

УДК 524.38-852/36

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕРЫ И ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС СПЕКТРАЛЬНОЙ И СПЕКЛ-ИНТЕРФЕРОМЕТРИЧЕСКОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ HD 10009

© 2009 Ю. Ю. Балега^{1,2*}, В. В. Леушин^{1,2**}, М. К. Кузнецов²¹Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз, 369167 Россия²Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Поступила в редакцию 14 октября 2008 г.; принята в печать 20 октября 2009 г.

Система HD 10009 является спектральной и спекл-интерферометрической двойной с практически одинаковыми компонентами солнечного типа. Она исследовалась спекл-интерферометрически на БТА и спектрофотометрически на 2-м телескопе Терскольского филиала ИНАСАН в спектральной области 3500–9600 Å. Проведен детальный анализ атмосферы главного компонента (компонент 1) системы, получены содержания некоторых элементов в его атмосфере. Оценены светимость и температура каждого из компонентов системы: $L_1 = 2.9 L_\odot$, $L_2 = 1.0 L_\odot$; $T_{eff1} = 6017$ К, $T_{eff2} = 5930$ К. Содержание железа равно $[Fe] = -0.27 \pm 0.05$. Полученные результаты позволяют оценить эволюционный статус компонентов системы. Ее возраст составляет 7.9 миллиардов лет, причем компонент 1 уже близок к области красных гигантов, а компонент 2 все еще находится на стадии выгорания водорода на главной последовательности.

Ключевые слова: звезды — переменные и пекулярные

1. ВВЕДЕНИЕ

Звезда HD 10009 (HR 466, HIP 7580, BD–10 343, LTT 885) — двойная система с большим собственным движением ($\mu_\alpha = 0.2494''/\text{год}$, $\mu_\delta = 0.111''/\text{год}$) [1] на удалении примерно 40 пк от Солнца. Орбитальный период системы около 29 лет. Ее интегральный спектр соответствует спектральному классу F7V, а спектры отдельных компонент разделить сложно из-за малой разницы скоростей. Первым двойственность HD 10009 обнаружил Койпер в 1934 г., наблюдая ее визуально на 36-дюймовом телескопе. Им же дана оценка разности блеска компонент, $\Delta m = 0.8$. По имени первооткрывателя система получила наименование Ки1 7. Параметры орбитального движения по визуальным наблюдениям вычислили Хайнц [2] и Бэз [3]. Обе орбиты оказались неверными, что связано с трудностями визуальных измерений тесной пары — на протяжении значительной части орбиты расстояние между компонентами остается меньше $0.1''$, что часто делает визуальные измерения ошибочными. Хайнц [4] в дальнейшем включил в исходные данные результаты спекл-интерферометрических наблюдений HD 10009

на 4-м телескопе обсерватории Китт Пик. Полученная орбита имела высокий эксцентриситет $e = 0.78$, но заниженную величину большой полуоси ($a = 0.182''$), что давало неверный динамический параллакс и суммарную массу системы ($\pi_{dyn} = 0.013''$, $3.6 M_\odot$).

Комплексное решение орбиты, учитывающее по методу наименьших квадратов как визуальные, так и спектроскопические измерения, было впервые получено Токовининым [5]. Однако из-за малого числа доступных измерений лучевых скоростей, сосредоточенных вблизи периастра, точность элементов орбиты оказалась невысокой. По орбитальным параметрам суммарная масса системы оценена как $2.76 M_\odot$ при отношении масс $q = 0.82$. Из корреляционных кривых скоростей компонент и суммарного показателя цвета $B - V = 0.53$ Токовининым найдена разность блеска $\Delta m = 1.23$, совпадающая с нашей поздней оценкой по данным спекл-интерферометрии на БТА. Впервые была дана и достаточно реальная оценка расстояния до системы порядка 45 пк, что всего на 20 процентов больше современных оценок.

Мартен и Миньяр [6] определили отношение масс в системе по астрометрическим измерениям Hipparcos, $q = 1.37$, то есть вторичный компонент, по их данным, оказался массивнее

*E-mail: balega@sao.ru

**E-mail: leushin@sci.lebedev.ru

Таблица 1. Параметры системы HD 10009

Параметр	Tokovinin [5]	Hartkopf et al. [9]	Pourbaix [10]	Balega et al. [11]
Параллакс ($\times 10^{-3}$ ")	22.2	25.73	27	27
a (")	0.292	0.318	0.324	
e	0.748	0.6816	0.798	0.79
P (лет)	28.83	23.7	28.8	29
$\Sigma M/M_{\odot}$	2.7	2.8	2.16 ± 0.32	2.35 ± 0.35
Δm	1.23			1.20
Sp(1)	F5V		F5V	F5
Sp(2)	G2V		G	G3

главного. Такой результат получен ими по явно заниженной оценке разности блеска между компонентами, $\Delta m = 0.41 \pm 0.15$. Более точный анализ наблюдений пары со спутника Hipparcos выполнен Содерйелмом [7], который получил $\Delta m = 1.03$ и $q = 0.93 \pm 0.08$. При суммарной массе $\Sigma M = 2.18 \pm 0.26 M_{\odot}$ массы компонентов оказались равны $1.13 M_{\odot}$ и $1.05 M_{\odot}$, а параллакс $\pi = (25.73 \pm 0.93) \times 10^{-3}$ ". Наиболее достоверная орбита пары опубликована Пурбо [8], который вслед за Токовининым использовал подбор параметров методом наименьших квадратов по имеющимся астрометрическим и спектральным данным: $P = 28.8 \pm 0.8$ лет, $e = 0.798 \pm 0.007$, $a = (0.324 \pm 0.005)$ ". Если использовать параллакс Hipparcos, $\pi_{Hip} = 0.02615$ ", получим суммарную массу $\Sigma M = 2.29 M_{\odot}$. Имеются и более современные спекл-измерения пары, однако все они получены на малых телескопах и не ведут к уточнению параметров. В Табл. 1 приведены некоторые данные по параметрам системы.

Все орбиты HD 10009, вычисленные по спекл-данным, подтверждают её высокий эксцентриситет ($e = 0.8$). Изучение таких двойных звезд имеет большое значение для теорий формирования и эволюции кратных систем. Особенно важно получить информацию о химическом составе, эволюционном статусе и физических параметрах компонентов. Однако наблюдение спектров каждого компонента высокоэксцентричной пары возможно только в эпоху прохождения периастра, когда составной спектр системы разделяется. Для HD 10009 следующее такое событие будет только в 2018 году. Нами выполнены спектроскопические исследования звезды в период, когда спектры компонентов полностью перекрывались. Ниже мы приводим результаты определения параметров атмосфер ком-

понент и предлагаем один из возможных сценариев формирования высокоэксцентричной системы.

2. НАБЛЮДЕНИЯ И ОБРАБОТКА

Спектры HD 10009 получены нами 28–29 августа 2005 г. и 25–26 августа 2006 г. на эшелъном спектрографе в фокусе кудэ 2-м телескопа Международного центра астрономических и медико-биологических исследований на пике Терскол [12] с использованием ПЗС-камеры с матрицей 1242×1152 элемента фирмы Write (Великобритания). В каждую ночь было получено по три спектра объекта в диапазоне $3500 - 9600 \text{ \AA}$ с разрешением $R = 45000$ и отношением сигнал/шум в спектрах около 200. Обработка выполнялась с помощью пакета программ DECH20, созданного в Специальной астрофизической обсерватории РАН [13]. Во время наблюдений звезда находилась далеко от периастра, и спектральные линии не раздваивались.

3. ОБЩИЕ ПАРАМЕТРЫ КОМПОНЕНТ И ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ АТМОСФЕР

3.1. Эффективные температуры

Спектральные линии звезд системы в полученных нами спектрах не разделяются, что затрудняет определение характеристик каждого из компонентов. Из Табл. 1 видно, что параметры объектов должны мало отличаться друг от друга. Поэтому можно считать, что их спектры довольно похожи.

Фотометрические измерения дают возможность оценить среднюю температуру системы, что при некоторых условиях позволяет оценить температуру каждого из компонентов. В Табл. 2 приведены фотометрические индексы и соответствующие им

Таблица 2. Цвета, температуры и [Fe] системы HD 10009

	V	B-V	U-B	β	$b-y$	m_1	c_1
	6.23	+0.53 [15]	0.00 [15]	2.620 [16]	0.331 [16]	0.160 [16]	0.387 [16]
T_{eff} (при [Fe] = -0.13)		6050±130		6060±140	6115±110		
T_{eff} (при [Fe] = -0.27)		6000±130		6090±140	6090±110		

величины температур, полученные по зависимостям из работы [14]. Оценки температур получены для двух значений [Fe], первое ([Fe]=-0.13) найдено по индексам m_1 , c_1 и $b-y$ [17], второе ([Fe]=-0.27) определено в настоящей работе по результатам анализа спектров методом моделей атмосфер. Средняя эффективная температура системы при нашем значении [Fe] получается равной 6060 ± 130 К.

Спектральные классы компонент системы, полученные разными авторами и приведенные в Табл. 1, показывают, что температуры компонент должны быть близки друг к другу (около 6000 К), причем первый компонент, вероятно, горячее второго.

Используя видимую звездную величину $V=6^m.23$, известное расстояние $\pi = 0''.027$ (берутся результаты последних работ [10, 11]) и разницу блеска компонент $\Delta m = 1.20$, получаем светимости $L_1 = 2.90 L_\odot$ и $L_2 = 1.00 L_\odot$. Помещаем компоненты на общую эволюционную изохрону и оцениваем температуры каждого из них: $T_{eff1} = 6017$ К и $T_{eff2} = 5900$ К. Одновременно здесь же оцениваются и ускорения силы тяжести на поверхностях компонент: $\log g_1 = 4.04$, $\log g_2 = 4.40$.

Поскольку полученные температуры попадают в область величин, где ошибки определяются ошибками фотометрических индексов, мы рассчитали модели атмосфер с температурами от 5800 до 6250 К и $\log g$ от 4.00 до 4.50. Химический состав для моделей брался с дефицитом некоторых элементов до -0.3 dex (Табл. 3). Расчеты проводились по программе LLmodels [18] с учетом всех линий поглощения. В Табл. 4 приведены параметры наборов моделей для расчета синтетических спектров, которые сравниваются с наблюдаемыми на Рис. 1.

Модели использовались для расчетов профилей водородных линий в спектрах каждого из компонент по программе SintVA [19]. Затем профили для первого и второго компонент суммировались и сравнивались с наблюдаемыми (Рис. 1). Эти сопоставления показывают, что наблюдаемые профили водородных линий в крыльях совпадают с теоретическими для моделей с параметрами: $T_{eff} = 6017$ К, $\log g = 4.04$ для компонента 1 и $T_{eff} = 5900$ К, $\log g = 4.40$ для компонента 2.

Изменение же температуры на ± 200 К приводит к заметным расхождениям между расчетом и наблюдениями.

Учитывая точность оценок по фотометрическим индексам, можно считать, что атмосферы компонент удовлетворительно описываются параметрами: $T_{eff} = 6017 \pm 100$ К, $\log g = 4.04 \pm 0.10$ для компонента 1 и $T_{eff} = 5900 \pm 100$ К, $\log g = 4.40 \pm 0.10$ для компонента 2 при химическом составе атмосферы, указанном в Табл. 3.

3.2. Содержание железа, титана, кремния и микротурбулентная скорость в атмосфере главного компонента HD 10009

Для определения содержания железа в атмосферах компонент системы мы измерили эквивалентные ширины 50 линий FeI и 43 линии FeII в спектре HD 10009. В связи с тем, что параметры обоих компонент очень близки, интенсивности их линий, а, следовательно, и эквивалентные ширины должны быть практически одинаковыми. В момент получения наших спектров компоненты системы имели равные лучевые скорости, кроме того они имеют практически равные скорости вращения, что позволяет определить эквивалентную ширину в спектре каждого из них, используя равенство $W_{\lambda 1} = W_{\lambda obs} [n / (n + 1) + W_{\lambda 2} / (W_{\lambda 1} (n + 1))]^{-1}$.

Здесь $W_{\lambda 1}$ и $W_{\lambda 2}$ — эквивалентные ширины линий поглощения в спектрах первого и второго компонента, $W_{\lambda obs}$ — наблюдаемая эквивалентная ширина линии в спектре системы, $n = L_1 / L_2$ — отношение светимостей. Различия в температурах и радиусах компонент учитывается через теоретически рассчитанные отношения эквивалентных ширин компонент. В нашем случае для $\Delta m = 1.2$ и $n = 3$. Отношение $W_{\lambda 2} / W_{\lambda 1}$ определялось нами из расчетов эквивалентных ширин для моделей атмосфер с параметрами $T_{eff1} = 6017$ К, $\log g_1 = 4.04$ и $T_{eff2} = 5900$ К, $\log g_2 = 4.40$ с химическим составом, представленным в Табл. 3. Вычисленные по указанной формуле эквивалентные ширины вместе с параметрами линий [20] и определенным содержанием элемента могут быть получены по адресу: leushin@sci.lebedev.ru. Расчеты проводились для ЛТР с использованием программы KONTUR [21]. По результатам определения

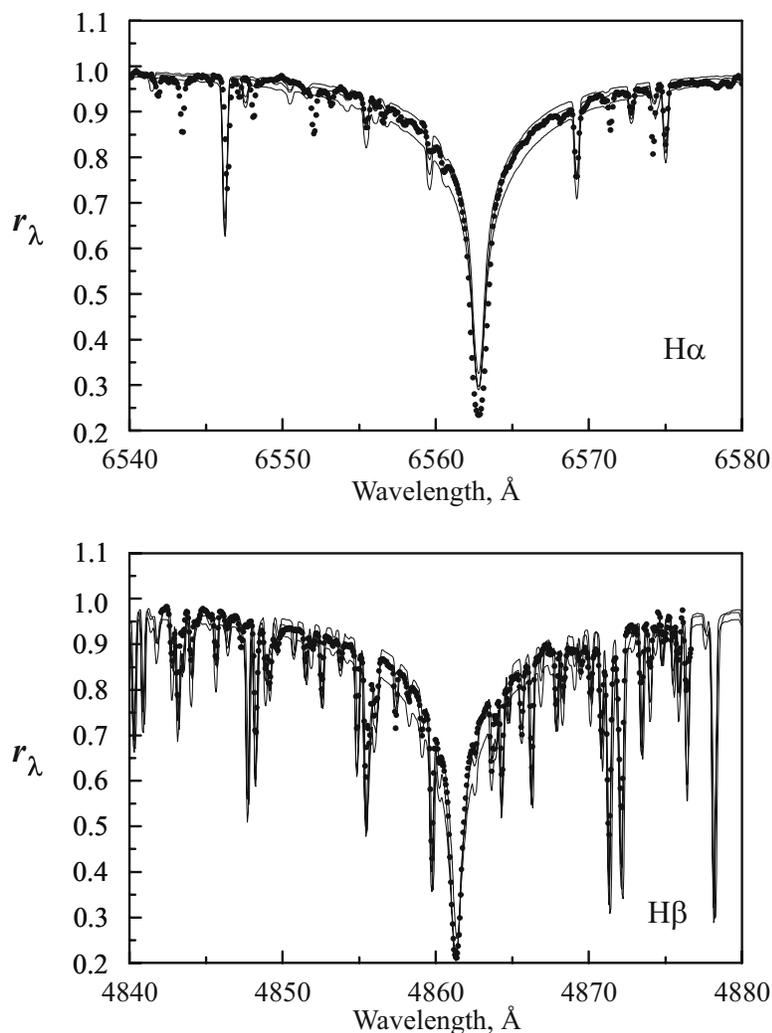


Рис. 1. Сопоставление наблюдаемых (точки) профилей линий H_{α} и H_{β} синтетическим спектрам, рассчитанным для моделей с параметрами из Табл. 4. Верхний теоретический профиль соответствует первому набору параметров, средний, практически совпадающий с наблюдениями, — второму, нижний — третьему набору параметров из Табл. 4.

Таблица 3. Содержание элементов в атмосферах моделей и Солнца

Элемент	C	N	O	Ne	Na	Mg	Al	Si	S	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe
$\log N(El)_*$	8.43	7.68	8.56	7.75	6.29	7.24	6.13	7.21	6.84	6.02	3.06	4.65	3.96	5.63	5.05	7.25
$\log N(El)_{\odot}$	8.39	7.78	8.66	7.84	6.17	7.53	6.37	7.51	7.14	6.31	3.05	4.90	4.00	5.64	5.39	7.45

$\log N(Fe)$ для различных значений микротурбулентной скорости V_{turb} строились линейные регрессии $\log N(Fe) = \log N(Fe)_0 + k \times W_{\lambda}$, которые позволяют выбрать реальную величину V_{turb} в атмосфере исследуемой звезды. Соответствующие регрессии показывают, что микротурбулент-

ная скорость в атмосфере первого компонента HD 10009 близка к 2.00 ± 0.10 км/с.

Та же процедура, что и для линий железа, была проведена для линий TiI и TiII.

Средние содержания железа и титана, полученные по линиям FeI, FeII, TiI и TiII для атмосферы первого компонента HD 10009, равны:

Таблица 4. Параметры моделей атмосфер компонентов HD 10009

Компонент	T_{eff} , К	$\log g$	L_1/L_2	V_t , км/с	$V \sin i$, км/с
1	5850	3.95	2.9	2.0	10.0
2	5800	4.00		2.0	10.0
1	6017	4.04	2.9	2.0	10.0
2	5900	4.40		2.0	10.0
1	6250	4.18	2.9	2.0	10.0
2	5850	4.00		2.0	10.0

$$\log N(FeI) = 7.18 \pm 0.02,$$

$$\log N(FeII) = 7.22 \pm 0.02,$$

$$\log N(TiI) = 4.70 \pm 0.04,$$

$$\log N(TiII) = 4.64 \pm 0.04.$$

Среднеквадратичные ошибки среднего содержания характеризуют внутреннюю точность полученных величин и показывают для каждого элемента совпадение оценок содержаний по разным ионам в пределах ошибок.

Для определения содержания кремния мы измерили 18 линий в спектре HD10009, и те же линии были измерены для солнечного спектра. Наши эквивалентные ширины линий Солнца практически совпадают с опубликованными ранее [22]. При анализе линий кремния были использованы величины сил осцилляторов из работы [23]. По данным из [20] содержание кремния, полученное по разным линиям, как для атмосферы Солнца, так и для HD10009 отличается между собой на ± 1 dex. В то же время с использованием данных из [23] различия не превышают нескольких сотых dex.

Средние значения содержания кремния:

$$\log N(Si)_{HD10009} = 7.33 \pm 0.01,$$

$$\log N(Si)_{\odot} = 7.57 \pm 0.01.$$

Полученное обилие для Солнца совпадает с опубликованными ранее работами [24, 25] и свидетельствует о том, что в рамках использованных моделей, различия наших определений химического состава атмосферы HD 10009 по сравнению с солнечными реальными.

В Табл. 5 приведена разность содержания железа и титана, определенного по линиям нейтральных и ионизованных атомов $\Delta\epsilon(El) = \log N(ElI) - \log N(ElII)$ для моделей с разными температурами. Ионный баланс, полученный для ионов железа и титана, подтверждает правильность выбора параметров модели атмосферы главного компонента: $T_{eff1} = 6017$ К, $\log g_1 = 4.04$.

Таблица 5. Изменение $\Delta\epsilon = \log N(ElI) - \log N(ElII)$ с T_{eff} модели атмосферы

T_{eff} , К	$\Delta\epsilon(Fe)$	$\Delta\epsilon(Ti)$
5850	0.01	0.13
6017	0.04	0.06
6150	0.33	0.27

3.3. О величинах эквивалентных ширин в спектрах компонентов системы

Мы видим, что для главного компонента HD 10009 наблюдается дефицит содержания металлов, что несколько необычно для звезд в окрестности Солнца. Возникает вопрос, является ли этот эффект реальным или он вызван неправильным учетом двойственности. Если фундаментальные параметры компонент определены достаточно уверенно, то оценки содержания элементов могут быть ошибочными из-за неправильного определения эквивалентных ширин линий в спектрах компонентов по наблюдаемому спектру. Мы считали, что эквивалентные ширины линий компонентов почти одинаковы (теоретически рассчитанные значения $W_{\lambda 2}/W_{\lambda 1}$ для всех линий мало отличаются от единицы) и почти равны наблюдаемым в суммарном спектре. Это справедливо, если суммируется два практически одинаковых спектра. Если же спектры не одинаковы, то наблюдаемые эквивалентные ширины могут существенно отличаться от величин эквивалентных ширин линий в спектрах каждого из компонентов.

Низкое содержание элементов в таком случае может быть обусловлено ослаблением линий в суммарном спектре. В том случае, если центры линий не смещены относительно друг друга из-за относительных скоростей компонентов и уширения, вызванные вращением, одинаковы, различия эквивалентных ширин могут быть связаны

Таблица 6. Химический состав атмосферы главного компонента HD 10009 и Солнца

Элемент	$\log N(El)_{HD10009}$	$\log N(El)_{\odot}$	Элемент	$\log N(El)_{HD10009}$	$\log N(El)_{\odot}$
C	8.33±0.10	8.39±0.04	V	3.96±0.15	4.00±0.03
N	7.84±0.10	7.83±0.11	Cr	5.40±0.10	5.65±0.05
O	8.71±0.15	8.60±0.05	Mn	5.14±0.07	5.50±0.03
Na	6.03±0.15	6.30±0.03	Fe	7.20±0.05	7.47±0.03
Si	7.33±0.05	7.54±0.02	Co	4.73±0.11	4.91±0.03
S	6.99±0.15	7.19±0.04	Ni	5.90±0.09	6.22±0.03
Ca	6.27±0.10	6.34±0.03	Ba	1.79±0.15	2.18±0.03
Ti	4.63±0.05	4.92±0.03			

только с различием глубин линий и определяются формулой из раздела 3.2. В предельном случае отсутствия измеримых линий в спектре второго компонента (что может осуществляться при очень быстром вращении компонента и расширении линий до полного исчезновения) линии в суммарном спектре становятся в $W_{\lambda obs}/W_{\lambda 1} = n/(n+1)$ раз меньше линий первого компонента. По оценкам разных авторов разность блеска компонентов $\Delta m = 2.5 \log(L_1/L_2)$ варьируется от 0.75^m до 1.2^m . Это дает нам отношение $n = L_1/L_2 : 2 \leq n \leq 3$. Таким образом, в случае $\Delta m = 0.75$ и полном отсутствии линий поглощения в спектре второго компонента, эквивалентные ширины главного компонента будут в 1.5 раза больше наблюдаемых, при этом содержания элементов будут близки к солнечным. Однако из предыдущих наблюдений, проводившихся ближе к периаstrу, когда линии компонентов разделяются [5], следует, что высказанное выше предположение об отсутствии в спектре линий второго компонента неверно, и величина n ближе к 3, что и использовалось нами при расчетах. Таким образом, можно заключить, что дефицит металлов в HD 10009 — установленный факт.

3.4. Содержание C, N, O и некоторых других элементов в атмосфере первого компонента HD 10009

Поскольку интенсивности линий C, N и O в спектре HD 10009 очень малы и практически все блендируются линиями других элементов, прежде всего линиями FeI, определение содержания этих элементов по эквивалентным ширинам линий затруднено и подвержено значительным ошибкам. Поэтому определение содержания в атмосфере первого компонента HD 10009 проводилось по

расчетам синтетических спектров в окрестностях линий CI, NI и OI.

Параметры линий выбирались из списка VALD [20]. Механизмы уширения спектральных линий учитывались в соответствии с методикой, описанной в работе [26]. Сопоставления наблюдаемых и вычисленных спектров для участков с линиями CI представлены на Рис. 2, для линий NI — на Рис. 3 и для линий OI — на Рис. 4. При расчетах выбранных участков синтетических спектров учитывались все линии, попадающие в этот интервал и имеющие глубины больше 0.01. Среднее содержание углерода, по нашим определениям, составляет:

$$\log N(C)_{HD10009} = 8.33 \pm 0.10;$$

азота:

$\log N(N)_{HD10009} = 7.84 \pm 0.10$. Оно оценивалось всего по двум слабым (на уровне шума) линиям и может иметь ошибку существенно больше указанной.

Для кислорода содержание равно:

$$\log N(O)_{HD10009} = 8.71 \pm 0.15 .$$

Содержание кислорода определялось с учетом поправок за отклонения от ЛТР [27]. При определении среднего содержания кислорода использовались эти исправленные значения.

Средние величины содержания элементов по всем определениям приведены в Табл. 6, где сопоставлены содержания элементов, определенные нами относительно солнечных данных [25]. Ошибки, указанные в Табл. 6, соответствуют изменениям содержания при ошибке моделей в $\Delta T = \pm 100$ и $\Delta \log g = \pm 0.10$.

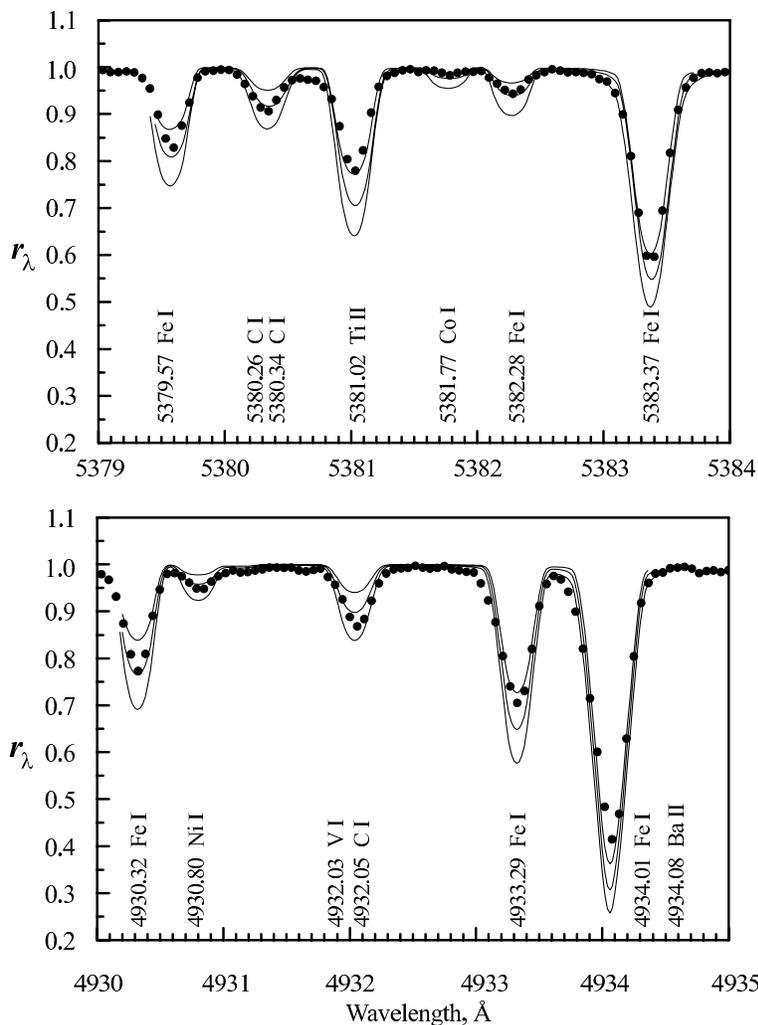


Рис. 2. Сопоставление наблюдаемых (точки) участков спектра с линиями Cl с рассчитанными синтетическими спектрами. Синтетические спектры рассчитаны при меняющихся в два раза величинах содержаний соответствующих элементов.

4. ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС СИСТЕМЫ HD 10009

Выше упоминалось, что наблюдаемое отношение светимостей компонент ($\Delta m = 1.20$) и их общая светимость, оцениваемая по видимому блеску ($V = 6^m.23$) и известному расстоянию ($\pi = 0''.027$) дает светимости компонент $L_1 = 2.90L_\odot$ и $L_2 = 1.00L_\odot$. Полученные параметры компонент лучше всего совмещаются с эволюционной изохроной [28] с $\log t = 9.90$ (t — время эволюции в годах) для звезд с уменьшенным содержанием металлов ($z = 0.008$). По изохронам мы можем уточнить температуры и массы компонент: $T_{eff1} = 6017$ K, $T_{eff2} = 5900$ K и $M_1 = (1.00 \pm 0.15)M_\odot$ и $M_2 = (0.9 \pm 0.14)M_\odot$. Величина содержания металлов $z = 0.008$ соответствует уменьшенному примерно в 2 раза обилию тяжелых элементов по сравнению с Солнцем. Оценка $[Fe] = -0.27 \pm 0.05$ для HD 10009 показывает, что химический состав этой системы в

пределах ошибок соответствует выбранному z . Сумма масс компонент в пределах ошибок совпадает с полученной в работах [10, 11] и кажется соответствующей действительности.

Соответствующие изохроны и положения компонент представлены на Рис. 5. Другие комбинации светимостей и температур хуже согласуются друг с другом и наблюдениями и не позволяют поместить оба компонента на одну изохрону. В то же время естественное предположение об общности происхождения компонент системы требует их одинакового возраста. Поэтому можно считать, что полученные здесь характеристики соответствуют действительности. Общая светимость системы равна $3.9L_\odot$, ($L_1 = 2.9L_\odot$, $L_2 = 1.0L_\odot$), а массы компонент практически равны солнечной массе. Возраст системы приближается к 8 миллиардам лет и первый компонент находится в стадии окончания выгорания водорода в ядре, а второй на-

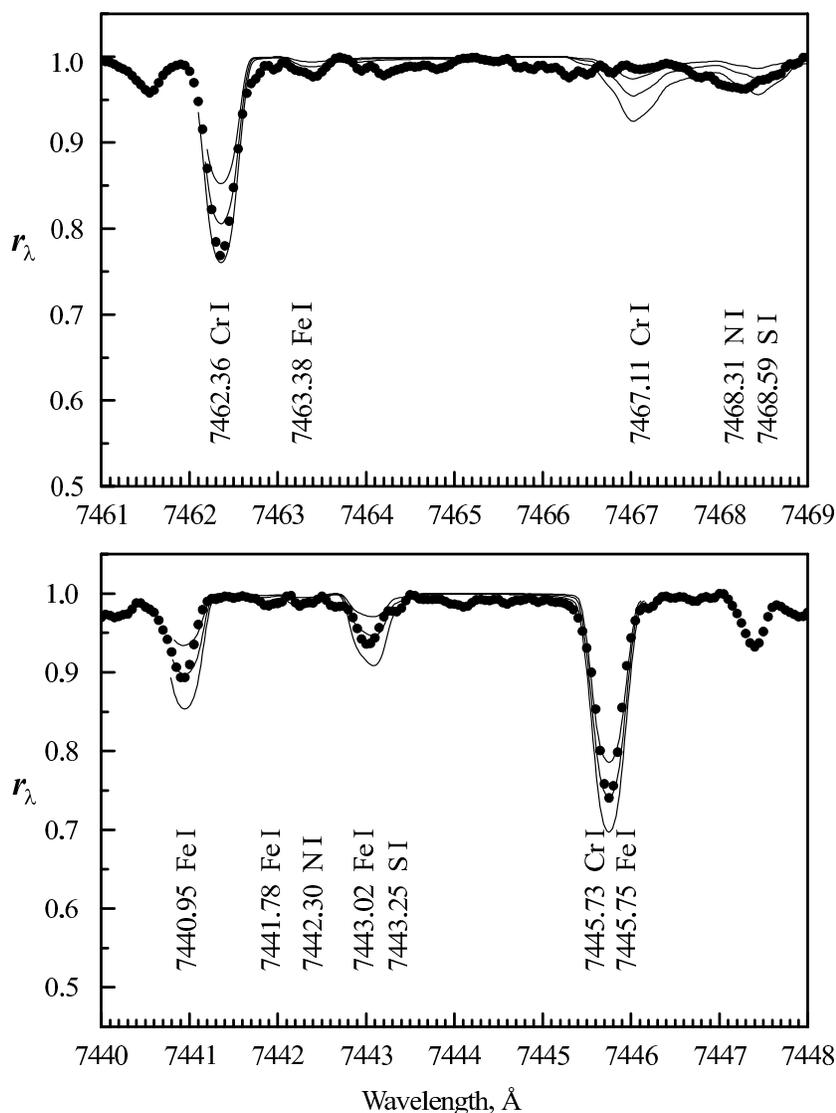


Рис. 3. То же, что и на Рис. 2, для линий Ni.

ходится в начальной стадии эволюции на главной последовательности.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При расстоянии до системы 40 пк обнаруженный дефицит металлов $[Fe] = -0.27 \pm 0.05$ несколько необычен для нашей области Галактики, хотя он не противоречит современным представлениям о химическом составе звезд в окрестностях Солнца [29]. HD10009 является системой с большим собственным движением [1]. Исходя из этого, можно предположить, что она образовалась 8 миллиардов лет назад в сферической подсистеме Галактики в области, слабо обогащенной тяжелыми элементами, и за это время достигла окрестностей Солнца. Наиболее точно определенные содержания элементов (C, Si, Ti, Fe и Ni) указывают на

слабое увеличение дефицита (по сравнению с Солнечным содержанием) с возрастанием атомного номера элемента. Небольшой избыток кислорода не меняет этой общей тенденции.

Компоненты системы имеют практически солнечные массы, но по возрасту гораздо старше Солнца. В то же время такие динамические характеристики компонентов системы, как микро-турбулентные скорости в атмосферах и скорости вращения, имеют существенно большие значения, чем у Солнца. Наблюдаемая скорость вращения первого компонента сейчас около 10 км/с (близка к этой величине и скорость вращения второго компонента [5]), что при наблюдаемом радиусе первого компонента в $1.6 R_{\odot}$ (радиус определяется через массу $1.0 M_{\odot}$ и $\log g = 4.04$ компонента) соответствует периоду вращения в 8.1 дня. То есть его вращение вокруг своей оси в настоящий момент

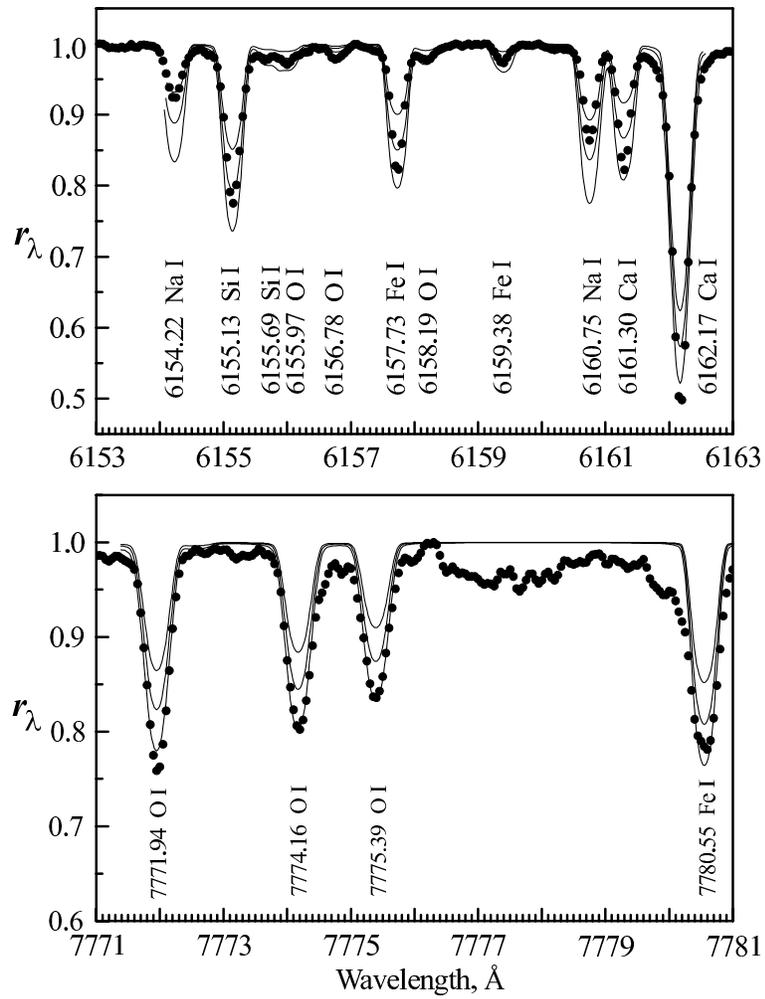


Рис. 4. То же, что и на Рис. 2, для линий O I.

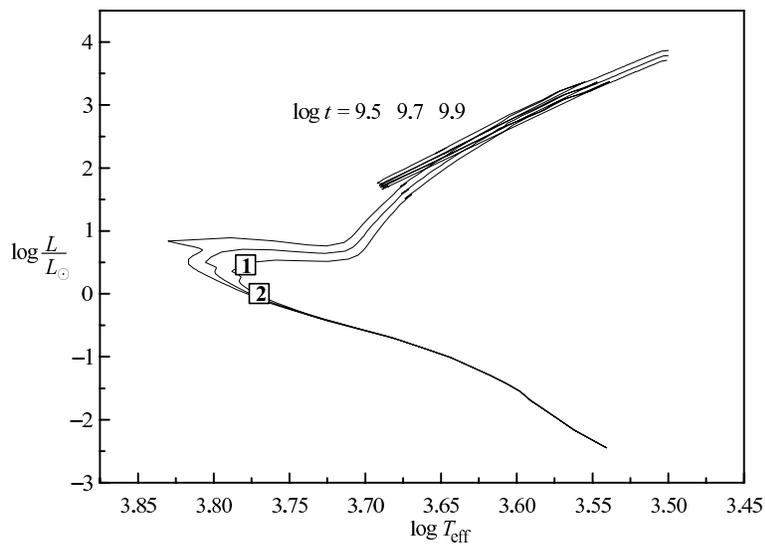


Рис. 5. Положение компонентов системы HD 10009 на изохронах эволюционных треков.

существенно быстрее, чем движение по орбите. Для звезд солнечных масс нельзя получить по химическому составу свидетельства о перемешивании на главной последовательности и сделать заключение о скорости вращения компонентов системы вокруг своих осей в начальный период эволюции, как это делается для звезд больших масс [30]. Разумно предположить, что скорость вращения компонентов в момент рождения определялась условием устойчивости $V_{rot} = (GM/R)^{1/2}$, что для звезды типа Солнца составляет 437 км/с, при этом период вращения равен $0^d.116$. Наблюдаемые скорости вращения ($V \sin i$) F–G-звезд иногда бывают большими (HD 10156, F5, $V \sin i = 440$ км/с; HD 125519, G5, $V \sin i = 300$ км/с [31]), что близко к скорости, определяемой пределом устойчивости. Скорости меньшие, но того же порядка, более многочисленны [31, 32], а с учетом угла наклона часть из них может быть близка к предельной. Причем наибольшие значения скоростей наблюдаются именно при достижении звездой начальной главной последовательности [33, 34].

Если, в соответствии со сделанными нами в предыдущей работе [35] предположениями, считать, что в начальный период система состояла из компонентов со скоростями вращения, обусловленными пределом устойчивости, то их вращательная энергия была равна $E_{rot} = 1.58 \times 10^{49}$ эрг. Если, к тому же, в начальный период орбита системы была близка к круговой с радиусом, равным нынешнему расстоянию в периастре $r = a(1 - e) = 370 \times 10^6$ км, то ее орбитальный период был около 1000^d , что на много больше периода вращения компонентов. И, таким образом, здесь мы можем говорить о приливных выступах [35], которые из-за более быстрого осевого вращения компонентов, по сравнению с их вращением по орбите, приводят к возможности возникновения ускорения движения компонентов по орбите, причем энергия этого ускорения может черпаться из энергии вращения компонент.

Следовательно, первоначальная круговая орбита может перейти в орбиту ($a = 1.77 \times 10^9$ км, $e = 0.79$, $T = 10610^d$), которая наблюдается сейчас. При этом орбитальная энергия системы $E_{orb} = -G \times M_1 M_2 / 2a$ увеличивается на 1.33×10^{47} эрг, что составляет малую долю от первоначальной вращательной энергии компонент. Здесь мы вновь ссылаемся на работы [36, 37], которые показывают, что предложенный механизм увеличения периода и большой полуоси орбиты может работать в случае двойных звездных систем, аналогично тому, что мы наблюдаем на примере увеличения орбитального периода и полуоси орбиты вращения Луны вокруг Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. The Hipparcos and Tycho Catalogues, SP-1200 (ESA, 1997).
2. W. D. Heintz, *Astronom. J.* **73**, 565, (1968).
3. P. Baize, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **60**, 333 (1985).
4. W. D. Heintz, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **72**, 543 (1988).
5. А. Токовинин, *Письма в АЖ* **19**, 3 (1993).
6. C. Martin and F. Mignard, *Astronom. and Astrophys.* **330**, 585 (1998).
7. S. Soederhjelm, *Astronom. and Astrophys.* **341**, 121 (1999).
8. D. Pourbaix, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **131**, 377 (1998).
9. W. I. Hartkopf, B. D. Mason, H. A. McAlister, et al., *Astronom. J.* **111**, 370 (1996).
10. D. Pourbaix, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **145**, 215 (2000).
11. I. I. Balega, Yu. Yu. Balega, K.-H. Hofmann, et al., *Astronom. and Astrophys.* **385**, 87 (2002).
12. Ф. А. Мусаев, Г. А. Галазутдинов, А. В. Сепреев и др., *Кинемат. и физика неб. тел.*, **15**, 282 (1999).
13. G. A. Galazutdinov, ftp.sao.ru.
14. A. Alonsj, S. Arribas, and C. Martinez-Roger, *Astronom. and Astrophys.* **313**, 873 (1996).
15. H. L. Johnson, R. I. Mitchell, B. Iriarte, et al. *Comm. Lun. Plan. Lab.* **4**, 99, (1966).
16. P. B. Stetson, *Astronom. J.* **102**, 589 (1991).
17. B. Nordstrom, M. Mayor, J. Andersen, et al., *Astronom. and Astrophys.* **418**, 989 (2004).
18. D. Shulyak, V. Tsymbal, T. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys.* **428**, 993 (2004).
19. В. В. Цимбал, частное сообщение, (2002).
20. F. Kupka, N. E. Piskunov, T. A. Ryabchikova, et al., *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 119 (1999).
21. В. В. Леушин, Г. П. Топильская, *Астрофизика* **22**, 121 (1985).
22. C. E. Moore, M. G. J. Minnaert, and J. Houtgast, *The Solar Spectrum 2935 A to 8770 A*, NBS Monograph 61 (Washington, 1966).
23. J. Luck, *Astrophys. J. Suppl.* **75**, 759 (1991).
24. C. A. Prieto, M. Asplund, R. J. C. Lopez, et al., *Astronom. J.* **576**, 544 (2002).
25. E. Lodders, *Astronom. J.* **591**, 1220 (2003).
26. Ю. Ю. Балег, В. В. Леушин и Г. Вайгельт, *Астрон. ж.* **82**, 247 (2005).
27. M. Asplund, N. Grevesse, A. J. Sauval, et al., *Astronom. and Astrophys.* **417**, 751 (2004).
28. L. Girardi, A. Bressan, G. Bertelli, and C. Chiosi, *Astronom. and Astrophys. Suppl. Ser.* **141**, 371 (2000).
29. В. А. Марсаков, Т. А. Боркова, *Письма в АЖ* **32**, 419 (2006).
30. Ю. Ю. Балег, В. В. Леушин, М. К. Кузнецов и др., *Астрон. ж.* **85**, 1 (2006).
31. R. Glebocki, P. Gnacinski, and A. Stawikowski, *Acta Astron.* **50**, 509 (2000).
32. J. R. Stauffer, L. W. Hartmann, C. F. Prosser, et al., *Astrophys. J.* **479**, 776 (1997).

33. J. Bouvier, R. Wichmann, K. Grankin, et al., *Astronom. and Astrophys.* **318**, 495 (1997).
34. R. Neuhauser, G. Torres, M. F. Sterzik, and S. Randich, *Astronom. and Astrophys.* **325**, 647 (1997).
35. Yu. Yu. Balega, V. V. Leushin, and M. K. Kuznetsov, *Astron. Astrophys. Transact.* **26**, 139 (2007).
36. O. Struve, B. Lynds, and H. Pillans, *Elementary Astronomy* (New York, Oxford University Press, 1959).
37. J. Chapront and M. Chapront-Touze, *Celest. Mech.* **66**, 31 (1997).

EVOLUTIONARY STATUS AND CHEMICAL COMPOSITION OF THE ATMOSPHERE OF THE SPECTROSCOPIC AND SPECKLE INTERFEROMETRIC BINARY HD 10009

Yu.Yu. Balega, V.V. Leushin, M.K. Kuznetsov

HD 10009 is a spectroscopic and speckle interferometric binary with almost identical solar-type components. It was studied via speckle interferometry using the 6-m telescope of the Special Astrophysical Observatory of the Russian Academy of Sciences and had its spectrophotometry performed in the 3500–9600 Å wavelength interval with the 2-m telescope of the Terskol Branch of the Institute of Astronomy of the Russian Academy of Sciences. A detailed analysis of the atmosphere of the primary component (component 1) of the binary yielded the abundances of some of the elements. The luminosities and temperatures of the components are found to be $L_1 = 2.9 L_\odot$, $L_2 = 1.0 L_\odot$ and $T_{eff1} = 6017$ K, $T_{eff2} = 5930$ K, respectively. The iron abundance is $[Fe] = -0.27 \pm 0.05$. Our results make it possible to assess the evolutionary status of the system. The binary is 7.9 Gyr old and the primary component is close to become a red giant, whereas the secondary component is still in the hydrogen-burning stage near the main sequence.

Key words: *stars: variable and peculiar*