

УДК 523.9

Д. М. Кули-Заде, З. Ф. Шабанова

Бакинский государственный университет
AZ 1148 Азербайджан, Баку, ул. Академика З. Халилова 23
e-mail: ckulizade@yahoo.com, ckulizade@mail.ru**О тонкой структуре профиля линии λ 532.4185 нм
в спектре центра диска Солнца**

На основе цифровых спектров, полученных с помощью двойных монохроматоров высокого спектрального разрешения, построен профиль линии λ 532.4185 нм Fe I в спектре центра диска Солнца. Определены основные спектрофотометрические характеристики профиля линии с большой точностью. Детально исследуется тонкая структура профиля линии. Определены параметры асимметрии профиля.

ПРО ТОНКУ СТРУКТУРУ ПРОФІЛЯ ЛІНІЇ λ 532.4185 НМ У СПЕКТРІ ЦЕНТРА ДИСКУ СОНЦЯ, Кулі-Заде Д. М., Шабанова З. Ф. — На основі цифрових спектрів, отриманих за допомогою подвійних монохроматорів високого спектрального розділення, побудовано профіль лінії λ 532.4185 нм Fe I у спектрі центра диску Сонця. Визначено основні спектрофотометричні характеристики профіля лінії з великою точністю. Детально досліджується тонка структура профіля лінії. Визначено параметри асиметрії профіля.

ON THE FINE STRUCTURE OF THE LINE λ 532.4185 NM IN THE SPECTRUM OF THE SOLAR DISK CENTRE, by Kuli-Zade D. M., Shabanova Z. F. — The profile of the line λ 532.4185 nm Fe I in the spectrum of the solar disk centre was constructed on the basis of digital spectra obtained with the use of double monochromators with high spectral resolution. The general spectrophotometric characteristics of the line were determined with high precision. The fine structure of the line was investigated. The line profile asymmetry parameters were found.

ВВЕДЕНИЕ

Линия λ 532.4185 нм Fe I с потенциалом возбуждения нижнего уровня $\epsilon = 3.2$ эВ возникает при переходе с нечетного уровня $z^5D_4^0$ на четный уровень e^5D_4 и является самой интенсивной линией мультиплета z^5D^0 —

e^5D . Для этой линии $\Delta L = \Delta J$. В спектре Солнца линия λ 532.4185 нм — одна из наиболее свободных от бленд линий.

Выбор линии λ 532.4185 нм Fe I связан с тем, что в работе Р. И. Костыка и Е. В. Хоменко [1] подробно исследовано влияние конвективных движений и звуковых волн на профиль этой линии. Раньше в работах [7, 10] было показано, что волновые движения в фотосфере вызывают незначительную асимметрию профилей линий поглощения. Однако недавно Ханслмейер с сотрудниками [6] показали, что волны могут существенно влиять на профили фраунгоферовых линий и вызвать значительную асимметрию.

Естественно ожидать, что асимметрия профилей линий поглощения в спектре Солнца может быть вызвана конвективными движениями и звуковыми волнами. Характер асимметрии и форма показателя асимметрии профилей линий может зависеть от механизма, вызывающего асимметрию. Поэтому из анализа асимметрии профилей линий можно выяснить физические процессы вызывающие асимметрию профилей фраунгоферовых линий в спектре Солнца.

В работе [1] на основе решения системы гидродинамических уравнений с использованием трехмерной модели солнечной атмосферы исследовался процесс распространения звуковой волны в движущихся гранулах и межгранулярных областях. Было показано, что характер изменения со временем бисектора профиля линии, синтезированного с учетом отклонения от ЛТР, хорошо воспроизводит данные наблюдений. Основная цель исследования [1] состояла в изучении влияния распространяющихся звуковых волн на бисекторы профилей линий и сравнении его с влиянием, оказываемым конвективными движениями. Было показано, что величина асимметрии профиля линии λ 532.4185 нм Fe I, обусловленная звуковыми волнами, сравнима с асимметрией, вызванной конвективными движениями.

Целью нашей работы есть построение точного наблюдаемого профиля линии λ 532.4185 нм Fe I в спектре центра диска Солнца на основе точнейших цифровых материалов, полученных с помощью быстросканирующих монохроматоров двойной дисперсии, определение параметров асимметрии и поиск механизмов, приводящих к асимметрии профилей фраунгоферовых линий в спектре Солнца.

НАБЛЮДАЕМЫЙ ПРОФИЛЬ ЛИНИИ В СПЕКТРЕ ЦЕНТРА ДИСКА СОЛНЦА

Линия λ 532.4185 нм Fe I довольно чистая (свободная от бленд) линия в данной области спектра. По таблице Мур на ее фиолетовом крыле расположены очень слабые линии λ 532.4097 нм Cr I и λ 532.3930 нм Ti I. Их интенсивность примерно в сто раз меньше, чем интенсивность исследуемой линии. На далеком красном крыле этой линии расположена неидентифицированная очень слабая линия λ 532.4705 нм. Указанные блендирующие линии довольно слабы и никак не могут деформировать профиль линии λ 532.4185 нм.

Наблюдаемый профиль линии λ 532.4185 нм Fe I был построен по цифровому спектральному материалу, полученному в работе [5] с помощью быстросканирующего двойного монохроматора, где остаточная интенсивность дается шагом 0.2 пм. Это позволяет довольно надежно определить профиль линии и исследовать ее тонкую структуру.

В спектре центра диска Солнца крылья линии λ 532.4185 нм простира-

Таблица 1. Наблюдаемый профиль линии λ 532.4185 нм Fe I

$\Delta\lambda$, пм	R_v	R_r	$\Delta R = R_v - R_r$	$\Delta\lambda$, пм	R_v	R_r	$\Delta R = R_v - R_r$
0	0.860	0.860	0.000	0.0200	0.260	0.265	-0.005
0.001	847	860	-0.013	0.022	237	230	0.007
0.002	825	855	-0.030	0.024	215	203	0.012
0.003	775	840	-0.065	0.026	197	177	0.020
0.004	740	818	-0.078	0.028	180	157	0.027
0.005	680	770	-0.090	0.030	167	143	0.024
0.006	645	725	-0.080	0.038	125	097	0.028
0.007	610	665	-0.055	0.046	097	072	0.025
0.008	575	615	-0.060	0.054	072	057	0.015
0.009	540	575	-0.035	0.062	057	047	0.010
0.010	510	540	-0.030	0.070	047	040	0.007
0.011	480	500	-0.020	0.078	037	037	0.000
0.012	450	465	-0.015	0.086	027	030	-0.003
0.013	425	430	-0.005	0.094	023	025	-0.002
0.014	400	400	0.000	0.102	020	021	-0.001
0.015	370	380	-0.010	0.110	014	015	-0.001
0.016	345	350	-0.005	0.118	007	007	0.000
0.017	325	325	0.000	0.126	003	003	0.000
0.018	295	300	-0.005	0.134	000	000	0.000
0.019	280	280	0.000				

ются до 10 пм в обе стороны от линии. Внимательный мониторинг профиля не обнаружил депрессии профиля в области наиболее близкой линии λ 532.4097 нм Cr I.

Наблюдаемый профиль линии дается в табл. 1, где $\Delta\lambda$ — расстояние от центра линии, R — глубина профиля, которая дается для фиолетового (R_v) и красного (R_r) крыльев профиля линии отдельно. Центр профиля линии был определен на уровне полуширины профиля линии $\Delta\lambda_{1/2}$.

По наблюдаемому профилю были определены основные параметры профиля линии: эквивалентная ширина W , полуширина $\Delta\lambda_{1/2}$, четвертьширина $\Delta\lambda_{1/4}$ и центральная глубина R_0 . Эквивалентная ширина была определена по формуле

$$W = 2 \frac{\Delta\lambda_i}{3} [(R_0 + R_{2n}) + 2(R_1 + R_3 + \dots + R_{2n-1}) + 4(R_2 + R_4 + \dots + R_{2n-2})],$$

где $\Delta\lambda_i$ — i -й шаг, R_0 и R_{2n} — начальное ($\Delta\lambda = 0$) и конечное значения глубины профиля. Основные значения параметров профиля линии λ 532.4185 нм Fe I оказались равными $\Delta\lambda_{1/2} = 25.8$ пм, $\Delta\lambda_{1/4} = 47$ пм, $R_0 = 0.860$, $W = 35$ пм.

ТОНКАЯ СТРУКТУРА ПРОФИЛЯ ЛИНИИ

1. Дифференциальная асимметрия профиля линии λ 532.4185 нм Fe I

$$\delta(R) = \Delta\lambda_{v_i} - \Delta\lambda_{r_i},$$

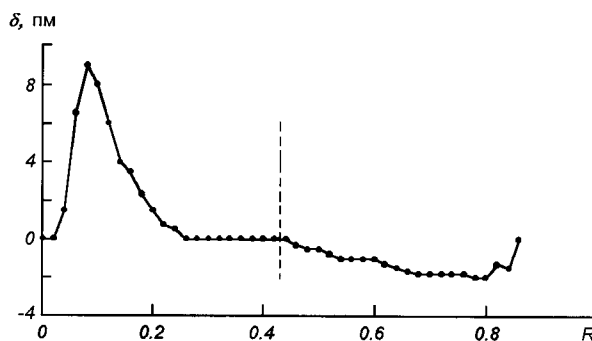
определяемая согласно [3, 4, 8], приведена в табл. 2, где $\Delta\lambda_{v_i}$ и $\Delta\lambda_{r_i}$ — расстояния от центра линии на ее фиолетовом и красном крыльях соответственно при заданной глубине профиля.

На рисунке представлена зависимость дифференциальной асимметрии δ от глубины R профиля линии, которая показывает изменение асимметрии

Таблица 2. Изменение дифференциальной асимметрии $\delta(R)$ внутри линии λ 532.4185 нм Fe I

R	$\delta(R)$, пм	R	$\delta(R)$, пм	R	$\delta(R)$, пм
0.00	0	0.30	0	0.60	-1.0
0.02	0	0.32	0	0.62	-1.3
0.04	1.5	0.34	0	0.64	-1.5
0.06	6.5	0.36	0	0.66	-1.7
0.08	9.0	0.38	0	0.68	-1.8
0.10	8.0	0.40	0	0.70	-1.8
0.12	6.0	0.42	0	0.72	-1.8
0.14	4.0	0.44	0	0.74	-1.8
0.16	3.5	0.46	-0.3	0.76	-1.8
0.18	2.3	0.48	-0.5	0.78	-2.0
0.20	1.5	0.50	-0.5	0.80	-2.0
0.22	0.8	0.52	-0.8	0.82	-1.3
0.24	0.5	0.54	-1.0	0.84	-1.5
0.26	0	0.56	-1.0	0.86	0
0.28	0	0.58	-1.0		

Зависимость дифференциальной асимметрии δ от глубины R профиля (вертикальная пунктирная линия показывает центр профиля линии на уровне полуширины)



внутри профиля линии λ 532.4185 нм Fe I по величине и знаку. Как видно, в крыльях линии ($R < 0.30$) дифференциальная асимметрия положительна ($\delta(R) > 0$), т. е. наблюдается значительная фиолетовая асимметрия. В интервале $0.30 < R < 0.45$ дифференциальная асимметрия близка к нулю, т. е. профиль симметричен, а начиная с $R > 0.45$ наблюдается красная асимметрия.

2. Интегральная асимметрия профиля линии λ 532.4185 нм, как и другие параметры асимметрии, была определена по оригинальной программе [4], составленной на кафедре астрофизики БГУ:

$$\Lambda = \sum |\delta(R_i)| \Delta R_i = \sum_{\delta(R) > 0} |\delta(R_i)| \Delta R_i + \sum_{\delta(R) < 0} |\delta(R_i)| \Delta R_i.$$

Здесь ΔR_i ширина элементарной площади в графике зависимости дифференциальной асимметрии δ от глубины профиля линии R (см. рисунок).

Были определены также положительная и отрицательная доли интегральной асимметрии:

$$\Lambda_+ = \sum_{\delta(R) > 0} |\delta(R_i)| \Delta R_i, \quad \Lambda_- = \sum_{\delta(R) < 0} |\delta(R_i)| \Delta R_i.$$

3. Остаточная асимметрия

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

показывающая преимущества фиолетовой ($\Delta\Lambda > 0$) и красной ($\Delta\Lambda < 0$) асимметрий, определена согласно работам [3, 4, 8].

4. Относительная асимметрия профиля линии определялась по формуле

$$\Lambda_o = \frac{\sum |\delta(R_i)| \Delta R_i}{W},$$

где W — эквивалентная ширина линии. Она равна доле интегральной асимметрии от полного поглощения в линии.

Значения интегральной, остаточной и относительной асимметрий, а также положительная и отрицательная доли интегральной асимметрии профиля линии λ 532.4185 нм Fe I в спектре центра диска Солнца оказались равными $\Lambda = 1.58$ пм, $\Delta\Lambda = 0.32$ пм, $\Lambda_o = 4.5\%$, $\Lambda_+ = 0.95$ пм, $\Lambda_- = -0.63$ пм.

Видно, что интегральная асимметрия профиля линии λ 532.4185 нм составляет приблизительно 4.5 % от полного поглощения в линии. Положительная и отрицательная доли интегральной асимметрии соответственно составляют 2.6 и 1.6 % от полного поглощения в линии.

ОБСУЖДЕНИЯ

В спектре Солнца линия λ 532.4185 нм Fe I является линией средней интенсивности. Центральная остаточная интенсивность линии в спектре центра диска Солнца равна $r_o = 0.140$, т. е. ядро этой линии эффективно формируется в сравнительно верхнем слое фотосферы, а крылья линии — в области образования непрерывного спектра, т. е. в глубоких слоях фотосферы.

Наше исследование показывает, что в спектре центра диска Солнца центр линии λ 532.4185 нм Fe I смещен в красную сторону, а крылья — в фиолетовую сторону. В результате в области профиля, где глубина R превышает 0.40, наблюдается красная асимметрия ($\delta(R) < 0$), в области, где $R < 0.40$ — фиолетовая асимметрия ($\delta(R) > 0$).

Согласно данным [9] область образования этой линии простирается от $H = 10$ км до $H = 500$ км. Высота фотосферы $H = 10$ км соответствует непрерывному спектру, а высота $H = 500$ км — центральной интенсивности линии. Очевидно, что в области эффективного формирования центра линии в фотосфере следует ожидать значительного влияния волновых движений на профиль линии.

Теоретическое исследование [1] показало, что над гранулами центр линии смещается в фиолетовую сторону, а над межгранулярными областями — в красную. Даже в области температурного минимума конвективные движения не исчезают. В этой области над гранулами вещество в основном поднимается, а над межгранулярными областями — опускается.

В работе [2] на основе корреляционного анализа спектральных материалов, полученных на немецком вакуумном башенном телескопе в Изанье (Испания) с высоким пространственным (0.5") и временным (9 с) разрешениями установлено, что гранулы и межгранулярные области изменяют относительную яркость на высоте 250 км, а на высоте около 490 км происходит общая перемена направления скоростей: вещество над гранулами преимущественно опускается, над межгранулярными областями — поднимается. Показано, что наиболее типичными и эффективными являются четыре типа движения. В первых двух движущееся вещество изменяет

только знак относительно контраста, что происходит на высоте около 270 км. В последних двух на высоте вблизи 350 км происходит изменение и знака контраста, и направления движения. Из сравнения наблюдаемых зависимостей с теоретическими, полученными на основании трехмерной гидродинамической модели, в работе [2] сделан вывод, что на протяжении всей фотосферы вплоть до температурного минимума конвективные движения сохраняют свою колончатую структуру. В области температурного минимума скорость опускающихся элементов турбулентности преобладает над скоростью поднимающихся элементов. Это качественно может объяснить вышеуказанный наблюдаемый факт о смещении центра линии в красную, а крыльев — в фиолетовую сторону, и следовательно, наблюдаемую асимметрию профиля линии λ 532.4185 нм.

1. Костык Р. И., Хоменко Е. В. Влияние звуковых волн на профили спектральных линий в атмосфере Солнца: наблюдения и теория // Астрон. журн.—2002.—79, № 11.—С. 1027—1033.
2. Костык Р. И. Щукина Н. Г. Тонкая структура конвективных движений в фотосфере Солнца: Наблюдения и теория // Астрон. журн.—2004.—81, № 9.—С. 846—858.
3. Кули-Заде Д. М. Тонкая структура профилей фраунгоферовых линий в разрешенном и неразрешенном спектре Солнца // Вестник БГУ.—2002.—№ 2.—С. 72—100.
4. Кули-Заде Д. М. Программа для вычисления асимметрии профилей фраунгоферовых линий в спектрах Солнца и звезд // Вестник БГУ.—2004.—№ 2.—С. 158—165.
5. Delbouille L., Neven L., Roland G. Photometric Atlas of the solar spectrum from 3000 Å to 10 000 Å. — Lige, 1973.—241 p.
6. Hanslmeier A., Kuchera A., Rybak J., Wohl H. The location of Solar oscillations in the photosphere // Dynamic Sun / Eds A. Hanslmeier, M. Messerotti, A. Veronig. — Dordrecht: Kluwer, 2001.—P. 267—270.
7. Kostik R. I., Orlova T. V. On the asymmetry of selected Fraunhofer lines. II // Solar Phys.—1974.—36, N 2.—P. 279—285.
8. Kuli-Zade D. M., Basal M., Kandemir G. On the differential and total asymmetry of the Fraunhofers lines in the Solar spectrum // Kinematics and Physics of Celestial Bodies.—1995.—11, № 2.—С. 40—43.
9. Shchukina N. G., Trujillo J Bueno The NLTE Formation of iron lines used in Solar Polarimetry // Solar Phys.—1997.—172, N 1-2.—P. 117—124.
10. Teplitskaya R. B. The effect of short-periodic oscillations in the photosphere on the spectral line profile // Solar Phys.—1969.—6, N 1.—P. 18—27.

Поступила в редакцию 05.03.08