АНАЛИЗ ТОНКОЙ СТРУКТУРЫ ПРОФИЛЕЙ ФРАУНГОФЕРОВЫХ ЛИНИЙ В СПЕКТРЕ СОЛНЦА

Д. М. Кули-заде

Бакинский государственный университет
e-mail: ckulizade@bsu.az, ckulizade@yahoo.com

Предлагается новый количественный метод для анализа асимметрии профилей фраунгоферовых линий. Вводятся новые физические величины дифференциальной, интегральной, остаточной и относительной асимметрии, которые позволяют более подробно анализировать асимметрию профилей линий и их зависимость от атомных и фотосферных величин. Показывается, что интегральная и остаточная асимметрии профилей заметно растут с ростом интенсивности и уменьшаются с ростом оптической глубины образования линий. Впервые исследуется изменение дифференциальной, интегральной и остаточной асимметрий по диску Солнца.

ВВЕДЕНИЕ

Асимметрия профилей фраунгоферовых линий в спектре Солнца впервые была обнаружена Фойгтом [1] в 1955 году по линиям инфракрасного триплета кислорода. Однако асимметричность профилей фраунгоферовых линий в спектре Солнца окончательно была установлена в 1960–1962 гг. Хиггсом [2] на основе наблюдений с высоким спектральным разрешением. После применения новых спектральных приборов – быстросканирующих двойных монохроматоров и фурье-спектрометров высокой дисперсии и высокого разрешения [3–5] эта проблема стала предметом исследования многих авторов.

В первое время асимметрия профилей фраунгоферовых линий описывалась простым сравнением фиолетового и красного крыльев профилей линий. Несколько позже она стала характеризоваться биссектором – геометрическим местом середин хорд, соединяющих точки профиля линии с одинаковыми интенсивностями на фиолетовом и красном крыльях.

В дальнейшем наиболее обширные исследования асимметричности профилей слабых и умеренных фраунгоферовых линий в спектре центра диска Солнца методом биссектора были выполнены в работах [6–18].

Асимметрию профилей фраунгоферовых линий можно характеризовать также методом коэффициента асимметрии. Этот метод применялся многими. Мы отметим работу Костыка и его группы [8–10] в ГАО НАН Украины, где были определены коэффициенты асимметрии профилей около 130 фраунгоферовых линий слабой и средней интенсивности. Он получил, что с ростом интенсивности спектральных линий коэффициент асимметрии уменьшается и для сильных линий превращается в нуль.

Мы считаем, что уменьшение коэффициента асимметрии с ростом силы линий физически необъяснимо и, скорее всего, является ошибкой метода коэффициента асимметрии профилей линий.

Основные недостатки вышеперечисленных методов заключаются в том, что асимметрия профилей линий поглощения описывалась качественно, отсутствовала величина, характеризующая асимметрию всего профиля фраунгоферовой линии и невозможно было исследовать статистическую зависимость асимметрии профилей фраунгоферовых линий от атомных и фотосферных величин.

Для решения этой проблемы мы предложили новый количественный метод для описания и измерения асимметрий профилей фраунгоферовых линий [15–18]. Для этого мы ввели новые размерные величины, имеющие определенные физические значения. Эти величины дают возможность более подробно и, главное, количественно характеризовать асимметричность профилей фраунгоферовых линий в спектре Солнца и звезд.

НОВЫЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ И АНАЛИЗА АСИММЕТРИЙ ПРОФИЛЕЙ ЛИНИЙ

Для исследования асимметрии профилей линий мы предложили новый количественный метод и ввели новые размерные физические величины, характеризующие асимметричность профилей фраунгоферовых линий количественно [15–18]. Метод заключается в следующем:

Определим середину профиля линии на уровне полуширины $\Delta\lambda_{1/2}$ и через него проведем перпендикулярную к оси абсцисс (ось $\Delta\lambda$) линию. Далее на фиолетовом и красном крыльях профиля определим точки с одинаковой остаточной интенсивностью $r(\Delta\lambda_{vi})$ и $r(\Delta\lambda_{ri})$. Здесь $\Delta\lambda_{vi}$ и $\Delta\lambda_{ri}$ – расстояния от центра профиля линий на глубине $R(\Delta\lambda_i)$ для фиолетового и красного крыльев соответственно. Величину

$$\delta(R_i) = \Delta\lambda_{vi} - \Delta\lambda_{ri} \tag{1}$$

называем дифференциальной асимметрией. Она характеризует асимметричность профиля линии на данной глубине $R(\Delta\lambda_i)$.

Зависимость $\delta(R_i)$ от R показывает изменение дифференциальной асимметрии с глубиной профиля по величине и по знаку. При $\delta(R_i) > 0$ асимметрию называем фиолетовой, при $\delta(R_i) < 0$ – красной, а при $\delta(R_i) = 0$ профиль линии на данной глубине будет симметричным.

Площадь, образованную зависимостью $\delta(R_i)$ от R_i будем называть интегральной асимметрией. Очевидно, что интегральную асимметрию аналитически можно выразить как:

$$\Lambda = \int_0^{R_0} |\delta\,(R)|\, dR \approx \sum_i |\delta(R_i)|\, \Delta R_i. \tag{2}$$

Очевидно, что она определяет асимметрию всего профиля линии.

Разность положительной и отрицательной долей интегральной асимметрии

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

называем остаточной асимметрией. Она показывает преимущество фиолетовой или красной асимметрий.

Если $\Delta\Lambda > 0$, то преобладает фиолетовая асимметрия, если $\Delta\Lambda < 0$, то преобладает красная асимметрия, а если $\Delta\Lambda = 0$, то обе асимметрии имеют одинаковую силу.

Величину

$$\Lambda_0 = \frac{\sum |\delta(R_i)|\, \Delta R_i}{W} \tag{4}$$

мы называем относительной асимметрией, где W – эквивалентная ширина профиля линии. Она показывает, какую долю составляет интегральная асимметрия от эквивалентной ширины линии.

Если положительная доля интегральной асимметрии

$$\Lambda_+ = \sum_{\delta(R)>0} |\delta\,(R_i)|\, \Delta R_i = 0, \tag{5}$$

то профиль линии полностью характеризуется красной асимметрией, а если отрицательная доля интегральной асимметрии

$$\Lambda_- = \sum_{\delta(R)>0} |\delta\,(R_i)|\, \Delta R_i = 0, \tag{6}$$

то профиль линии полностью характеризуется фиолетовой асимметрией.

Таким образом, предложенный нами новый метод дает возможность более подробно описывать и исследовать асимметрию профилей фраунгоферовых линий в спектрах Солнца и звезд. В отличие от метода биссектора, в предложенном нами методе асимметрия профилей линий характеризуется количественными величинами, имеющими определенный физический смысл.

ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящее время предполагается, что асимметрия профилей фраунгоферовых линий в спектре Солнца связана с динамическими процессами в фотосфере. Если это в действительности так, то сильные линии должны подвергаться влиянию динамических процессов гораздо сильнее, чем слабые. Потому, что области образования сильных фраунгоферовых линий охватывают всю фотосферу и даже частично нижнюю хромосферу. Слабые же линии образуются в тонком слое нижних областей фотосферы. Следовательно, асимметрия на самом деле должна усиливаться с увеличением силы линий, что и дает предложенный нами новый количественный метод.

Результаты многих исследователей об уменьшении коэффициента асимметрии с увеличением эквивалентных ширин линий мы считаем ошибочным. Точнее говоря, это ошибка метода, которая не может учитывать изменения знака асимметрии внутри профиля линии. На самом деле, в пределах профиля данной линии асимметрия может неоднократно менять величину и знак. Поэтому красная асимметрия в одних глубинах профиля линии может компенсироваться фиолетовой асимметрией в других глубинах. В результате асимметрия профиля линии уменьшается, и даже асимметричная сильная линия может оказаться почти симметричной.

В предложенном нами методе этот факт учитывается, т. е. при определении интегральной асимметрии профилей фраунгоферовых линий складываются модули ее положительных и отрицательных долей, а не сами доли.

Интегральная и остаточная асимметрии профилей линий, как и следовало ожидать из физических рассуждений, значительно растет с увеличением интенсивности линий. С другой стороны, с увеличением средней эффективной глубины образования интегральная, остаточная и относительная асимметрии профилей линий заметно уменьшаются. Это находится в полном соответствии с результатом об увеличении асимметрии с интенсивностью линий.

Наши исследования показывают, что асимметрия профилей фраунгоферовых линий заметно изменяется по диску Солнца. Характер и величина изменения параметров асимметрии зависят от глубины профиля линии.

[1] *Voigt H. H.* Drei-Storm-Model der Sonnenphotosphare und Asymmetrie der Linien des infraroten Sauertoff-Tripletts // Z. Astrophys. – 1956. – **40**, N 3. – P. 157–190.

[2] *Higgs L. A.* The solar red-shift // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 1960.– **121**, N 5. – P. 421–435.

[3] *Delbouille L., Neven L., Roland G.* Photometric Atlas of the solar spectrum for λ3000 to 10000 Å. – Liege, 1973. – 241 p.

[4] *Beskers J. M., Bridges C. A., Gillam L. B.* A high resolution spectral atlas of the solar irradiance from 380 to 700 nanometrs. – Sacramento Peak Observ., 1976.– 175 p.

[5] *Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L.* Solar flux atlas from 296 to 1300 nm. – New Mexico, National Solar Observatory, 1984.– 239 p.

[6] *Dravins D., Lindergen L., Nordlund A.* Solar granulation: influence of convection on spectral line asymmetries and wavelength shifts // Astron and Astrophys. – 1981. – **96**, N 1–2. – P. 345–364.

[7] *Dravins D.* Photospheric spectrum line asymmetries and wavelength shifts // Ann. Rev. Astron. and Astrophys. – 1982. – **20**. – P. 61–89.

[8] *Kostik R. I., Orlova T. V.* On the asymmetry of selected Fraunhofer lines. II. // Solar Phys. – 1974. – **36**. – P. 279–285.

[9] *Kostik R. I., Orlova T. V.* On the asymmetry of selected Fraunhofer lines. V. // Solar Phys. – 1977. – **53**. – P. 353–358.

[10] *Костык Р. И.* Тонкая структура фраунгоферовых линий и строение фотосферы Солнца // Астрон. журн. – 1985. – **62**, № 1. – С. 112–123.

[11] *Balthasar H.* Asymmetries and wavelength of solar spectral lines and the solar rotation determined from Fourier-transform spectra // Solar Phys. – 1984. – **93**, N 2. – P. 219–241.

[12] *Balthasar H., Wöhl H.* Limb Effekt und Asymmetrien solaren Spektral-linien zwischen 4800 und 6500 Angstrom in Fourier-transform-spektren. – Mitt. Astron. Ges., 1982. – N 55. – P. 71.

[13] *Атрощенко И. Н., Гадун А. С., Костык Р. И.* Моделирование конвективных движений в оболочке Проциона. II. Асимметрия спектральных линий // Астрофизика. – 1989. – **31**, Вып. 3. – С. 589–600.

[14] *Atroshchenko I. N., Gadun A. S., Kostik R. I.* Asymmetry of absorption lines in the solar and Procyon spectra // Solar and Stellar Granulation: NATO ASI Series. – 1989. – **263**. – P. 135–143.

[15] *Kuli-Zade D. M., Basal M.* The quantitative method for line asymmetry determination // Tr. J. of Physics. – 1994. – **18**, N 9. – P. 926–929.

[16] *Kuli-Zade D. M., Basal M., Kandemir G.* On the differential and total asymmetry of the Fraunhofer lines in the solar spectrum // Кинематика и физика небес. тел. – 1995. – **11**, № 2. – С. 51–56.

[17] *Кули-Заде Д. М.* О тонкой структуре профилей линий инфракрасного триплета кислорода в спектре Солнца // Вестник БГУ. – 1998. – № 1. – С. 83–88.

[18] *Kuli-Zade D. M.* Intensity dependence of the asymmetry of Fraunhofer line profiles // Astron. Rep. – 2001. – **45**, N 1. – P. 75–78.