

## ИЗУЧЕНИЕ ПЯТНИСТОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРЫ У МАГНИТНОЙ CP- ЗВЕЗДЫ 56 Ari

С.Г.АЛИЕВ, С.Г.ЗЕЙНАЛОВ

*Шамахинская Астрофизическая Обсерватория им. Н.Туси НАН Азербайджана  
AZ1243, Азербайджан, г.Шамаха*

На основании спектральных магнитных и фотометрических наблюдений изучена химическая неоднородность (пятнистость) структуры магнитной CP-звезды 56 Ari. Выявлено, что фаза максимума блеска, интенсивности линий Si II и других пекулярных элементов совпадают с минимумом линий H и HeI. Получено, что около положительного магнитного полюса интенсивности линий пекулярных элементов и температура достигают максимального значения. Установлено, что амплитуда изменения H-линий растет с увеличением номера этих линий.

Магнитные химически пекулярные (CP) звезды располагаются в верхней части главной последовательности в интервале спектральных классов F5-B0 ( $T_e=7500\div 15000^\circ\text{K}$ ) и составляют в среднем около 20% всех звезд этого интервала. Практически все магнитные CP-звезды являются фотометрическими, спектральными и магнитными переменными одного и того же периода, который совпадает с периодом вращения каждой звезды. Переменность этих звезд объясняется моделью наклонного ротатора с неоднородным распределением химических элементов по поверхности – пятнистостью звезд.

В большинстве работ по магнитным звездам основное внимание было уделено выявлению неоднородности поверхности этих звезд. При этом во многих работах предполагалось, что поверхность звезды физически однородна, неоднороден только химический состав [1].

К сожалению во всех предыдущих работах не было детально исследовано влияние эффекта пятнистости на структуру атмосферы, в основном, по глубине фотосферы у магнитных CP-звезд.

Целью данной работы является выявление влияния “эффекта неоднородности” на физические параметры и строение фотосферы в области пятен на примере типичной магнитной CP-звезды 56 Ari (HD 19832).

Магнитная спектрально-переменная CP-звезда 56 Ari имеет спектральный класс B8p и следующие особенности, которые делают эту звезду особенно интересной для исследования :

1. Несмотря на то, что почти все CP - звезды являются медленными ( статистически  $V\sin i \leq 60$  км /сек ) ротаторами , звезда 56 Ari является одной из быстровращающихся звезд ( $V_{\text{эк}} = 170$  км /сек) [2].
2. В спектрах этой звезды наблюдаются довольно сильные и широкие линии Si II и HeI, которые показывают четко выраженные периодические изменения .
3. В атмосфере 56 Ari оба эти элемента (Si и He) имеют аномальный химический состав, в результате чего может произойти изменение соотношения  $N(\text{He}+\text{Si})/N_{\text{H}}$ , что может привести к изменению строения фотосферы в области пятен по сравнению со строениями нормальных звезд .
4. Фотометрические наблюдения, проводимые в 10-цветах [3], показывают синхронные изменения блеска во всех цветах с периодом  $P=0^{\text{d}}.7279$ , который был определен еще ранее в [4]. Бэбкок отнес ее к звездам, магнитное поле которых нельзя измерить из-за большой ширины линий. Однако позднее

фотоэлектрическим методом [1] по линии H $\beta$  было измерено магнитное поле этой звезды (см. ниже).

**НАБЛЮДЕНИЯ.** Около 35 спектрограмм для 56Ari было получено на 2-м телескопе ШАО им. Н.Туси НАН Азербайджана в фокусах куде и кассегрена с дисперсией 4 и 10Å/мм. Часть этих спектров была использована в [2], на основании которых был определен десятикратный дефицит гелия в атмосфере 56Ari. Полученные спектрограммы равномерно распределены по периоду. Некоторые спектрограммы были отсняты настолько близко по фазе ( $\Delta\phi=0.01-0.03$ ), что при исследовании их можно отнести к одной фазе.

Спектрограммы, полученные в фокусе кассегрена (10Å/мм), были использованы, в основном, при анализе водородных линий [5]. В данной работе мы использовали спектрограммы, полученные в основном в фокусе куде. Привязка по фазе была проведена по элементам, полученным в [4]

$$JD (V_{min})=2437667.728+0.7278925E.$$

Подробные сведения о наблюдательных материалах и методике обработки представлены в [5]. Поскольку звезда имеет большую скорость вращения, большинство наблюдаемых линий на регистрограммах очень широкие и выявить их среди шумов записи очень трудно. По полученным регистрограммам были проведены идентификации спектральных линий, в основном, более репрезентативных химических элементов для звезд спектрального класса B8. В результате оказалось, что в спектральном интервале  $\lambda 3700\div 4800\text{Å}$  все сильные линии в спектре 56Ari принадлежат HeI, SiII, SrII, EuII, CrII и FeII. Кроме водородных линий, которые имеют очень широкие крылья, четко выделяются и линии  $\lambda 4481$  MgII и  $\lambda 3933.6$  CaII. Профили большинства линий заметно меняются с фазой и имеют сложную структуру.

Для обработки кроме линии бальмеровской серии нам удалось выбрать линии (Таблица1), которые являются свободными или почти свободными от блендирования. Большинство из них выглядит как одиночные в фазах ( $\phi=0.40\div 0.60$ ), но при  $\phi=0.25\div 0.30$  они разделяются на несколько компонентов.

Для выявления химической неоднородности (пятнистости) поверхности магнитных CP звезд имеются различные методы [6]. В основе большинства имеющихся методов лежит процедура разделения наблюдаемых контуров линий на компоненты. При этом часто бывает так, что какая-то доля компонента оказывается ложной из-за шумов и качества спектрограмм.

Чтобы избавиться от таких неопределенностей и достижения цели данной статьи, т.е. выявления химической неоднородности на поверхности звезды, мы использовали метод, предложенный в [6].

Для этого во всех спектрограммах нами были определены полные (суммарные) эквивалентные ширины (средние по всему видимому диску звезды) выбранных линий, экстремальные значения которых приведены в Таблице1 (столбцы 4 и 5). Одновременно были измерены и лучевые скорости  $V_r$  по центру тяжести каждой линии, если даже данная линия состоит из нескольких компонентов. Очевидно, что при таких измерениях определяются лучевые скорости только центрального компонента, который формируется, в основном, в области пятна, расположенного около центральной части видимого диска звезды.

С целью выявления наиболее химически неоднородной (пятнистой) области на видимом полушарии у 56Ari были построены графики зависимости величин  $W\lambda$  и  $V_r$  выбранных линий от фазы ( $\phi$ ). По характеру изменения все фазовые кривые можно разделить на две группы:

1. Линии H и He I;
2. Линии Si II и других элементов.

Таблица 1.

Элемент $\lambda$	Мульти- плет	$E_i$ (eV)	$W_\lambda$ (mA°)		Элемент $\lambda$	Мульти- плет	$E_i$ (eV)	$W_\lambda$ (mA°)	
			max	min				max	min
H I					Cr II				
6562.61	1	10.15	9.20	7.80	4242.38	31	3.85	100	45
4340.46	1	10.15	10.70	8.60	4275.57	31	3.84	110	52
3885.39	2	10.15	10.90	6.70	4558.65	44	4.06	220	125
3750.15	2	10.15	4.50	1.90	4588.22	44	4.06	200	115
He I					Mn II				
4026.19	18	20.87	450	130	4206.37	7	5.37	200	124
4471.48	14	20.82	440	70	4253.02	7	5.36	90	48
Mg II					4284.42	6	5.35	135	80
4481.33	4	8.83	520	290	Fe II				
4390.58	10	9.96	270	140	4303.17	27	3.69	260	190
Si II					4508.28	38	3.84	280	200
3862.59	1	9.90	410	200	4515.34	37	3.83	320	200
4128.03	3	9.78	500	240	4549.47	38	3.82	380	270
4130.89	3	9.80	590	330	4583.83	38	3.79	140	65
4200.90	?	12.52	310	150	Sr II				
4621.70	-	12.52	300	145	4077.71	1	0.00	387	205
Ca II					4215.51	1	0.00	200	104
3933.66	1	0.00	260	140	4305.45	3	3.03	170	75
Sc II					Eu II				
4246.83	7	0.31	190	110	4129.73	1	0.00	86	40
4314.06	15	0.62	105	60	4205.05	1	0.00	105	60
4320.74	15	0.60	95	50					

1. Во всех спектрограммах звезды 56Agi были обработаны наблюдаемые H-линии, а также две линии He I  $\lambda 4026$  и  $\lambda 4471$ . Обнаружены изменения  $W_\lambda$  и  $V_r$  рассматриваемых линий водорода и гелия с периодом, которые показывают одинаковый ход (Рис.1). На Рис.1 представлены также кривые изменения блеска в  $\Delta U$  ( $\lambda 4600\text{Å}$ ) по измерениям [3].

Сравнение показывает, что в максимуме блеска звезды эквивалентные ширины линий H и He получают минимальные значения, а в минимуме блеска - максимальные, т.е. блеск и интенсивности этих линий изменяются в противофазе. Наибольшую амплитуду изменения показывают H-линии с высокими номерами ( $n > 10$  коротковолновые линии  $\lambda \leq 3800\text{Å}$ ). Согласно [7,8] эффективные глубины образования ( $\tau$ ) H-линий сильно различаются, причем линии с высокими номерами формируются в самых верхних слоях атмосферы с  $\tau \leq 0.15$  для звезд ранних спектральных классов O - FO.

Чтобы получить информацию о физических условиях по глубине атмосферы, были построены зависимости относительных значений ( $W_\lambda/W_\lambda$ ) интенсивностей H-линий от номера (n) для фаз максимума и минимума блеска звезды 56Agi (Рис.2). Как видно из Рис.2, амплитуда изменения

$$A = (W_\lambda/W_\lambda)_{\max} - (W_\lambda/W_\lambda)_{\min} \quad (1)$$

увеличивается с номером H-линий, и в области  $H_\alpha$  достигает минимального значения ( $A \rightarrow 0$ ). Это означает, что в нижних слоях атмосферы ( $\tau \geq 0.6$ ), где эффективно формируются линии  $H_\alpha$ - $H_\gamma$ , феномен химической пекулярности убывает и становится незначительным.

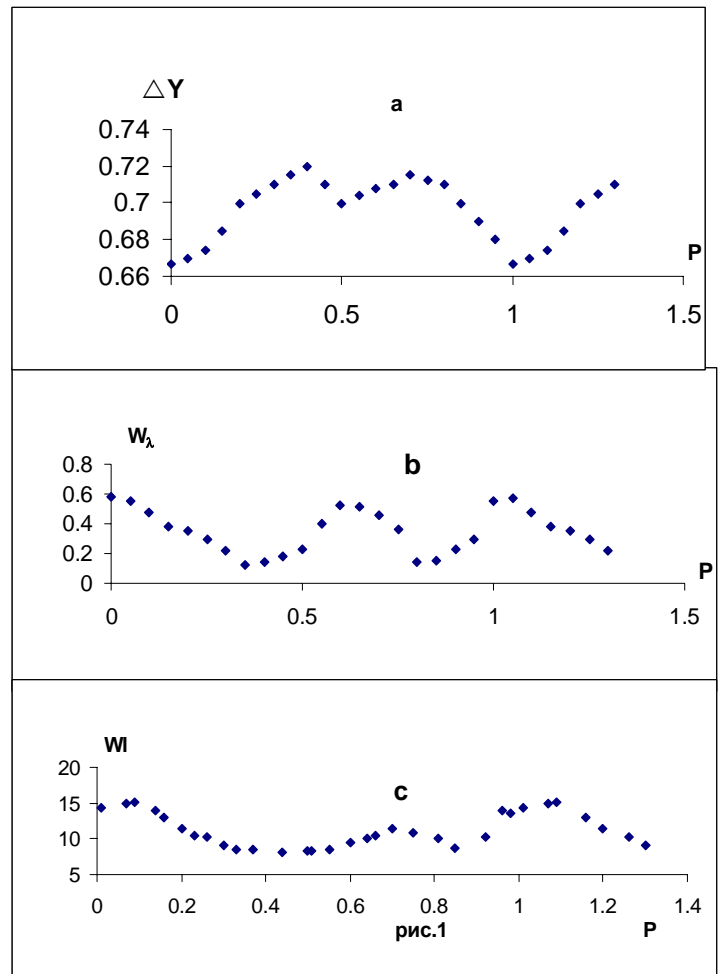
По измеренным значениям  $W_\lambda$ , центральным глубинам  $R_c$  и номером(nm) последней из наблюдаемых линий серии Бальмера обычными методами [7] были определены электронные плотности ( $lgne$ ) для фаз максимума и минимума в отдельности.

Полученные значения для  $lgne(nm)$ ,  $lgN_{O_2H}$  ( $N_{O_2H}$  – количество атомов водорода во втором состоянии в  $1cm^3$ , а  $H$  – толщина «однородной атмосферы» звезды) и  $lgne(W_\lambda)$  после введения всех необходимых поправок по [7] приведены в Таблице2.

С целью сравнения полученных результатов с данными других авторов в столбце б этой таблицы приведены значения соответствующих величин, взятых из литературы, а также результаты определения  $\Delta lgne$  для нормальной звезды  $\alpha Leo$  B8 ( $Te=13250$ ), использованной в качестве звезды сравнения. Получено, что в фазе минимума величина  $lgne(W_\lambda)$  (определяемого по методу Унзольда) в нижних слоях атмосферы ( $\tau \geq 0.6$ ) имеет такое же значение, как у нормальной звезды  $\alpha Leo$  в пределах точности определения  $\Delta lgne = \pm 0.05$ .

**Рис.1.**

а - изменение блеска  $\Delta Y$  ( $\lambda 4600$ ), б – эквивалентная ширина ( $W_\lambda$ ) линии HeI  $\lambda 4472\text{\AA}$ , с -  $W_\lambda$  линии  $H_\delta$  для 56Ari в зависимости от фазы.



Тогда как в этой же фазе в верхних слоях атмосферы ( $\tau \leq 0.15$ ), где эффективно формируются H-линии с высокими номерами ( $n > 11$ ), электронные плотности, определяемые по методу Инглиса–Теллера, на  $lgne(nm) = 0.70$  больше, чем у нормальной звезды  $\alpha Leo$ .

**Таблица 2 .**

Параметры	Область пятна	Нормальн. область	Параметры	Автор	Литер. данные	Источник
$\phi$ ( фаза )	0.25-0.35	0.95-0.05	Be ( Гс )	+560/-385	-346/+384	1.11
Te ( $H\gamma, H_\delta$ )	13.100	12400	Be ( Гс )	—	-400/+550	12
Te ( B- V)	13000	12700	$\Delta Te(H\gamma H_\delta)$	700 °K	500	4.5
nm	18.00	16.50	$\Delta Te$ (B-V)	300 °K	310	2.5
$lg ne$ (nm)	14.13	13.85	$V \sin i$	170	200	1.11
$R_c$	0.80	0.84	$V_{\text{ЭК}}$ (км/сек)	165	160-170	2.4
$lg$ ( $N_{O_2H}$ )	16.60	16.88	$\Delta lg ne(56Ari)$	0.73	—	—
$lg ne$ ( $W_\lambda$ )	14.86	14.82	$\Delta lg ne(\alpha Leo)$	1.50	1.45	5

Эти наблюдательные факты показывают, что в области пятен, где интенсивности линий водорода и гелия минимальны, в верхних слоях атмосферы электронные плотности в пять раз больше, чем у нормальной звезды  $\alpha$ Leo.

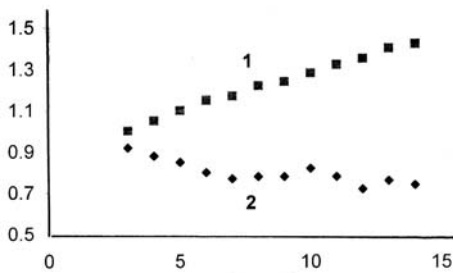


Рис.2.

Зависимость относительных значений интенсивности H-линий от номера (n); 1 – для области пятна, 2 – без пятна.

Все полученные наблюдательные факты свидетельствуют о том, что распределения заряженных частиц по глубине атмосферы в пятнах значительно отличаются от нормальных звезд. Изменения исследуемых величин могут быть связаны с различиями физических условий, в основном, с различиями температур и строением фотосферы в области пятен. С этой целью были сопоставлены теоретические [10] и наблюдаемые контуры линий  $H\gamma$ ,  $H\delta$  для фаз экстремумов интенсивности линий H, He и блеска звезды. В результате были получены следующие значения для параметров атмосферы звезды  $56Agi$ :  $T_e=13100K$  (max),  $T_e=12400K$  (min) и  $lgg=3.5$  (Таблица 2). Как видно, разница температур составляет  $\Delta T=700K$ . Оценка разницы температур по изменениям величин  $B-V=-0.11$  [4] дает значение  $\Delta T_e=310K$ . Примерно такие же расхождения температур были обнаружены и для других подобных (AO-B6) магнитных CP-звезд. Это может возникать не только из-за разницы глубин, к которым относят температуры, а также и из-за различий в структурах фотосфер магнитных CP-звезд и нормальных. Различие структур следует из аномального содержания неоднородного распределения различных элементов и наличия сильного магнитного поля в атмосферах магнитных CP-звезд.

2. Линии Si II и других (пекулярных) элементов. На всех регистрограммах были измерены полные эквивалентные ширины и лучевые скорости линии MgII, SiII, CaII, ScII, CrII, MnII, FeII, SrII и EuII, которые приведены в Таблице 1.

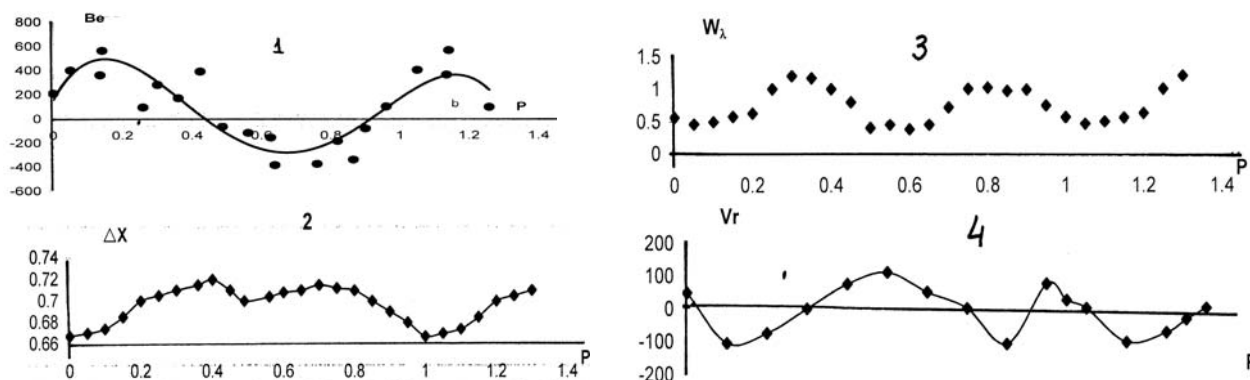
Некоторые из этих линий в фазах максимума интенсивности линий H и He слабые и с трудом выявляются на фоне шумов записи. В этих фазах ( $\varphi=0.40\div 0.60$ ) ошибки измерений величин  $W_\lambda$  и  $V_r$ , которые были определены по спектрам звезды сравнения  $\alpha Leo$  ( $7\div 10\%$ ), на несколько процентов повышены ( $\sigma \geq 15-20\%$ ). Несмотря на это в спектрах  $56Agi$  имеются достаточно сильные линии выше упомянутых элементов, (особенно линии SiII), которые четко выделяются на фоне шумов и достаточно корректны для обработки. Были построены кривые зависимости значений  $W_\lambda$  и  $V_r$  от фазы. Изменения интенсивности линий с фазой для всех элементов показывают одинаковый характер, причем на всех кривых имеются два максимума  $\varphi \approx 0.30$  и  $0.75$ . В этих фазах  $V_r=0$  и контуры линий становятся сложными и состоят из нескольких компонентов.

В качестве примера на Рис.3 приводятся фазовые кривые величин  $W_\lambda$  и  $V_r$  для линий SiII ( $\lambda\lambda 3862, 4128$  и  $4201$ ). Как видно, нулевая лучевая скорость соответствует фазам экстремумов интенсивностей линий Si II.

Аналогичная картина наблюдается и для линий других пекулярных элементов. На этом же рисунке приведена кривая изменения магнитного поля Be и блеска в «X» лучах ( $\lambda 4050$ ) Женевской системы по измерениям [3].

Анализ фазовых кривых для величин Be,  $W_\lambda$ ,  $\Delta X$ ,  $(B-V)$  [4] и  $V_r$  показывает, что кремний и, возможно, другие пекулярные элементы сконцентрированы в двух локальных областях (пятнах) на поверхности этой звезды. Не исключено, что в

ИЗУЧЕНИЕ ПЯТНИСТОЙ СТРУКТУРЫ АТМОСФЕРЫ У МАГНИТНОЙ CP-ЗВЕЗДЫ 56 Ari  
 этих областях имеется несколько пятен (2-3), которые в интегральном свете от видимого полушария звезды наблюдаются, как единая область с повышенным содержанием пекулярных элементов.



**Рис.3.**

1 – изменение Be (Гс), 2 – блеска  $\Delta X(4050\text{\AA})$ , 3 -  $W_\lambda(b\text{\AA})$  линии Si II  $\lambda 4128\div 30\text{\AA}$ ,  
 4 –  $V_r$  линии Si II  $\lambda 3862\text{\AA}$  (км/сек) в зависимости от фазы.

Согласно Рис.3 максимумы блеска звезды совпадают с максимумами Be и  $W_\lambda$  линий кремния в пределах точности измерений. Кроме того фаза главного максимума ( $\varphi \approx 0.3$ ) этих величин соответствует фазе  $V_r = 0$ . Согласно модели наклонного ротатора и результатам [6] в этой фазе самое сильное пятно – область с максимальным содержанием пекулярных элементов (кроме He) – расположено на центральной части видимого полушария звезды. Из сравнения Рис.1 и Рис.3 видно, что линии водорода и гелия изменяются в противофазе с линиями Si II, блеска и магнитного поля. Это связано с тем, что в области пятна имеется десятикратный дефицит He [2]. Уменьшение интенсивности H-линий, возникающее из-за различия физических условий в пятнах и нормальной части атмосферы, никак нельзя объяснить изменением содержания атомов водорода.

**ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ.** Комплексный анализ результатов спектральных, магнитных и фотометрических наблюдений еще раз подтверждает наличие неравномерного распределения различных элементов по поверхности магнитных CP - звезд, в том числе у 56Ari. Совпадение максимумов эквивалентных ширин линий пекулярных элементов (SiII, SrII, CrII и т.д.) и блеска звезд свидетельствуют о существенном влиянии химических аномалий на физические условия и строение фотосферы в области пятен. Наличие сильного магнитного поля  $-400/+550$ Гс приводит к усилению химических аномалий [1] и уменьшению роли основного поглощающего элемента – водорода. В результате изменяется коэффициент непрерывного поглощения, температурный режим (градиент) и другие характеристики атмосферы CP – звезд.

Сравнение графиков зависимостей величин  $W_\lambda$ , Be,  $\Delta x$ ,  $\Delta u$  и  $V_r$  от фазы показывает, что положительный полюс магнитного поля (диполя) находится на долготе  $l \approx 40^\circ$  ( $\varphi \approx 0.12^\circ$ ), на расстоянии  $15-20^\circ$  от которого расположен центр тяжести наибольшей пекулярной области (пятна) на видимом полушарии звезды 56Ari. В этой области (в пятнах) из-за химической аномалии возникает дополнительный покровный эффект ( $8\div 10\%$ ), который приводит к увеличению температуры, в среднем на  $700\div 1000$ К.

В конечном итоге наряду с изменениями блеска и интенсивности линий пекулярных элементов возникают изменения H-линий, причем наибольшие изменения обнаруживаются у линий с высоким номером. Согласно [7], последние

эффективно формируются в верхних слоях атмосферы ( $\tau < 0.2$ ), где степень пекулярности достигает максимального значения.

На основании комплексного анализа результатов спектральных, магнитных и фотометрических наблюдений были сделаны следующие выводы:

1. Детальный анализ изменений в спектре звезды 56 Ari еще раз подтверждает, что различные химические (пекулярные) элементы на поверхности магнитных CP-звезд распределены неравномерно;
2. Фаза главного максимума полных эквивалентных ширин пекулярных элементов и блеска звезды совпадает с фазой минимальной интенсивности линий H и HeI;
3. Область с максимальным содержанием пекулярных элементов (пятно), где имеет место десятикратный дефицит He, расположена около положительного полюса магнитного поля;
4. Все наблюдаемые H-линии показывают синхронные изменения, причем амплитуда вариаций растет с увеличением номера этих линий;
5. Основные параметры атмосферы (Te, ne, N<sub>02</sub>, Ve, блеск и др.) в области пятен и окружающих частей по поверхности звезды значительно отличаются друг от друга.

Авторы благодарны Иманлы Г.С. за помощь при подготовке статьи к печати.

1. В.Л.Хохлова, *Итоги науки и техники, Астрономия*, М. ВИНТИ, (1983) 233.
2. И.А.Асланов, В.Л.Хохлова, *Астрономический журнал*, **491**(972) 271.
3. W.Schoneich, G.Hilderbrandt, *Astron. Nachr.*, **297** (1976) 39.
4. R.H.Hardie, N.H.Schroeder, *Astrophys. J.*, **138** (1963) 350.
5. С.Г.Алиев, Спектральное исследование магнитных CP-звезд с учетом эффекта пятнистости, дисс. на соискание степени кан. физ.-мат. наук, БГУ, (2003).
6. С.Г.Алиев, С.Г.Зейналов, *Труды международной научной конференции. ШАО*, (2004) 136.
7. И.М.Копылов, *Изв. КрА*, **35** (1966) 11.
8. J.Tuominen, T.V.Tuominen, K.Main, *Astrophys. J.*, **68** (1968) 98.
9. И.М. Копылов, *Изв. САО*, **24** (1987) 44.
10. R.L.Kurucz, *Astrophys. J. Suppl.*, **40** (1979) 1.
11. E.F.Borra, J.D.Landstreed, *Astrophys. J. Suppl.*, **42** (1980) 421.
12. P.Didelon, *Astron. Astrophys. Suppl.*, **53** (1983) 119.

#### 56 Ari CP- MAQNIT ULDUZUNDA ATMOSFERIN LƏKƏLİ QURULUŞUNUN TƏDQIQI S.H.ƏLİYEV, S.Q.ZEYNALOV

Işdə spektral, maqnit və fotometrik müşahidələr əsasında 56Ari maqnit ulduzunda atmosferin ləkəli quruluşa malik olması təsdiq edilmişdir. Aşkar edilmişdir ki, pekulyar elementlərin və parlaqlığın maksimumu H və HeI xətlərinin minimumu ilə üst-üstə düşür. Alınmışdır ki, pekulyar elementlərin və temperaturun maksimumuna ( $T=13100\text{K}$ ) uyğun oblast (ləkə) maqnit sahəsinin müsbət qütbü ətrafında yerləşmişdir. Hidrogen xətlərinin dəyişkənlik amplitudası onların (seriya) nömrələrinə görə artması müəyyən edilmişdir.

#### STUDY OF SPOT STRUCTURE IN THE ATMOSPHERES MAGNETIC CP-star 56Ari S.Q.ALIYEV, S.Q.ZEYNALOV

The chemical peculiarities – spot structure of the atmosphere magnetic - CP-star 56 Ari have been studied on the basis analysis of the results spectral, magnetic and photometrically observations. It has been detected that the phase of maximum light (in  $\Delta y$ ,  $\Delta x$ ) and maximum of lines SiII and other peculiar elements coincided with minimum of H and HeI. It has been obtained that silicon maximum occurs about positive magnetic extremum and maximum and temperature ( $T=13100^\circ\text{K}$ ). The amplitudes of variations H-lines have increased with number of those lines.

Редактор: Э. Гулиев