64	23	4.79	4314.08	ScII 15	14		9.33
4179.43	CrII 26	28		6.90	4314.31	FeII 32	38	9	
4179.81	ZrII 6			8.48	4314.98	TiII 41	63		
4181.76	FeI 354	15	27		4316.81	TiII 94	20		
4184.33	TiII 21	17			4319.72	FeII 220	9		
4187.04	FeI 152	25		4.18	4320.97	TiII 41	30		
4187.80	FeI 152	20		4.31	4325.01	ScII 15	18		8.91
4195.41	CrII 161	23			4325.4	ZrII 108	24		
4199.10	FeI 522	23:			4325.76	FeI 42	50	32	
4199.27	YII 5	18:			4326.76	MnII 6	36		
4202.03	FeI 42	28	37:	4.52	4330.26	TiII 94	14		
4204.69	YII 1	32			4330.71	TiII 41	16		
4205.37	MnII 2	15			4337.92	TiII 20	44		
4206.38	MnII 7	31		6.00	4351.76	FeII 27	73		
4207.35	CrII 26	11		6.63	4354.35	FeII 213	21		
4208.99	ZrII 41	18			4357.57	FeII 28			
4215.52	SrII 1	102	28	8.35	4358.34	HgI 1	17		
4219.36	FeI 800	12	14		4358.73	YII 5	48		8.05
4222.22	FeI 152	13		4.34	4359.74	ZrII 79	9:		
4224.85	CrII 162	26		5.92	4361.25	FeII 17			
4226.73	CaI 2	22	23	5.87	4367.66	TiII 104	40		
4227.43	FeI 693	33		4.25	4369.40	FeII 28	27		4.38
4233.17	FeII 27	111	27	4.94	4370.96	ZrII 79	9:		
4235.29	MnI 23	21		5.16	4379.78	ZrII 88	14		
4235.73	YII 5	36			4383.55	FeI 41	67	37	4.76
4235.94	FeI 152	16	20	4.18	4384.33	FeII 32	36		4.50
4238.82	FeI 693	23		3.89	4385.38	FeII 27	61		
4242.38	CrII 31	63	18	5.67	4386.86	TiII 104	35	10	7.00
4246.83	ScII 7	10		9.99	4390.98	TiII 61	18		
4247.43	FeI 603	10:			4394.06	TiII 51	51		6.45
4250.13	FeI 152	27		4.27	4395.03	TiII 19	88		6.98
4250.79	FeI 43	23			4395.85	TiII 61	24		7.14
4251.73	GdII 15	22		8.49	4398.02	YII 5	54	8:	8.40
4252.62	CrII 31	30		5.85	4399.78	TiII 51	62	18	
4253.02	MnII 7	19			4402.86	FeII 15			
4254.35	CrI 1	15:	32:	6.08	4404.75	FeI 41	45	27	4.91
4254.55	CrII 18				4407.69	TiII 51	10		
4258.16	FeII 28	35	13		4409.52	TiII 61	14		6.93
4259.20	MnII 7	32		5.32	4411.08	TiII 115	33	20	7.38
4260.48	FeI 152	34	33		4411.91	TiII 61	7:		7.09
4261.92	CrII 31	55	20	5.68	4413.60	FeII 32	11		
4269.28	CrII 31	27		5.66	4415.13	FeI 41	23	23	4.66
4271.16	FeI 152	22	20	4.34	4416.82	FeII 27	80		
4271.76	FeI 42	46		4.79	4417.72	TiII 40	60		6.84
4273.32	FeII 27	37	21	4.64	4418.34	TiII 51	24		6.38
4274.80	CrI 1	23	23	5.86	4421.95	TiII 93	18		7.26

ТАБЛИЦА 1 (продолжение)

$\lambda, \text{Å}$	Элемент, мультиплет	$W_1, \text{мÅ}$	$W_2, \text{мÅ}$	$-\lg \varepsilon (X)_1$	$\lambda, \text{Å}$	Элемент, мультиплет	$W_1, \text{мÅ}$	$W_2, \text{мÅ}$	$-\lg \varepsilon (X)_1$
1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
4422.59	YII 5	49			4544.01	TiII 60	10:		
4428.00	MgII 9	13			4545.14	TiII 30	10		6.32
4433.99	MgII 9	35		4.65	4549.21	FeII 186	39		
4442.99	ZrII 88	18		8.05	4554.03	BaII 1	24:	40	9.48
4443.80	TiII 19	81	30	7.02	4555.02	CrII 44	65:		5.71
4444.56	TiII 31	20		6.85	4555.89	FeII 37	69		4.90
4447.72	FeI 68	10		4.00	4558.66	CrII 44	81	33	6.49
4450.49	TiII 19	55		6.85	4563.76	TiII 50	77	22	6.93
4451.54	FeII 29				4565.78	CrII 39	32		
4453.35	VII 199	8		7.26	4571.97	TiII 82	90	35	6.83
4455.26	FeII 24				4576.33	FeII 38	46	22	4.53
4457.42	ZrII 79	3		8.84	4579.52	FeII 15			
4464.46	TiII 40	37	21	6.85	4580.06	FeII 26	21		
4465.4	YII 81	22			4582.84	FeII 37	50:	18	
4467.34	SmII 53	8		7.98	4583.83	FeII 38	95		
4468.49	TiII 31	94	34	6.83	4588.22	CrII 44	72	31	6.26
4469.15	TiII 18	9			4589.96	TiII 50	45		6.53
4470.86	TiII 40	16			4592.09	CrII 44	57	21	
4471.48	HeI 14	45			4596.02	FeII 27			
4472.02	FeII 37	30		4.72	4598.53	FeII 219	19		
4478.71	MnII 20				4616.64	CrII 44	52	15:	6.04
4481.2	MgII 4	275	56		4618.83	CrII 44	67	23	6.11
4488.32	TiII 115	61	19	6.25	4620.51	FeII 38	42		4.37
4489.18	FeII 37	61			4625.91	FeII 186	15		
4491.40	FeII 37	64	26	4.73	4634.11	CrII 44	61	30:	6.10
4501.27	TiII 31	83	37	6.99	4635.33	FeII 186	42		4.42
4508.28	FeII 38	75	38	4.65	4656.97	FeII 43	28		
4514.17	PtII 54				4663.71	FeII 44	14		
4515.34	FeII 37	72		4.77	4666.75	FeII 37	32		
4520.22	FeII 37	63	26		4670.17	FeII 25	23		
4522.63	FeII 38	81	33		4682.32	YII 12	34		
4528.62	FeI 68	20:	22		4708.66	TiII 49	21		
4529.46	TiII 82	34		6.89	4727.85	MnII 5	10		
4533.97	TiII 50	87			4731.44	FeII 43	53		
4539.62	CrII 39	16			4738.30	MnII 5	16:		
4541.52	FeII 38	53	23	4.52	4755.73	MnII 5	32		

нента, для вторичного компонента необходимы дополнительные наблюдения, а по имеющемуся материалу невозможно даже указать спектральный класс.

Определение параметров атмосферы. Для определения химического состава атмосферы звезды необходимо иметь значения эффективной температуры T_e , ускорения силы тяжести в атмосфере g , микротурбулентной скорости ξ . Параметры T_e и $\lg g$ определим, сравнивая наблюдаемые и теоретические характеристики профилей водородных линий H_γ и H_δ , значения показателя цвета $(B-V)_0$. Дополнительно используем гипотезу об ионизационном равновесии атомов железа и хрома. Более детально наша методика определения T_e , g и ее точность описаны в [9]. Отметим, что ранее [10] найдено систематическое различие в содержаниях хрома, определенных по линиям нейтральных и ионизованных атомов хрома, причем это различие зависит от температуры T_e . Однако вблизи $T_e \approx 10\,000$ К указанная разница практически равна нулю [10], это дает возможность использовать здесь ионизационное равновесие для хрома при оценке T_e и g . В табл. 2 приведены данные о наблюдаемых контурах линий H_γ , H_δ для HR 4072. Теоретические профили этих линий, как и остальную информацию о характеристиках моделей атмосфер, мы взяли из работы [11].

Рис. 2 иллюстрирует процедуру определения T_e и $\lg g$. Из рисунка видно, что показатель цвета дает параметры, хорошо согласующиеся с параметрами, полученными по изолиниям ионизационного равновесия. Хорошее совпадение изолиний для полуширин профиля H_γ , определенных для различных уровней остаточной интенсивности, указывает на отсутствие серьезных отличий формы профиля у исследуемой звезды по сравнению с нормальной звездой этой же

температуры и светимости. Стрелкой на рис. 2 отмечено значение эффективной температуры, полученной из условия бoльцмановской заселенности уровней ионов FeII и TiII.

Микротурбулентная скорость ξ_t , полученная по линиям FeI из условия независимости содержания железа ϵ (Fe) от эквивалентной ширины ξ_t , равна 2.2 км/с. Проекция скорости осевого вращения, определенная по полуширине

ТАБЛИЦА 2
Контурь линий H_γ и H_δ

Полуширина $\Delta\lambda$, Å	Остаточная интенсивность r		Полуширина $\Delta\lambda$, Å	Остаточная интенсивность r	
	H_γ	H_δ		H_γ	H_δ
0	0.18	0.18	10	77	81
1	31	31	12	82	86
2	38	40	14	86	89
4	51	54	16	89	92
6	60	65	20	93	95
8	69	73	28	0.97	0.98

$\Delta\lambda$ линии MgII 4481, для HR 4072 не превосходит 10 км/с. Столь высокая оценка приведена потому, что зависимость $v \sin i$ от $\Delta\lambda$ (MgII 4481) для $v \sin i < 10$ км/с в [12] не прокалибрована.

Химический состав и строение атмосферы. Расчет химического состава выполнен для параметров $T_e = 10\ 100$ К, $\lg g = 3.8$, $\xi_t = 2.2$ км/с с использованием программы WIDTH 6 и сетки моделей [11]. Поскольку параметры исследуемой звезды не совпадают с узлами сетки моделей, была использована программа интерполяции характеристик моделей, составленная сотрудниками Симферопольского университета Д. А. Ляшко и В. В. Цымбалом.

ТАБЛИЦА 3
Химический состав HR 4072

$\lg \epsilon$	MgI (1)	MgII (2)	SiII (2)	CaI (2)	ScII (3)	TiII (3a)	VII (3)	CrI (3)	CrII (17)	MnI (3)	MnII (3)
	A = 12	12	14	20	21	22	23	24	24	25	25
$-\lg \epsilon (X)$	4.37	4.70	4.74	6.06	9.41	6.85	7.61	6.00	6.09	5.81	5.76
$-\lg \epsilon (X)_{\odot}$	4.57		4.50	5.72	9.01	7.55	8.13	6.58		7.17	

$\lg \epsilon$	FeI (21)	FeII (19)	SrII (2)	YII (5)	ZrII (6)	BaII (1)	SmII (1)	GdII (1)	HgII (1)
	A = 26	26	38	39	40	56	62	64	80
$-\lg \epsilon (X)$	4.45	4.60	8.17	7.94	8.37	9.48	7.98	8.49	7.65
$-\lg \epsilon (X)_{\odot}$	4.50		9.23	9.60	9.60	10.12	11.00	10.90	11.10

Примечание. В скобках указано число использованных линий.

польского университета Д. А. Ляшко и В. В. Цымбалом. Конкретные значения $\lg \epsilon (X)$ для индивидуальных линий приведены в табл. 1. Отметим, что при расчете химического состава мы использовали лишь избранные линии, отобранные в зависимости от надежности их сил осцилляторов, степени блендирования при используемом спектральном разрешении. Использовались источники сил осцилляторов, перечисленные в [9], а для линий FeI и FeII мы воспользовались системой [13, 14].

В табл. 3 приведены средние значения содержаний химических элементов в атмосфере HR 4072, здесь же дан стандартный солнечный химический состав, на основе которого вычислена сетка [11] и который используется в качестве первого приближения при работе с программой WIDTH 6.

Для элементов Ti, Cr, Mn, Fe, представленных в спектре достаточно большим числом линий, наши результаты хорошо согласуются с данными [4], полученными методом кривых роста. Анализ табл. 3 приводит к следующим выводам:

- 1) металличность, традиционно отождествляемая с величиной $[Fe/H]$, у исследуемой звезды солнечная;
- 2) группа элементов α -процесса (Mg, Si, Ca, Sc) по отношению к солнечному химическому составу имеет небольшой дефицит (-0.24 dex);
- 3) для марганца избыток содержания получен по линиям как нейтральных, так и однократно ионизованных атомов. Важно подчеркнуть, что при этом для марганца, так же как и для других элементов группы железа, выполняется ионизационное равновесие;

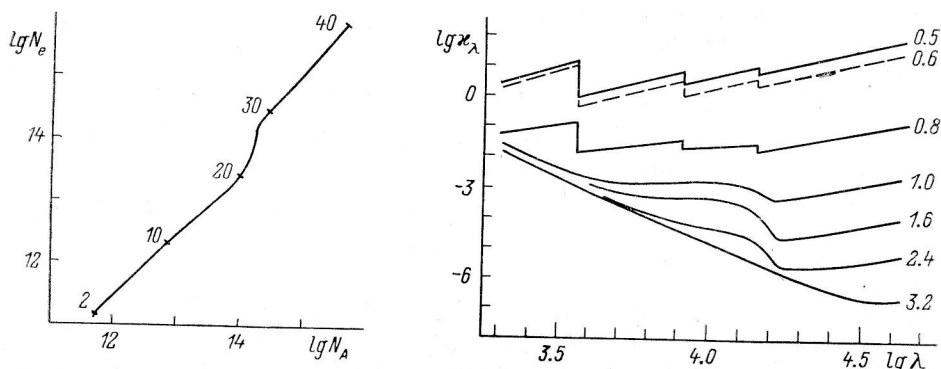


Рис. 3. Соотношение между числом свободных электронов N_e и числом всех атомов и ионов N_A в столбе атмосферы сечением 1 см^2 для модели с параметрами; $T_e = 10\,000 \text{ K}$, $\lg g = 3.5$. Цифрами указаны номера уровней в модели атмосферы из [11].

Рис. 4. Непрозрачность 1 г звездного вещества κ_λ в функции обратной температуры θ . Учтены все виды связанно-свободных и свободно-свободных переходов в поле атомов H и He, ионов H^- , He^+ , H_2^+ . При решении уравнений состояния учтена ионизация 31 элемента, содержание которых принято равным солнечному.

- 4) для группы элементов s-процесса (Sr, Y, Zr, Ba) обнаружен избыток в среднем на 1.15 dex;
- 5) для тяжелых элементов Sm, Gd, Hg получены большие избытки, в среднем на 3.0 dex;
- 6) в атмосфере HR 4072 наблюдаются отклонения от закона четности. Например, содержания четных элементов Mn и Y превышают содержания соседних элементов Sr и Zr соответственно. Эти отклонения свидетельствуют в пользу того, что обычный вид кривой распространенности, обусловленный в основном свойствами атомных ядер, в данном случае искажен процессами неядерного характера. Для CP-звезд в качестве такого механизма, как известно, предложен механизм диффузионного разделения элементов в условиях стабильной атмосферы [15].

Прежде чем перейти к обсуждению аномалий химического состава, полученных для HR 4072, рассмотрим подробнее вопрос применимости моделей [11] для анализа атмосфер Hg-Mn-звезд.

На рис. 3 представлена зависимость числа электронов N_e от полного числа атомов N_A в столбе атмосферы сечением 1 см^2 для модели с солнечным химическим составом и параметрами $T_e = 10\,000 \text{ K}$, $\lg g = 3.5$ из [11]. Из рисунка видно, что в глубоких подфотосферных слоях водород полностью ионизован и N_e практически равно и пропорционально N_A . Нижняя граница фотосферы приблизительно совпадает с 30-м уровнем модели (логарифм оптической глубины в континууме $\lg \tau_{5000} = 0.25$), а верхняя — с 24-м ($\lg \tau_{5000} = -0.97$). Следовательно, замена основного источника свободных электронов — водорода на металлы происходит именно в фотосфере. Коэффициент непрерывного поглощения $\kappa_\lambda(H^-)$, обусловленный отрицательными ионами водорода, пропорционален электронной плотности, поэтому изменение содержания в атмосфере металлов, постав-

ляющих свободные электроны, может повлиять в конечном счете на структуру фотосферы. Как показали расчеты по формуле Саха, в интересующем нас диапазоне T_e и N_e такими элементами являются Mg, Si, Fe, но из табл. 3 видно, что у HR 4072 содержания этих элементов близки к солнечному. Поэтому не следует ожидать и существенных изменений в величине κ_λ (H^-).

На рис. 4 приведена зависимость коэффициента непрозрачности водородно-гелиевой смеси в расчете на 1 г звездного вещества в функции обратной температуры $\theta = 5040/T$. Расчет выполнен нами для значения газового давления $\lg p_g = 2$, что типично для атмосфер A-звезд главной последовательности. Из рис. 4 видно, что при $T = 10\,000$ К ($\theta = 0.5$) поглощение отрицательными ионами водорода незначительно для всех λ , следовательно, и более существенные вариации содержания Mg, Si, Fe (до 0.5—1.0 dex) мало изменят суммарный коэффициент непрерывного поглощения.

Вклад в непрозрачность за счет связанно-свободных переходов у металлов и элементов CNO-группы мы вычислили, пользуясь результатами работы [16]. При $\theta = 0.5$ и $\lg p_g = 2$ наиболее весомыми вкладчиками в непрозрачность являются кремний и углерод. Но у границ серий, где скачок κ_λ (Si) максимальный (λ 1674 и 1974 Å), суммарное поглощение нейтральным кремнием ниже, чем атомами водорода, а границы серий с максимальным скачком κ_λ (C) — λ 1100 и 1238 Å лежат в энергетически второстепенной для звезды с $T_e = 10\,000$ К области длин волн, причем скачок κ_λ (C) λ 1238 Å перекрывается мощной абсорбцией в L_α .

Величина покровного эффекта в атмосферах A-звезд определяется в основном абсорбционным спектром железа, содержание которого у HR 4072 практически нормальное. Кроме того, найденное значение микротурбулентной скорости 2.2 км/с близко к значению $\xi_t = 2.0$ км/с, для которого рассчитана сетка моделей [11]. Таким образом, можно утверждать, что влияние абсорбционного спектра на структуру атмосферы HR 4072 не должно значимо отличаться от такового в случае нормальной звезды с $T_e = 10\,000$ К. Дополнительным свидетельством служит хорошее совпадение T_e , определяемой из условия ионизационного равновесия и по показателю цвета $(B-V)_0$. Что касается применения контуров H_γ , H_δ для определения светимости звезды, то следует подчеркнуть, что мы используем лишь крылья линий, т. е. те детали контуров, которые формируются вблизи фотосферы.

Итак, мы считаем вполне обоснованной применимость моделей из [11] как при анализе химического состава исследуемой звезды, так и для рассмотрения деталей, касающихся процесса диффузии химических элементов.

Определим стадию ионизации, в которой находятся интересующие нас элементы. Для этого необходимо оценить предельную глубину залегающих подфотосферных слоев, из которых под действием лучевого давления «выдуваются» атомы этих элементов. Для элементов Sr, Y, Zr масса подфотосферных слоев, полное удаление из которых атомов данных элементов может создать наблюдаемые в атмосфере избытки, примерно в 10 раз (табл. 3) превышает массу атмосферы. Для модели с $T_e = 10\,000$ К и $\lg g = 4.0$ из [11] это условие достигается на уровне 34, а для модели с $T_e = 10\,000$ К и $\lg g = 3.5$ — на уровне 35. На таких глубинах температуры равны 17 000 и 16 000 К соответственно. Расчеты по формуле Саха показывают, что Sr, Y, Zr на этих глубинах находятся преимущественно во второй стадии ионизации. Остаточная электронная конфигурация у этих ионов различна, а наблюдаемые в атмосфере HR 4072 избытки этих элементов одинаковы. С другой стороны, атомы бария в подфотосферных слоях находятся в двукратно ионизованном состоянии, а $\lg \epsilon$ (Ba) в атмосфере не показывает столь большого избытка. Мишо [15] объяснял это особенное поведение бария тем обстоятельством, что ион BaIII имеет электронную конфигурацию благородного газа. Но такую же конфигурацию имеют и ионы SrIII, а избыток Sr существенно отличается от избытка Ba.

Далее рассмотрим ситуацию с элементами Sm, Gd, Hg, избытки содержания которых в атмосфере HR 4072 достигают трех порядков. Масса подфотосферных слоев, которые могут обеспечить наблюдаемые избытки, примерно в 1000 раз больше массы атмосферы, температура самых глубоких слоев около 30 000 К.

Детальный расчет степени ионизации для этих элементов выполнить невозможно из-за неопределенности в величинах сумм по состояниям для столь тяжелых ионов. Оценки степени ионизации для Sm, Gd, Hg при 10 000 К показали, что при этой температуре Sm и Gd ионизованы дважды, а ртуть находится в первой стадии ионизации. Экстраполируя значения статистических сумм на более высокие температуры, примем, что на интересующих нас глубинах степень ионизации перечисленных элементов по крайней мере на порядок выше. При этом остаточная электронная конфигурация SmIV и GdIV совпадает с конфигурацией ксенона. Ионы ртути при этих же условиях имеют принципиально другую электронную конфигурацию.

При фиксированных характеристиках поля излучения в атмосфере эффективность диффузионного разделения атомов или их ионов обусловлена в основном двумя факторами: низкой абсолютной концентрацией элемента в атмосфере и богатством абсорбционного спектра того состояния ионизации, в котором элемент преимущественно находится. Выполнение второго условия можно проверить, пользуясь списком линий [6]. Анализ работы [6] показал, что полнота описания спектров каждого из элементов резко снижается для элементов тяжелее железа. Поэтому наиболее подходящими для статистики линий мы считаем Fe и Mn, атомы которых на уровне фотосферы находятся преимущественно в однократно ионизованном состоянии. Мы выполнили подсчеты числа линий ионов FeII и MnII для двух произвольно выбранных участков спектра: 3000—3100 и 4100—4200 Å, для которых в работе [6] имеются характеристики соответственно для 3754 и 2860 линий разных элементов. Из числа этих линий в первом диапазоне длин волн ионам FeII принадлежат 117, а ионам MnII — 258 линий, во втором диапазоне — 78 и 108 линий соответственно. Таким образом, для марганца выполняются оба требования, обеспечивающие эффективность механизма диффузии, а именно богатство абсорбционного спектра иона MnII и низкая концентрация в атмосфере по сравнению с железом (табл. 3).

Принято считать, что магнитные поля у ртутно-марганцевых звезд невелики или отсутствуют вообще. Однако отсутствие измеримого глобального поля у звезды не означает, что отсутствуют и локальные магнитные поля. Поэтому для линий избранных элементов мы решили проверить гипотезу магнитного усиления по спектру HR 4072. Воспользовавшись каталогом факторов Ланде [17], мы вычислили коэффициенты корреляции с этими факторами содержания титана и железа, определенных по спектрам TiII, FeII и FeI. Для всех трех случаев коэффициент корреляции заключен в интервале от -0.2 до 0.5, что, по нашему мнению, указывает на отсутствие магнитного усиления линий. В спектре HR 4072 большинство линий металлов попадает на линейный участок кривой роста, поэтому искомое усиление линий не могло быть скомпенсировано завышением микротурбулентной скорости. По этой же причине влияние сверхтонкой структуры на интенсивность линий невелико.

Литература

1. К л о ч к о в а В. Г., К о п ы л о в И. М. Химически пекулярные звезды в группировках разного возраста // Астрон. журн. 1986. 63. С. 240—245.
2. К л о ч к о в а В. Г., К о п ы л о в И. М. О скоростях вращения химически пекулярных звезд // Астрон. журн. 1985. 62. С. 947—955.
3. Н е а с о х W. D. Chemical abundances in Hg-Mn stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1979. 41. P. 675—688.
4. G u t h r i e B. N. G. Abundance of elements in the atmospheres of sharp-lined Hg-Mn stars // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1984. 206. P. 85—107.
5. М о о г e Ch. Multiplet table of astrophysical interest. Princeton, 1945.
6. К и р и с з R. L., Р е у т р е м а н н E. A table of semiempirical gf values: SAO Special Report. 1975. N 362.
7. D w o r e t s k y M. M. Identification of Pt II in the spectra of some peculiar A-stars // Astrophys. J. Lett. 1969. 156. L101—102.
8. D o b r i c h e v V. // Rep. Dept. Astron. Bulgarian Acad. Sci. 1970. 4. P. 47.
9. 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). 1986. 22. С. 22—27.
10. К л о ч к о в а В. Г., П а н ч у к В. Е. Химический состав A-звезд гало // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1988. 26. С. 27—37.
11. К и р и с з R. L. Model atmospheres for G, F, A, B and O stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1979. 40. P. 1—340.

12. A system of standart stars for rotational velocity determinations / A. Slettebak, G. W. Collins, P. B. Boyce et al. // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1975. 29. P. 137—160.
13. Б о я р ч у к А. А., С а в а н о в И. С. Силы осцилляторов для нейтрального железа и его содержание в атмосфере Солнца // *Изв. КрАО.* 1985. 70. С. 57—128.
14. Б о я р ч у к А. А., С а в а н о в И. С. Силы осцилляторов для линий ионизованного железа // *Изв. КрАО.* 1986. 74. С. 49—68.
15. M i c h a u d C. Diffusion process in peculiar A stars // *Astrophys. J.* 1970. 160. P. 641—658.
16. T r a v i s L. D., M a t s u s h i m a S. Radiative opacity in stellar atmospheres. I: Metal absorbtion coefficients // *Astrophys. J.* 1968. 154. P. 689—714.
17. Р о м а н ю к И. И. О некоторых проявлениях магнитного усиления линий поглощения в спектрах пекулярных звезд // *Астрофиз. исслед. (Изв. САО).* 1984. 18. С. 37—56.

Поступила в редакцию 19 декабря 1986 г.
