

БАЛЬМЕРОВСКИЕ СКАЧКИ ХИМИЧЕСКИ ПЕКУЛЯРНЫХ ЗВЕЗД

Ю. В. Глаголевский, Г. П. Топильская

На основании собственных измерений и литературных данных определены бальмеровские скачки (D) более 110 химически пекулярных звезд (CP). Сопоставление величин D нормальных и CP-звезд подтвердило полученные нами ранее данные об уменьшенной величине скачков у CP-звезд по сравнению с нормальными. Оказалось, что D у (Sr, Cr, Eu)-звезд с $T_e < 8400$ К в среднем нормальны, у (Hg, Mn)-звезд уменьшены в среднем на $\delta D = 0.05$, у Am-звезд бальмеровские скачки уменьшены тоже на $\delta D = 0.05$. Обнаружена зависимость δD от поверхностного магнитного поля B_s . Моделирование величин D путем увеличения содержания кремния в атмосферах CP-звезд, проведенное ранее, не дает необходимого эффекта во всем диапазоне температур. Несколько лучший результат получен лишь путем введения еще одного поглощающего химического элемента в ультрафиолетовой области спектра. В качестве образца такого источника был использован Mg, содержание которого увеличено по сравнению со стандартным на два порядка.

Balmer discontinuities (D) were determined for more than 110 chemically peculiar stars (CP) on the basis of the own measurements and the literature data. A comparison of D for the normal and CP stars confirms the data, obtained by us earlier, about the smaller values of D relative to the normal ones. It was found that D for Si, Cr, Eu stars with $T_e < 8500$ K were at an average normal; for Hg, Mn stars they were decreased at an average by $\delta D = 0.05$; for Am stars Balmer discontinuities were also decreased by $\delta D = 0.05$. A dependence of δD upon the surface magnetic field B_s was found. Modeling of D values by means of silicon abundance in the atmosphere of CP stars, carried out earlier, has not given a necessary effect in all the temperature ranges. A little better result was obtained by introducing one more chemical absorbing element in the ultraviolet spectral band. Such a chemical element was Mg, abundance of which was increased by the order of two as compared with the normal one.

1. В серии работ [1—6] мы показали, что распределение энергии в непрерывных спектрах химически пекулярных звезд, особенно величины бальмеровских скачков D , аномально. Последние в среднем уменьшены по сравнению со скачками нормальных звезд того же спектрального класса. Позднее этот вывод был подтвержден на основе данных многоцветной фотометрии [7—9]. В серии работ Адельмана ([10—14] и в ссылках в них на другие работы этой серии) тоже показано, что для многих химически пекулярных звезд (CP) наклон континуума и величина бальмеровского скачка соответствуют моделям с разной эффективной температурой T_e , в среднем различающейся на 600—700 К. Престон [9] тоже изучал CP-звезды по показателям в системе Стремгрена и сделал вывод об аномальной величине бальмеровских скачков.

Таким образом, к настоящему времени накоплено много данных, свидетельствующих об аномальности бальмеровских скачков у CP-звезд. Недостатком всех этих работ является то, что температурные параметры — Sp или показатели цвета не являлись достаточно надежными и об аномалиях D можно было говорить в значительной мере качественно. В этой работе мы попытались изучить зависимость D (T_e) на основе эффективных температур, полученных нами в единой системе [15]. Правильность шкалы эффективных температур [15] проконтролирована с помощью оценок T_e (BS) по полному потоку, сделанных рядом авторов [16—19]. Сопоставление температур из [15] и T_e (BS) показано на рис. 1, из которого видно, что по крайней мере в диапазоне $7000 < T_e < 15000$ К соответствие между ними хорошее. Разброс может быть объяснен ошибками измерений, переменностью и индивидуальными особенностями звезд. При температурах $T_e > 15000$ К значения $T_e > T_e$ (BS) приблизительно на 700 К, однако реальность этого различия нельзя считать надежной, так как сравнение сделано только с данными по T_e (BS) из единственного источника [18].

К настоящему времени накопилось достаточно много данных о бальмеровских скачках CP-звезд разных типов. Во-первых, это наши определения с помощью фотоэлектрического спектрофотометра [5] (32 звезды). Затем мы использовали два каталога распределения энергии в спектрах звезд в абсолютных единицах [20, 21], в которых содержатся данные для 30 звезд. Мы взяли также результаты измерений распределения энергии в непрерывных спектрах из упомянутой серии работ Адельмана (72 звезды). Данные о металлических звездах мы взяли в работе [4]. Таким образом, в нашем распоряжении оказался список из более чем 110 звезд с известными D . Все данные разных источников сведены в единую систему Адельмана с помощью поправок, выведенных по общим звездам.

2. Для оценок бальмеровских скачков по данным абсолютной фотометрии мы вычисляли отношения $\lg I_\lambda/I_\lambda^0$ во всем диапазоне длин волн. Величины I_λ^0

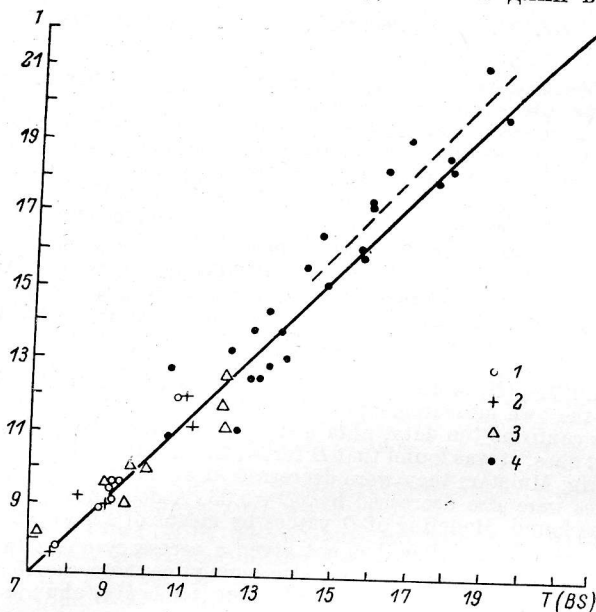


Рис. 1. Сравнение T_e из нашего списка [5] и T_e (BS), полученных по методу Блэквела—Шаллиса.

Источники: 1 — [16]; 2 — [19]; 3 — [17]; 4 — [18].

были взяты для единственного хорошо изученного стандарта α Лут. Методика измерений позволяет облегчить проведение непрерывных спектров, так как зависимость $\lg I_\lambda/I_\lambda^0$ от I/λ теоретически, как известно, является линейной функцией и это на практике в пределах точности измерений обычно осуществляется. Относительная величина бальмеровских скачков ΔD определяется по графикам относительных распределений энергии. Абсолютные значения $D = \Delta D + D^0$, где D^0 — величина скачка у звезды сравнения α Лут. Относительное распределение энергии в спектрах CP-звезд, как правило, имеет характерный вид ввиду наличия широких полос поглощения на длинах волн 4200, 5200 и 6300 Å, поэтому прямая $\lg I_\lambda/I_\lambda^0$ (I/λ) проводилась по участкам спектра, заключенным между этими полосами. Величина $D^0 = 0.52$ для α Лут определена нами по описанной методике относительно звезд, имеющих высокую температуру: 15 Mon ($Sp=0.7$), δ Ori ($Sp=0.9.5$) и σ Ori ($Sp=0.9.5$). Величина D у них принята 0.01, 0.02 и 0.02 в соответствии с их спектральным типом. После того как по данным каталогов [10—14] с помощью указанной методики были получены величины D , к ним были приведены данные из [5] и [4] путем добавления поправки 0.03, оцененной по зависимостям, построенным по общим звездам. Таким образом, для α Лут получено $D = 0.52$, т. е. то же значение, которое мы получили выше.

3. Следующим этапом работы было изучение зависимости D (T_e) для нормальных звезд. Величины D были получены по той же методике на основании

HD	Звезда	Тип	T_e	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	\bar{D}	Δ	n	δD
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
358	α And	HgMn	11100	0.26	0.16	0.25	0.26	—	0.23	0.07	4	-0.18
2453	—	SrCrEu	8500	—	—	—	0.48	—	0.48	—	1	-0.01
5797	—	SrCrEu	8200	—	—	—	0.48	—	0.48	—	1	+0.01
6164	—	SiSrCrEu	9780	—	—	—	0.39	—	0.39	—	1	-0.10
8374	47 And	Am	8300	—	—	—	—	0.37	0.37	—	1	-0.10
8441	—	SrCrEu	9000	—	—	—	0.49	—	0.49	—	1	-0.02
8855	—	SiCr	11400	—	—	—	0.27	—	0.27	—	1	-0.12
10221	43 Cas	SiCr	10370	—	—	0.35	—	—	0.35	—	1	-0.11
10783	—	SrCr	10000	—	—	0.39	—	—	0.39	—	1	-0.09
11187	—	SiCr	9940	—	—	—	0.38	—	0.38	—	1	-0.10
11503	γ Ari	SiCr 4012	9600	0.46	—	—	0.48	—	0.48	—	1	-0.05
12288	—	SiSrCrEu	8250	—	—	—	—	—	0.42	0.03	3	-0.08
12447	α Psc	SrCrEu	9550	0.40	0.40	0.45	—	—	0.46	—	1	-0.04
15089	ι Cas	SiCr	8600	0.46	—	0.39	—	—	0.39	—	1	-0.09
15144	HR 710	SrCrEu	8370	—	—	—	—	—	0.47	—	1	+0.05
18078	—	SrCrEu	8370	—	—	—	0.47	—	0.47	—	1	-0.05
18296	21 Per	SrCrEu	10570	—	—	0.40	0.38	—	0.39	0.01	2	-0.05
19832	56 Ari	SiSrCrEu	12510	—	—	—	0.28	—	0.28	—	1	-0.05
22374	9 Tau	Si	8300	—	—	—	0.48	—	0.48	—	1	+0.01
23408	20 Tau	SrCrEu	12250	—	0.30	—	—	—	0.30	—	1	-0.04
25823	31 Tau	He-w	12900	—	0.26	—	0.25	—	0.26	0.02	3	-0.08
27295	53 Tau	SiSr 4200	11000	—	—	0.28	0.33	—	0.33	—	1	-0.08
27309	56 Tau	HgMn	12260	—	—	0.25	0.29	—	0.27	0.02	2	-0.06
27628	60 Tau	Si	7700	—	—	—	—	0.33	0.33	—	1	-0.09
27749	63 Tau	Am	7800	—	—	—	—	0.35	0.35	—	1	-0.08
27962	68 Tau	Am	8370	—	—	0.51	—	—	0.51	—	1	+0.02
28546	81 Tau	Am	8400	—	—	—	—	0.43	0.43	—	1	-0.05
29140	88 Tau	Am	8500	—	—	—	—	0.45	0.45	—	1	-0.04
32549	11 Ori	Am	10000	—	0.44	—	—	—	0.44	—	1	-0.44
32633	—	Si	12580	—	—	—	0.26	—	0.26	0.01	1	-0.06
32650	—	SiCr 4012	12850	0.32	—	—	0.31	—	0.32	—	2	+0.01
33254	16 Ori	SiEu	8200	—	—	0.41	—	0.37	0.38	0.03	2	-0.10
33904	μ Lep	Am	11750	0.32	0.24	0.36	—	—	0.31	0.07	3	-0.06
34452	10 Aur	HgMn	15650	—	—	—	0.20	—	0.20	—	1	-0.03
35497	β Tau	Si 4200	13600	0.25	—	0.31	—	—	0.28	0.02	2	-0.02
37479	ϵ OriE	SiCrMn ?	23650	—	—	—	—	—	0.06	—	1	-0.02
38104	σ OriE oAur	He-r CrEu	8600	—	0.06	—	0.49	—	0.49	—	1	+0.01

HD	Звезда	Тип	T _e	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄	D ₅	D	Δ	n	3D
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
39317	137 Tau	SiCrEu	9900	—	—	—	0.46	—	0.46	—	1	—0.03
40312	o Aur	Si	9950	0.42	—	0.48	—	—	0.44	—	3	—0.04
43819	—	Si	10900	—	—	—	0.33	—	0.33	0.06	1	—0.09
47152	53 Aur	CrEu	9500	—	—	—	0.43	—	0.43	—	1	—0.08
50169	—	SrCrEu	9150	—	—	—	0.46	—	0.46	—	1	—0.05
51418	—	SrCrEu	9450	—	—	—	0.36	—	0.36	—	1	—0.45
65339	53 Cam	SrCrEu	8460	—	—	—	0.44	—	0.44	—	1	—0.05
68351	15 Cnc	SiSrCr	10400	—	—	0.48	0.44	—	0.46	0.02	2	0.00
72968	3 Hya	SrCrEu	9700	—	—	—	0.48	—	0.48	—	1	—0.02
74524	49 Cnc	SiSr	10600	—	—	—	0.35	—	0.35	—	1	—0.09
75333	14 Hya	HgMn	11700	—	—	—	0.33	—	0.33	—	1	—0.04
77350	γ Cnc	4012 Si	10200	—	—	0.49	0.43	—	0.46	0.03	2	—0.01
78316	z Cnc	HgMn	12350	—	—	0.32	0.28	—	0.30	0.02	2	—0.03
81009	τ UMa	Am	7500	—	—	—	—	0.32	0.32	—	1	—0.08
89069	—	SrCrEu	8000	—	—	—	0.45	—	0.45	—	1	—0.01
89822	—	SrCrEu	9150	—	—	—	0.45	—	0.45	—	1	—0.06
108662	30 UMa	SiSr	10100	—	—	0.57	—	—	0.57	—	1	+0.07
108945	17 ComA	SrCrEu	10000	—	—	0.44	0.43	—	0.44	0.01	2	—0.04
110066	21 Com	SrCrEu	8950	—	—	—	0.49	—	0.49	—	1	—0.02
111433	—	SrCrEu	8750	—	—	—	0.46	—	0.46	—	1	—0.04
112815	—	SrCrEu	9500	—	—	—	0.46	—	0.46	—	1	—0.05
112413	UMa	CrEu	8900	0.51	0.52	0.56	—	—	0.53	0.03	3	+0.02
118022	α ² CVn	SiHgCrEu	11900	—	0.35	0.37	—	—	0.36	0.01	2	+0.01
120198	78 Vir	SrCr	9450	0.43	0.45	0.45	0.46	—	0.45	0.02	4	—0.06
124224	84 UMa	CrEu	10300	—	—	—	0.42	—	0.42	—	1	—0.04
125248	—	Si	12460	—	0.32	—	0.29	—	0.42	—	2	—0.02
129174	—	CrEu	9300	—	—	0.40	—	—	0.31	0.02	1	—0.11
130559	π BooA	HgMn	11450	—	—	0.34	—	—	0.40	—	1	—0.06
133029	μ LiBA+B	SrCrEu	9950	—	0.41	—	0.30	—	0.32	0.02	2	—0.07
137909	β CrB	SiCr	11000	—	—	—	0.36	—	0.41	—	1	—0.05
137949	33 Lib	SrCrEu	7880	0.45	0.39	0.35	—	—	0.36	0.05	3	—0.03
141795	ε Ser	SrCrEu	7500	—	—	—	0.37	—	0.40	—	1	—0.03
143807	ι CrB	Am	9200	—	—	—	0.37	—	0.37	—	1	—0.07
144206	ο Her	HgMn	10360	0.44	0.35	0.35	0.39	—	0.44	—	4	—0.08
145389	φ Her	HgMn	11250	0.31	—	—	0.33	—	0.38	0.06	4	—0.18
147550	—	HgMn	10580	0.36	—	0.35	0.36	—	0.36	0.01	3	—0.10
	—	Si	8600	—	—	—	0.48	—	0.48	—	1	—0.02

HD	Звезда	Тип	T_e	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	Δ	n	δD
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13				
148112	ω Her	CrEu	9400	0.48	—	—	—	—	—	—	—	—	0.48	—	1	-0.03
149822	—	SiSrCr	10200	—	—	—	0.39	—	—	—	—	—	0.39	—	1	-0.08
152107	52 Her	SrCrEu	8800	—	0.44	—	—	—	—	—	—	—	0.44	0.00	2	-0.06
165474	—	SrCrEu	7600	—	—	0.44	0.47	—	—	—	—	—	0.47	—	1	+0.05
170000	φ Dra	Si	11650	—	—	0.37	—	—	—	—	—	—	0.37	—	1	0.00
170973	—	SiSrCrEu	9500	—	—	—	0.38	—	—	—	—	—	0.38	—	1	-0.13
171782	—	Si	43100	—	—	—	0.31	—	—	—	—	—	0.31	—	1	0.00
172044	—	Si	41950	—	—	—	0.24	—	—	—	—	—	0.24	—	1	-0.11
173524	46 Dra	HgMn	11520	—	0.36	—	0.36	—	—	—	—	—	0.36	0.00	2	-0.02
173648	ζ Lyra	HgMn	8450	—	—	—	—	—	0.46	—	—	—	0.46	—	1	-0.02
176232	10 Aql	Am	7750	—	—	—	0.44	—	—	—	—	—	0.44	—	1	-0.02
179527	19 Lyr	SrCrEu	9780	—	—	—	0.34	—	—	—	—	—	0.34	—	1	+0.01
179761	21 Aql	Si	11900	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.33	—	1	-0.15
182568	2 Cyg	He-w	49900	—	0.14	—	—	—	—	—	—	—	0.14	—	1	-0.01
183056	4 Cyg	Si	12800	0.28	0.28	0.33	0.29	0.33	—	—	—	—	0.29	0.04	4	-0.02
184905	—	SiSrCrEu	10100	—	—	0.33	0.33	—	—	—	—	—	0.33	—	1	-0.15
188041	—	SrCrEu	8640	—	—	—	—	—	0.45	—	—	—	0.33	—	1	-0.17
189849	15 Vul	Am	8100	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.45	—	1	-0.01
190068	—	SiCr 4200	9650	—	—	—	0.46	—	—	—	—	—	0.46	—	1	-0.03
191742	—	SrCrEu	8150	—	—	—	0.47	—	—	—	—	—	0.47	—	1	0.00
192678	—	Cr	9000	—	—	—	0.48	—	—	—	—	—	0.48	—	1	-0.03
192913	—	Si 4012	9980	—	—	—	0.36	—	—	—	—	—	0.36	—	1	-0.12
196178	—	Si 4200	43400	—	—	—	0.23	—	—	—	—	—	0.23	—	1	-0.06
196502	73 Dra	SrCrEu	8900	—	—	0.51	—	—	—	—	—	—	0.51	—	1	-0.04
200311	—	HgMn	43000	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.24	—	1	-0.06
201601	γ Equ	SrCrEu	7600	0.42	—	0.40	0.37	—	—	—	—	—	0.40	0.03	3	-0.03
204411	—	SiCrEu	8800	—	—	—	0.49	—	—	—	—	—	0.49	—	1	-0.01
205087	—	SiSrCrEu 4200	10840	—	—	—	0.35	—	—	—	—	—	0.35	—	1	-0.12
206088	γ Cap	Am	8000	0.50	0.41	0.31	—	—	0.29	—	—	—	0.38	0.12	4	-0.08
207098	δ Cap	Am	8150	—	—	—	—	—	0.35	—	—	—	0.35	—	1	-0.12
215441	—	Si 4200	14900	—	—	—	0.18	—	—	—	—	—	0.18	—	1	-0.07
216533	—	SrCr	8450	—	—	—	0.49	—	—	—	—	—	0.49	—	1	0.00
220147	—	SiCrEu	10200	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0.38	—	1	+0.04
220825	α Psc	SrCrEu	9600	—	—	—	—	—	0.38	—	—	—	0.38	—	3	-0.07
223640	108 Aqr	Si	13200	—	0.42	0.43	0.44	—	—	—	—	—	0.44	0.01	2	+0.01
224926	29 Psc	He-w	13750	—	0.24	0.36	0.27	—	—	—	—	—	0.31	0.05	2	+0.01
													0.24	—	1	0.00

данных [22], а также [20, 21]. Оказалось, что зависимость $D(T_e)$ для звезд главной последовательности лежит ниже теоретической [23] и для $\lg g = 4.0$ на 0.03. В дальнейшем мы использовали экспериментальную кривую. Для получения T_e были использованы параметры Q (по зависимости из [24]).

С помощью полученной нами зависимости $D(T_e)$ для нормальных звезд мы оценили бальмеровские скачки CP-звезд, изученных в работах Адельмана. Для этого были использованы температуры, определенные там по величине D .

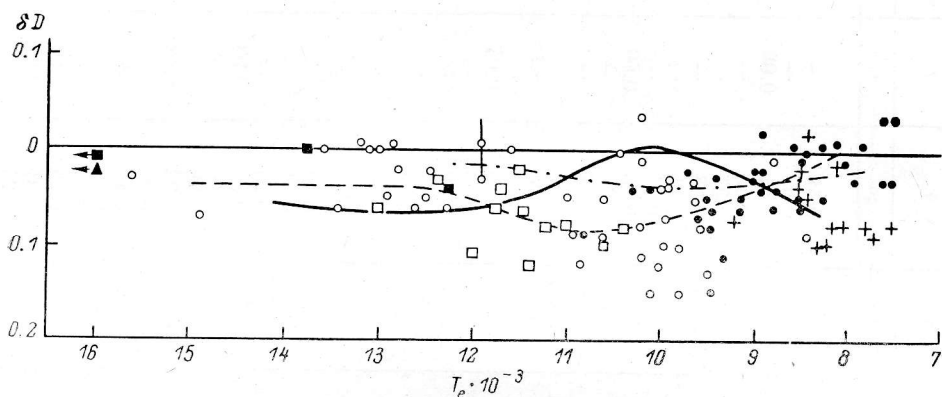


Рис. 2. Отклонение δD бальмеровских скачков CP-звезд от нормальных значений.

Для α^2 CVn показаны пределы изменения δD . 1 — He- γ ; 2 — He-w; 3 — Si+; 4 — (HgMn); 5 — (SrCrEu); 6 — Am-звезды; 7 — среднее значение для наблюдаемых величин; 8 — вычисленная зависимость при избытке кремния; 9 — вычисленная зависимость при избытке магния.

В этих работах для каждой звезды дано одно значение T_e в тех случаях, когда теоретическое распределение энергии соответствует как величине бальмеровского скачка, так и наклону пашеновского континуума. В случае несоответствия приводятся два значения T_e , и мы брали ту T_e , которая определена по D . По этим температурам с помощью зависимости $D(T_e)$ для нормальных звезд мы оценили величины бальмеровских скачков CP-звезд. Сопоставление данных

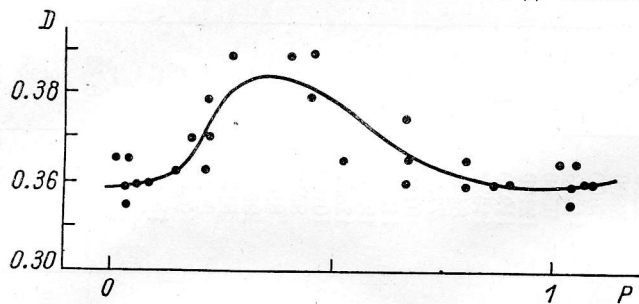


Рис. 3. Изменения D у звезды α^2 CVn с фазой периода.

всех 5 источников показало, что между ними нет систематических различий более 0.01.

Все данные сведены в таблицу, где T_e взяты из [15], D_1-D_5 получены на основании работ [5, 20, 21], серии работ Адельмана и [4] соответственно. Величины D — это средние значения, Δ — максимальные отклонения усредненных величин от D , приблизительно характеризующие надежность и точность среднего, n — число усредняемых значений. Наконец, в последнем столбце даны отклонения δD величин D от средних значений для нормальных звезд главной последовательности той же температуры (мера аномальности).

4. По данным таблицы построена зависимость, представленная на рис. 2, причем звезды разных типов пекулярности обозначены разными значками. Хорошо видно, что CP-звезды всех групп в диапазоне $T_e > 8500$ К располагаются ниже средней линии для нормальных звезд. Средняя зависимость для Bp- и Ap-звезд проведена штриховой линией. Звезды с $T_e < 8500$ К принадлежат

преимущественно к (SrCrEu)-группе и располагаются там же, где нормальные звезды. На разброс точек влияют многие факторы: ошибки измерений, переменность, реальные различия. На рис. 3 приведен график изменения D с фазой периода для звезды α^2 CVn, полученный нами по наблюдениям на спектроэлектрофотометре [25]. Амплитуда достигает величины 0.05. Однако надо помнить, что величины бальмеровских скачков в таблице определялись на основании нескольких измерений, полученных в разных фазах периода, поэтому влияние переменности значительно уменьшено. Наибольшие отклонения δD от нормальных звезд имеют звезды Si-типа. Металлические и (HgMn)-звезды имеют бальмеровские скачки в среднем на 0.05 меньше, чем нормальные звезды.

5. Причины уменьшения бальмеровских скачков уже обсуждались в литературе. В наших работах (см., например, [6]) рассматривалась гипотеза уменьшенного температурного градиента. Однако она вызвала новую проблему, так как неизвестен механизм, который мог бы привести к нарушению распределения температуры в атмосфере. В цитированных работах предполагалось, что согласно гипотезе Пикельнера [26] в турбулентной атмосфере уменьшение температурного градиента может возникнуть потому, что магнитное поле гасит турбулентцию, при этом уменьшается вязкость и возникают условия усиления конвекции, вследствие этого увеличившийся перенос тепла в верхние слои перегревает их. Однако современная точка зрения состоит в том, что атмосферы CP-звезд ($Sp=B0-F0$) конвективно устойчивы и описанный процесс у таких звезд возникнуть не может. Предположение стабильности атмосферы легло в основу гипотезы Мишо о диффузионном механизме обогащения верхних слоев атмосфер пекулярными химическими элементами, и этот механизм в настоящее время следует считать наиболее обоснованным.

Влияние магнитного поля на распределение температуры в атмосфере было изучено в работах [27, 28]. В них показано, что в верхних слоях атмосфер она может значительно измениться уже при поле $B \approx 10^4$ Гс. На $\tau \approx 0.01-1$ температура оказывается выше, а на $\tau < 0.01$ — ниже, чем в атмосфере без поля. Такая модель в первом приближении объясняет форму профилей линий водорода CP-звезд поздних типов, у которых по сравнению с нормальными звездами центральные части более глубокие и узкие, а крылья более широкие [29, 30]. Однако такое изменение распределения температуры с глубиной приводит не к уменьшению, а к некоторому увеличению величины D .

Кроме причин, вызванных нарушением структуры атмосферы, могут быть еще и те, которые связаны с коэффициентом поглощения. Коэффициент непрерывного поглощения у звезд с $7000 > T_e < 25000$ К

$$\kappa = \kappa(\text{H}) + \kappa(\text{He}) + \kappa(\text{M}) + \kappa(\text{e})$$

состоит из коэффициентов поглощения водорода — $\kappa(\text{H})$, металлов — $\kappa(\text{M})$, гелия — $\kappa(\text{He})$ и рассеяния на свободных электронах — $\kappa(\text{e})$. Остальными источниками поглощения в первом приближении можно пренебречь. Основной вклад в поглощение дает водород, причем величина бальмеровского скачка определяется соотношением количества H^- , H I и H II . Это соотношение является очень чувствительным к небольшим вариациям электронной плотности, которые могут быть вызваны избыточным содержанием металлов. Электронное рассеяние играет малую роль при тех давлениях, которые имеют место в В—А-звездах главной последовательности. Наблюдения показывают, что электронные плотности у CP-звезд, вычисленные, например, по последнему номеру линий бальмеровской серии, незначительно отличаются от нормальных значений [31]. Гелий не может играть заметной роли, так как его содержание или нормально, или понижено (за исключением звезд He-r). Следовательно, основное внимание при объяснении аномальных величин бальмеровских скачков следует уделить $\kappa(\text{M})$. Это неудивительно, так как именно избытком многих химических элементов характерны CP-звезды. Вычисление распределения энергии в непрерывных спектрах звезд при увеличении содержания кремния в ее атмосфере до трех порядков [32] привело к следующим эффектам, уменьшающим величину D .

1) Изменилась роль основного поглощающего элемента — водорода, в результате чего уменьшилась величина бальмеровского скачка.

2) Сильное увеличение поглощения в полосах ионизации кремния привело к перераспределению потока по длинам волн, который частично «заливает» бальмеровский скачок.

3) Увеличился средний молекулярный вес вещества, из-за чего коэффициент поглощения на единицу массы уменьшился.

Увеличение содержания Si на два порядка приводит к уменьшению бальмеровского скачка на величину δD в зависимости от T_e так, как показано на рис. 5 (штриховая кривая). В диапазоне $T_e > 10\,000$ К наблюдается уменьшение D , так же как и при $T_e < 9000$ К. Наблюдаемая и расчетная кривые вблизи $T_e \approx 10\,000$ К имеют противоположный ход. Различие наблюдается также и в диапазоне $T_e < 9000$ К, где (SrCrEu)-звезды имеют только слегка уменьшенные в среднем скачки, а избыток Si требует значительного их уменьшения. Зато величины δD у Am-звезд хорошо совпадают с вычисленными. Можно сделать

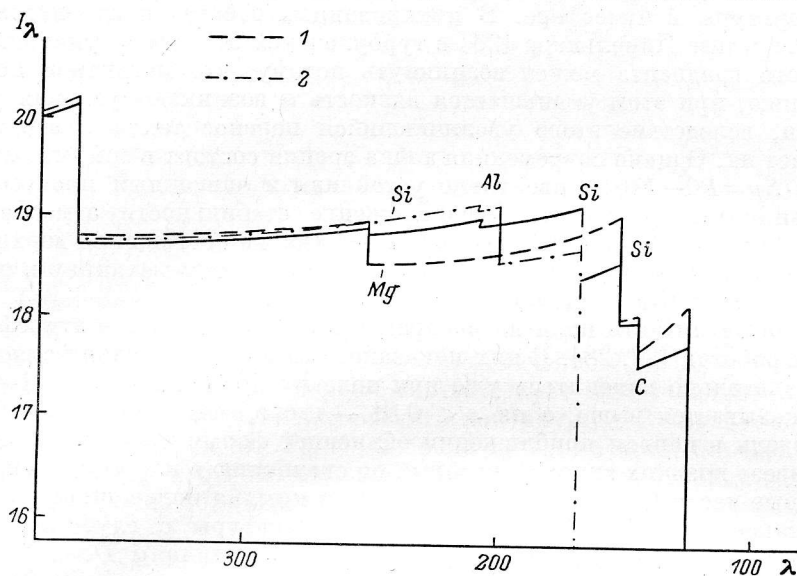


Рис. 4. Положение полос поглощения в ультрафиолетовой области спектра у разных химических элементов.

1 — зависимость I_λ при увеличении содержания Mg; 2 — то же, при увеличении содержания Si.

предположение, что различие между вычисленными и наблюдаемыми значениями происходит из-за неучета избытка содержания других химических элементов, кроме кремния.

6. Мы не знаем, какие именно пекулярные химические элементы помимо кремния дают сильное поглощение в ультрафиолетовой области спектра. Для модельных расчетов удобно использовать в качестве образца магний, который, как и кремний, имеет сильные фотоионизационные полосы поглощения с границами на $\lambda = 1621.51, 2513.82$ и 3756.61 Å (см. рис. 4 и [32]). Кроме того, в отличие от других химических элементов для Mg имеются достаточно надежные коэффициенты непрерывного поглощения. Для вычисления распределения энергии в непрерывном спектре использовались программы ATLAS-6 [33] и SAM-1 [34]. Вычислена сетка моделей при предположении увеличенного содержания Mg на два порядка. Все остальные параметры приняты нормальными. Расчеты выполнены в приближении ЛТР, поглощение в линиях не учитывалось, использовались следующие источники поглощения: H I, H⁻, H⁺, He⁻, He I, Mg I, Al I, Si I, C I, Ca I, рассеяние на свободных электронах и атомах H и He. Расчеты проведены в диапазоне температур от 8000 до 12 000 К и $\log g = -4.0$ при точности сохранения потока на всех глубинах, равной 0.5 %.

Увеличение содержания Mg приводит к тем же трем эффектам, которые перечислены выше для случая с кремнием (п. 5). В результате действия этих эффектов изменяется структура атмосферы и распределение энергии в непрерывном спектре, в том числе изменяется величина бальмеровского скачка. Зави-

симости $D(T_e)$ для моделей со стандартным химическим составом и с увеличенным содержанием Si и Mg приведены на рис. 5. Видно, что избыток этих элементов сильно влияет на D , причем в разных диапазонах температур по-разному. Потенциалы ионизации нижнего уровня Si и Mg близки, 7.65 и 8.15 эВ соответственно. Оба элемента из-за небольшого значения потенциала ионизации являются значительными дополнительными поставщиками свободных электронов при $T_e < 9000$ К, однако при $T_e > 9000$ К, как следует из расчета моделей, вклад в n_e составляет 9 % для Mg и 7.5 % для Si на глубинах $\tau \approx 0.03 \div 0.05$ при избытке этих элементов на два порядка. Это согласуется с результатами наблюдений, которые показывают, что электронная плотность в атмосферах СР-звезд не отличается значительно от нормальных. При дальнейшем увеличении T_e все большую роль играет второй эффект — перекачка поглощенной в ультрафиолете энергии в видимую область спектра, что связано с увеличением доли потока, приходящегося на ультрафиолетовую область спектра. Разное влияние на D обоих химических элементов связано главным образом с разным положением скачков их поглощения по длинам волн. Положения скачков интенсивности Si находятся на $\lambda = 1978.45, 1678.45$ и 1520.00 Å, т. е. скачки поглощения магния распола-

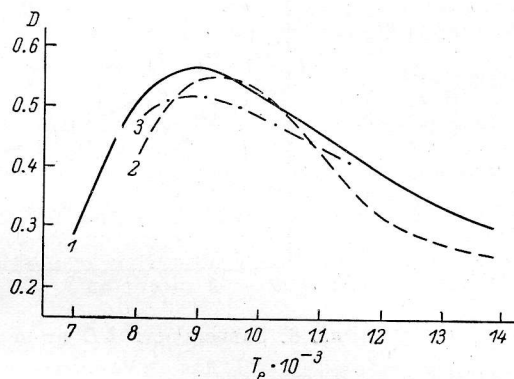


Рис. 5. Зависимость $D(T_e)$ для нормального химического состава (1), при увеличении содержания Si на два порядка (2), при увеличении содержания Mg на два порядка (3).

гаются ближе к бальмеровскому скачку, чем у кремния, и, следовательно, доля переизлученного в районе скачка потока больше, чем для кремния (рис. 6). Однако интенсивность скачков Mg быстро уменьшается, как показывает расчет, с увеличением T_e и при $T_e > 12000$ К они уже практически исчезают. Причины влияния избытка кремния на D подробно рассмотрены в работе [32]. Там показано, что при $T_e < 9000$ К скачки должны быть уменьшены вследствие увеличения поглощения H^- . На практике, как мы видели, у звезд (SrCrEu)-группы этого не наблюдается, вероятно из-за нормального содержания кремния у них. Другие химические элементы в зависимости от положения и силы полос непрерывного поглощения в ультрафиолетовой области спектра, а также от потенциала ионизации будут давать другие эффекты.

Сравнение результатов расчета приведено также на рис. 5, где наглядно видно, как оба элемента воздействуют на величину скачка D при разных температурах. Качественно расчеты удовлетворительно представляют наблюдаемую зависимость, однако для количественного совпадения необходимо учитывать влияние остальных пекулярных химических элементов. При этом следует учесть еще один механизм непрерывного поглощения в ультрафиолетовом участке спектра — автоионизационные полосы железа и других металлов [35]. В этом случае прежде всего потребуются меньший и более реальный избыток кремния. При расчетах, возможно, потребуются учитывать влияние магнитного поля на структуру атмосферы. Следует еще раз подчеркнуть, что в наших расчетах элемент Mg использован лишь как образец для проверки механизма уменьшения бальмеровских скачков, так как в нашем распоряжении не было коэффициентов непрерывного поглощения в ультрафиолетовой области спектра для пекулярных химических элементов.

7. На рис. 6 дана зависимость δD от величины поверхностного магнитного поля B_s , взятого из [36]. Заметно, что чем больше поле, тем сильнее отклонение δD . Линия регрессии представляется формулой

$$\delta D = -0.0085 B_s + 0.1.$$

Рассеяние точек в основном обусловлено переменностью D и ошибками их определения. На рис. 2 показаны пределы изменения бальмеровского скачка у звезды $\alpha^2 CVn$. Среднее рассеяние точек, обусловленное этими двумя причинами, $\Delta = \pm 0.03$, т. е. такое же, как рассеяние точек на графике (см. колонку 11 в таблице). Поскольку магнитное поле увеличивает температурный градиент [28], то это должно приводить к небольшому увеличению D . Но избыток содержания химических элементов ведет к его уменьшению, поэтому можно сделать предположение, что химические аномалии зависят от величины магнитного поля. Этот вывод можно сделать только для звезд с магнитным полем, так как ни (HgMn)-, ни Am-звезды не имеют заметного поля, а бальмеровские скачки у них аномальны в той же степени, как и у CP-звезд вообще.

8. В заключение подведем некоторые итоги. Применение более точных, чем ранее, температур привело к более равномерному распределению CP-звезд

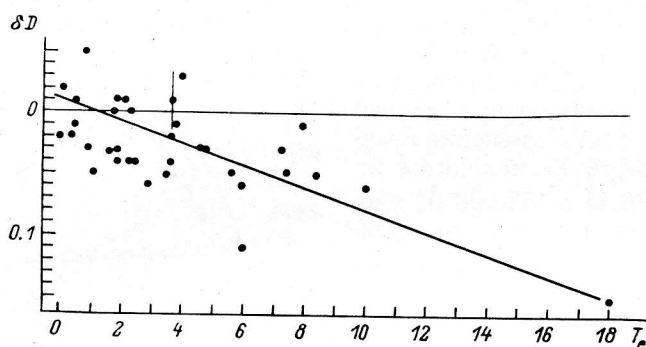


Рис. 6. Зависимость δD от поверхностного магнитного поля.
Для $\alpha^2 CVn$ показан предел изменения δD .

на зависимости $\delta D (T_e)$, чем раньше [5]. Максимальное отклонение δD от нормальных значений теперь составляет 0.15—0.17 против ранних значений 0.28—0.30 [5]. Величина D у звезд (StCrEu)-типа в среднем совпадает с нормальными значениями (или слегка меньше их), что может служить указанием на нормальное содержание у них кремния. Причина уменьшения бальмеровских скачков у Am-звезд, очевидно, тоже связана с аномалиями химического состава. Величины D у (HgMn)-звезд уменьшены в той же степени, как и у других CP-звезд, хотя магнитное поле, если оно имеется вообще, не превышает нескольких десятков гаусс.

Ни один из перечисленных ранее механизмов в отдельности не может полностью объяснить аномалии бальмеровских скачков, однако основным источником следует считать избыток химических элементов. Химические аномалии, вероятно, как-то связаны с магнитным полем, но оно не является единственной причиной их появления.

Для более полного моделирования наблюдаемой зависимости $\delta D (T_e)$ для разных типов CP-звезд необходимо учесть следующие эффекты:

- 1) вклад в непрерывное поглощение всех тех химических элементов, аномальное содержание которых наблюдается у CP-звезд (поглощение в ионизационных и автоионизационных полосах);
- 2) влияние блокировки линиями поглощения;
- 3) влияние магнитного поля на модели звездных атмосфер.

В заключение авторы благодарят И. М. Копылова, В. В. Соколова и В. В. Леушина за полезные дискуссии.

Литература

1. Глаголевский Ю. В. Непрерывный спектр семи магнитных звезд // Астрофизика. 1963. 16. С. 43—51.
2. Глаголевский Ю. В. Исследование непрерывных спектров пекулярных звезд // Астрофизика. 1964. 17. С. 32—40.
3. Глаголевский Ю. В. Спектрофотометрия пекулярных звезд // Тр. Астрофиз. ин-та АН КазССР. 1966. 7. С. 57—69.

4. Козлова К. И., Глаголевский Ю. В. Сравнение непрерывных спектров пекулярных и металлических звезд // Тр. Астрофиз. ин-та АН КазССР. 1967. 8. С. 57—62.
5. Глаголевский Ю. В. Некоторые результаты исследования непрерывных спектров магнитных и пекулярных звезд. — Астрон. ж., 1966, 43, с. 73—79.
6. Глаголевский Ю. В. О температурном градиенте в атмосферах магнитных и пекулярных звезд // Астрон. журн. 1966. С. 1194—1199.
7. Geibaldi M., Hauck B., Morguleff N. The balmer discontinuity of the Ap stars // Astron. and Astrophys. 1974. 30. P. 105—109.
8. Hauck B. The photometric properties of the Ap stars // 32-d IAU Coll. Vienna, 1975. P. 365—377.
9. Preston G. The chemically peculiar stars of the upper main Sequence.
10. Adelman S. J. Spectrophotometry of the peculiar B and A stars. VII // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1980. 42. P. 375—382.
11. Adelman S. J. Spectrophotometry of the peculiar B and A stars. VIII // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1981. 43. P. 25—32.
12. Puper D. M., Adelman S. J. Spectrophotometry of the peculiar B and A stars. XIII // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1983. 51. P. 365—384.
13. Adelman S. J. Spectrophotometry of the peculiar B and A stars. XIV // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser. 1983. 51. P. 511—532.
14. Adelman S. J., Puper D. M. Spectrophotometry of peculiar B and A stars. XV // Astron. and Astrophys. 1985. 118. P. 313—320.
15. Глаголевский Ю. В., Чунакова Н. М. Об эффективных температурах химически пекулярных звезд // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1986. 22. С. 39—57.
16. Blackwell D. E., Shallis M. J. Angular diameters, radii and effective temperatures of Ap stars // Astron. and Astrophys. 1979. 79. P. 48—55.
17. Глушнев И. Н. Эффективные температуры и угловые диаметры пекулярных звезд // Астрон. журн. 1986.
18. Lanz T. Effective temperature of Ap stars // Astron. and Astrophys. 1985. 144. P. 191—198.
19. Effective temperatures, angular diameters and radii of Ap stars / M. J. Shallis, J. E. F. Baruch, A. J. Booth, M. J. Selly // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. 1985. 213. P. 307—312.
20. Харитонов А. В., Терещенко В. М., Князева Л. Н. Сводный спектрофотометрический каталог звезд. Алма-Ата: Наука, 1978.
21. Спектрофотометрия ярких звезд / И. Б. Волошина, И. Н. Глушнев, В. Т. Дорошенко и др. М.: Наука, 1982.
22. Barbier D., Chalonge. Etude du rayonnement continu de quelques etoiles entre 3100 et 4600 Å // Ann. Astrophys. 1941. 4. P. 30—47.
23. Kurucz R. S. Model atmospheres for G, F, A, B and O stars // Astrophys. J. Suppl. Ser. 1979. 40. P. 1—340.
24. Straizis V., Kuriliene G. Fundamental stellar parameters derived from the evolutionary tracks // Astrophys. and Space Sci. 1981. P. 353—368.
25. Глаголевский Ю. В. Спектрофотометрия $\alpha^2\text{CVn}$ // Вестн. АН КазССР. 1965. 239. С. 46—53.
26. Пикельнер С. Б. Механизм образования активных областей при наличии магнитного поля // Астрон. журн. 1960. 37. С. 616—618.
27. Trasco J. D. Light variations in magnetic stars // Astrophys. J. 1972. 171. P. 569—582.
28. Staude J. About the influence of magnetic field on the model atmospheres of a Magnetic Stars // Astron. Nachr. 1972. Bd. 294. S. 113—121.
29. Глаголевский Ю. В., Козлова К. И. Анализ водородных линий пекулярных звезд $\alpha^2\text{CVn}$ и γLyr // Астрофизика. 1967. 3. С. 367—377.
30. Глаголевский Ю. В., Козлова К. И., Полосухина Н. М. О переменной водородной линии H_β в спектре магнитнопеременной звезды βCrV // Письма в Астрон. журн. 1978. 4. С. 138—139.
31. Леушин В. В. Водородные линии в спектрах пекулярных звезд // Астрофиз. исслед. 1973. 5. С. 70—80.
32. Леушин В. В., Соколов В. В., Топильская Г. П. Влияние содержания легко понижемого элемента на атмосферы звезд // Астрофизика. 1982. 18. С. 423—438.
33. Kurucz R. S. Atlas: A computer program for calculating model stellar atmospheres // SAO Spec. Rep. 1970. 309. P. 292.
34. Wright S., Arguros J. Atlas 5 at the University of London (SAM-1). 1: Programming and implementation // Comm. Univ. London. Obs. 1975. 76.
35. Jamar C. The ultraviolet absorption by the photoionisation spectrum of Fe I in Ap-stars // Astron. Astrophys. 1980. 89. P. 22—26.
36. Магнитное поле и другие параметры химически пекулярных звезд. I / Ю. В. Глаголевский, И. И. Романюк, Н. М. Чунакова, В. Г. Штоль // Астрофиз. исслед. (Изв. САО). 1986. 23. С. 38—58.

Поступила в редакцию
3 марта 1986 г.