

АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 10

НОЯБРЬ, 1974

ВЫПУСК 4

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНО-ПЕРЕМЕННОЙ ЗВЕЗДЫ 21 PER. I

Ю. В. ГЛАГОЛЕВСКИЙ, К. И. КОЗЛОВА, Н. С. ПОЛОСУХИНА

Поступила 19 марта 1974

У магнитно-переменной звезды 21 Per исследованы изменения лучевых скоростей и интенсивностей спектральных линий в разных фазах периода. Оказалось, что химические элементы расположены в двух противоположных пятнах на поверхности. Заподозрено наличие линий тяжелых элементов Hg I, W I, Os I, Ag I и Am I. Получены кривые изменения интенсивностей этих линий. Спектральные особенности 21 Per вызывают трудности при интерпретации химических аномалий в отдельных участках поверхности Ар-звезд, а возможное наличие тяжелых элементов заставляет обратить большое внимание на гипотезу ядерных реакций как причину аномалий химического состава. Совпадение по форме кривой блеска V и кривой изменения интенсивностей линий европия и гадолиния не противоречит предположению о том, что одним из источников фотометрической переменности в системе V является дополнительное поглощение редкоземельными элементами в ультрафиолетовой области спектра.

1. *Введение.* 21 Per (HD 18296) является магнитно-переменной звездой A0_p. Ее спектр содержит линии аномальной интенсивности, принадлежащие элементам Si, Sr, Eu, Cr. По данным [1] интенсивность спектральных линий переменна, и они имеют разную ширину. Величина напряженности магнитного поля H, измерялась неточно из-за большой ширины спектральных линий ($\sim 0.6 \text{ \AA}$) и сложности их профилей, однако Бэбкоку [1] удалось установить, что полярность меняется и крайние значения H, равны $-1270 + +1350 \text{ гс}$. Напряженность магнитного поля, определяемая по линиям отдельных элементов, оказалась различной.

Период фотометрических изменений блеска 21 Per ($P = 2^d883$) был получен в 1968 г. [3], затем он был уточнен [2]:

$$JD (\text{главный максимум}) = 2439491^d77 + 2^d88422E \pm 0^d00003.$$

Фотометрические измерения дают две волны изменения блеска за период, причем главный максимум приходится на фазу $0^{\circ}0$, а вторичный, более слабый, — на фазу $0^{\circ}5$. В нашем исследовании использован $P = 2^d 88422$.

Первое исследование спектральных изменений 21 Per провел Престон [2], отметивший крайнюю сложность спектра. Около 25% спектральных линий ему не удалось отождествить. В некоторых фазах линии ряда элементов раздваиваются. Лучевые скорости (v_r) получены в [2] по линиям нескольких элементов, причем линии Eu II, Ti II и Mn II показали две ветви изменения v_r за период, остальные линии изменяются более сложным образом и с меньшей амплитудой. Интенсивности линий в произвольных единицах измерялись только у Eu II ($\lambda 4129, 3819 \text{ \AA}$).

Задачей данного исследования является изучение изменений интенсивностей и лучевых скоростей спектральных линий разных элементов в течение периода, а также поиски тяжелых элементов в спектре 21 Per.

2. *Наблюдательный материал и его обсуждение.* Наблюдения проводились на 2.6-метровом рефлекторе Крымской астрофизической обсерватории со спектрографом Куде с дисперсией 4 и 8 $\text{\AA}/\text{мм}$. Ширина спектров равна 0.5 мм. Основные данные о полученном материале приведены в табл. 1.

А) *Лучевые скорости.* Для измерений были отобраны неблендируемые линии, список которых приведен в табл. 2. Положение линий на спектрограммах измерялось на микроскопе ИЗА-2 и обрабатывалось на ЭВМ Минск-14 в КрАО по программе, составленной Д. Н. Рачковским. Результаты измерения лучевых скоростей (v_r) приведены на рис. 1—3 и в табл. 3. Как видно из рисунков, наши измерения хорошо согласуются с данными Престона [2] и дополняют их, заполняя пробел в фазах $0^{\circ}6 - 0^{\circ}8$. Нам не удалось с достаточной точностью на спектрограммах измерить линию Eu II 4129.73 в моменты раздвоения, так как в это время оба ее компонента ослабевают. Поэтому на графике (v_r, P) нанесены только те точки, которые соответствуют одиночным линиям.

Ошибки измерений лучевых скоростей составляют в среднем $\pm 1 \text{ км/сек}$, если они получены как среднее из измерений нескольких линий и достигают 2—3 км/сек для одиночных измерений из-за значительной ширины линий и неучтенных слабых переменных бленд.

При рассмотрении рис. 1 можно видеть, что ветвь v_r вблизи фазы $0^{\circ}0$ формируется первым (или главным) пятном, проходящим в этот момент через меридиан, а ветвь вблизи фазы $0^{\circ}5$ — вторым пят-

ном. В соответствии с этим в табл. 3 данные располагаются в двух столбцах, обозначенных „гл“ и „вт“. Далее на рисунках 1-а и 1-е проведена линия $v_r = 9$ км/сек, соответствующая средней лучевой скорости 21 Per.

Таблица 1
ДАННЫЕ О НАБЛЮДАТЕЛЬНОМ МАТЕРИАЛЕ

№	Дата	Фаза	Дисперсия А/мм	Область спектра	Тип фото- эмульсии
1	7.11.68	0.66	8	3930—4550	A-500
2	25. 9.69	0.23	8	4100—4500	A-500
3	25. 9.69	0.24	8	4120—4580	A-500
4	25. 9.69	0.26	8	3700—4290	A-500
5	8.10.69	0.73	8	3700—4280	A-500
6	8.10.69	0.77	8	3700—4280	A-500
7	25.10.69	0.70	4	3720—4260	A-500
8	26.10.69	0.02	4	3900—4680	A-500
9	14. 1.70	0.72	4	3720—4270	A-500
10	18. 1.70	0.76	4	3890—4680	A-600
11	15. 2.70	0.76	4	3830—4490	A-500
12	22. 2.70	0.19	4	3750—4250	A-500
13	22. 2.70	0.22	4	3730—4270	A-500
14	24. 2.70	0.88	8	3930—4440	A-500
15	10. 9.70	0.63	4	3900—4640	A-500
16	11. 9.70	0.98	4	3900—4660	A-500
17	15. 9.70	0.35	4	3930—4600	A-500
18	16. 9.70	0.71	4	3930—4600	A-600
19	20. 9.70	0.11	4	3970—4670	A-500
20	1.11.71	0.19	4	3900—4630	A-500
21	13. 1.71	0.91	4	3900—4400	A-500
22	29. 1.72	0.98	4	3900—4480	103a0
23	31. 3.72	0.46	8	4000—4680	103a0

Б) *Интенсивности спектральных линий.* Эквивалентные ширины линий W_λ измерены с помощью электронносчетного планиметра [4] на регистрограммах, полученных в интенсивностях на микрофотометре САО АН СССР.

Точность определения W_λ в среднем равна 20%. Значения $W_\lambda/\bar{W}_\lambda$ (\bar{W}_λ — эквивалентная ширина, усредненная за период) приведены в табл. 4. В скобках после названия элемента указано число использованных спектральных линий. Значения $W_\lambda/\bar{W}_\lambda$ на рисунках 1—3

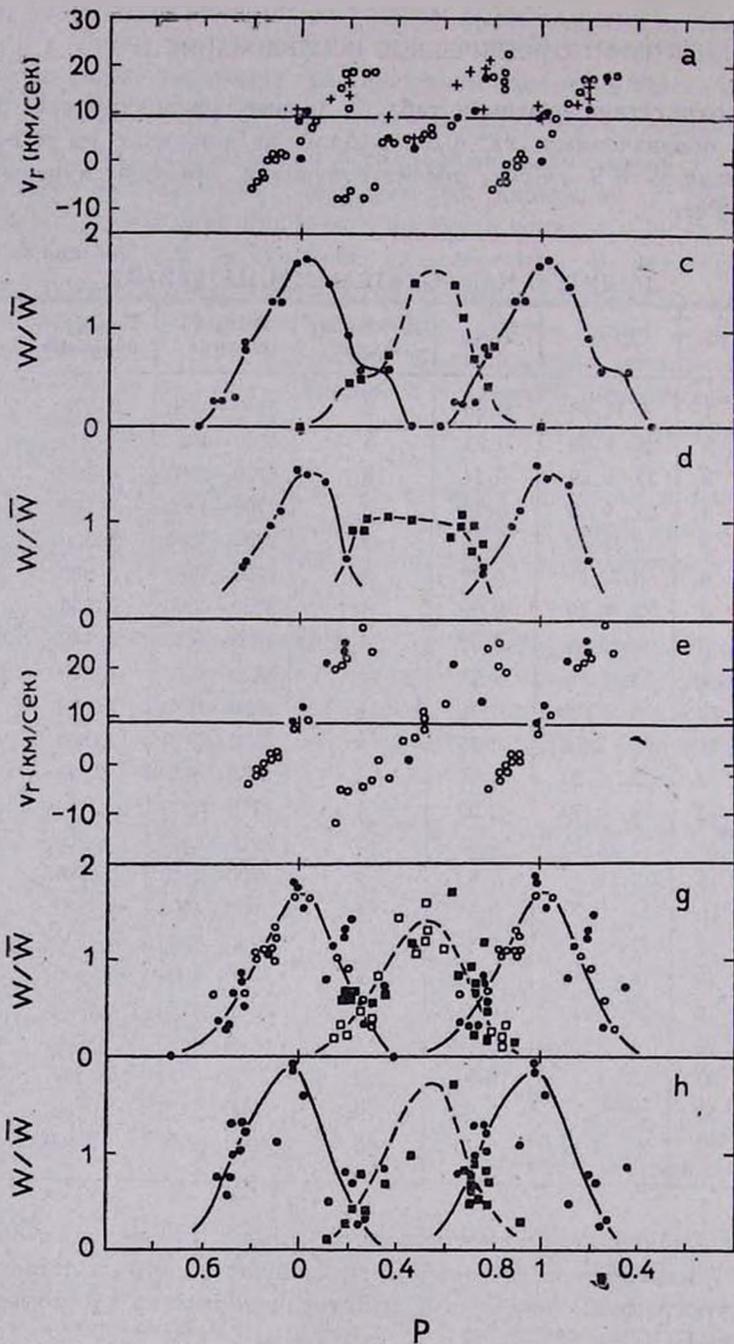


Рис. 1. Изменение лучевых скоростей v_r и относительных эквивалентных шири $W_\lambda / \bar{W}_\lambda$ линий в течение периода для элементов группы 1: а. ● — Ti; + — Mn (наши измерения). ○ — Ti, + — Mn (Престон [3]). с. Ti: ● — главное пятно, ■ — вторичное пятно. d. Mn: ● — главное пятно, ■ — вторичное пятно. е. ● — Eu наши измерения; ○ — Eu + Gd (Престон [3]). г. Eu: ● — главное пятно; ■ — вторичное пятно (наши измерения); ○ — главное пятно; □ — вторичное пятно (Престон [3]). h. Gd: ● — главное пятно; ■ — вторичное пятно.

имеют разброс, особенно заметный у элементов Gr, Mg и Fe. Он может получаться как из-за сложного распределения элементов по поверхности звезды, так и благодаря вероятному существованию короткоживущих областей, богатых этими элементами. Последнее предполагается на основании значительных различий значений $W_{\lambda}/\overline{W}_{\lambda}$ в табл. 4, полученных в близких фазах, но в разные годы наблюдений.

Таблица 2
СПЕКТРАЛЬНЫЕ ЛИНИИ, ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ
ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Элемент	λ_{A}	Элемент	λ_{A}
Eu II	4129.73	Ca II	3933.66
Ti II	4294.10	Si II	4128.05
	4307.90		4130.88
	4300.05	Sr II	4077.71
Mn II	4259.20		4215.52
	4063.53	Cr II	4038.03
Fe II	3935.94		4242.38
	3938.29		4261.92
	3938.97	Mg II	4481.13
	4122.64	V II	4404.68
	4296.57	Zr II	4048.68
	4385.38		4045.63
	4263.17		

Периодические изменения лучевых скоростей и интенсивностей спектральных линий интерпретируются с точки зрения гипотезы наклонного ротатора. Угол наклона оси вращения к лучу зрения можно оценить следующим образом. Эффективная температура 21 Per $T_{\text{эфф}} = 11\,700^{\circ}$ и $S_p = B8.5$. По спектральному классу звезды на основании работ [6–8] можно определить $R/R_{\odot} = 2.6$, если предположить, что звезда принадлежит главной последовательности, и $R/R_{\odot} = 4.0$, если она имеет IV класс светимости. По периоду и $v \sin i = 24$ км/сек [9] мы получим $i = 35^{\circ}$ в первом случае и $i = 21^{\circ}$ во втором (наши оценки по ширине линий железа также дали $v \sin i = 24$ км/сек).

В) Группы элементов. По характеру изменений кривых лучевых скоростей (v_r , P) и относительных интенсивностей линий ($W_{\lambda}/\overline{W}_{\lambda}$, P) все элементы можно разделить на две группы (см. рис. 1–3).

Группа 1 (рис. 1) включает элементы Ti, Mn, Eu, Gd. Из рисунка видно, что эти элементы концентрируются в двух противополо-

ложно расположенных пятен. В отличие от редкоземельных элементов титан дает асимметричные кривые ($W_\lambda/\overline{W}_\lambda, P$). На нисходящей части кривой для главного пятна имеется выступ в фазе $P=0^{\circ}3$, а второе пятно дает такой же подъем на восходящей части в фазах $0^{\circ}2-0^{\circ}3$ (рис. 1с). Эти „выступы“ на кривых подтверждаются нарушением плавности кривой (v_r, P) в тех же фазах $0^{\circ}2-0^{\circ}3$. На рис. 1d интересен по форме плоский максимум кривой ($W_\lambda/\overline{W}_\lambda, P$) в фазах $0^{\circ}2-0^{\circ}3$ для Mn, относящийся ко второму пятну. Такая форма кривой может явиться следствием того, что второе пятно имеет, по-видимому, сложную структуру.

Таблица 3

ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ v_r (км/сек)

Фаза	Группа I						Группа IIa				Группа IIb	
	Eu II		Ti II		Mn II		Fe II	Ca II	Si II	Sr II	Cr II	Mg II
	гл.	вт.	гл.	вт.	гл.	вт.						
0.02	12.9	—	10.3	—	14.8	—	12.3	11.5	13.6	12.8	10.3	19.2
0.11	21.4	—	12.8	—	12.7	—	10.9	—	11.8	11.7	—	11.5
0.19	26.0	—	11.5	—	14.4	—	10.6	9.9	7.9	11.0	5.3	—
0.19	23.9	—	—	—	—	16.6	9.7	9.8	8.9	9.5	6.6	16.7
0.35	—	—	—	5.0	—	9.0	10.8	10.9	8.6	7.3	5.1	15.9
0.46	—	1.5	—	3.3	—	5.3	7.1	—	6.8	7.8	4.0	—
0.63	—	21.6	—	8.9	—	17.0	8.9	12.1	9.7	10.4	9.9	14.8
0.70	—	—	—	—	—	18.7	11.2	12.4	12.5	13.3	—	—
0.71	—	—	—	11.3	—	11.1	10.2	—	11.6	10.6	12.2	12.7
0.72	—	—	—	—	—	—	13.9	16.1	13.4	13.3	20.8	—
0.75	—	14.0	—	8.5	—	20.4	10.1	8.3	9.0	10.1	5.4	11.6
0.76	—	—	—	17.9	—	21.4	18.9	18.4	13.6	17.8	16.2	26.7
0.91	—	—	—	—	—	—	—	9.1	—	—	—	15.9
0.98	—	—	2.1	—	—	—	9.5	—	11.4	9.3	10.8	—
0.98	9.6	—	8.9	—	10.9	—	11.4	8.3	10.6	11.4	8.4	11.4

Группа II a (см. рис. 2) включает Fe, Ca, Si, Sr. Кривые (v_r, P) характеризуются отсутствием разрыва в фазе $0^{\circ}3$ и меньшей амплитудой изменений, чем у первой группы. Зависимость ($W_\lambda/\overline{W}_\lambda, P$) имеет очень малую амплитуду изменений, особенно на рисунке 2d.

Группа II b (рис. 3), содержит Cr и Mg. Кривая (v_r, P) похожа по форме на кривую рис. 2a и b, но разрывы отсутствуют. Величины ($W_\lambda/\overline{W}_\lambda$) и v_r изменяются с той же, как и в предыдущем

ОТНОСИТЕЛЬНЫЕ ЭКВИВАЛЕНТНЫЕ ШИРИНЫ $W_{\lambda}/\bar{W}_{\lambda}$

Таблица 4

Фаза	Группа I								Группа IIa				Группа IIб	
	Eu II (1)		Gd II (1)		Ti II (6)		Mn II (2)		Fe II (4)	Ca II (1)	Si II (2)	Sr II (2)	Cr II (4)	Mg II (1)
	г.а.	вт.	г.а.	вт.	г.а.	вт.	г.а.	вт.						
0.02	1.56	—	1.58	—	1.75	—	1.53	—	1.14	1.01	—	1.01	1.29	1.25
0.11	0.78	1.04	0.49	0.15	1.50	—	1.46	—	1.32	0.92	1.06	0.97	1.24	1.05
0.19	1.30	0.61	0.80	0.29	0.96	0.50	—	—	0.90	0.79	0.90	0.92	0.98	0.89
0.19	1.24	0.58	—	—	—	—	0.66	—	1.24	1.10	1.01	1.04	—	—
0.22	1.45	0.66	0.70	0.39	—	—	—	0.95	1.36	1.35	0.91	—	1.04	—
0.24	—	0.67	0.26	0.78	0.58	0.51	—	0.95	—	0.77	0.83	0.90	0.70	0.87
0.26	0.32	0.58	0.30	0.39	—	—	—	1.07	0.93	1.04	0.80	1.01	0.91	—
0.35	0.74	0.56	0.85	0.70	0.58	0.81	—	1.10	0.71	0.98	0.88	1.00	0.99	0.97
0.46	—	1.17	—	1.02	—	1.50	—	1.07	1.26	0.68	1.03	—	0.97	0.90
0.63	—	1.72	—	1.72	0.25	1.51	—	0.90	0.95	1.19	1.03	1.07	0.79	0.94
0.66	0.36	0.84	0.79	0.79	0.25	0.88	—	1.07	—	0.86	0.81	0.93	0.73	0.92
0.70	0.30	0.92	0.57	0.65	—	—	—	1.02	1.11	1.20	1.07	1.08	1.12	—
0.71	0.33	0.27	0.73	0.43	0.30	0.74	—	0.76	0.87	0.98	1.77	1.00	0.75	1.00
0.72	0.66	0.77	0.95	—	—	—	—	—	0.81	1.37	1.23	0.98	1.10	—
0.73	—	—	1.30	0.52	—	—	—	0.83	0.86	0.94	—	1.15	1.09	—
0.76	0.85	0.20	0.98	0.47	0.80	0.45	0.58	—	—	0.75	1.25	1.08	0.87	1.04
0.76	0.73	1.21	1.30	0.80	0.85	0.85	0.56	—	0.89	1.07	1.26	1.06	0.89	0.77
0.77	0.53	0.52	1.20	0.45	—	—	0.61	—	0.90	1.14	—	—	1.08	—
0.88	1.10	0.15	—	—	1.32	—	1.00	—	0.84	1.25	0.75	0.98	0.89	—
0.91	—	—	1.11	0.31	1.31	—	1.17	—	1.00	0.82	1.03	0.90	—	—
0.98	1.87	—	1.86	—	1.68	—	1.63	—	0.78	0.79	0.86	0.88	1.41	1.09
0.98	1.81	—	1.96	—	—	—	—	—	1.34	0.99	—	0.99	—	1.20

случае, амплитудой. Элементы Sr и Mg, вероятно, распределены на поверхности звезды более широкими пятнами с небольшой степенью концентрации. Разброс точек на рис. 3а наибольший, что, возможно, связано либо с появлением и исчезновением короткоживущих областей, богатых данным элементом, либо со сложной структурой данного пятна, о чем свидетельствует сложный вид профилей линий Si, Sr, Mg и др. Степень концентрации элементов и характер распределения пятен на поверхности звезды не обеспечивает достаточного разделения компонент, чтобы эту структуру можно было изучить подробно. Зависимость (v_r, P) для магния на рис. 2а не нанесена.

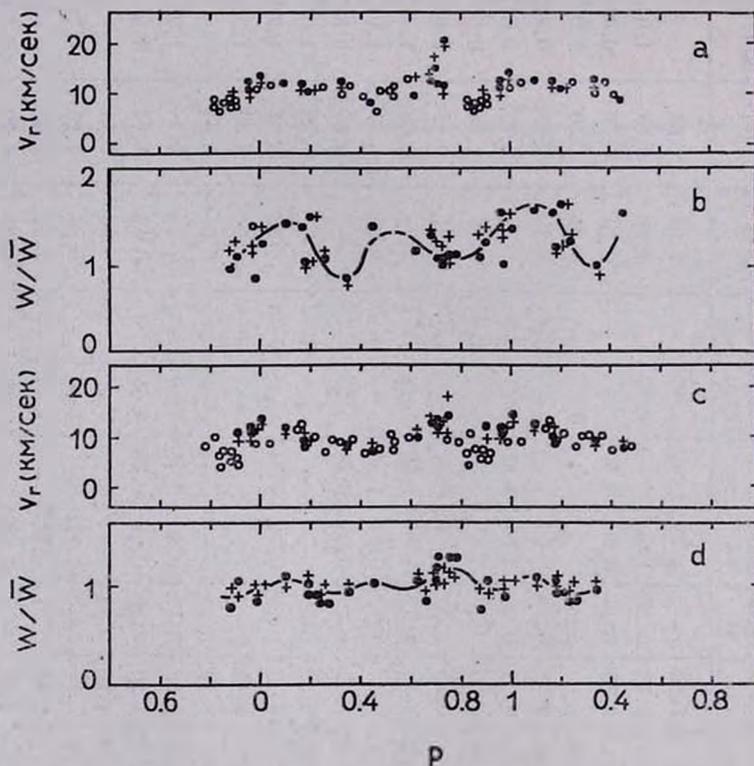


Рис. 2. Изменение лучевых скоростей v_r и относительных эквивалентных шири $W_\lambda / \bar{W}_\lambda$ линий в течение периода для элементов группы IIa. а, б. ● — Fe, + — Sr (наши измерения); ○ — Fe (Престон [3]). с, д. ● — Si; + — Sr (наши измерения); ○ — Si, Sr (Престон [3]).

Г) Тяжелые элементы. В последние годы часто дискутируется вопрос о существовании в атмосферах магнитных звезд значительного количества различных тяжелых элементов, в частности короткоживущих.

Если наличие таких элементов, будет твердо установлено, то это откроет новые перспективы в изучении эволюции звезд Ар и происхождения химических аномалий как продукта ядерного синтеза. Мы попытались найти в спектре 21 Per те тяжелые элементы, которые были обнаружены у других звезд [11—16] (см. табл. 5). Для отождествления были отобраны три регистрограммы в фазах, близких к нулевой (две в $P = 0^{\text{p}}98$ и одна в $P = 0^{\text{p}}02$), для исследования той части поверхности, на которой сконцентрированы все элементы. Если на двух из трех регистрограмм данная линия обнаруживалась, то она считалась достоверной. Наиболее слабая линия, которую можно было уверенно заметить среди зерна, имеет $W_{\lambda} = 5-7 \text{ \AA}$. Из-за множества бленд и значительной ширины линий мы допускали расхождение между измеренной длиной волны и лабораторной на величину порядка

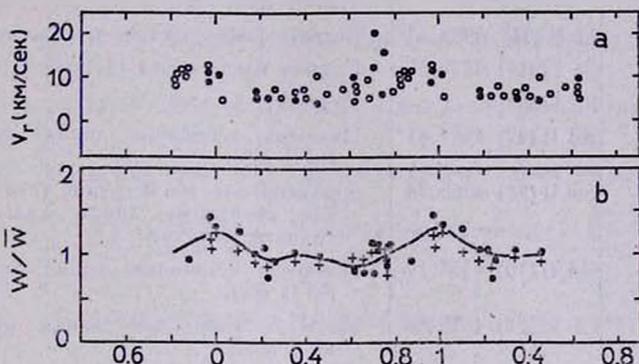


Рис. 3. Изменение лучевых скоростей v_r и относительных эквивалентных ширины W_{λ}/W_0 линий в течение периода для элементов группы IIb. а. ● — Cr (наши измерения); ○ — Cr (Престон [3]). б. ● — Cr; + — Mg.

0.1 \AA . Из всех линий тяжелых элементов, взятых из [11—16], были найдены те, которые приведены в табл. 5. Затем мы попытались приписать эти линии элементам, которые представлены в 21 Per и являются обычными в звездах такого спектрального класса. Названия возможных элементов, номера мультиплетов и длины волн соответствующих линий даны во втором столбце табл. 5. Оказалось, что почти каждой спектральной линии можно привести в соответствие линию обычно встречающихся элементов. В третьем столбце таблицы приведены близкие по длине волны линии в спектре солнечных пятен [17], в последнем столбце даются некоторые замечания, касающиеся той или

ТЯЖЕЛЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ В АТМОСФЕРАХ Ар-ЗВЕЗД

Элемент, λA	Вероятное отождествление	Примечания
1	2	3
Hg I 3984.00*	—	
Nb I 4058.94	Mn I (5) 4058.93	Присутствуют все линии Mn (5).
4079.73	Ti I (207) 4079.71	Линия Ti сильнейшая в мультиплете. Имеются другие линии мультиплетета.
Ag I 4210.94*	—	Бленда в крыле Nd II (57) 4211.29.
U I 3917.25	Fe I (20) 3917.18 Eu II (10) 3917.29	Более вероятно второе отождествление.
3943.82	Ce II (234) 3943.89	Одна из сильнейших в мультиплете. Имеются другие линии мультиплетета.
4222.36	Zr II (80) 4222.41	Имеются остальные линии мультиплетета Zr II (80).
U II 3932.03	Ti II (34) 3932.01	Более вероятно второе отождествление.
4472.33	Fe I (411) 4472.57 Fe I (39)	Слабые бленды Fe I (411) Fe I (39). Fe I (39).
4567.69	Nd II (49) 4567.61	Имеются остальные линии мультиплетета Nd II (49).
Os I 4066.69	Sm II (28) 4066.74	Достоверность Sm II трудно установить, так как остальные линии мультиплетета в сильных блендах.
4358.14	Nd II (10) 4358.17	Имеются остальные линии мультиплетета Nd II (10).
4376.90	Cr I (304) 4376.80	Имеются остальные линии мультиплетета Cr I (304).
4400.58*	—	
4420.47*	—	
4135.78	Cr II (163) 4135.77	Cr II сильная, имеются остальные линии мультиплетета (163).
4041.92	Fe I (602) 4441.91	Сильная в мультиплетете (602).
4213.86*	—	
4201.45	—	Сильная в крыле Si 4200.
4551.30	Ce II (229) 4551.30	Сильно блендирована.
4597.15	Gd II (44) 4596.58	
Os II 4399.27	Ce II (81) 4399.20	Присутствуют остальные линии мультиплетета Ce II (81).
Pu I 3907.20	Eu II (5) 3907.10	Присутствуют все линии мультиплетета Eu II (5).
4206.45	Hf II (74) 4206.59	Имеются другие линии мультиплетета Hf II (74)

Таблица 5 (продолжение)

1	2	3
3989.69	Pr (12) 3989.72	
	Ti I (12) 3989.76	Вероятное отождествление Ti (12).
4453.15	Mn (22) 4453.01	Имеются другие линии мультиплета Mn I (22).
Pu II 4273.22	Ti I (251) 4273.31	Сильные бленды Fe II и Ti I
	Fe II (27)	
4472.70	Fe I (39) 4472.52	В крыле сильной бленды.
	Mn I (22) 4472.79	
	Fe I(595) 4472.72	
	Fe II (37) 4472.92	
4504.92	Ca I (24) 4505.00	
Ta I 4377.98	Ne II (65) 4377.95	
	Fe I (723) 4566.99	
4566.86		
WI 3938.29	Fe II (3) 3938.29	В бленде имеются другие линии Fe II (3).
4044.27*		
4974.36	Ti I (254) 4074.36	Имеются все линии мультиплета Ti I (254).
4306.88*	—	
4365.96	Fe I (415) 4365.50	Имеются другие линии мультиплета Fe I (415).
4408.28	Gd II (44) 4408.25	Имеются другие линии Gd II (44) и VI (22).
	VI(22) 4408.20	
Pt I 4442.55		
4552.42	Ti II (42) 4552.45	Имеются другие линии мультиплета Ti II (42).
Re I 4170.40	Cr II (18) 4170.58	Имеются другие линии мультиплета Cr II (18).
4513.31	Cr I (150) 4513.21	Имеются другие линии мультиплета Cr I (150).
	Y I (15)	
4522.73	Ti II (42) 4522.80	Очень сильные бленды Ti I (42) и Fe II (38).
4523.88	Sm II (41) 4523.91	
Am II 3952.58	Fe I (278) 3952.61	
4509.45	Ca I (24) 4509.45	Слаба, отождествление неуверенное.
4575.59*		

иной идентификации. Из этой таблицы видно, что только небольшое число линий можно уверенно приписать тяжелым элементам (в табл. 5 они обозначены звездочками):

Элемент	Потенциал ионизации ($\lambda\theta$)	Длина волны, А
Hg I	10.43	3984.0
W I	7.98	4306.88, 4044.29
Os I	8.70	4213.86, 4400.58, 4420.47
Ag I	7.57	4210.94
Am II	—	4575.59

Средние интенсивности W измеренных линий отдельных тяжелых элементов находятся в пределах от 20—80 А. На рис. 4 представлены изменения относительных интенсивностей $W_\lambda/\bar{W}_\lambda$ наблюдаемых линий тяжелых элементов: а — одиночная линия ртути 3984.0А а и b — усредненные значения $W_\lambda/\bar{W}_\lambda$ из семи остальных спектральных линий. К сожалению, мы почти не располагаем спектрами в области фаз $0^\circ 4—0^\circ 6$ и кривая $(W_\lambda/\bar{W}_\lambda, P)$ для найденных элементов проводится здесь неуверенно. Как видно на рис. 4, изменения относительных интенсивностей линий в течение периода показывают одну волну, максимум амплитуды которой приходится на фазу, близкую к нулевой, а это значит, что наибольшая интенсивность линий тяжелых элементов наступает в момент прохождения главного пятна через меридиан.

Следует отметить, что ряд „заподозренных“ спектральных линий тяжелых элементов у 21 Per имеется в спектре Солнца, некоторые из них усилены в спектре солнечного пятна и, как правило, не отождествлены в каталоге [17].

Д) *Обсуждение результатов.* Характер изменений v , и W_λ ряда элементов у 21 Per значительно отличается от того, что наблюдается у других магнитных звезд, например, — у $\alpha^2 CVn$ [18, 19], HD 173650 [20] и др. Состав групп элементов у 21 Per является уникальным, как, впрочем, и у остальных, изученных в этом отношении звезд, что видно из следующей таблицы:

Звезда	Группа I	Группа II	Группа III	Пекулярность
21 Per	Eu, Gd, Mn, Ti	Sr, Si, Ca, Fe, Cr, Mg	—	Eu, Cr, Sr, Si
$\alpha^2 CVn$ [18, 19]	Eu, Gd, Dy	Ti, V, Cr, Mn, Fe	Si, Mg, Ca	Eu, Cr, Si, Hg
HD 125248 [10]	Eu, Gd, Ce	Ti, Fe	Cr, Sr	Eu, Cr
73 Dra [21]	Eu, Sr, Ti, Ca	Cr, Mg	—	

Следует заметить, что у каждой звезды элементы, входящие в одну определенную группу, имеют кривые $(W_i/\bar{W}_i, P)$, подобные по форме, но у разных звезд форма этих кривых, как правило, отличается, поэтому деление элементов на группы условно. Угол наклона оси вращения к лучу зрения для вышеуказанных звезд составляет 35° , 50° , 30° и 90° , соответственно, то есть условия видимости поверхности у первых трех звезд близки. В работе [19] было показано, что элементы концентрируются симметрично относительно магнитной оси, которая может быть наклонена под разными углами к оси вращения, но этот эффект мало влияет на состав групп и может лишь изменить форму кривых $(W_i/\bar{W}_i, P)$.

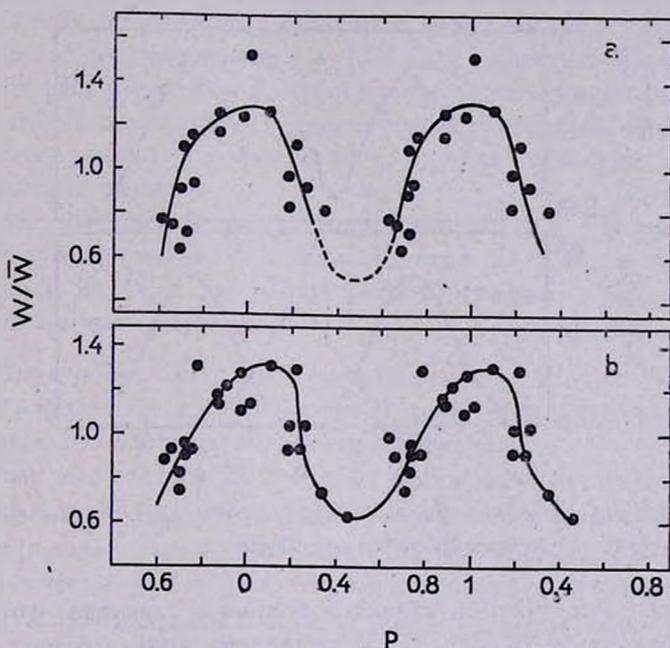


Рис. 4. Изменение усредненных относительных интенсивностей (W_i/\bar{W}_i) тяжелых элементов в течение периода (P): а — H γ I 3984.0 А; б — W I 4044.29, 4306.38; O γ I 4213.86, 4400.58, 4420.47; Ag I 4210.94; Am II 4575.59 А.

Из рассмотрения приведенных, пока еще слишком ограниченных данных видно, что не существует какой-либо закономерности в составе групп элементов. Только редкие земли всегда концентрируются вместе. Этот эффект вносит значительные осложнения при интерпретации химических аномалий. Если исходить из известных гипотез о су-

ществовании диффузионных процессов [22], либо аккреции вещества [23], то следует ожидать вполне закономерной группировки элементов в пятнах, которые должны располагаться в местах наибольшей напряженности магнитного поля. Последнее совершенно не выполняется в случае 21 Per, у которой довольно слабое поле ($H_e = \pm 500 \text{ гс}$) расположенное по поверхности сложным образом [3]. Могут возникнуть два предположения: либо существуют механизмы, нарушающие видимое появление связи магнитного поля с пятнистым распределением элементов, либо концентрация элементов не связана с магнитным полем. Для решения этого вопроса требуется дальнейшее накопление наблюдательного материала для звезд разных групп пекулярности. Необходимы также дальнейшие измерения магнитного поля у 21 Per.

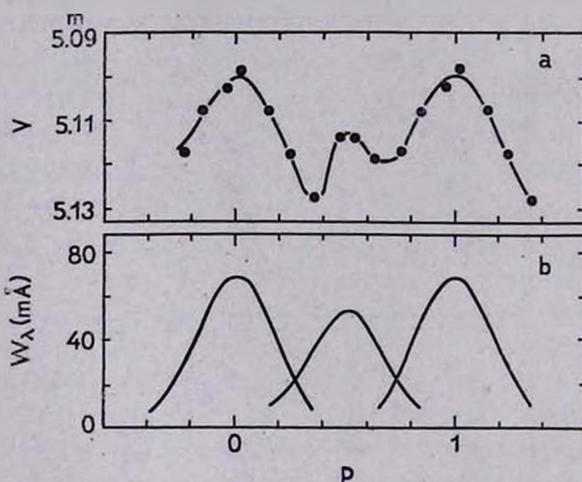


Рис. 5. Сравнение кривой блеска в системе V с кривой изменения интенсивностей линий европия в течение периода для 21 Per.

Интересной проблемой является вопрос о причине фотометрической переменности у 21 Per. В [3] приведена кривая блеска в системе V, на которой видно, что максимальной яркости звезда достигает в фазе $0^{\circ}0$, но имеется еще и другой, меньший по амплитуде максимум в фазе $0^{\circ}5$. В [24, 25] показано, что вариациями $T_{\text{эф}}$ или изменениями формы поверхности звезды нельзя объяснить фотометрическую переменность магнитных звезд. Наиболее вероятной причиной переменности, как представляется в настоящее время, является неравномерность распределения химических элементов [26]. У 21 Per форма кривой блеска подобна форме кривых $(W_{\lambda}/\bar{W}_{\lambda}, P)$ элементов группы I. Подобие форм кривых блеска в системе и кривых изменения интенсивностей линий ред-

ких земель было замечено ранее [27]. Этот эффект хорошо выявляется при сравнении кривых блеска с кривыми изменения интенсивностей линий Eu II у звезд: α^2 CVn [18], 73 Dra [21, 26], HD 71866 [27, 28], HD 125248 [10, 29], 53 Cam [30, 31], HD 221568 [32] и др. У 21 Per характер изменений кривой блеска и кривой изменения интенсивностей линий Eu II и Gd II в основных чертах одинаковы, что хорошо видно на рис. 5. С магнитным полем кривые блеска коррелируют менее четко, особенно у 21 Per. Поэтому источники фотометрической переменности Ар-звезд следует искать в первую очередь в существовании дополнительного поглощения в видимой и особенно в ультрафиолетовой областях спектра у редкоземельных элементов [33], а также в аномалиях физических условий в местах концентрации этих элементов. Дважды ионизованные редкоземельные элементы могут вызвать покровный эффект, подобный рассмотренному в [34] для кремния. Предварительные расчеты [35] показывают, что в местах концентрации редкоземельных элементов непрозрачность атмосферы в ультрафиолетовой области спектра может увеличиваться на 10%, а роль остальных элементов здесь, вероятно, меньше.

Интересными являются указания Бэбкока [1] и Престона [2] на замеченные ими признаки эмиссии в спектре 21 Per, в частности, в крыльях линии Fe 4233. На наших регистраграммах вблизи этой линии эмиссии не наблюдается.

3. *Заключение.* Отождествление спектра 21 Per нам удалось осуществить более полно, чем об этом сообщает Престон, но количество неотожествленных линий все же велико.

Впервые для звезды 21 Per нами определены интенсивности (W_λ) спектральных линий отдельных элементов: Eu II, Gd II, Mn II, Cr II, Mg II, Ca II и построены кривые изменения ($W_\lambda/\bar{W}_\lambda$) в течение периода. Измерены лучевые скорости для тех же элементов и заполнен пробел в измерениях v_r [2] на фазах 0^h6—0^h8. Проведено сравнение полученных v_r с данными Престона [2].

Наши спектрофотометрические исследования магнитно-переменной звезды 21 Per дали новые сведения о распределении элементов по поверхности звезды. По характеру распределения элементов их можно разделить на две основные группы. Вероятно, широкие области, занимаемые некоторыми элементами, имеют сложную структуру, о чем свидетельствует сложный вид профилей линий, например, Sr, Si, Mg и др.

Состав групп элементов вызывает трудности при интерпретации химических аномалий в отдельных участках поверхности звезды, если исходить из известных гипотез диффузии или аккреции, требующих вполне определенного состава групп. В то же время наличие тяжелых

элементов, заподозренное у 21 Per и многими авторами у других звезд, заставляет обратить внимание на гипотезу о существовании ядерных реакций на поверхности этих звезд.

В 1953 г. напряженность магнитного поля у 21 Per была значительной [1], а в 1967 г. поле оказалось слабым [2], что указывает на возможное существование долгопериодических изменений H_{α} , а возможно и других характеристик. В частности, в спектрах, полученных нами в 1968—1972 гг., мы не обнаружили эмиссии на λ 4233 Å, которые отмечал Престон в 1966—1967 гг. Если действительно, следуя Престону, на поверхности 21 Per имеется только слабое магнитное поле, то становится непонятной роль поля при концентрации элементов в пятне. Все это говорит о большей сложности процессов на поверхности звезд Ap, чем это предполагалось раньше.

Интересным фактом является совпадение формы фотометрической кривой блеска в системе V с формой кривой изменения интенсивностей линий европия и гадолиния у 21 Per и у других Ap-звезд.

В заключение авторы благодарят Д. Н. Рачковского за помощь при вычислениях на ЭВМ и И. В. Урмаеву за помощь при обработке спектрограмм.

Специальная астрофизическая обсерватория
АН СССР

Крымская астрофизическая обсерватория
АН СССР

A SPECTROPHOTOMETRIC STUDY OF THE MAGNETIC VARIABLE STAR 21 PER. I

Yu. V. GLAGOLEVSKY, K. L. KOZLOVA, N. S. POLOSUKHINA

Radial-velocity variations and spectral-line intensities are investigated for the magnetic variable star 21 Per at different phases of the period. Chemical elements have proved to be located in two opposite spots of the surface. The lines of the heavy elements HgI, W I, OsI, AgI, AmII are suspected to exist. Intensity variation curves for these lines are obtained. Spectral peculiarities of 21 Per cause some difficulties in interpreting chemical anomalies of individual regions on the surface of Ap-stars, and the possible existence of heavy elements obliges one to direct his attention to nuclear reactions as a reason of chemical anomalies. The agreement in shape between the light curve and the intensity variation curve of Eu and Gd lines does not contradict the proposition that an additional rare-earth absorption in the ultraviolet region of the spectra is one of the sources of photometric variability in the system.

ЛИТЕРАТУРА

1. *H. W. Babcock*, *Ap. J.*, Suppl. Ser., 3, 141, 1958.
2. *G. W. Preston*, *Ap. J.*, 158, 251, 1969.
3. *K. Steplen*, *Ap. J.*, 154, 945, 1968.
4. *В. С. Рылова, Э. Б. Гажур, Ю. Антропов*, *Изв. САО АН СССР*, 6, 160, 1974.
5. *Ю. В. Глазковский, К. И. Козлова, Н. М. Чумакова*, *Изв. САО АН СССР*, 5, 52, 1973.
6. *К. У. Аллен*, *Астрофизические величины*, ИИЛ, М., 1960.
7. *D. M. Doppler*, *Ann. Rev. Astr. Astrophys.*, 5, 85, 1967.
8. *D. F. Gray*, *A. J.*, 73, No. 9, 769, 1968.
9. *H. Aët, F. H. Chuffee, G. Suffock*, *Ap. J.*, 175, 779, 1972.
10. *A. Deutsch*, *Electromagnetic phenomena in cosmical physics.*, IAU Symposium No. 6, Cambridge, 1958.
11. *C. Jaschek, S. Maluroda*, *Nature*, 225, 246, 1970.
12. *E. Brundy, M. Jaschek*, *P. A. S. P.*, 82, 847, 1970.
13. *B. N. G. Guthrie*, *Astrophys. Space Sci.*, 3, 542, 1969.
14. *B. N. G. Guthrie*, *Astrophys. Space Sci.*, 10, 156, 1971.
15. *M. M. Dvoretzky*, *Ap. J.*, Lett., 156, 101, 1969.
16. *B. N. G. Guthrie*, *Observatory*, 89, 224, 1969.
17. *C. E. Moore, M. G. J. Minnaert, J. Houtgast*, *Solar Spectrum 2935 Å to 8770 Å.* Nat. Bureau of Standards Monograph 61, Washington, 1966.
18. *D. M. Pyper*, *Ap. J.*, 18, 347, 1969.
19. *Р. Н. Кумайгородская, И. М. Копылов*, *Изв. САО АН СССР*, 4, 50, 1972.
20. *J. B. Rice*, *Astron. Astrophys.*, 9, 189, 1970.
21. *G. Preston*, *Ap. J.*, 150, 871, 1967.
22. *G. Michaud*, *Ap. J.*, 160, 641, 1970.
23. *O. Havens, P. C. Conti*, *Astron. Astrophys.*, 14, 1, 1971.
24. *В. Л. Хохлова*, *Астрон. ж.*, 43, 534, 1971.
25. *Л. Н. Снежко*, *Астрон. циркул.*, № 741, 1972.
26. *S. S. Provitn*, *Ap. J.*, 117, 21, 1953.
27. *G. W. Preston*, *P. A. S. P.*, 83, 571, 1971.
28. *H. W. Babcock*, *Ap. J.*, 124, 489, 1956.
29. *D. W. N. Stibbs*, *M. N.*, 110, 395, 1950.
30. *I. Huchra*, *Ap. J.*, 174, 435, 1972.
31. *R. Farragiana*, *Astron. Astrophys.*, 22, 265, 1972.
32. *K. Osawa*, *Ann. Tokyo Astr. Obs.*, 10, 175, 1967.
33. *M. R. Molnar*, *Ap. J.*, 179, 527, 1973.
34. *D. M. Peterson*, *Ap. J.*, 161, 685, 1970.
35. *W. F. Huebner, G. D. Koontz, M. F. Argo*, *Bull. Am. Astron. Soc.*, 3, 483, 1971.