

УДК 524.316-36

Я. В. Павленко

¹Главная астрономическая обсерватория НАН Украины,
03680 Киев ГСП, ул. Академика Заболотного 27

Синтетические спектры и содержания элементов в атмосферах F—K-звезд

Обсуждаются методические проблемы определения содержания элементов в атмосферах звезд спектральных классов F—K методом синтетического спектра. Предложен алгоритм, который основан на определении содержания элементов посредством минимизации суммы разностей остаточных потоков $r_v = F_v/F_v^{\text{cont}}$ в наблюдаемом и рассчитанном синтетических спектрах. Эта схема реализована в программе ABEL8 и пригодна для решения широкого круга задач. Приводятся результаты тестирования методики при моделировании области $\lambda\lambda$ 669—672 нм в спектре Солнца (G2 V) и быстро вращающегося ($V \cdot \sin i = 90$ км/с) красного карлика (K2 V) из системы V471 Tau.

СИНТЕТИЧНІ СПЕКТРИ І ВМІСТ ЕЛЕМЕНТІВ В АТМОСФЕРАХ G—K-ЗІРОК, Павленко Я. В. — Обговорюються методичні проблеми визначення вмісту елементів в атмосферах зір спектральних класів F—K методом синтетичних спектрів. Запропоновано алгоритм, який базується на визначенні вмісту елементів з використанням процедури мінімізації суми різниць залишкових потоків $r_v = F_v/F_v^{\text{cont}}$ в спостережуваному і синтетичному спектрах. Така схема розрахнків реалізована в програмі ABEL8 і може використовуватись для розв'язку широкого кола задач. Наведено результати тестування методики при моделюванні $\lambda\lambda$ 669—672 нм в спектрах Сонця (G2 V) та червоного карлика (K2 V) з швидким обертанням ($V \cdot \sin i = 90$ км/с) з системи V471 Tau.

SYNTHETIC SPECTRA AND ABUNDANCES OF ELEMENTS IN THE ATMOSPHERES OF F—K STARS, by Pavlenko Ya. V. — The problems of determining the abundances of elements in the atmospheres of F-K stars by the synthetic spectrum method are discussed. The algorithm used is based on the minimization of differences of the residual fluxes $r_v = F_v/F_v^{\text{cont}}$ in observed and synthetic spectra. It is realized in the program ABEL8 and is suitable for a wide range of astrophysical tasks. Results of the use of the procedure for modeling $\lambda\lambda$ 669—672 mn in the spectra of the Sun (G2 V) and the fast rotating ($V \cdot \sin i = 90$ km/s) red dwarf (K2 V) from the system V471 Tau are presented.

ВВЕДЕНИЕ

Введение в строй новых мощных телескопов повышает требования к разработке достоверных методов анализа звездных спектров, содержащих множество линий. На сегодняшний день метод синтетических спектров широко используется при количественном анализе звездных спектров. При всей простоте этого метода область его применения заметно шире, чем у других методов, основанных на анализе эквивалентных ширин (метод кривых роста или моделей атмосфер). Причина этого очевидна — число неблендированных линий относительно невелико даже в спектре Солнца [3], при этом в реальных звездных спектрах, получаемых при более низком (по сравнению с Солнцем) отношении сигнал/шум, часть слабых, но относительно чистых линий оказывается непригодными для тонкого анализа.

С другой стороны, современные наблюдения поставляют материал достаточно высокого ($R = \lambda/\Delta\lambda > 100000$) качества, чтобы проводить исследования профилей линий поглощения на предмет определения изотопных отношений, поля макротурбулентных скоростей или вращения звезд, что не представляется возможным в рамках, например, метода кривых роста.

Сам метод синтетических спектров окончательно сформировался в 1970-х гг., с тех пор были написаны ряд программ для расчета синтетических спектров: WIDTH [12], KONTUR [4], SPANSAT [1], ABEL6, ABEL7 [6], SYNTHET [13], PHOENIX [8], SYNTHEL [5], STARSP [18], WITA612 [7] и др.

Эти комплексы программ были ориентированы на решение разных задач. Однако при их написании использовалась одна и та же система физических формул, описывающих состояние вещества звездных атмосфер и переноса излучения в них. Поэтому их применение в принципе должно приводить к сравнимым результатам. Определенные различия могут возникнуть вследствие использования различных входных физических данных, будь то суммы по состояниям атомов и молекул, сечения поглощения излучения в континууме или различия в данных для отдельных линий поглощения (длины волн, силы осцилляторов, потенциалы возбуждения нижних уровней или константы затухания).

Применение метода синтетических спектров подразумевает идентификацию и анализ возможно большего числа профилей линий и/или их бленд. Как правило, такой анализ оказывается довольно трудоемким. Поэтому практически сразу со времени появления метода синтетических спектров проводились попытки автоматизации процедуры численного анализа спектров. Применение численных вариационных методов при сравнении рассчитанных и наблюдаемых спектров позволило определить совокупность содержаний элементов даже в том случае, когда они оказываются связанными посредством системы уравнений ионизационно-диссоциативного равновесия (см. [6]).

Ниже описывается более простой алгоритм определения содержания отдельных элементов в атмосферах F—K-звезд при помощи методов синтетических спектров. Необходимость его разработки возникла в процессе анализа массовых наблюдений двойных систем, состоящих из звезд-двойников (аналогов) Солнца, с целью обнаружения в них аномалий содержаний химических элементов [15]. Как оказалось, некоторые двойные системы состоят из звезд, содержания лития в атмосферах которых существенно различаются (до 1 dex), что невозможно объяснить с точки зрения традиционных представлений о об их эволюции. Некоторые исследователи связывают с наличием планет у части из них.

МЕТОДИКА РАСЧЕТОВ И АЛГОРИТМ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЙ ЭЛЕМЕНТОВ

Использованная здесь методика расчетов синтетических спектров описана в ряде работ [7, 17]. Расчеты проводятся в рамках классических предположений: ЛТР, отсутствие стоков и источников энергии в плоскопараллельной среде; при решении уравнения переноса излучения учитывались как процессы поглощения фотонов, так и их рассеяния. Поскольку алгоритм определения содержания элементов отличается от просто расчетов синтетических спектров, программа, в которой он реализован, получила название ABEL8. Расчет синтетических спектров входит в ABEL8 как один из этапов процедуры определения содержаний. В принципе эта программа продолжает серию программ ABEL6 и ABEL7, в которых были реализованы вариационные методы определения содержаний C, N, O в атмосферах звезд поздних спектральных классов.

Наблюдения, как правило, дают распределения энергии по спектру (и/или эшеле-порядку), которые затем приводятся к стандартному виду в остаточных потоках или интенсивностях. Именно спектры в остаточных потоках $r_\nu = F_\nu / F_\nu^{\text{cont}}$ с уверенной привязкой к шкале длин волн являются важной частью входной информации для программы ABEL8. Понятно, что наличие в наблюдаемом спектре даже небольших систематических или дифференциальных сдвигов линий приводит к проблемам при использовании любых алгоритмов численного анализа. В ABEL8 автор реализовал относительно простую идею.

Пусть имеется наблюдаемый спектр в остаточных потоках $X(w_j)$, заданный на сетке длин волн w_j , $j = 1, N_j$. Рассчитаем для сетки содержаний a_k , $k = 1, N_k$ ряд теоретических спектров $y(w_i)$ на сетке длин волн w_i , $i = 1, N_i$ (как правило, $N_i > N_j$). После свертки этих теоретических спектров с инструментальным профилем (и/или профилем вращения) получаем массив наблюдаемых остаточных потоков R_i . Затем рассчитываются величины $S(a_k) = \sum [(X(w_j) - R(w_j))]^2$; величины $R(w_j)$ получаем посредством интерполяции R_i в узлах сетки длин волн наблюдений w_j .

Искомые содержания данного элемента получаем из условия минимума функции S . Для примера на рис. 1 показана зависимость S от содержания элементов в атмосфере Солнца. В этом случае расчеты производились для модели атмосферы Солнца HOLMU [10] и списка линий VALD [11]. Рассчитанные спектры в интервале длин волн $\lambda\lambda = 669\text{--}673$ нм сравнивались с атласом Куруца и др. [14]. На этом участке солнечного спектра находятся линии разной интенсивности нескольких элементов: Ca, Fe, Al, Si. В процессе работы силы осцилляторов gf некоторых линий были изменены с использованием данных других авторов (см. ниже). Это позволило улучшить согласие наблюдаемых и синтетических спектров. Програм-

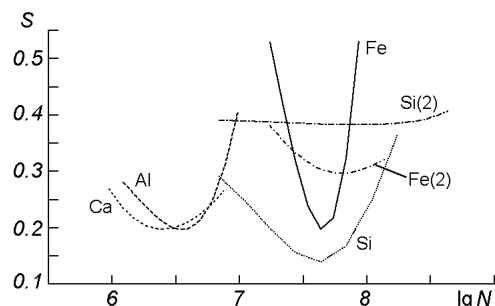


Рис. 1. Зависимость значений величины S от содержания элементов для модели атмосферы Солнца HOLMU [10]; Fe(2) — кривая для случая V471 Tau, Si(2) — случай отсутствия линий Si

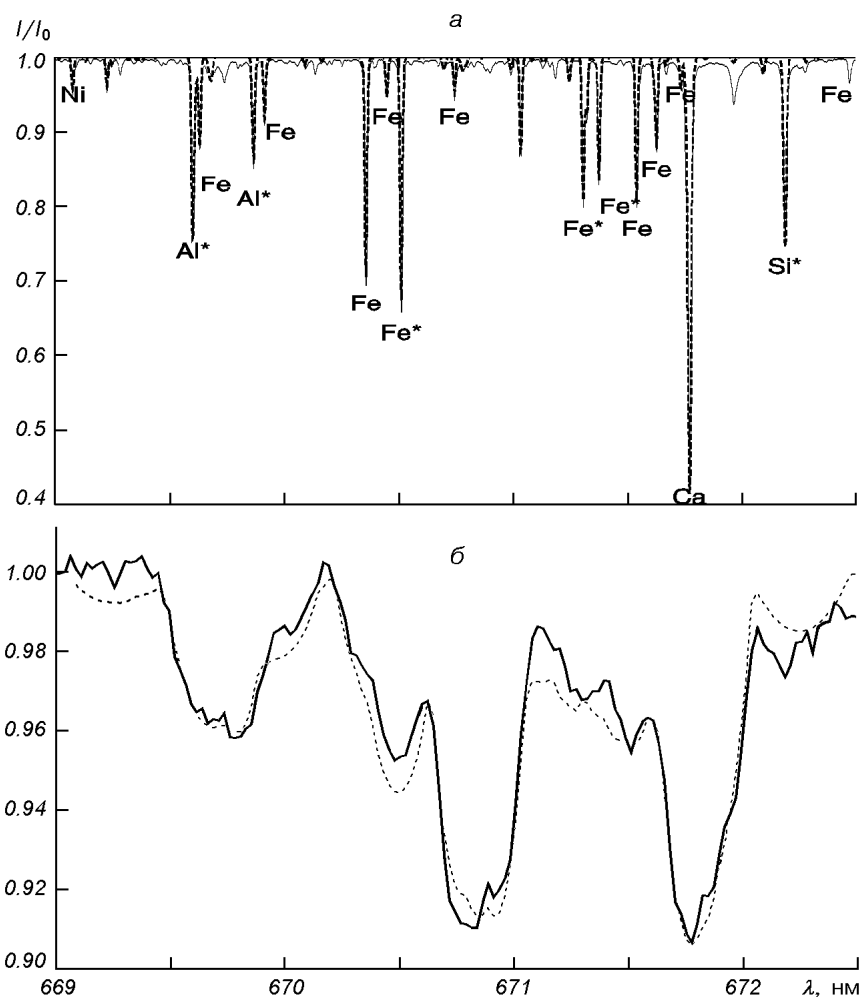


Рис. 2. Сравнение наблюдаемых спектров Солнца (вверху) и V471 (внизу) с синтетическими при минимуме функции S

ма ABEL8 была применена для определения содержаний. Собственно, в этом случае эта процедура была применена скорее для проверки величин сил осцилляторов в списке VALD [11], поскольку содержание элементов в атмосфере Солнца достаточно хорошо известно. Как и ожидалось, из условия $\min S$ были получены «солнечные» содержания, которые совпали с данными [9]. Сравнение рассчитанных спектров с наблюдаемыми в спектре Солнца [15] показано на рис. 2.

Отметим, однако, несколько моментов.

1. Естественно, описываемая методика может быть использована для верификации списков линий. В нашем случае были отмечены проблемы с линиями алюминия $\lambda\lambda$ 669.678, 669.867 нм. В списке VALD для них даны по всей видимости, все же ошибочные gf . Для получения реалистичных интенсивностей линий алюминия в солнечном спектре мы использовали значения gf из работы [3].

2. При каждом изменении задаваемых содержаний элементов в ABEL8 производится перерасчет системы уравнений ионизационно-диссоциативно-

го равновесия. При этом изменение содержаний «примесных» элементов (таких как литий) практически не сказывается на величине S , которая в принципе формируется как сумма невязок по всем линиям поглощения. С другой стороны, при изменении содержания элементов — доноров свободных электронов ситуация несколько усложняется. В этом случае результирующий эффект зависит как от изменения интенсивностей самих линий поглощения данного элемента, так и от изменений непрозрачности, обусловленного изменениями его вклада в электронную плотность. На рис. 1 показан эффект изменения содержания натрия в солнечной атмосфере. Как уже отмечалось выше, линии натрия на участке $\lambda\lambda$ 669.0—672.0 нм практически не проявляются.

Этот алгоритм может применяться и при исследовании спектров, уширенных вращением. В рамках этой работы в качестве иллюстрации возможностей нашей методики был воспроизведен участок спектра V471 Tau. Наблюдаемый спектр использовался в работе [16] для определения содержания лития в атмосфере этого компонента двойной системы в Гидах, состоящей из красного карлика (K2V) и белого карлика (DA2). При этом спектр красного карлика уширен вращением $V \cdot \sin i = 90$ км/с.

Использовалась рассчитанная автором модель атмосферы из работы [16] и тот же список атомных линий. Результаты воспроизведения наблюдаемого спектра также приведены на рис. 2. Вращение в этом случае учитывалось по методике, описанной в книге [2]. «Лучшее описание» спектра красного карлика из системы V471 (которое в этом случае соответствует минимуму S) было получено с содержаниями элементов, которые приведены в таблице.

Содержания элементов в атмосфере Солнца и V471 Tau

Элемент	Z	$\lg N_{\odot}$ [9]	$\lg N_{\odot}^{\text{ABEL8}}$	$\lg N_{\text{V471}}^{\text{ABEL8}}$
Li	3	—	—	-9.60
Al	13	-5.55	-5.55	-5.65
Si	14	-4.40	-4.40	-4.00
Ca	20	-5.66	-5.66	-5.46
Fe	26	-4.40	-4.40	-4.20

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Таким образом, в рамках этой работы показана возможность применения относительно простого алгоритма для тонкого анализа звездных спектров с целью определения содержания элементов в атмосферах звезд поздних спектральных классов. Явным преимуществом этой методики является то, что оценка качества сравнения рассчитанных и наблюдаемых спектров производится на основе применения вариационных принципов. При определении содержаний элементов в этом случае используется информация о всех линиях поглощения данного элемента, как относительно чистых, так и в разной степени блендированных. Естественно, при этом остаются обычные требования к качеству и достоверности используемых списков линий, расчета характеристик их уширения. Кроме этого, здесь требуется очень точное воспроизведение шкалы длин волн в наблюдаемом и рассчитанном спектре. Наш опыт показал, что даже небольшое смещение длин волн

весьма отрицательно сказывается на результате. Для минимизации последствий в ABEL8 предусмотрена возможность сдвига двух спектров относительно друг друга, постоянная сдвига по длинам волн Δ определяется в ABEL8 из условия минимума зависимости $S = S(\Delta)$. В худшем случае наличия дифференциальных сдвигов приходится ревизовать шкалу длин волн при помощи стандартных пакетов обработки наблюдаемых данных: IRAF или DESH20.

Определенные (но вполне понятные) проблемы возникают при анализе спектров с низким отношением S/N . В этом случае, помимо проблем проведения непрерывного спектра, требуется решить задачу отбора линий достаточной интенсивности. Как известно, решение обеих задач основано преимущественно на эвристических принципах.

Таким образом, реализованный в программе ABEL8 алгоритм количественного анализа звездных спектров требует критического отбора большого массива входной информации. Количество свободных параметров задачи должно быть сведено к минимуму. Особые требования при этом предъявляются к используемым спискам линий — при определении содержаний параметры линий поглощения должны быть определены с возможно большей точностью. С другой стороны, фундаментальные характеристики звезд должны быть определены независимыми методами.

Естественно, эти ограничения сужают область применения программы. Тем не менее, программа ABEL8 с успехом была использована для определения содержания элементов в атмосферах звезд спектральных классов F—K. Программа работает под различными операционными системами (LINUX, DOS, WINDOWSxx) и может быть использована (как исполняемый модуль) всеми заинтересованными пользователями.

Финансовая поддержка исследований частично обеспечивалась программой Small Research Grant Американского астрономического общества. Автор благодарит Э. Мартина за предоставление наблюдаемых спектров V471 Tau в численном виде и Ю. Любчика за сотрудничество, а также Н. Щукину за ряд полезных замечаний.

1. Гадун А. С., Шеминова В. А. SPANSAT: Программа расчета профилей спектральных линий поглощения в звездных атмосферах в ЛТР приближении. — Киев, 1987.—37 с.— (Препринт / АН Украины. Ин-т теор. физики; 88-87Р).
2. Грей Д. Наблюдения и анализ звездных атмосфер. — М.: Мир, 1980.—496 с.
3. Гуртовенко Э. А., Костык Р. И. Фраунгоферов спектр и система солнечных сил осцилляторов. — Киев: Наук. думка, 1989.—196 с.
4. Леушин В. О точности определения химического состава звезд методом моделей атмосфер // Астрофизика.—1986.—25, № 1.—С. 103—118.
5. Любимков Л. С. Химический состав звезд: метод и результаты анализа. — Одесса: Астропринт, 1995.—323 с.
6. Павленко Я. В. Определение содержаний С, N, O в атмосферах звезд поздних спектральных классов. Экстремальная задача // Астрон. журн.—1991.—68, вып. 2.—С. 431—434.
7. Павленко Я. В. Линии лития в спектрах поздних М-карликов: случай UX Tau C // Астрон. журн.—2000.—77, № 4.—С. 254—263.
8. Allard F., Hauschildt P. Model atmospheres for M(sub)dwarf stars. I. The base model grid // Astrophys. J.—1995.—445, N 1.—P. 433—450.
9. Anders E., Grevesse N. Abundances of elements: Meteoritic and solar // Geochimica et Cosmochimica Acta.—1989.—53, N 1.—P. 197—214.
10. Holweger H., Muller E. A. The photospheric barium spectrum: solar abundances and collision of Ba II lines with hydrogen // Solar Phys.—1974.—39, N 1.—P. 19—27.
11. Kupka F., Piskunov N., Ryabchikova T. A., et al. VALD-2: Progress of the Vienna Atomic Line Data Base // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.—1999.—138.—P. 119—133.
12. Kurucz R. L. Model atmospheres for G, F, A, B stars // Astrophys. J. Suppl. Ser.—1979.—40, N 2.—P. 1—199.

13. *Kurucz R. L.* Cambridge, MA: Smithsonian Astrophysical Observatory, 1993.—CD ROM N 9.
14. *Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L.* Solar flux atlas from 296 to 1300 nm // National solar obs. atlas. — Cambridge: Harvard Univ., 1984.—N 1.
15. *Martin E., Basri G., Pavlenko Ya., Lyubchik Yu.* Cyg 16 phenomena // *Astron. J.*—2002.
16. *Martin E. L., Pavlenko Y., Rebolo R.* Common envelope evolution and Li in V471 Tauri // *Astron. and Astrophys.*—1997.—**326**, N 2.—P. 731—735.
17. *Pavlenko Ya. V., Rebolo R., Martin E. L., Garcia Lopez G.* Formation of lithium lines in atmospheres of cool dwarfs // *Astron. and Astrophys.*—1995.—**303**, N 3.—P. 807—818.
18. *Tymbal V. V.* Model atmospheres and spectrum synthesis // *ASP Conf. Ser.*—1996.—**108**.—P. 198—202.

Поступила в редакцию 01.10.01