

## ASTROFİZİKA

УДК 524.31

**О ТОНКОЙ СТРУКТУРЕ ПРОФИЛЕЙ ФРАУНГФЕРОВЫХ  
ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ  $\alpha$  CM<sub>i</sub> (ПРОЦИОНА)**

**Д.М.КУЛИ-ЗАДЕ, С.Г.МАМЕДОВ, З.Ф.АЛИЕВА,  
К.И.АЛЫШЕВА, М.М.ТАИРОВ**  
*Бакинский Государственный Университет*  
*ckulizade@mail.ru*

*На основе высокодисперсионных цифровых спектральных материалов, полученных с помощью двойных монохроматоров высокого разрешения, были построены профили более 100 слабых и умеренных фраунгоферовых линий в спектре звезды  $\alpha$  CM<sub>i</sub> спектрального класса F5 IV (Проциона). Определены параметры асимметрии профилей линий методом Кули-Заде. Исследуется изменение асимметрии профилей линий от интенсивности (эквивалентных ширин). Показано, что с увеличением интенсивности линий, интегральная и остаточная асимметрии заметно увеличиваются.*

**Ключевые слова:** процион, спектр, профили линий, асимметрия, параметры асимметрии.

Как известно, в нормальном спектре Солнца и звезд, профили большинства фраунгоферовых линий являются асимметричными. Кроме того, установлено, что асимметрия профилей линий имеет сложную тонкую структуру. Иными словами, в пределах профиля данной спектральной линии асимметрия может неоднократно меняться по величине и по знаку.

Асимметрия профилей линий раньше характеризовалась только качественно, отсутствовала физическая величина, определяющая асимметрию всего профиля линии количественно.

На кафедре астрофизики БГУ Кули-Заде [2] разработал совершенно новый, не опирающийся на предыдущие, количественный метод для анализа асимметрии профилей фраунгоферовых линий в спектрах Солнца и звезд. При этом для детального анализа асимметрии он предложил 4 новых величин, каждая из которых имеет определенный физический смысл и характеризует асимметричность профилей линий количественно:

Дифференциальная асимметрия

$$\delta(R_i) = \Delta\lambda_{g_i} - \Delta\lambda_{r_i} \quad (1)$$

определяет асимметрию на данной глубине профиля  $R_i$  или на расстояние  $\Delta\lambda_i$  от центра профиля линии;

Интегральная асимметрия

$$\Lambda = \sum_i |\delta(R_i)| \Delta R_i \quad (2)$$

определяет асимметрию всего профиля линии;

Остаточная асимметрия

$$\Delta\Lambda = \sum_{\delta(R)>0} |\delta(R_i)| \Delta R_i - \sum_{\delta(R)<0} |\delta(R_i)| \Delta R_i \quad (3)$$

показывает преимущество фиолетовой или красной асимметрии. При  $\Delta\Lambda > 0$  преобладает фиолетовая асимметрия, а при  $\Delta\Lambda < 0$  преобладает красная асимметрия.

Относительная асимметрия

$$\Lambda_0 = \frac{\sum_i |\delta(R_i)| \Delta R_i}{W} \quad (4)$$

определяет долю интегральной асимметрии от полного поглощения в линии (эквивалентной ширины).

### Наблюдательный материал

Используемый в работе наблюдательный материал был получен с помощью двойного цифрового монохроматора высокого разрешения и высокой дисперсии [1]. Остаточные интенсивности даются с шагом  $5\text{m}\text{\AA}$ , что позволяет построить профили слабых фраунгоферовых линий и исследовать их тонкую структуру в большом спектральном интервале. Надо отметить, что пока  $\alpha\text{ CM}_i$  (Процион) единственная звезда, спектр которой получен с высокой дисперсией.

Для анализа были выбраны только наиболее чистые, неблендированные линии разных химических элементов в спектральной области  $44000\text{--}5500\text{\AA}$ . Потенциал возбуждения нижних уровней линий меняется от  $0,0\text{ eV}$  до  $4,5\text{ eV}$ .

Спектрофотометрическая обработка спектров проводилась программой ORIGIN.

### Определение параметров асимметрии

Параметры асимметрии профилей исследуемых фраунгоферовых линий были определены комплексной программой, составленной на кафедре астрофизики Бакинского Государственного Университета [3]. Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1

**Параметры асимметрии профилей фраунгоферовых  
линий в спектре звезды  $\alpha$  CM<sub>i</sub> (Проциона)**

$\lambda$	Элемент	W (mÅ)	$\Lambda$ (mÅ)	$\Lambda_+$ (mÅ)	$\Lambda_-$ (mÅ)	$\Delta \Lambda$ (mÅ)
4140,42	Ti I	43	2.2	1.2	-1.0	0,2
4157.788	Fe I	118	1.4	1.1	-0.3	0,8
4163.650	V II	139	15.8	13.9	-2.0	11,9
4231.040	Ni I	40	1.0	0.2	-0.7	-0,5
4246.258	Fe I	130	4.0	3.7	-0.4	3,3
4266.968	Fe I	69	2.3	1.1	-1.2	-0,1
4278.195	Fe I	87	3.1	0.2	-2.9	-2,7
4389.250	Fe I	41	1.0	0.1	-0.9	-0,8
4438.353	Fe I	32	1.0	0.4	-0.7	-0,3
4447.730	Fe I	124	3.6	3.1	-0.5	2,6
4451.586	Mn I	84	9.3	9.3	0	9,3
4485.679	Fe I	64	1.4	0.3	-1.0	-0,7
4515.337	Fe II	123	2.4	0.3	-2.1	-1,8
4531.633	Fe I	35	1.6	0.3	-1.3	-1
4547.850	Ti I	72	3.0	0	-2.9	-2,9
4550.771	Fe I	61	2.4	0.1	-2.2	-2,1
4554.045	Ba II	184	2.7	1.8	-0.8	1
4576.345	Fe II	98	7.6	6.7	-0.9	5,8
4589.960	Ti II	109	3.7	2.8	-0.9	1,9
4602.948	Fe I	102	5.3	0	-5.3	-5,3
4602.005	Fe I	44	0.9	0.5	-0.4	0,1
4616.640	Cr II	70	2.0	0.4	-1.6	-1,2
4617.270	Ti I	35	1.3	0.2	-1.1	-0,9
4620.519	Fe II	75	1.6	0.1	-1.2	-1,1
4625.052	Fe I	74	2.3	2.3	0	2,3
4634.085	Cr II	90	1.8	0.9	-0.9	0
4651.285	Cr I	54	3.2	3.2	0	3,2
4652.168	Cr I	80	2.9	1.4	-1.5	-0,1
4686.224	Ni I	53	0.7	0.2	-0.5	-0,3
4700.171	Fe I	37	1.0	0.4	-0.5	-0,1
4710.290	Fe I	69	9.5	9.5	0	9,5
4718.429	Cr I	47	3.8	2.6	-1.2	1,4
4722.159	Zn I	61	1.6	1.1	-0.5	0,6
4733.000	N IV	64	3.1	0.2	-2.8	-2,6
4739.108	Mn I	29	1.4	1.4	0	1,4
4741.542	Fe I	50	2.2	0	-2.3	-2,3
4779.990	Ti II	84	4.1	1.5	-2.6	-1,1
4789.350	Ti I	44	2.2	0	-2.1	-2,1
4789.659	Fe I	78	1.7	1.6	0	1,6
4903.318	Fe I	107	2.9	2.5	-0.4	2,1

$\lambda$	Элемент	W (mÅ)	$\Lambda$ (mÅ)	$\Lambda_+$ (mÅ)	$\Lambda_-$ (mÅ)	$\Delta \Lambda$ (mÅ)
4904.420	Ni I	69	1.8	0.1	-1.6	-1,5
4917.240	Fe I	43	2.6	0.5	-2.0	-1,5
4922.267	Cr I	59	2.7	1.6	-1.14	0,46
4924.775	Fe I	77	4.0	1.1	-3.0	-1,9
4930.310	Fe I	48	1.0	0.2	-0.8	-0,6
4932.029	V I	51	1.7	0	-1.7	-1,7
4935.830	Ni I	43	1.6	0.3	-1.3	-1
4953.221	Ni I	31	1.0	0	-1.0	-1
4969.927	Fe I	62	3.8	0.1	-3.6	-3,5
4973.108	Fe I	60	5.6	5.5	0	5,5
4980.190	Ni I	83	3.7	3.7	0	3,7
4988.965	Fe I	69	7.5	1.4	-6.0	-4,6
4994.130	Fe I	80	3.4	0	-3.3	-3,3
5002.800	Fe I	51	1.6	1.1	-0.5	0,6
5020.028	Ti I	70	4.3	3.8	-0.5	3,3
5029.620	Fe I	29	4.1	0	-4.1	-4,1
5031.030	Fe I	95	10.6	9.6	-1.0	8,6
5049.830	Fe I	111	3.3	3.3	0	3,3
5080.545	Ni I	90	6.9	6.9	0	6,9
5081.125	Ni I	80	4.7	4.7	0	4,7
5083.342	Fe I	84	7.0	7.0	0	7
5090.780	Fe I	74	2.6	1.0	-1.6	-0,6
5105.549	Cu I	43	1.5	0.5	-0.9	-0,4
5109.662	Fe I	61	0.8	0.2	-0.5	-0,3
5110.414	Fe I	114	2.7	0	-2.7	-2,7
5115.390	Ni I	58	0.9	0.7	-0.1	0,6
5120.360	Fe II	34	2.2	0.2	-2.0	-1,8
5121.629	Fe I	59	6.9	6.9	0	6,9
5126.210	Fe I	55	1.0	1.0	0	1
5127.360	Fe I	73	2.1	0.1	-2.0	-1,9
5133.700	Fe I	129	2.4	1.0	-1.4	-0,4
5150.860	Al III	83	3.2	2.7	-0.5	2,2
5151.915	Fe I	71	2.8	0.6	-2.1	-1,5
5159.660	Fe I	52	2.0	2.0	0	2
5167.340	Mg I	390	11.3	6.6	-4.6	2
5172.698	Mg I	425	20.7	17.8	-2.8	15
5176.552	Ni I	37	3.0	0	-3.0	-3
5183.640	Mg I	578	18.1	2.8	-15.3	-12,5
5198.725	Fe I	74	3.3	1.4	-1.8	-0,4
5202.330	Fe I	131	7.4	5.1	-2.2	2,9
5204.520	Cr I	145	1.6	0.1	-1.4	-1,3
5210.400	Ti I	52	1.1	0.7	-0.4	0,3
5211.544	Ti II	46	1.1	1.1	0	1,1
5217.395	Fe I	79	2.4	2.0	-0.4	1,6

$\lambda$	Элемент	W (mÅ)	$\Lambda$ (mÅ)	$\Lambda_+$ (mÅ)	$\Lambda_-$ (mÅ)	$\Delta \Lambda$ (mÅ)
5242.495	Fe I	74	3.2	0	-3.2	-3,2
5281.800	Fe I	112	2.3	1.8	-0.4	1,4
5288.533	Fe I	20	0.7	0	-0.7	-0,7
5302.309	Fe I	113	6.0	0.5	-5.4	-4,9
5305.870	Cr II	46	2.0	1.0	-0.9	0,1
5307.360	Fe I	80	8.9	5.9	-3.0	2,9
5325.550	Fe II	74	1.9	0.6	-1.3	-0,7
5334.870	Cr II	53	2.1	0	-2.0	-2
5343.438	Co I	43	1.0	0.6	-0.3	0,3
5348.320	Cr I	71	2.3	1.2	-1.1	0,1
5362.864	Fe II	120	3.0	1.8	-1.2	0,6
5367.470	Fe I	117	0.8	0.5	-0.3	0,2
5393.175	Fe I	112	12.3	11.2	-1.1	10,1
5397.140	Fe I	152	1.6	0.7	-0.8	-0,1
5398.285	Fe I	62	1.9	1.2	-0.7	0,5
5400.509	Fe I	100	3.5	1.9	-1.5	0,4
5409.795	Cr I	102	3.8	3.8	0	3,8
5418.775	Ti I	64	2.1	1.8	-0.3	1,5
5425.260	Fe II	64	7.7	7.7	0	7,7
5429.710	Fe I	203	12.9	10.4	-2.4	8

### Зависимость асимметрии профилей от интенсивности фраунгоферовых линий

В ряде работ [4] показано, что в спектре Солнца коэффициент асимметрии

$$k = \frac{M_3}{(\sqrt{M_2})^3}$$

( $M_2$  и  $M_3$  центральные моменты второго и третьего порядков) с увеличением силы линий сильно уменьшается и для довольно сильных линий приближается к нулю. Этот результат невозможно интерпретировать физически, поскольку сильные линии охватывают более протяженный слой фотосферы и тем самым больше подвергаются депрессиям динамических процессов, чем слабые линии.

Это ошибочное заключение, видимо, связано с тем, что фиолетовая асимметрия ( $\delta(R_i) > 0$ ) в одних глубинах профиля компенсируется красной ( $\delta(R_i) < 0$ ) в других глубинах и в результате асимметричная линия оказывается симметричной.

Чтобы учесть это в методе, предложенном Кули-Заде [2] при определении интегральной асимметрии суммируются не сами величины дифференциальной асимметрии  $\delta(R)$ , а ее модули. В результате компенси-

рования фиолетовой асимметрии в одних интервалах глубин профиля линий с красной асимметрией в других интервалах глубин не происходит.

В данной работе рассматривается изменение интегральной и остаточной асимметрий профилей фраунгоферовых линий от интенсивности, т.е. от эквивалентных ширин фраунгоферовых линий в спектре  $\alpha CM_i$ .

На рис.1 показана зависимость интегральной асимметрии от эквивалентных ширин линий. Такие зависимости приведены на рис.2 и рис.3 для положительной и отрицательной долей интегральной асимметрии.

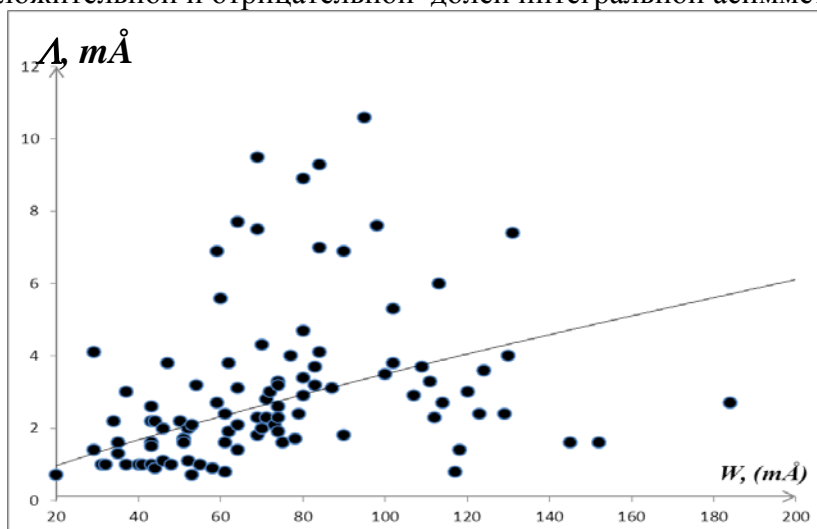


Рис.1 Зависимость интегральной асимметрии  $\Lambda = \sum_i |\delta(R_i)| \Delta R_i$  от эквива-

лентных ширин линий

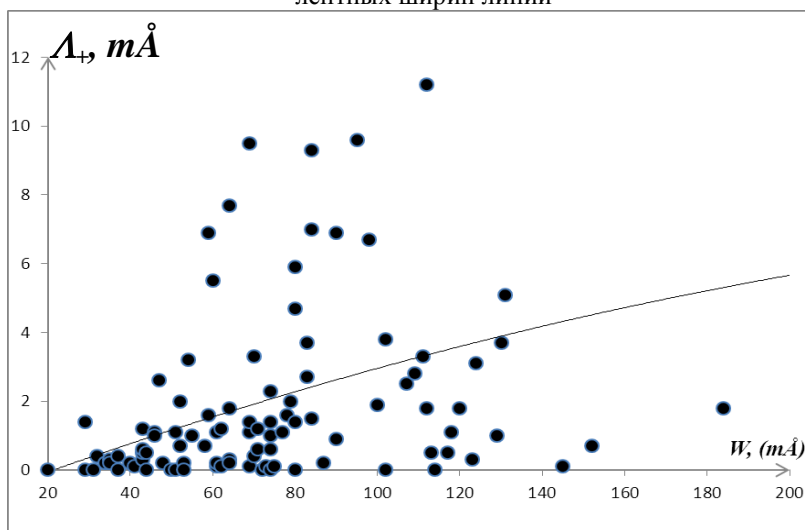


Рис. 2. Зависимость положительной доли интегральной асимметрии

$$\Lambda_+ = \sum_{\delta(R)>0} |\delta(R_i)| \Delta R_i$$

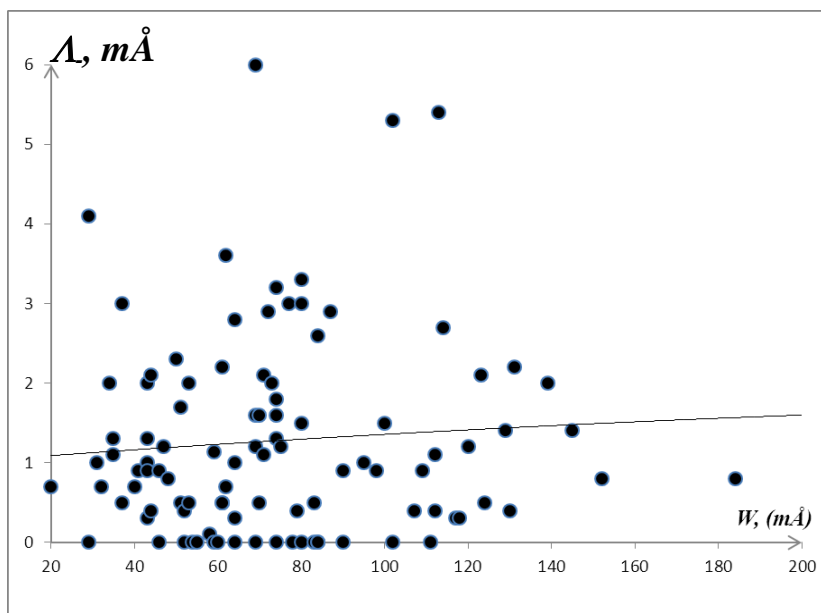


Рис. 3. Зависимость отрицательной доли интегральной асимметрии

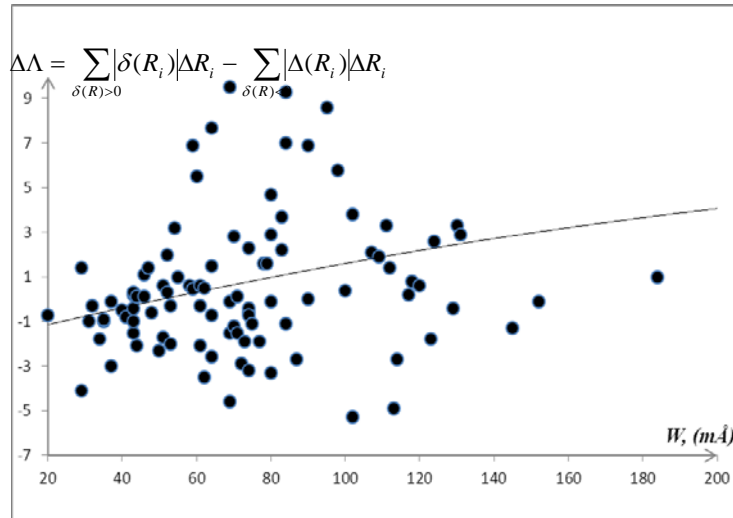
$$\Delta_- = \sum_{\delta(R)<0} |\Delta(R_i)| \Delta R_i \text{ от эквивалентных ширин линий.}$$

Как видно, во всех трех случаях, в среднем, наблюдается увеличение асимметрии с интенсивностью линий.

На рис.4 показана зависимость остаточной асимметрии  $\Delta\Lambda$  от эквивалентных ширин линий. В этом случае тоже наблюдается рост остаточной асимметрии с увеличением интенсивностей используемых фраунгоферовых линий. Такая зависимость физически объяснима, ибо сильные линии охватывают более протяженный слой атмосферы, чем слабые линии. Поэтому сильные линии больше подвергаются депрессионным влияниям динамических процессов, возникающих в атмосфере звезды, чем слабые линии. Такие же результаты были получены Кули-Заде [5-6] для спектра Солнца

### Заключение

- В спектре звезды  $\alpha CM_i$  (Процион) профили большинства фраунгоферовых линий в спектральной области  $\lambda 4000-5500 \text{ \AA}$  являются асимметричными.
- Из рассмотренных 104 фраунгоферовых линий слабой и средней интенсивности 50 линий характеризуются фиолетовой асимметрией, 49 линий –красной асимметрией.
- Интегральная и остаточная асимметрии, в среднем, увеличиваются с интенсивностью линий.



**Рис.4.** Зависимость  $\Delta\lambda = \sum_{\delta(R_i)>0} |\delta(R_i)|\Delta R_i - \sum_{\delta(R_i)<0} |\Delta(R_i)|\Delta R_i$  от эквивалентных ширин линий

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Griffin R.F., Griffin R. A Photometric Atlas of the Spectrum of Procyon Cambridge, 1979, 140 p.
2. Кули-Заде Д.М., On the Quantitative Method for Measurement and Analysis of the Fine Structure of the Fraunhofer Lines Profiles, Astronomical and Astrophysical Transaction, 2014, vol. 28, No4, и384-404.
3. Кули-Заде Д.М. Программа вычисления асимметрии профилей фраунгоферовых линий в спектре Солнца и звезд, Вестник БГУ, 2004, № 2, 158-165,
4. Kostik R.I., Orlova T.V. On the Asymmetry of Selected Fraunhofer Lines. V. Solar Phys., 1977, v. 53, №2, p. 353-358.
5. Кули-Заде Д.М. Зависимость асимметрии профилей фраунгоферовых линий от интенсивности. Астрон. ж., 2001, №1, с. 87-90.
6. Kuli-Zade D.M. Intensity Dependence of the Asymmetry of Fraunhofer Line Profiles. Astronomy Reports, 2001, v.45, No1, p. 75-78.

#### ACMi (PROSİYON) SPEKTRİNDƏ FRAUNHOFER XƏTLƏRİNİN PROFİLLƏRİNİN İNCƏ QURULUŞU HAQQINDA

C.M.QULUZADƏ, S.H.MƏMMƏDOV, Z.F.ƏLİYEVƏ, K.İ.ALIŞEVƏ, M.M.TAHİROV

#### XÜLASƏ

İkiqat monoxromatorların köməyilə alınmış yüksək dispersiyalı rəqəmsal materiallar əsasında 100- ə qədər zəif və orta intensivlikli fraunhofer xətlərinin profilləri qurulmuşdur. Quluzadə üsulu ilə profillərin asimetriya parametrləri təyin olunmuşdur. Asimetriyanın intensivlikdən (ekvivalent enliklərdən) asılılığı tədqiq olunur. Göstərilir ki, xətlərin intensivliyi artdıqca integral və qalıq asimetriya nəzərə alınacaq dərəcədə artır.

**Açar sözlər:** Prosiyon, spektr, xətlərin profili, asimetriya parametrləri

**ON THE FINE STRUCTURE OF FRAUNHOFER LINE PROFILES  
IN THE SPECTRUM  $\alpha$ CMi (PROCYON)**

**D.M.KULI-ZADE, S.H.MAMMADOV, Z.F.ALIEVA, K.I.ALISHEVA, M.M.TAIROV**

**SUMMARY**

On the basis of high – dispersive digital spectrum materials obtained by double monochromators of high – resolution, the profiles of more than 100 weak and moderate Fraunhofer lines in the star spectrum  $\alpha$ CMi spectral class of F5 IV (Procyon) were constructed. Parameters of line profiles asymmetry were determined by Kuli- Zade s method. The change of line profiles asymmetry from intensity (equivalent widths) is investigated. It is shown that with intensity of lines, integral and residual asymmetries noticeably increase.

**Key words:** Procyon, spectrum, line profiles, asymmetry, parameters of asymmetry

*Поступила в редакцию: 09.07.2015 г.*

*Подписано к печати: 17.11.2015 г.*