

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРАХ ЗВЕЗД К-ГИГАНТОВ СКОПЛЕНИЯ ГИАД

*Н. С. Комаров, Т. В. Мишенина, В. Е. Панчук*

Для четырех К-гигантов из скопления Гиады по спектрограммам с обратной дисперсией 15 Å/мм определено содержание кислорода. Использовалась запрещенная линия [OI] 6300.30 Å, влияние соседних линий учтено методом синтетических спектров. В пределах ошибок метода содержание кислорода в атмосферах исследованных звезд совпадает с солнечным.

The oxygen abundance is determined for the four K-giants from the Hyades cluster using the spectra with a reciprocal dispersion of 15 Å/mm. The forbidden [OI] 6300.30 Å line is used, the influence of neighbour lines is taken into account using the method of synthetic spectra. Within the methodical errors, oxygen abundance in the atmospheres of the investigated stars is equal to the solar one.

Содержание элементов CNO-группы в атмосферах звезд высокой светимости является важным и чувствительным тестом теории звездной эволюции. Собственные, исходные концентрации легких элементов в веществе звезды могут быть существенно изменены вследствие CNO-цикла, а процесс конвективного перемешивания вещества может привести к возможности обнаружения этих изменений посредством спектроскопических наблюдений. В общем случае отличия в содержаниях легких элементов от солнечного химического состава определяются типом населения, к которому принадлежит звезда, степенью развития CNO-цикла и степенью обмена переработанного вещества с веществом звездной атмосферы. Ясно, что для разделения этих факторов необходимо выполнить комплексное спектроскопическое исследование совокупности звезд разного возраста и разной светимости.

В этом плане наиболее удобными в методическом отношении являются К-гиганты диска и гало. Они занимают широкий диапазон возрастов и металлическихностей, а высокая светимость этих звезд позволяет выполнять исследования химического состава на значительных расстояниях от Солнца. Основные затруднения здесь связаны с методами определения эволюционной стадии одиночных звезд. Так, например, величина ускорения силы тяжести в атмосфере  $g$ , являющаяся основным спектроскопическим индикатором эволюции звезды вдоль ветви гигантов, определяется с невысокой точностью, и разные способы определения  $g$  дают систематически различающиеся значения. В области ветви гигантов линии одинакового возраста расположены на диаграмме светимость—температура достаточно тесно, поэтому ошибки определения эффективной температуры звезд, формально доведенные до значений  $\Delta T_e \approx 100$  К [1], логически противоречивых явлению конвективного переноса, могут повлиять на точность определения возраста.

Частично преодолеть эти затруднения можно, наблюдая К-гиганты в скоплениях, где, используя гипотезу об одновременном образовании звезд, возраст К-гигантов можно оценить по возрасту звезд верхней части главной последовательности. Но в этом случае возникает новое затруднение — для подавляющего числа рассеянных скоплений диска Галактики спектроскопические исследования с разрешением, достаточным для анализа отдельных линий нейтральных атомов или линий вращательного спектра легких молекул, крайне трудоемки или невозможны. Здесь можно применять метод спектрального синтеза,

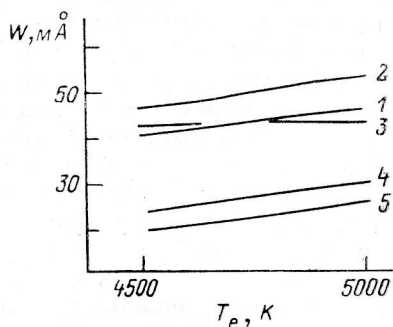
который позволяет анализировать бленды интересующих нас линий, не разделенных при использованном спектральном разрешении. Такой метод безусловно нуждается в дополнительном тестировании получаемых результатов путем наблюдения части исследуемых звезд с возможно более высоким спектральным разрешением.

В качестве объектов, наиболее пригодных для задачи изучения химического состава по спектрограммам различного спектрального разрешения, мы выбрали четыре К-гиганта в ближайшем рассеянном скоплении — Гидах. Для этого скопления имеются как независимые определения металличности [2] и химического состава [3], выполненные для звезд низкой светимости, так и ряд работ по исследованию непосредственно химического состава К-гигантов, список этих работ можно найти в [4]. В работе [5] мы описали метод и привели результаты спектроскопического определения металличности К-гигантов Гида по спектрограммам с обратной дисперсией  $15 \text{ \AA}/\text{мм}$ . Полученные при этом параметры моделей атмосфер применим ниже для оценки содержания кислорода методом синтетических спектров.

**Спектроскопический материал, параметры атмосфер.** Характеристики исследованных звезд приведены в табл. 1 работы [5]. Там же дана информация

Зависимость эквивалентной ширины линии [OI] 6300.30 от эффективной температуры  $T_e$ , рассчитанная методом моделей атмосфер для случая солнечной металличности ( $[\text{Fe}/\text{H}]=0.0$ ) и набора параметров  $\lg g$ ,  $\epsilon(\text{C})/\epsilon(\text{O})$  и  $[\text{O}/\text{Fe}]$ .

	$\lg g$	$\epsilon(\text{C})/\epsilon(\text{O})$	$[\text{O}/\text{Fe}]$
1	2.25	0.6	0.0
2	2.25	0.6	0.3
3	2.25	0.28	0.0
4	2.25	0.6	-0.3
5	3.0	0.6	0.0



о материале наблюдений, способах его редукции и отождествления спектральных линий. В данной работе для определения содержания кислорода мы использовали участки спектров, включающие запрещенную линию [OI] 6300.30  $\text{\AA}$ . На спектрограммах со спектральным разрешением около  $0.3 \text{ \AA}$  эта линия составляет бленду с линией ионизованного скандия ScII 6300.70  $\text{\AA}$ . Используя данные о кривой распространенности химических элементов в атмосферах исследуемых звезд из [5], мы можем достаточно точно вычислить вклад соседних линий в рассматриваемую бленду. Необходимые для этого силы осцилляторов взяты из [6, 7].

Все использованные разновидности методов определения эффективной температуры  $T_e$ , ускорения силы тяжести в атмосфере  $g$  перечислены в [5]. В отличие от [5] величину микротурбулентной скорости  $\xi_t$  мы определили из условия независимости содержания железа  $\epsilon(\text{Fe})$  от эквивалентной ширины  $W$  используемой линии нейтрального железа. Новое значение  $\xi_t=1.8 \text{ км/с}$  на  $0.1 \text{ км/с}$  меньше  $\xi_t$ , определенной в [5] методом кривых роста, поэтому мы по-прежнему пользовались моделями атмосфер из [8], где учет влияния линий поглощения на структуру атмосферы выполнен при  $\xi_t=2 \text{ км/с}$ . Среднее значение эффективной температуры исследуемых звезд  $T_e=(4920 \pm 20) \text{ K}$ , среднее значение ускорения силы тяжести  $\lg g=2.75 \pm 0.03$ , что и обусловило необходимость расчетов синтетических спектров для моделей атмосфер со следующими параметрами:  $T_e=5000$  и  $4500 \text{ K}$ ,  $\lg g=3.0$ ,  $2.25$  и  $1.5$  и солнечным содержанием химических элементов. Параметрами расчета синтетических спектров являлись также содержания кислорода и углерода, а именно, вычисления проводились для значений  $\epsilon(\text{C})/\epsilon(\text{O})=0.6$  и  $0.28$  и  $\epsilon(\text{O})/\epsilon(\text{Fe})=1$ ,  $2$  и  $0.5$ . После расчета синтетического спектра в диапазоне  $\lambda 6297-6304 \text{ \AA}$  мы можем определить эквивалентную ширину интересующей нас детали спектра как функцию  $T_e$ ,  $g$ ,  $\epsilon(\text{O})$ ,  $\epsilon(\text{C})$ ,  $\epsilon(\text{Fe})$ .

**Обсуждение результатов.** На рис. 1 приведены зависимости  $W$  исследуемой линии от эффективной температуры  $T_e$  для набора параметров  $\lg g$ ,  $\varepsilon(\text{O})/\varepsilon(\text{Fe})$  и  $\varepsilon(\text{C})/\varepsilon(\text{O})$ . Видно, что в интересующем нас интервале  $T_e$  эквивалентная ширина линии кислорода изменяется незначительно, следовательно, дисперсия  $\sigma T_e = \pm 150 \text{ K}$  практически не скажется на результате определения содержания кислорода  $\varepsilon(\text{O})$ . Изменение отношения  $\varepsilon(\text{C})/\varepsilon(\text{O})$  в 2 раза также практически не изменяет  $W[\text{OI}]$ , здесь под изменением отношения  $\varepsilon(\text{C})/\varepsilon(\text{O})$  мы понимаем изменение  $\varepsilon(\text{C})$ , так как величина  $\varepsilon(\text{O})$  является искомой. Низкая чувствительность результатов к содержанию углерода объясняется тем, что при  $\varepsilon(\text{C})/\varepsilon(\text{O}) < 1$  практически все атомы углерода связаны в молекулах  $\text{CO}$  (при низких температурах), и для формирования линии  $[\text{OI}]$  остается достаточное количество свободного кислорода. При более высоких температурах, т. е. в более глубоких слоях атмосферы, концентрация молекул  $\text{CO}$  падает и концентрации атомов углерода и кислорода изменяются пропорционально плотности вещества. Изменение  $\lg g$  от 2.25 до 3.0, почти не нарушая ход зависимости  $W$  от  $T_e$ , приводит к уменьшению эквивалентной ширины  $W[\text{OI}]$  вдвое. Прежде чем сделать вывод о точности определения  $\varepsilon(\text{O})$ , заметим следующее.

а) Ошибка средней по четырем К-гигантам величины  $\lg g$  равна 0.03 dex, если  $g$  определяется одним из методов, например из условия ионизационного равновесия. Если сравнивать методы определения  $g$  между собой, то неопределенность возрастает до 0.3 dex. Формально принимая веса перечисленных в работе [5] методов определения  $g$  равными, получим  $\sigma \lg g = 0.23$ . Это приводит к ошибке определения содержания кислорода  $\sigma \lg \varepsilon(\text{O}) = 0.15$ .

б) Второй причиной, определяющей точность вычисления  $\varepsilon(\text{O})$  данным методом, является вклад в рассматриваемую бленду, вносимый линией ионизованного скандия. Если этот вклад постоянный для звезд данного типа населения, а его величина определена предварительно путем исследования других линий скандия, то ошибки в определении величины  $\sigma \lg \varepsilon(\text{Sc}) = 0.15$ , также связанные с различием в  $\lg g$ , определенных разными методами, не следует суммировать с ошибками определения содержания кислорода, как величины, связанные через  $\lg g$ . Исследования кривой распространенности химических элементов в атмосферах звезд Гиад [3, 5] подтверждают гипотезу о неизменности химического состава по элементам, более тяжелым, чем элементы CNO-группы.

в) Третьим, вероятным источником ошибок  $\sigma \lg \varepsilon(\text{O})$  является ЛТР-приближение, применяемое к анализу запрещенной линии. Действительно, в этом случае необходимо учитывать как столкновительные, так и радиативные переходы. Кроме того, справедливость ЛТР-приближения для атмосферы гиганта в целом тесно связана со светимостью звезды. Без детального изучения этих обстоятельств трудно согласиться с выводом работы [9], где корреляция содержания кислорода и светимости звезды и корреляция  $\varepsilon(\text{O})$  с  $\varepsilon(\text{Fe})$  интерпретируется как следствие эволюционной переработки химического состава.

Результаты исследования содержания железа, скандия и кислорода в атмосферах К-гигантов Гиад

Звезда	$T_e \pm \sigma$	$\lg g \pm \sigma$	[Fe/H]	[Sc/H]	[O/Fe]		
					Авторы	[10]	[11]
$\gamma$ Tau	$4940 \pm 135$	$2.73 \pm 0.27$	0.11	-0.14	-0.25	-0.02	-0.3
$\delta$ Tau	$4925 \quad 90$	$2.72 \quad 0.23$	0.00	-0.05	-0.19	-0.04	
$\varepsilon$ Tau	$4900 \quad 130$	$2.74 \quad 0.23$	0.09	0.00	-0.08	-0.14	
$\theta^1$ Tau	$4920 \quad 90$	$2.80 \quad 0.21$	0.02	0.00	-0.01	-0.03	-0.3

В таблице мы приводим результаты определений содержания кислорода методом синтетических спектров, содержания железа и скандия методом моделей атмосфер, а также результаты определения содержания кислорода, выполненные в [10, 11] по спектрограммам более высокого спектрального разрешения. Можно сделать вывод, что содержание кислорода в атмосферах К-гигантов Гиад в пределах ошибок метода совпадает с солнечным.

### Литература

1. Gratton G. R., Ortolani S. Metal abundances in 26 halo stars // *Astron. Astrophys.* 1984. 137. P. 6—16.
2. Клочкова В. Г., Панчук В. Е. Спектроскопическое определение металличности F-карликов в рассеянных скоплениях // *Письма в Астрон. журн.* 1986. 12, № 6. С. 446—451.
3. Клочкова В. Г., Панчук В. Е. Кривая распространенности химических элементов в атмосферах F-карликов // *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*. 1988. 26. С. 14—26.
4. A catalogue of Fe/H determinations, 1984 edition / G. Cayrel, C. Bentolila, B. Hauck, A. Duquennoy // *Astrophys. J. Suppl. Ser.* 1985. 59. P. 145—186.
5. Мишенина Т. В., Панчук В. Е., Комаров Н. С. Химический состав K-гигантов Гиад // *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*. 1986. 22. С. 13—16.
6. A model-atmosphere analysis of the spectrum of Arcturus (basic spectroscopic data) / R. Mäcke, R. Griffin, R. Griffin, H. Holweger // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1975. 19. P. 303—349.
7. Kurucz R. L., Peutremann E. A table of semiempirical gf values // *Smithsonian Astrophys. Observ. Special Rep.* 1972. Nr 362.
8. A grid of model atmospheres for metal-deficient giant stars. II / R. A. Bell, K. Eriksson, B. Gustafsson, A. Nordlund // *Astron. Astrophys. Suppl. Ser.* 1976. 23. P. 37—95.
9. Gratton R. G. Studies on the spectra of K-giants. III. Carbon, nitrogen and oxygen abundances // *Astron. Astrophys.* 1985. 148. P. 105—114.
10. Lambert D. L., Ries L. M. Carbon, nitrogen and oxygen abundances in G and K-giants // *Astrophys. J.* 1981. 248. P. 228—248.
11. Carbon nitrogen and oxygen abundances in G8—K3 giant stars / P. Kjärgaard, B. Gustafsson, G. A. Walker, L. Hultqvist // *Astron. Astrophys.* 1982. 115. P. 145—163.

Поступила в редакцию 13 июня 1986 г.