

АНАЛИЗ АТМОСФЕР МАГНИТНЫХ ЗВЕЗД МЕТОДОМ КРИВЫХ РОСТА

I. Звезды 41 Tau, 21 Per, и Cas

Ю. В. Глаголевский

По спектрограммам с дисперсией 15 Å/мм методом кривых роста получены микротурбулентные скорости, температуры возбуждения T_v и ионизации T_i , а также электронные плотности звезд 41 Tau, 21 Per и Cas. Микротурбулентные скорости небольшие, в пределах 1.4—2.1 км/сек. Электронные плотности соответствуют таковым у звезд III класса светимости. Соотношение между T_v и T_i нормальное, что служит доводом в пользу нормальных условий возбуждения и ионизации.

Microturbulent velocities, excitation temperatures T_v , ionization temperatures T_i , and electron densities of the magnetic stars 41 Tau, 21 Per, and Cas have been obtained by the curve of growth method using spectrograms with the dispersion of 15 Å/mm. The microturbulent velocities are small (within the limits of 1.4—2.1 km/s). The electron densities correspond to those of the stars belonging to the III_d luminosity class. The relation between T_e and T_i is normal, which is an argument for normal conditions of excitation and ionization.

ВВЕДЕНИЕ

При исследовании различных свойств магнитных, пекулярных и металлических звезд их, как правило, сравнивают с нормальными звездами того же спектрального класса или того же цвета. Однако ни спектральный класс, ни цвет не являются вполне надежными параметрами по следующей причине. Спектральный класс (Sp) не является однозначной функцией эффективной температуры, так как при определении его по линиям металлов, кальция (линия K) или водорода получаются разные значения. Это известное свойство звезд рассматриваемого типа, особенно металлических звезд. В табл. 1 приведено несколько характерных примеров, взятых из работ [1, 2]. В этой таблице указан номер звезды из каталога HD, название звезды, спектральный класс, определенный по водородным линиям — SpH, по линиям ионизованного кальция (K) — SpK, по линиям металлов — SpM и по линиям гелия — SpHe.

ТАБЛИЦА 1

HD	Звезда	SpH	SpK	SpM	SpHe
8441	—	A3	B8	A5	—
17775	—	A3	B9	A5	—
18078	—	A0	A0	F0	—
19832	56 Ari	B7	B8	—	B9
108663	17 Com A	B9	B8	A3	—
108945	21 Com	A0	A2	A3	—
137909	β CrB	F0	A8	F2	—
182640	δ Aql	F0.5	F0.4	A7.7	—
202444	τ Cyg	F2.8	F0.4	A7.1	—
11636	β Ari	A3.4	A3.4	A7.3	—

Различие в Sp отражает аномальность интенсивностей спектральных линий. Принято считать, что нормальны интенсивности только линий железа. Это, однако, не всегда так. В ряде случаев линии Fe в спектрах пекулярных звезд также усилены или ослаблены по отношению к нормальным звездам [3, 4]. Цвет звезд рассматриваемого типа тоже не может служить надежным критерием температуры. В системе U, B, V цвет соответствует систематически более раннему Sp [5]. Измерения распределения энергии в непрерывных спектрах [6, 7] показывают также заметные аномалии. Камерон [8] измерил цвета очень большого количества магнитных, пекулярных и металлических звезд методом шестичетной фотометрии и показал, что цвета отличны от нормальных и эти звезды могут быть легко выделены по признакам аномальности. В своей работе Камерон приводит график зависимости величин c_1 от m_1 , где c_1 — показатель цвета, характеризующий величину бальмеровского скачка, и m_1 — показатель цвета участка, прилежащего к бальмеровскому скачку с длинноволновой стороны спектра. На этом графике нанесены точки, принадлежащие нормальным и пекулярным звездам, причем последние систематически сдвинуты.

В ряде случаев аномалии значительны, причем характер их не закономерен и поэтому невозможно их учесть. В настоящее время не исследована связь различных спектральных свойств изучаемых звезд с температурой. Мы поставили перед собой задачу исследовать соотношения основных спектральных свойств с температурой, если это вообще окажется возможным. Температура может быть определена методом кривых роста. Следует иметь в виду, что аномалии интенсивностей спектральных линий могут возникать как вследствие отклонений химического состава, так и вследствие аномального строения атмосферы [9]. Если строение атмосферы значительно отличается от нормального, то следует ожидать нарушения в соответствии температур, полученных по различным элементам и ионам.

Исходя из опубликованных работ, можно сделать вывод, что отклонения в распределении температуры и давления не столь велики, чтобы оказывать значительное влияние на рассматриваемые эффекты. Соотношение между интенсивностями спектральных линий нарушено по крайней мере в значительной степени аномалиями химического состава, а не строением атмосферы или отклонениями условий возбуждения и ионизации. Аномальность структуры заметно влияет, очевидно, только на распределение энергии в непрерывном спектре и на контуры водородных линий [4]. В работе [4] приводятся для нескольких пекулярных звезд контуры водородных линий, имеющие очень широкие крылья и узкое ядро, причем центральная глубина линий значительно больше нормальной. Последнее свидетельствует о существовании некоторого протяженного слоя. Трудно судить о том, насколько реально существование столь широких крыльев, так как проведение непрерывного спектра у поздних пекулярных звезд осуществляется неуверенно вследствие наличия чрезвычайно интенсивных металлических линий, сильно блиндирующих друг друга. Некоторые авторы отмечают, однако, что для пекулярных и металлических звезд кривые роста строятся так же уверенно, как и для нормальных, и это еще раз дает основание доверять всем параметрам, получаемым методом кривых роста. Изучая параллельно пекулярные и стандартные звезды, можно будет судить о реальности этого предположения.

К настоящему времени опубликован ряд работ, посвященных исследованию магнитных, пекулярных и металлических звезд методом кривых роста. Недостатком многих из них является то, что температуры возбуждения T_v и температуры ионизации T_i определены только по одному

или двум элементам. Как известно, таким образом можно получить температуру, значительно отличающуюся от средней, определенной по нескольким элементам, тем более что неизвестно, каковы в этом отношении свойства звезд рассматриваемого типа. Кроме того, опубликованный материал очень разнороден в том смысле, что анализ проводился по спектрам, имеющим как очень большую дисперсию ($\sim 1-2 \text{ \AA/мм}$), так и очень маленькую ($\sim 30 \text{ \AA/мм}$), применялась различная методика и разные теоретические кривые роста. Из сказанного следует, что использовать только опубликованный материал для исследования различных закономерностей не только нецелесообразно, но и методически неправильно. Поэтому для выполнения поставленной задачи из числа магнитных, пекулярных и металлических звезд были отобраны звезды всех спектральных классов от самых ранних до самых поздних, которые должны будут исследоваться единой методикой, на основании однородного материала.

§ 1. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Для исследования температурной последовательности магнитных, пекулярных и металлических звезд были использованы спектры, полученные на 50-дюймовом рефлекторе Крымской астрофизической обсерватории с дисперсией 15 \AA/мм В. В. Леушиным. Спектры были профотометрированы на микрофотометре в прямых интенсивностях. В настоящей работе приводятся результаты обработки спектров трех звезд 41 Tau, 21 Per и ι Cas. Основные данные о спектрограммах приведены в табл. 2.

В табл. 3 приведены основные данные об изучаемых звездах. SpHD — спектральный класс в системе HD, SpH — спектральный класс, определенный по интенсивностям линий

ТАБЛИЦА 2

Звезда	Область спектра, \AA	Количество спектрограмм
41 Tau	3660—4370	3
21 Per	3680—4420	2
	3985—4638	2
ι Cas	3680—4420	3
	3985—4638	2

водорода, SpM — по общему виду металлического спектра, SpK — по линиям ионизованного кальция K и SpHe — по линиям гелия (определены Осава [1]). Далее в таблице φ_1 и φ_2 — спектрофотометрические градиенты в видимой и ультрафиолетовой областях спектра, D — бальмеровский скачок [7]. Магнитное поле измерено у 21 Per и 41 Tau; у ι Cas поле не измерялось из-за расширенных

вращением линий. Звезда 21 Per интересна, в частности, тем, что она имеет смешанную полярность магнитного поля, т. е. некоторые линии показывают направление поля противоположных знаков [10]. Она относится к типу β , т. е. имеет быстрые неправильные изменения магнитного поля с обращением полярности наряду с быстрыми и неправильными изменениями интенсивностей ряда спектральных линий. Звезда 21 Per является также типичным представителем пекулярных звезд в том смысле, что практически все элементы, интенсивность спектральных линий которых бывает пекулярной, имеются в ее спектре. Бальмеровский скачок уменьшен. Звезда 41 Tau тоже имеет быстро меняющиеся интенсивности спектральных линий, причем контур линии K временами раздваивается. Эта звезда является спектрально-двойной. Бальмеровский скачок также аномален. SpM и SpK для 21 Per и 41 Tau Осава не определял из-за слабости линий.

Спектрограммы звезд получены в разные даты, поэтому изменения интенсивностей будут влиять на средние эквивалентные ширины. Этот эффект, который учесть невозможно, очевидно, будет увеличивать разброс

ТАБЛИЦА 3

Основные данные о звездах	21 Per	41 Tau	† Cas
SpHD	A0p	A0p	A5p
SpH	B7	B8	B9
SpM	—	—	A7
SpK	—	—	A0
SpHe	нет	B9	нет
φ_1	1.12	0.90	—
φ_2	1.35	1.05	—
D	0.35	0.23	—
Магнитное поле (ге)	-1270, +1350	-530, +700	—
Переменность	β	β	1 ^d , 74
$v \sin i$ (км/сек.)	0	10	50
Особенность	Si, Mn, Sr, Eu, λ 4200 Å, пере- менные контуры	Sr, Si, λ 4200 Å, спектрально-двой- ная	Sr, Cr

ТАБЛИЦА 4

λ	Мультимет	$\lg \frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$			λ	Мультимет	$\lg \frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$		
		21 Per	41 Tau	† Cas			21 Per	41 Tau	† Cas
		FeI			4248.23	482	0.84	—	0.38
					4241.11	351	0.44	—	—
4607.66	554	—	—	0.91	4239.80	18	—	—	0.51
4542.42	894	1.73	—	—	4238.82	693	1.10	0.82	1.29
4525.14	826	1.26	—	1.82	4235.90	152	0.99	—	1.18
4494.57	68	—	—	0.91	4233.61	152	1.00	—	1.10
4482.17	2	—	—	1.24	4225.46	693	1.05	0.97	1.14
4476.02	350	0.77	—	1.05	4222.20	152	0.72	—	0.99
4466.55	350	0.93	—	1.05	4213.65	355	0.76	1.05	0.61
4461.65	2	0.93	—	1.39	4210.36	152	0.69	—	0.93
4459.12	68	—	—	0.97	4202.03	42	1.01	—	1.01
4454.38	350	0.80	—	1.12	4198.31	152	1.24	1.06	1.62
4447.72	68	—	—	0.91	4196.22	693	0.67	0.95	0.80
4443.20	350	1.07	—	1.12	4191.44	152	0.90	1.24	1.71
4442.35	68	0.79	—	1.20	4187.80	152	1.32	—	1.20
4427.31	2	0.90	—	1.71	4187.04	152	0.99	1.03	0.99
4422.57	350	0.76	—	1.56	4182.38	476a	0.81	—	0.61
4408.42	68	—	—	0.91	4181.76	354	0.72	—	1.29
4407.71	68	—	—	0.76	4172.13	649	1.22	0.97	1.62
4405.02	2	1.25	—	1.39	4175.64	354	0.60	—	1.39
4388.41	830	1.11	—	0.87	4170.91	482	0.92	0.78	1.24
4383.55	41	1.01	—	1.43	4174.92	19	—	—	1.35
4375.93	2	—	—	0.87	4157.79	695	—	—	0.66
4367.58	414	1.23	—	1.22	4156.80	354	0.80	—	1.08
4352.73	71	1.17	—	1.27	4154.50	355	—	—	1.46
4360.81	903	1.16	—	1.08	4147.67	42	—	—	0.57
4326.76	42	—	—	1.10	4143.87	43	0.99	0.94	1.24
4325.76	42	1.38	0.94	1.58	4137.00	726	1.08	—	0.08
4305.45	476	1.04	—	—	4133.87	698	1.05	—	0.70
4299.24	152	0.60	—	1.33	4126.19	695	—	—	0.68
4285.44	597	0.97	0.97	0.66	4114.45	357	0.70	—	0.43
4282.41	71	1.26	—	0.74	4109.80	359	—	—	1.26
4271.16	152	0.98	—	1.50	4107.49	354	—	—	0.83
4260.48	152	—	—	1.37	4094.97	217	—	—	0.89
4250.79	42	1.01	—	1.03	4091.56	357	—	—	0.99
4250.12	152	0.71	1.12	1.31	4087.00	694	0.90	—	1.20
4245.26	352	0.75	—	0.47	4085.28	559	0.93	—	1.12

Т А Б Л И Ц А 4 (продолжение)

λ	Мультиплет	lg $\frac{W\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$			λ	Мультиплет	lg $\frac{W\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$		
		21 Per	41 Tau	1 Cas			21 Per	41 Tau	1 Cas
CrI					TiI				
4626.18	21	—	—	1.07	4471.24	146	—	—	0.59
4545.96	10	1.06	—	1.05	4552.45	42	—	—	0.72
4535.72	33	—	—	0.99	4287.4	44	—	—	0.55
4539.50	33	1.42	—	1.22	3924.53	13	—	—	1.08
4530.76	33	—	—	1.35					
4511.90	150	1.26	—	1.05					
4506.85	288	1.18	—	—					
4496.86	10	—	—	0.97					
4424.28	129	—	—	0.97	4589.96	50	1.20	—	1.39
4371.28	22	0.83	—	1.23	4571.97	82	1.40	—	1.39
4359.63	22	0.96	—	0.93	4563.76	50	1.64	—	1.20
4357.53	198	0.79	—	—	4544.01	60	—	—	0.44
4351.77	22	—	—	1.43	4542.14	30	1.17	—	—
4351.05	22	—	—	1.39	4533.97	50	1.72	—	1.12
4337.56	22	—	—	1.03	4529.47	82	1.44	—	1.37
4289.72	1	—	—	1.75	4501.27	31	1.66	—	1.14
4254.35	1	1.10	0.80	1.31	4493.54	18	1.16	—	0.46
4289.7	1	1.10	—	1.75	4488.32	115	—	—	1.58
4274.8	1	0.99	—	0.97	4470.86	40	1.06	—	0.63
4222.64	132	1.02	—	—	4469.16	18	—	—	1.11
4209.76	155	0.82	—	—	4468.49	31	—	—	0.89
					4464.46	40	1.14	—	0.85
					4450.49	19	—	—	0.91
					4444.56	31	1.39	—	0.93
					4443.80	19	—	—	1.12
					4421.95	93	—	—	1.56
					4418.34	51	0.87	—	0.44
					4417.72	40	—	—	0.51
					4411.07	115	—	—	0.85
					4409.52	61	1.20	—	0.08
					4399.78	51	1.19	—	0.74
					4395.85	61	1.17	—	0.51
					4395.03	19	1.09	—	1.05
					4394.06	51	0.79	—	0.44
					4390.98	10	1.23	—	0.72
					4386.86	104	1.25	—	1.08
					4367.66	104	1.23	—	—
					4330.71	41	—	—	0.99
					4320.94	41	1.05	0.57	—
					4314.98	41	1.10	1.01	1.29
					4312.86	41	1.10	0.97	0.83
					4307.90	41	—	—	1.58
					4300.05	41	1.34	1.07	1.48
					4294.10	20	0.99	—	0.91
					4290.23	41	1.39	—	1.41
					4287.89	20	0.97	1.12	0.49
					4184.33	21	1.01	0.90	0.63
					4174.03	105	—	0.80	1.35
					4163.64	105	0.92	0.95	0.78
					4173.54	21	1.30	—	1.39
					4171.90	104	1.22	—	1.62
					4053.81	87	—	1.10	—
					4026.33	87	0.92	1.01	—
					3987.63	11	—	—	0.51
					3931.99	34	—	0.85	—
					3913.46	34	0.97	1.08	0.78
					3900.51	54	0.88	—	1.08
					3814.58	12	—	1.20	—
CrII					TiII				
4618.83	44	1.44	—	0.97					
4616.64	44	1.12	—	1.50					
4592.05	44	1.22	—	—					
4588.21	44	1.43	—	1.50					
4558.65	44	1.70	—	1.69					
4555.02	44	—	—	1.33					
4362.93	179	1.22	—	—					
4284.21	31	1.20	—	0.80					
4275.67	31	1.12	—	1.24					
4261.92	31	1.35	1.33	1.35					
4269.28	31	0.86	0.94	1.24					
4252.62	31	1.38	1.00	1.14					
4242.38	31	—	0.92	—					
4224.85	31	0.86	0.94	1.24					
4209.02	169	0.85	—	—					
4207.35	26	0.80	—	0.97					
4195.41	161	1.03	—	1.22					
4179.43	26	1.39	—	0.23					
4151.01	163	1.16	—	0.57					
4145.77	162	0.97	1.09	0.44					
4132.41	26	1.00	1.01	1.46					
4075.63	19	—	0.90	—					
4072.56	26	—	1.02	—					
4070.90	191	0.94	—	—					
4054.11	19	1.10	—	1.05					
4056.02	182	—	0.82	—					
4051.97	19	0.81	0.92	0.76					
4049.14	191	1.37	—	1.52					
4038.63	194	1.08	0.87	—					
4022.36	183	0.98	—	—					
4003.33	191	1.13	—	—					
3945.11	142	—	0.90	—					
3911.3	129	0.47	—	0.62					
3754.6	20	—	1.03	1.41					

точек на кривых роста. В результате мы будем получать средние параметры.

Эквивалентные ширины, вернее величины $\lg \frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$, для изучаемых звезд представлены в табл. 4. В этой таблице представлены не все измеренные линии, а только те, которые использовались для построения кривых роста и определения температур возбуждения и ионизации (T_v и T_n). Список остальных линий и их интенсивностей будет опубликован в работе, посвященной изучению химического состава магнитных звезд.

§ 2. КРИВАЯ РОСТА

Для получения физических параметров атмосфер звезд была использована теоретическая кривая роста Унзоляда в координатах $\lg \frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot \frac{c}{2R_0 v_t}$ и $\lg \frac{1}{2R_0} \cdot \frac{Nf\lambda}{\pi v_t}$. Здесь v_t — скорость микротурбуленции атомов, R_0 — наибольшая центральная глубина водородных линий, c — скорость света, N — количество поглощающих атомов и f — сила осциллятора.

ТАБЛИЦА 5

Звезда	21 Per	41 Tau	ι Cas
R_0	0.88	0.74	0.94

Величины R_0 , необходимые для вычислений, приведены в табл. 5. Нами были взяты силы осцилляторов, использовавшиеся в работе [11].

При построении эмпирических кривых роста мы пытались сделать это для каждого элемента отдельно.

Однако даже в случае ι Cas не удалось построить таких кривых из-за недостаточного количества линий и значительного разброса точек. Поэтому были построены единые кривые роста для всех элементов, причем в случае ι Cas отдельно для ионов и нейтральных элементов (рис. 1). Эти кривые роста строились по мультиплетам, представленным достаточным количеством линий.

Микротурбулентная скорость v_t определяется по вертикальному сдвигу экспериментальной кривой относительно теоретической

$$\Delta y = \lg \frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6 - \lg \frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot \frac{c}{2R_0 v_t}$$

или

$$\lg v_t = \Delta y - 0.52 - \lg 2R_0.$$

Значения v_t (км/сек.) для исследуемых звезд приведены в табл. 6.

Такие низкие микротурбулентные скорости характерны для пекулярных звезд. Для сравнения приведем v_t для других звезд: 10 Aql имеет $v_t=2.14$ км/сек. [12], γ Equ имеет $v_t=1.4$ км/сек. [13].

Электронные плотности определяются методами Инглиса—Теллера и Унзоляда, причем первый метод относится к самым верхним слоям звездных атмосфер ($\tau \sim 0.2$), а второй — к более глубоким ($\tau \sim 0.3-0.5$), соответствующим средней глубине образования металлического спектра [15]. При первом методе, когда применяют небольшие дисперсии, обычно строят график зависимости глубин или эквивалентных ширины водородных линий от номера линии и экстраполируют графически прямолинейную часть до пересечения с осью абсцисс. Номер n_m , при котором происходит пересечение, и принимается за последний наблюдаемый номер линии. Однако при применении большой дисперсии наблюдается боль-

ТАБЛИЦА 6

Звезда	41 Tau	21 Per	ι Cas
По линиям нейтральных элементов ...	2.10	1.4	2.1
По линиям ионов ...	2.10	1.4	1.7

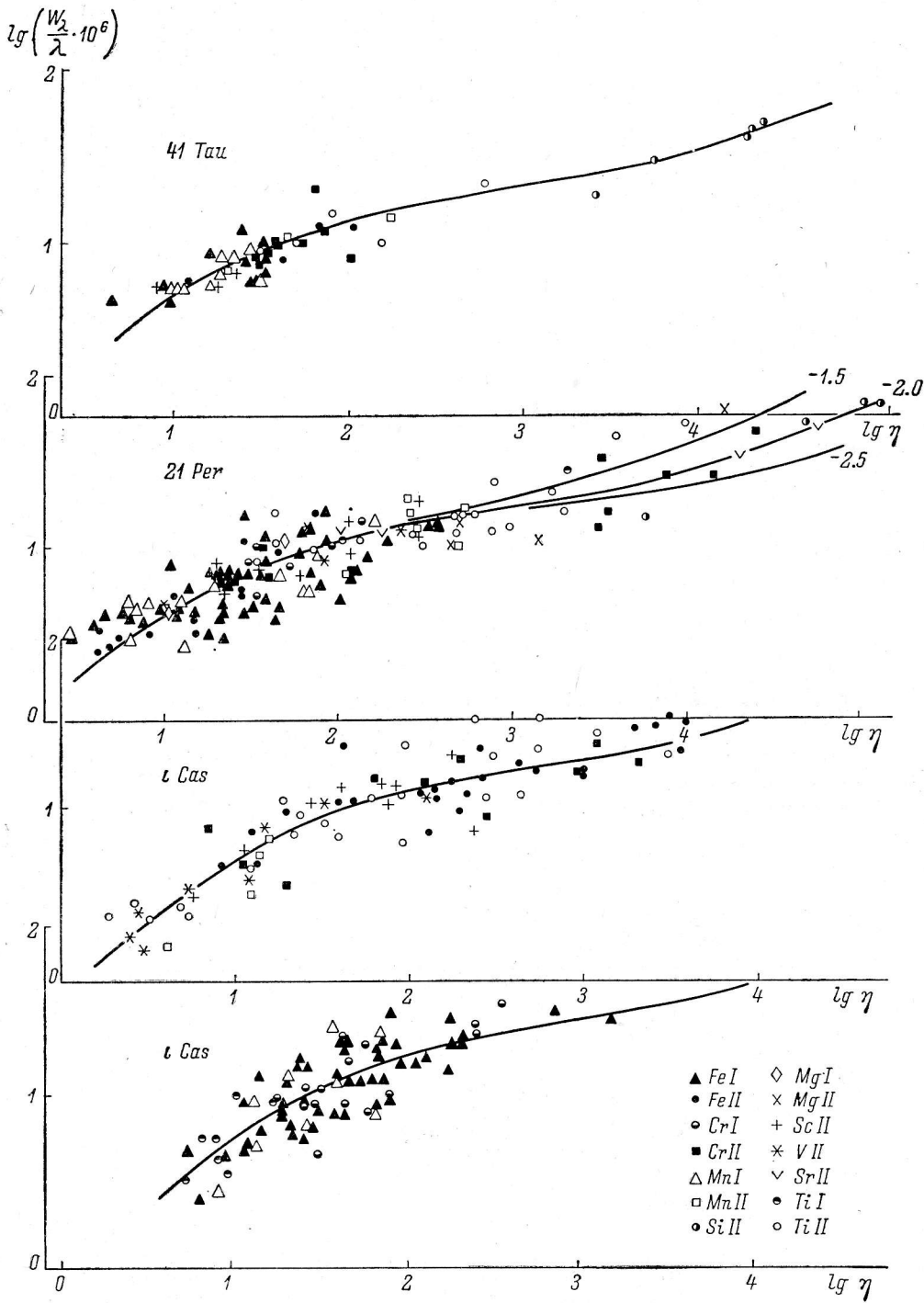


Рис. 4.

шее число линий, чем дает описанный способ (рис. 2). Поэтому мы брали последним именно тот номер, который наблюдается на регистрограмме.

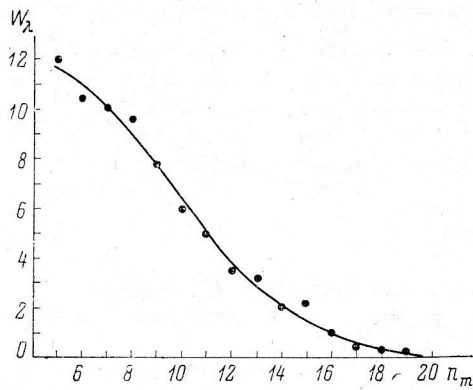


Рис. 2.

в единичном столбе атмосферы и вносится поправка из [15] за влияние переналожения водородных линий. В табл. 8 приведены эквивалентные ширины линий водорода W_λ и величины $\lg N_{0,2}H$. Далее, используя $\lg N_{0,2}H$ из табл. 8, вычисляем $\lg n_e$ по формуле

$$W^{3/2} = k N_{0,2} H n_e (R_0/0.45)^{3/2},$$

где логарифмы коэффициента k для линий H_α и H_β равны соответственно -29.10 и -29.18 .

Логарифмы электронных плотностей равны для 41 Tau 14.17, для 21 Per 14.12, для ι Cas 14.28. В полученные величины введены также поправки, учитывающие влияние электронов на расширение линий [15].

ТАБЛИЦА 7

Звезда	41 Tau	21 Per	ι Cas
$\lg n_e$	13.06	13.27	13.33

ТАБЛИЦА 8

Номер линии	Звезда			Номер линии	Звезда		
	41 Tau	21 Per	ι Cas		41 Tau	21 Per	ι Cas
5	10.3	12.0	17.2	14	1.3	2.0	1.6
6	9.1	10.4	17.4	15	0.7	2.2	0.8
7	9.3	10.0	18.8	16	0.3	1.0	1.0
8	9.0	9.6	13.8	17	0.3	0.4	0.3
9	7.9	7.8	10.5	18	0.3	0.3	0.4
10	6.4	6.0	7.6	19	0.2	0.2	—
11	5.1	5.0	5.3	20	0.1	—	—
12	3.3	3.5	4.3				
13	2.3	3.2	2.9	$\lg N_{0,2}H$	16.56	16.92	16.77

§ 3. ТЕМПЕРАТУРА ВОЗБУЖДЕНИЯ

По величинам $\lg \frac{W_\lambda}{\lambda} \cdot 10^6$ для всех линий с помощью кривой роста снимаем с оси абсцисс значения $\lg \frac{1}{2R_0} \cdot \frac{N_i f \lambda}{\pi v_i} = \lg \eta$. Вычитая из $\lg \eta$ соот-

ветствующие значения $\lg gf\lambda$ и $\lg \frac{1}{2R_0 v_i \pi}$, получаем $\lg \frac{N_i}{g_i}$. Далее, как обычно, строим график зависимости $\lg \frac{N_i}{g_i}$ от потенциала возбуждения

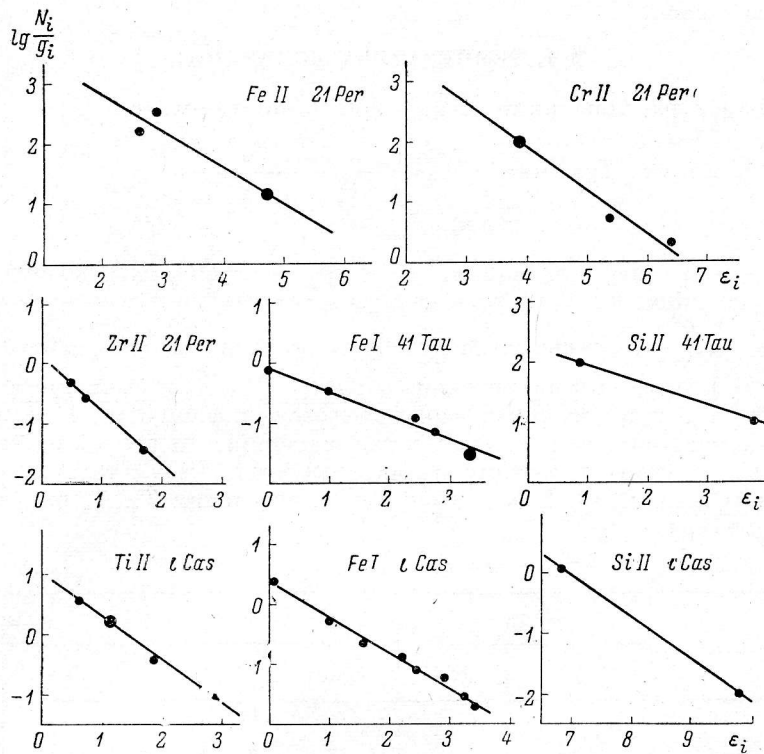


Рис. 3.

нижнего уровня ϵ_i . В узких интервалах ϵ_i значения $\lg \frac{N_i}{g_i}$ усреднялись. Угловой коэффициент прямых, проведенных по точкам, дает величину $\theta = \frac{5040}{T_v}$.

ТАБЛИЦА 9

Элемент	41 Tau		21 Per		ε Cas	
	T_v	Вес	T_v	Вес	T_v	Вес
FeI	11000°	2	8100°	2	7900°	3
FeII	8200	3	8600	3	7100	2
TiII	5600	1	7800	1	7200	2
CrI	—	—	10800	1	8400	2
CrII	9300	3	8100	3	8050	2
SrII	11300	1	5000	1	—	—
ZrII	5000	1	5800	1	—	—
MnI	11500	3	8300	2	7250	1
SiII	15200	2	13300	1	7100	3
MgI+MgII	—	—	12000	1	—	—
VII	—	—	—	—	7200	1
T_v	10080		8600		7560	

На рис. 3 приведены некоторые из лучших графиков, а результаты определения T_v по различным элементам представлены в табл. 9. На основании данных этой таблицы определены средневзвешенные значения \bar{T}_v . Веса устанавливались с учетом количества использованных линий и разброса точек.

§ 4. ТЕМПЕРАТУРА ИОНИЗАЦИИ

Температура ионизации определялась по формуле

$$T_{ii} = \frac{3360 (\chi_r + \varepsilon_i^r - \varepsilon_k^{r+1})}{\frac{2}{3} \lg \left(\frac{N_i^r}{n_e N_k^{r+1}} \cdot \frac{g_k}{g_i} \right) + 10.43 + \lg T_{ii}},$$

где χ_r — потенциал ионизации, ε_i^r и ε_k^{r+1} — потенциалы возбуждения r и $r+1$ раз ионизованного элемента, соответствующие взятым величинам $\lg \frac{N_i^r}{g_i}$ и $\lg \frac{N_k^{r+1}}{g_k}$. Здесь взяты значения $\lg n_e$, вычисленные методом Ун-зольда. В формуле предварительно задается $T_{ii} = T_v$ и вычисляется первое значение T_{ii} , которое снова подставляется в формулу. Как правило, третья подстановка дает результат, отличающийся от второй на несколько десятков градусов, и поэтому не используется. Результаты вычислений приведены в табл. 10. Как и в случае определения \bar{T}_v , \bar{T}_{ii} определялись с учетом весов.

ТАБЛИЦА 10

Элемент	41 Tau		21 Per		Cas	
	T_{ii}	Вес	T_{ii}	Вес	T_{ii}	Вес
FeI, FeII	10400	3	9700	2	9500	1
CrI, CrII	9100	1	7600	1	6250	1
MnI, MnII	10700	1	8400	2	—	—
MgI, MgII	—	—	12600	1	—	—
TiI, TiII	—	—	—	—	6950	1
\bar{T}_{ii}	10200		9400		7570	

§ 5. ЗАКЛЮЧИТЕЛЬНЫЕ ЗАМЕЧАНИЯ

В настоящей статье мы не будем анализировать полученные данные подробно, так как это будет сделано после обработки всего материала. Поэтому ограничимся некоторыми замечаниями предварительного характера. Как видно из таблиц, между отдельными определениями температуры возбуждения и температуры ионизации имеются значительные различия, особенно это касается звезд 41 Tau и 21 Per. Очевидно, эти различия связаны не только с ошибками наблюдений, но и с существованием для некоторых звезд зависимости температуры от потенциала возбуждения. На рис. 4 приведены графики, иллюстрирующие сказанное. Для 41 Tau эта зависимость получилась значительно менее уверенной, чем для 21 Per, а для Cas ее нет вовсе. Кружки имеют диаметры, пропорциональные весу согласно табл. 9 и 10. На рис. 4 для 21 Per приведены также данные из работы [3] (светлые кружки, нижняя прямая) для звезды Cas, имеющей приблизительно ту же температуру. Температуры возбуждения в этом случае определялись по спектрам с дисперсией 4.5 Å/мм.

В расположении точек имеется большое сходство и намечается зависимость величины T_v от потенциала возбуждения. В ряде случаев нормальные звезды также показывают такую зависимость.

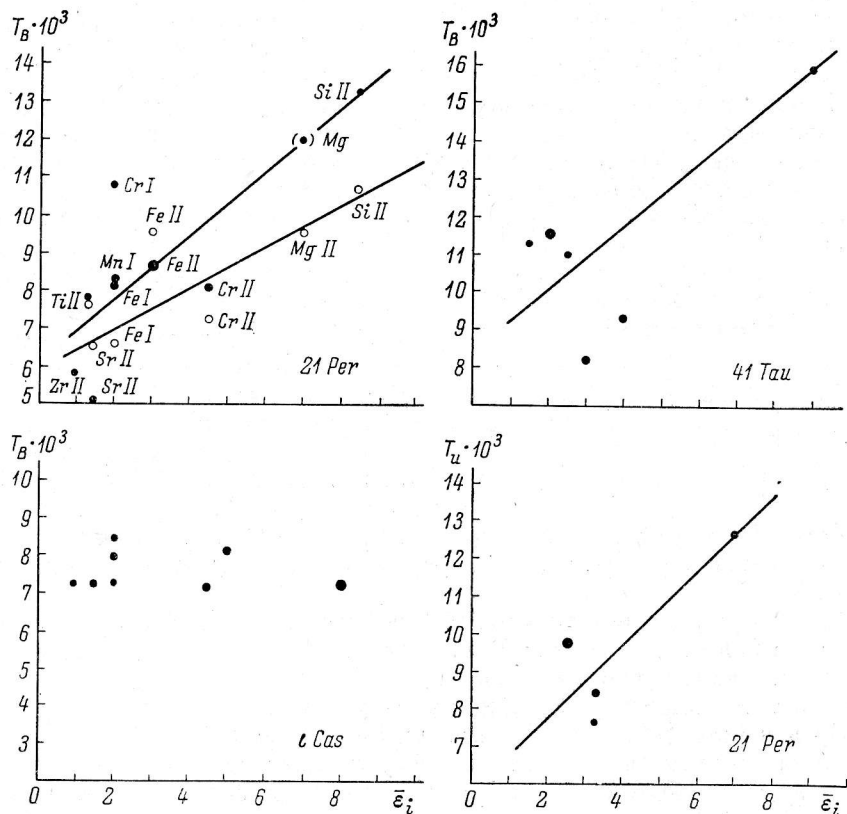


Рис. 4.

Используя измеренные температуры, можно оценить спектральные классы. Для этого были использованы данные, собранные И. М. Копыловым [16] из разных источников. Это — температуры возбуждения и ионизации для большого количества звезд, также измеренные методом кривых роста и методом моделей атмосфер. На основании этого были построены средние кривые зависимости T_v и T_u от спектрального класса Sp , использованные для нахождения $Sp(T_v)$ и $Sp(T_u)$ для наших звезд. Последние снимались с графиков с точностью, равной 0.5 подкласса. Результаты приведены в табл. 11.

ТАБЛИЦА 11

Спектральный класс	41 Tau	21 Per	ϵ Cas
$Sp(T_v)$	B9.0	A0.5	A2.0
$Sp(T_u)$	B9.0	B9.5	A2.5
\overline{Sp}	B9.0	A0.0	A2.5

В таблице \overline{Sp} обозначает среднее из $Sp(T_v)$ и $Sp(T_u)$.

Из рассмотрения этой таблицы можно сделать вывод, что $Sp(T_v)$ и $Sp(T_u)$ близки и соотношение между ними, а следовательно и между температурами, такое же, как и в случае нормальных звезд. Таким образом, это может служить подтверждением предположения о нормальных

условиях возбуждения и ионизации в атмосферах рассматриваемых звезд. Нормальное соотношение между T_v и T_n также указывает на то, что, очевидно, нет заметного нарушения термодинамического равновесия в среднем. Следует подчеркнуть предварительный характер этих выводов.

Спектральные классы, определенные по водородным линиям (см. табл. 3), оказываются на несколько подклассов более ранними, чем $Sp(T_v)$ и $Sp(T_n)$. Это соответствует меньшей интенсивности водородных линий по отношению к нормальным звездам того же Sp , однако доля, вносимая эффектом светимости, пока неясна. К сожалению, для рассматриваемых звезд нет надежных тригонометрических параллаксов, и вопрос о светимости можно решить только косвенным путем.

Спектральные классы, определяемые по металлам (SpM), для звезд 21 Per и 41 Tau не находились, и имеется только упоминание о слабости металлического спектра [1]. У звезды ι Cas SpM значительно более поздний, чем \overline{Sp} . Это тоже характерное свойство пекулярных и металлических звезд, так как общее усиление спектральных линий создает впечатление о более позднем спектральном классе. То же самое можно сказать по поводу SpK .

Линии He у звезды 21 Per очень слабы, а у 41 Tau их интенсивность вполне соответствует температуре (что иногда наблюдается у пекулярных звезд).

Номер n_m последней наблюдаемой водородной линии в спектрах звезд 21 Per и ι Cas соответствует III классу светимости, а n_m для 41 Tau соответствует самой верхней границе области, занимаемой звездами III класса светимости, если нанести полученные нами данные на график $n_m - Sp$ в работе [15]. Это еще раз подтверждает существующее мнение, что пекулярные звезды располагаются у верхней границы главной последовательности. Поэтому можно воспользоваться зависимостью абсолютной величины M_v от спектрального класса, построенной для магнитных и пекулярных звезд с использованием тригонометрических и групповых параллаксов [7]. Из этой зависимости получаем данные табл. 12. Эти величины будут в дальнейшем уточнены, когда аналогичную зависимость можно будет построить по точным спектральным классам.

Сделаем некоторые замечания относительно спектрофотометрических градиентов ϕ и бальмеровских скачков D . Поскольку у звезды 41 Tau $\overline{Sp} = B9$, а не A0, величина D становится ближе к нормальным значениям, но по-прежнему не соответствует последним, в то же время спектрофотометрические градиенты находятся в области нормальных значений. У звезды 21 Per спектральный класс остается тем же и, следовательно, аномальность параметров непрерывного спектра сохраняется. Для ι Cas величины ϕ и D неизвестны.

Автор выражает благодарность И. М. Копылову за ценные советы и Н. М. Чунаковой за помощь в обработке материала.

Литература

1. K. O s a w a, Ann. Tokyo Astron. Obs., 9, ser. 2, No. 3, 1965.
2. И. М. К о п ы л о в, Т. С. Б е л ь я к и н а, Э. А. В и т р и ч е н к о, Изв. Крымск. астрофиз. обс., 29, 181, 1963.
3. M. H a s k, Publ. Observ. Astron. Trieste, No. 367, 1967.
4. M. H a s k, Vistas in Astronomy, vol. 7, 1965.
5. H. J. A b t, J. C. G o l s o n, Astrophys. J., 136, 35, 1962.

6. D. Barbier, D. Chalonge, Ann. Astrophys., 4, 30, 1941.
7. Ю. В. Глаголевский, Астрон. ж., 43, вып. 1, 73, 1966.
8. R. Cameron. An investigation of the magnetic and related stars through photoelectric narrow-band photometry. Dissertation, Washington, 1966.
9. J. C. Pecker, Mem. Soc. Roy. Sci. Liege, 14, 449, 1954.
10. Г. У. Бэбкок. Звездные атмосферы. Под ред. Д. Гринстейна, ИЛ, 1963.
11. С. К. Зейналов, Изв. Крымск. астрофиз. obs., 37, 191, 1967.
12. L. Auer, Astrophys. J., 139, 1148, 1964.
13. M. Nassi, Mem. Soc. Astron. Ital., 29, 263, 1965.
14. И. М. Копылов, Изв. Крымск. астрофиз. obs., 26, 232, 1961.
15. И. М. Копылов, Изв. Крымск. астрофиз. obs., 35, 11, 1966.
16. И. М. Копылов, Изв. Крымск. астрофиз. obs., 30, 69, 1963.

Декабрь 1968 г.