ИССЛЕДОВАНИЕ ЗВЕЗД – ФОТОМЕТРИЧЕСКИХ АНАЛОГОВ СОЛНЦА НА 2-м ТЕЛЕСКОПЕ ОБСЕРВАТОРИИ ТЕРСКОЛ

А. И. Галеев[1], И. Ф. Бикмаев[1], Ф. А. Мусаев[2,3], Г. А. Галазутдинов[2]

[1] *Казанский университет, кафедра астрономии*
ул. Кремлевская, 18, 420008 Казань, Россия
e-mail: almaz@ksu.ru

[2] *Специальная астрофизическая обсерватория РАН*
пос. Нижний Архыз, 369167 Карачаево-Черкесская Республика, Россия

[3] *Международный центр астрономических и медико-экологических исследований*

На кудэ-эшеле-спектрометре 2-м телескопа обсерватории Терскол в течение 1999–2000 гг. получены высокодисперсионные спектры звезд выборки фотометрических аналогов Солнца. По вычисленным ранее фундаментальным параметрам атмосфер звезд (T_{eff}, $\lg g$) с помощью измеренных эквивалентных ширин определены содержания 30 химических элементов от углерода до европия, а также содержания лития по профилям линии Li I 670.8 нм. Измерения лучевых скоростей звезд по спектральным линиям позволили провести анализ кинематических характеристик данных звезд.

STUDY OF PHOTOMETRIC SOLAR-ANALOG STARS FROM THE SPECTRA OBTAINED WITH THE 2-m TELESCOPE AT THE TERSKOL OBSERVATORY, by Galeev A., Bikmaev I., Musaev F., Galazutdinov G. – We obtained high-resolution spectra of a sample of solar analogs by using a coude-echelle-spectrometer of the 2-m telescope of the Terskol Observatory in 1999–2000. We derived fundamental parameters of the atmospheres (T_{eff}, $\lg g$) of these stars and determined abundances of 30 elements from carbon to europium using measured equivalent widths. Moreover, the abundance of lithium was calculated from the Li I 670.8 nm line profiles. We also analyzed kinematic characteristics of these stars based on measured radial velocities.

ВВЕДЕНИЕ

Среди звезд солнечного типа – обширной группы звезд спектральных классов от поздних F до ранних K, расположенных на главной последовательности диаграммы Герцшпрунга–Рессела или вблизи нее – выделяют так называемые звезды-аналоги Солнца. Параметры их атмосфер заключены в небольших пределах и ненамного отличаются от солнечных значений. Таких объектов немного, к примеру, в своей классической работе 1996 г. Кайрел де Стробель [1], проанализировав звезды каталога HIPPARCOS, выделила лишь 50 звезд, по температуре, светимости и металличности похожих на Солнце.

Аналоги Солнца выделяются по разным критериям – по цветовым индексам или распределению энергии в спектре (фотометрические аналоги), по температуре, по идентичности спектров, по хромосферной активности и т. д. Интересной задачей является проблема существования аналогов Солнца по химическому составу, ведь этот параметр является фундаментальным критерием и мало подвержен селективным эффектам.

Актуальной проблемой остается задача поиска полного аналога, или двойника Солнца. Двойник Солнца – звезда, все физические параметры которой – температура, светимость, масса, радиус вращение, поле скоростей, возраст, магнито-гидродинамическая структура, химический состав и т. д. – в пределах ошибок наблюдений, измерений, модели атмосферы и пр. совпадают с солнечными. Предполагается, что такие звезды должны иметь различие температур в пределах 100 K, металличность – внутри ± 0.05 dex, их возраст не должен отличаться от солнечного больше чем на 1 млрд лет и т. д. В 1997 г. Порто де Мелло и да Сильва [2] предложили в качестве наиболее вероятного кандидата в двойники Солнца звезду 18 Скорпиона (HD 146233).

В данной работе мы исследовали выборку фотометрических аналогов Солнца: определили важнейшие параметры атмосфер этих звезд и рассмотрели возможность обнаружения среди них двойника Солнца по спектрам высокого разрешения, которые были получены на кудэ-эшеле-спектрометре, установленном на 2-м телескопе обсерватории Терскол.

НАБЛЮДЕНИЕ И ОБРАБОТКА СПЕКТРОВ

Спектры шестнадцати звезд солнечного типа, которые являются фотометрическими аналогами Солнца [3], были получены с помощью кудэ-эшеле-спектрометра [4], установленного на 2-м телескопе Zeiss-2000. В качестве детектора использовалась ПЗС-камера WI 1242×1152, с размером пиксела 22.5 × 22.5 мкм. Спектры экспонированы с разрешением 45 000 и охватывают диапазон длин волн от 350 до 1000 нм. Благодаря хорошей чувствительности камеры отношение сигнал/шум в красной части спектров данных звезд достигает 200.

14 звезд выборки наблюдались в июле–августе 1998 г., а спектры HD 213575 и HD 225239 получены в сентябре и октябре 1999 г. В каждую ночь для калибровки длин волн и отождествления спектральных линий при тех же условиях (положения спектрографа и ПЗС) снимался спектр сумеречного рассеянного солнечного света.

Изображения спектров переведены в одномерный вид, и обработаны (нормировка, калибровка длин волн, измерение эквивалентных ширин и лучевых скоростей) посредством программного пакета DECH20 [5]. В диапазоне длин волн 400–900 нм в спектрах каждой звезды и в одном из спектров Солнца измерены эквивалентные ширины нескольких сотен линий почти 40 атомов и ионов от Li I до Eu II и лучевые скорости около 150 линий сильных неблендированных линий различных элементов. Список исследованных звезд, важнейшие параметры атмосфер, определенные в данной работе, а также измеренные значения эквивалентных ширин (EW) линии K I λ 769.9 нм и Li I λ 670.8 нм, отдельно рассмотренные авторами в работах [6] и [7], и среднее значение лучевой скорости (RV) для каждой звезды приведены в таблице. В качестве примера на рис. 1 приведены участки спектров некоторых звезд в области линии K I λ 769.9 нм. На рисунке также отмечены соседние теллурические линии O_2, которые в зависимости от топоцентрической скорости звезды находятся на разном расстоянии от звездной линии.

Эффективные температуры звезд вычислялись по опубликованным фотометрическим индексам с помощью калибровок Алонсо и др. [8], основанных на методе инфракрасных потоков. Точность определения температур не хуже 100 K, и они согласуются с другими данными, к примеру, [9]. Логарифмы ускорений свободного падения найдены с использованием параллаксов, измеренным с помощью спутника “HIPPARCOS”. Содержания железа и 34 других химических элементов (за исключением лития) определялись по эквивалентным ширинам нейтральных или однажды ионизованных атомов посредством программы WIDTH 6 с использованием моделей атмосфер Куруца [10]. При вычислениях использованы значения gf-факторов базы данных VALD [11]. Методом “линия–линия” получены дифференциальные значения содержаний химических элементов относительно Солнца (точнее, содержаний элементов, найденных аналогично по эквивалентным ширинам, которые были измерены в потоковом атласе Куруца).

Список исследованных звезд, их параметры и некоторые измеренные данные

Звезда HD	T_{eff}, K	$\lg g$, dex	[Fe/H], dex	EW (K I 769.9), пм	EW (Li I 670.8), пм	RV, км/с
Sun	5770	4.44	0.0	17.30	0.22	
4307	5780	3.98	–0.17	15.15	6.15	
4915	5660	4.59	–0.24	15.61	0.47	–3.1
6582	5381	4.71	–0.60	16.44	0.23	
10307	5815	4.32	0.05	17.02	2.31	2.9
34411	5800	4.20	0.08	15.85	2.83	67.0
133002	5610	3.45	–0.38	15.89	≤0.2	
141004	5870	4.18	0.05	15.41	1.89	
146233	5710	4.37	–0.01	16.61	1.18	
159222	5805	4.39	0.13	17.54	2.41	
186408	5740	4.24	0.10	17.13	0.43	–27.4
186427	5700	4.34	0.05	17.51	≤0.2	–27.6
187923	5700	4.08	–0.12	16.94	0.40	–21.0
197076	5810	4.46	–0.05	15.56	3.58	–34.9
213575	5630	4.15	0.0	17.65	2.57	21.2
222143	5720	4.41	0.10	16.92	≤0.2	0.9
225239	5650	3.79	–0.39	15.80	2.97	

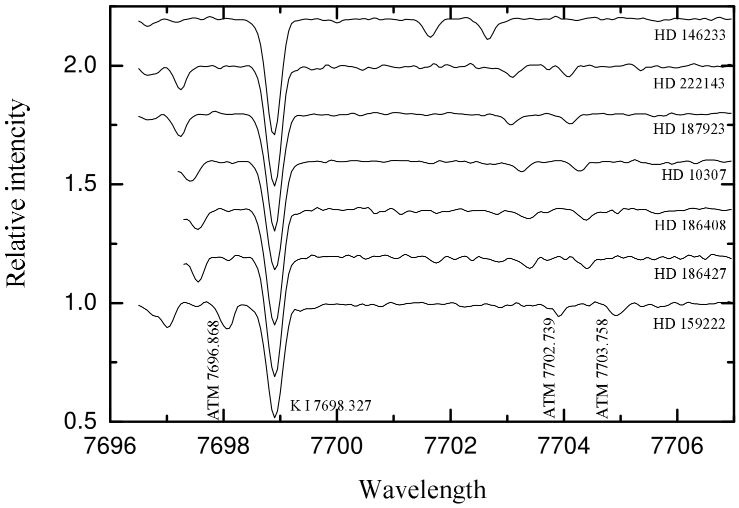

Рис. 1. Участки спектров ряда наблюдавшихся звезд в районе линии K I λ 769.9 нм. Спектры имеют последовательный сдвиг вдоль вертикальной оси на 0.2

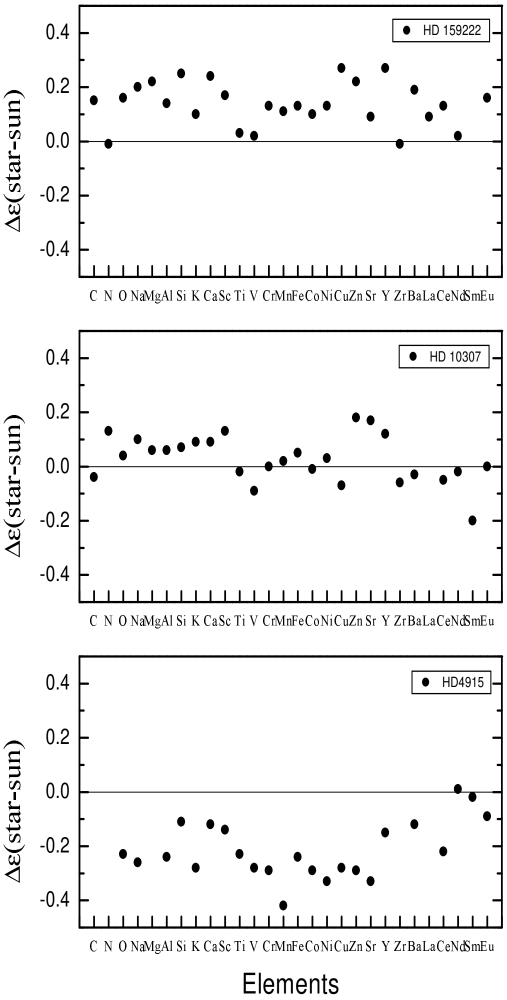

Рис. 2. Содержания химических элементов в атмосферах трех фотометрических аналогов Солнца – звезд с избытком металлов (HD 159222), солнечным химсоставом (HD 10307) и с пониженной металличностью (HD 4915)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

1. Для шести звезд фундаментальные параметры атмосфер (таблица) получены впервые. Значения параметров других звезд согласуются с данными других исследований [12]. Анализ параметров звезд показывает, что несмотря на фотометрическую схожесть этих объектов с Солнцем, многие из них имеют значения, величины которых далеки от солнечных. Наиболее заметно это в случае известного субкарлика μ Cas (HD 6582), а также малоизученных звезд-субгигантов HD 133002 и HD 225239.

2. Оставшиеся 13 звезд по химическому составу разделяются на три группы (рис. 2): три звезды имеют пониженное содержание металлов, четыре звезды показывают повышенное содержание химических элементов относительно Солнца, и лишь шесть фотометрических аналогов Солнца имеют химический состав, близкий к солнечному. Распределение содержаний химических элементов у отдельных звезд имеет неоднородный вид (например, у HD 34411 содержание легких элементов Na, Mg, Al повышено, а содержание тяжелых, таких как Ba, Nd, Eu, совпадает с солнечным значением).

3. По содержанию лития [7] выборка исследованных звезд разбивается на две части – объекты с солнечным содержанием лития и существенно большим.

4. Из рассмотренных звезд только предложенный ранее кандидат в двойники Солнца HD 146233 удовлетворяет критериям полного аналога Солнца – не только фундаментальные параметры, но и химический состав (за исключением избытка лития) этой звезды очень близок к солнечному.

В заключение авторы выражают глубокую признательность сотрудникам МЦ АМЭИ за организацию наблюдений летом 1998 года (А. Бондарю за помощь в наблюдениях). Авторы благодарят РФФИ за финансовую поддержку (грант 02-02-17174), а также за грант МАС 01-02-06068.

[1] *Cayrel de Strobel G.* Stars resembling the Sun // Astron. and Astrophys. Rev.–1996.–**7**.–P. 243–288.

[2] *Porto de Mello G. F., da Silva L.* HR 6060: The Closest Ever Solar Twin? // Astrophys. J.–1997.–**482**.–P. L89–L92.

[3] *Kharitonov A. V., Mironov A. V.* Selection of Solar analogues on the basis of various color indices // Solar Analogs: Characteristics and Optimum Candidates / Ed. J. Holl.–1998.–P. L149–L152.

[4] *Мусаев Ф. А., Галазутдинов Г. А., Сергеев А. В. и др.* Кудэ-эшеле-спектрометр для 2-м телескопа на пике Терскол // Кинематика и физика небес. тел.–1999.–**15**, № 3.–С. 282–287.

[5] *Галазутдинов Г. А.* // Препринт САО РАН.–1992.–**92**.–Р. 1.

[6] *Шиманский В. В., Бикмаев И. Ф., Галеев А. И. и др.* О механизмах синтеза калия при формировании звезд галактического диска // Астрон. журн. (в печати).

[7] *Галеев А. И., Машонкина Л. И. Бикмаев И. Ф. и др.* Содержание лития в атмосферах звезд-аналогов Солнца // Астрон. журн. (в печати).

[8] *Alonso A., Arribas S., Martinez-Roger C.* Determination of effective temperatures for an extended sample of dwarfs and subdwarfs (F0–K5) // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.–1996.–**117**.–P. 227–254.

[9] *Furhmann K.* Nearby stars of Galactic disk and halo // Astron. and Astrophys.–1998.–**338**.–P. 161–184.

[10] *Kurucz R. L.* Atmospheric models on CD–ROMs.–1993.

[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] *Cayrel de Strobel G., Soubiran C., Ralite N.* Catalogue of [Fe/H] determinations for FGK stars: 2001 edition // Astron. and Astrophys.–2001.–**373**.–P. 159–163.