

УДК 524.388-36

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ АТМОСФЕР КОМПОНЕНТ КРАТНОЙ СИСТЕМЫ ADS 11061. 41 DRACONIS

© 2005 г. Ю. Ю. Балега¹, В. В. Леушин¹, Г. Вайгельт²¹Специальная астрофизическая обсерватория, Нижний Архыз²Институт радиоастрономии им. Макса Планка, Бонн, Германия

Поступила в редакцию 25.03.2004 г.; принята в печать 20.09.2004 г.

Система 41 Dra наблюдалась спекл-интерферометрически и спектрально в период прохождения периастра в 2001 году. Получены спектры с разделенными линиями компонент в спектральной области 3700–9200 Å. На основе наблюдаемой зависимости разности блеска компонент от длины волны оценены величины $B - V$ для каждого из компонент в отдельности: $B - V = 0.511$ для компонента а и $B - V = 0.502$ для компонента б. По значениям $B - V$ и контурам водородных линий уточнены значения эффективных температур компонент. Данные наблюдений описываются параметрами системы 41 Dra: $T_{eff}^a = 6370$ К, $\lg g^a = 4.05$, $T_{eff}^b = 6410$ К, $\lg g^b = 4.20$. Определены содержания железа, углерода, азота и кислорода в атмосферах каждой из компонент. Полученные величины равны: $\lg N(\text{Fe})^a = 7.55$, $\lg N(\text{Fe})^b = 7.60$, $\lg N(\text{C})^a = 8.52$, $\lg N(\text{C})^b = 8.58$, $\lg N(\text{N})^a = 8.05$, $\lg N(\text{N})^b = 7.99$, $\lg N(\text{O})^a = 8.73$, $\lg N(\text{O})^b = 8.76$.

1. ВВЕДЕНИЕ

Квадрупольная система ADS 11061 состоит из пары спектрально-двойных звезд, 40 Dra и 41 Dra, вращающихся вокруг центра масс с периодом несколько десятков тысяч лет при полуоси видимой орбиты в диапазоне от 10^3 до 10^4 а.е. [1]. Периоды внутренних орбит для пар 40 и 41 Dra равны соответственно 10.5 и 1246.7 сут [2]. Система, скорее всего, является иерархической и динамически стабильной. Все ее компоненты принадлежат спектральному классу F5–F7. Исходя из оценки содержания железа [3], можно сделать вывод, что ADS 11061 принадлежит к населению молодого диска и имеет возраст, не превышающий 2.5 млрд. лет. На поздних стадиях эволюции такие звезды образуют гиганты, светимость которых незначительно отличается от светимости звезд главной последовательности.

Особое внимание система привлекает благодаря очень большому эксцентриситету пары 41 Dra: $e = 0.9754 \pm 0.0001$ [2]. Благодаря тому, что ее движение изучается как спектроскопически, так и с помощью интерферометрии, параметры комбинированной орбиты известны сегодня с высокой точностью. Например, несмотря на сравнительно большой период, время прохождения периастра определено с ошибкой около 10 минут. В этот момент компоненты пары приближаются друг к другу на расстояние порядка 10 радиусов звезды. В связи с высоким значением эксцентриситета возникает

вопрос о том, как могла сформироваться такая пара и почему за время жизни системы орбита не успела циркуляризоваться под воздействием приливных сил, как это имеет место в случае 40 Dra. Возможный сценарий происхождения и динамической эволюции ADS 11061 предложен в [2], однако картина остается далекой от полного объяснения. Очередной периастр был пройден 41 Dra в мае–июне 2001 г., что позволило в течение сравнительно небольшого промежутка времени (± 15 дней от периастра) наблюдать в интегральном спектре полное разделение спектров компонент. В этот период могут быть получены достоверные сведения о химическом составе атмосферы каждой звезды.

Анализ орбиты пары 41 Dra позволил определить величины масс компонент, которые равны: $M^a/M_\odot = 1.39 \pm 0.15$ и $M^b/M_\odot = 1.30 \pm 0.14$, и оценить динамическое значение параллакса системы [2]. Точное значение параллакса критично для определения светимости звезды, а при известной температуре — и радиусов компонент. Практически все оценки величины π в работах [1–6] имеют значения близкие к $\pi = 0.023''$, в то же время величина параллакса по каталогу HIPPARCOS для 41 Dra равна $0.01884''$ [7], что существенно меньше, приведенной выше величины. Однако, значение полученное HIPPARCOS, скорее всего ошибочно, так как в этих измерениях не учитывается влияние

Таблица 1. Различие блеска компонент 41 Drg

$\lambda, \text{\AA}/\Delta\lambda, \text{\AA}$	$\Delta m \pm \text{ошибка}$	Дата
5000	$0.40^m \pm 0.04^m$	2001.2713
5450/300	0.48 ± 0.03	1998.7769
6000	0.46 ± 0.05	2001.2713
6050/240	0.20 ± 0.10	1993.3492
6050/240	0.30 ± 0.10	1993.7646
6050/240	0.30 ± 0.10	1993.8437
6560/300	0.38 ± 0.05	1994.7129
7000	0.44 ± 0.10	2001.2713
8500/300	0.41 ± 0.14	2001.2713
12390/1380	0.47 ± 0.20	2000.7800
12390/1380	0.55 ± 0.20	2001.1920
16480/3170	0.46 ± 0.20	2000.7800
21910/4110	0.47 ± 0.10	1996.2667

двойственности системы. Таким образом, расстояние до системы скорее всего равно 44.6 ± 1.0 пк.

Ниже мы приводим результаты определения температур компонент, содержания железа, углерода, азота и кислорода в атмосферах по спектрам, полученным на эшелъных спектрографах телескопов БТА, Цейс-1000 САО РАН и Цейс-2000 МЦ АМЭИ (пик Терскол) [8–11] с разрешением от 15 000 до 100 000 и в спектральной области от 3700 А до 9200 А. Мы также анализируем оценки разности блеска между компонентами 41 Drg, полученные в широком диапазоне длин волн с помощью спекл-интерферометрии, и сравниваем их с данными спектральных наблюдений.

2. ОБ ЭФФЕКТИВНОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ КОМПОНЕНТ 41 DRA

Ранее [12] мы определили эффективную температуру компонент системы используя распределение энергии в непрерывном спектре системы [13] и эквивалентные ширины и контура водородных линий по нашим наблюдениям. Однако, там же мы отмечали противоречие в получаемых данных. Поэтому найденные ранее величины нуждаются в дополнительной проверке и уточнении. Для этой цели здесь мы использовали показатели цвета в системе UVV, спекл-интерферометрические определения разности блеска компонент и измерения соотношения глубин спектральных линий в спектрах компонент в момент, когда линии разделяются.

Хотя по данным разных каталогов $B - V$ для 41 Drg слегка различаются [14, 15], можно считать, что суммарный показатель цвета для системы $B - V = 0.507 \pm 0.001$.

В работе [12] мы отмечали, что различие блеска компонент по спекл-интерферометрическим измерениям составляет в среднем $\Delta m = 0.426 \pm 0.028$. Однако, для определения показателей цвета и температур компонент по отдельности крайне необходимо найти зависимость этой величины от длины волны. С этой целью в табл. 1 собраны все спекл-интерферометрические измерения Δm , полученные на БТА, которые дают зависимость Δm от длины волны в виде:

$$\Delta m = 0.330 + 0.863 \times 10^{-5} \lambda [\text{\AA}].$$

отсюда следует, что для середины полосы В ($\lambda 4400 \text{\AA}$): $\Delta m^B = 0.368$, и для середины полосы V ($\lambda 5500 \text{\AA}$): $\Delta m^V = 0.377$.

По эшелъным спектрам, полученным в фазы близкие к периастру в области длин волн от 3700 до 9200 \AA , мы промерили отношения центральных глубин линий компонент системы. Для этого выбирались линии свободные от блендирования. Центральные глубины линий поглощения в суммарном спектре системы связаны со светимостями компонент соотношением

$$\frac{R^{a,obs}}{R^{b,obs}} = \frac{E_\lambda^a R^a}{E_\lambda^b R^b},$$

где R^a , R^b и $R^{a,obs}$, $R^{b,obs}$ реальные и наблюдаемые центральные глубины линий соответственно. В том случае, если физические характеристики и химические составы компонент близки

$$R^a \approx R^b \quad \text{и} \quad E^b/E^a = R^{b,obs}/R^{a,obs}.$$

По нашим измерениям около 300 линий эти отношения зависят от длины волны и равны:

$$E_\lambda^b/E_\lambda^a = 0.73 - 0.54 \times 10^{-5} \lambda [\text{\AA}].$$

Переход от отношений светимостей к разностям в звездных величинах дает

$$\Delta m^{B,obs} = 0.378 \pm 0.008$$

$$\text{и} \quad \Delta m^{V,obs} = 0.387 \pm 0.008,$$

что достаточно точно совпадает со спекл-интерферометрическими определениями Δm .

Предположение, что величины B и V для компонент системы связаны соотношением

$$B^b = B^a + \Delta m^{B,obs} \quad \text{и} \quad V^b = V^a + \Delta m^{V,obs}$$

является хорошим приближением. В этом случае наблюдаемый показатель цвета системы $B - V$ будет равен:

$$B - V = (B^a - V^a) - 2.5 \lg \frac{1 + 10^{-0.4\Delta m^{B,obs}}}{1 + 10^{-0.4\Delta m^{V,obs}}}$$

$$\text{и} \quad B^b - V^b = B^a - V^a + (\Delta m^{B,obs} - \Delta m^{V,obs}).$$

Таблица 2. Список линий для измерения лучевых скоростей компонент

Линии звезд		Линии атмосферы
6526.653 SiI	6575.037 FeI	6532.359 H ₂ O
6546.239 FeI	6583.710 SiI	6536.720 H ₂ O
6554.223 TiI	6586.308 NiI	6542.313 H ₂ O
6555.463 SiI	6587.610 C I	6547.705 H ₂ O
6559.588 TiII	6592.926 FeI	6548.622 H ₂ O
6562.808 H α	6593.884 FeI	6552.629 H ₂ O
6569.216 FeI	6597.571 FeI	6557.171 H ₂ O
6571.174 FeI	6604.600 ScII	6572.086 H ₂ O
6572.779 CaI	6608.044 FeI	6574.852 H ₂ O
6574.228 FeI	6609.118 FeI	6599.324 H ₂ O

Таким образом, подставив наблюдаемые значения в эти соотношения мы можем получить значения показателей цвета для каждого из компонент системы 41 Dra

$$\text{компонент а: } B - V = B^a - V^a = 0.511,$$

$$\text{компонент б: } B - V = B^b - V^b = 0.502.$$

Используя расчеты Куруца [16] для моделей с нормальным химическим составом и турбулентной скоростью в атмосфере равной 2 км/с мы получаем для компонент системы значения эффективных температур:

$$\text{компонент а: } T_{eff}^a = 6370 \pm 20 \text{ К,}$$

$$\text{компонент б: } T_{eff}^b = 6410 \pm 20 \text{ К.}$$

Эти значения температур слегка ниже тех, что были получены нами в работе [12], в то же время они достаточно близки к оценкам T_{eff} и $B - V$ по эволюционным трекам [2].

Воспользовавшись значениями масс и светимостей, найденных из наблюдений орбитального движения и величины параллакса, приведенных в [2] и нашими оценками T_{eff} , мы получаем значения ускорения силы тяжести на поверхности компонент:

$$\text{компонент а: } \lg g^a = 4.05 \pm 0.10,$$

$$\text{компонент б: } \lg g^b = 4.20 \pm 0.10.$$

3. ЛУЧЕВЫЕ СКОРОСТИ КОМПОНЕНТ

Для моделирования синтетических спектров системы и сравнения их с наблюдениями в разные фазы орбитального движения нам необходимо было провести измерения лучевой скорости компонент по полученным спектрам. Измерения проводились по линиям звезды в районе линии H α , а в

качестве спектра сравнения использовались линии земной атмосферы. Список измеренных линий приведен в табл. 2.

Для вычисления лучевых скоростей и редукции их значений к Солнцу использовалась программа Галазутдинова Dech20 [17]. Результаты измерений лучевых скоростей компонент относительно прибора (V_r^a и V_r^b) и поправка к Солнцу (V_a) приведены в табл. 3. Для вычисления фаз использовались элементы: $T = \text{JD } 2449571.037$ и $P = 1246.680^d$.

Полученные значения лучевых скоростей достаточно хорошо совпадают с данными работы [2] и подтверждают корректность приведенных в ней элементов орбиты 41 Dra.

4. КОНТУРЫ ВОДОРОДНЫХ ЛИНИЙ

Синтетический спектр в области линии H α для системы 41 Dra был рассчитан суммированием теоретических контуров, полученных по программе SintVa, разработанной Цимбалом [18]. При вычислении теоретических контуров использовались модели с параметрами $T_{eff} = 6370$ К и $\lg g = 4.05$ для компонента а и $T_{eff} = 6410$ К и $\lg g = 4.20$ для компонента б. Модели были получены интерполяцией из сетки моделей Куруца [16]. Суммарный синтетический спектр H α рассчитывался для четырех фаз до и после прохождения периастра в 2001 г. Для учета сдвига длин волн в наблюдаемом спектре при расчетах использовались значения лучевых скоростей компонент, представленных в табл. 3. Скорость вращения компонент ($v \sin i$), необходимая для расчетов синтетического спектра, была определена по линиям поглощения металлов. Величина скорости вращения близка к 8.5 км/с для обеих компонент. Величины турбулентной скорости в атмосферах компонент были определены в работе [3] и равняются $V_t^a = 2.15$ км/с и $V_t^b = 1.70$ км/с. Соотношение яркостей компонент при суммировании спектров бралось равным $E^b/E^a = 0.68$.

Рассчитанные теоретические контура сравниваются с наблюдениями на рисунке. Здесь же приведены теоретические контура, рассчитанные нами, для двойной с компонентами имеющими равные $T_{eff} = 6500$ К и $\lg g = 4.00$. Соотношения блесков, турбулентные скорости, скорости вращения и лучевые скорости компонент брались такими же, как и для первого варианта. Наблюдаемые контура линии H α во всех фазах заключены между представленными теоретическими расчетами. Однако, совпадение с вариантом, где параметры моделей атмосфер равны $T_{eff} = 6370$ К и $\lg g = 4.05$ для компонента а и $T_{eff} = 6410$ К и $\lg g = 4.20$ для

Таблица 3. Лучевые скорости компонент 41 Drg

Спектр	Дата	JD	Phatha	V_r^a , км/с	V_r^b , км/с	V_a , км/с
z3818	14.11.2000	2451862.6090	0.8381	11.86 ± 1.52	1.85 ± 1.12	4.27
z3819	14.11.2000	2451862.6924	0.8382	11.13 ± 1.32	1.92 ± 1.32	4.28
t05311	20.01.2001	2451929.6299	0.8916	13.89 ± 1.67	-2.15 ± 1.22	-3.45
t05312	20.01.2001	2451929.6715	0.8917	13.54 ± 1.77	-2.07 ± 1.35	-3.46
t05413	21.01.2001	2451930.5882	0.8924	14.12 ± 1.85	-2.43 ± 1.56	-3.55
o05a	09.06.2001	2452070.4215	0.0046	-27.12 ± 1.09	44.85 ± 1.38	-1.33
t11406	26.11.20027	2452605.4215	0.4337	5.92 ± 1.37	5.48 ± 1.37	2.94

компонента b гораздо лучше. Это подтверждает правильность выбранных параметров атмосфер компонент системы 41 Drg.

5. О СОДЕРЖАНИИ ЖЕЛЕЗА В АТМОСФЕРАХ КОМПОНЕНТ 41 DRA

Содержание железа определялось по эквивалентным ширинам 50 линий FeI и 38 линий FeII. Для измерений использовались спектры, полученные вблизи периастра, когда линии компонент а и b четко разделяются. Эквивалентные ширины этих линий с атомными параметрами и значениями $\lg N(\text{Fe})$ для каждой из них и для разных фаз приведены в работе [3], там же описана методика определения $\lg N(\text{Fe})$. Расчеты проводились по программе KONTUR [19]. Использование моделей с $T_{eff} = 6575$ и $\lg g = 4.08$ для компонента а и $T_{eff} = 6600$ и $\lg g = 4.26$ для компонента b приводит к значениям $\lg N(\text{Fe}) = 7.66$ (компонент а) и $\lg N(\text{Fe}) = 7.72$ (компонент b). Эти величины слегка больше солнечного содержания железа ($\lg N(\text{Fe})_{\odot} = 7.50$). Коррекция эффективных температур и ускорений силы тяжести на поверхности компонент, проделанная в настоящей работе ($T_{eff}^a = 6370$ К и $\lg g^a = 4.05$, $T_{eff}^b = 6410$ К и $\lg g^b = 4.20$), приводит к значениям существенно ближе к солнечным.

Линии нейтрального железа FeI дают величины содержаний в атмосферах компонент равные:

$$a: \lg N(\text{Fe}) = 7.582 \pm 0.044,$$

$$b: \lg N(\text{Fe}) = 7.593 \pm 0.032.$$

По линиям ионизованного железа FeII полученные величины равны:

$$a: \lg N(\text{Fe}) = 7.530 \pm 0.039,$$

$$b: \lg N(\text{Fe}) = 7.613 \pm 0.045.$$

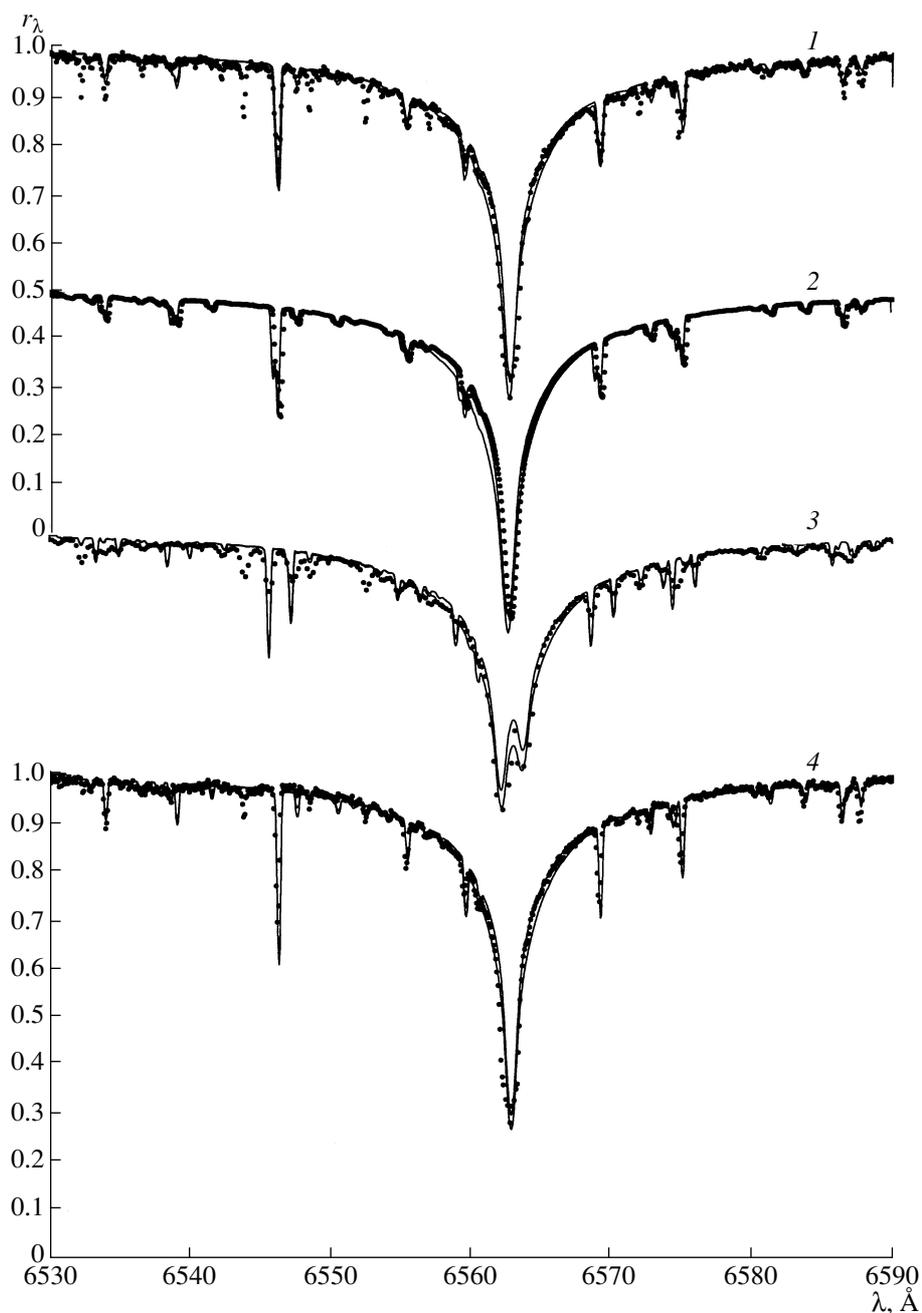
Среднеквадратичные ошибки среднего характеризуют внутреннюю точность полученных величин и показывают совпадение цифр в пределах ошибок. Таким образом, если в системе существует избыток

железа по сравнению с солнечным содержанием, то он не превосходит $+0.1\text{dex}$.

Необходимо отметить, что дальнейшее снижение эффективных температур моделей атмосфер компонент ухудшает ситуацию с совпадением значений $\lg N(\text{Fe})$, получаемых по линиям ионов в разной стадии ионизации. При температуре моделей в 6100 К для компонента а различие в содержаниях железа по линиям FeI и FeII составляет 0.13dex, а для компонента b эта величина равна 0.27dex, что далеко выходит за пределы наших ошибок. Таким образом, можно считать, что выбранные нами параметры атмосфер подтверждаются ионизационными соотношениями.

6. СОДЕРЖАНИЯ УГЛЕРОДА, АЗОТА И КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРАХ КОМПОНЕНТ СИСТЕМЫ

Величина содержания углерода, азота и кислорода в звездах детерминируется в значительной мере эволюционным статусом и является важным источником сведений о происхождении и истории звезд. Количество углерода и азота в звездах с массой больше солнечной определяет темп ядерных реакций выгорания водорода в CN-цикле и, таким образом, темп эволюции. Кроме того, углерод, азот и кислород наряду с водородом и гелием являясь наиболее обильными элементами в нормальных звездах обуславливают внутреннюю структуру атмосферы и всей звезды в целом. В то же время оценка содержаний этих элементов значительно затруднена сравнительной бедностью их линейчатых спектров. По этой причине подавляющее большинство работ по анализу содержаний C, N и O в звездных атмосферах основано на измерениях 1–2 линий каждого элемента в их спектрах. Этим же обстоятельством обуславливается важность результатов измерений каждой линии углерода, азота и кислорода в спектре для нахождения точного значения величины содержания элемента. Столь же важным является при этом и правильный учет



Сопоставление наблюдаемого спектра системы 41 Dra (точки) с теоретическими синтетическими спектрами (сплошные линии), верхний спектр рассчитан для моделей атмосфер компонент с параметрами: $T_{eff}^a = 6370$ K, $\lg g^a = 4.05$ и $T_{eff}^b = 6410$ K, $\lg g^b = 4.20$. Нижний спектр — модели атмосфер компонент имеют: $T_{eff} = 6500$ K и $\lg g = 4.00$. Фазы получения спектров: а) 0.83, б) 0.89, в) 0.00, д) 0.43.

физических условий формирования анализируемых спектральных линий.

Имеющиеся в нашем распоряжении эшелльные спектры (спектральная область 3700–9200 Å), полученные в моменты близкие к прохождению периастра, когда спектральные линии компонент разделены, позволили нам отождествить и измерить достаточно большое количество спектральных ли-

ний Si, Ni и OI в спектрах каждой из компонент системы.

В табл. 4 приведены параметры линий Si, измеренных в спектре системы 41 Dra. Здесь же даны величины эквивалентных ширин W_λ в mÅ и значения содержания углерода $\lg N(C)$ для каждой из компонент. Значения W_λ для каждого из компонент определялись по измеренным величинам

Таблица 4. Параметры линий и эквивалентные ширины W_λ и содержание углерода в атмосферах компонент а и б 41 Drg

$\lambda, \text{\AA}$	ε_i, eV	$\lg gf$	$W_\lambda^a, \text{m\AA}$	$\lg N(\text{C})^a$	$W_\lambda^b, \text{m\AA}$	$\lg N(\text{C})^b$
4762.31	7.48	-2.46	15.4	8.51	15.6	8.51
4762.53	7.48	-2.34	16.6	8.37	17.1	8.38
4792.66	7.95	-2.79	8	8.71	8	8.70
4815.22	7.95	-2.13	7.4	8.00	8	8.03
4815.48	7.95	-2.42	8.2	8.52	8.2	8.51
4817.37	7.48	-3.04	8.4	8.65	11	8.74
4926.43	8.54	-1.97	6.8	8.55	7.5	8.55
4932.05	7.68	-1.88	59.4	8.89	55.5	8.64
5039.05	7.95	-1.79	19.7	8.23	23	8.37
5039.10	7.95	-2.29	10	8.51	11	8.52
5040.12	7.95	-2.3	7	8.23	10.5	8.52
5052.17	7.68	-1.65	59	8.69	63.5	8.76
5380.34	7.68	-1.84	49.2	8.72	40	8.59
5515.55	8.85	-2.34	2.9	8.76	2.9	8.76
5793.12	7.95	-2.06	18.4	8.56	24	8.66
5800.60	7.95	-2.34	8.7	8.50	12	8.59
6586.27	9.00	-1.89	3.8	8.53	3.2	8.52
6587.61	8.54	-1.6	17.4	8.55	18.4	8.57
6588.64	9.17	-2.2	1.9	8.71	1.8	8.68
6591.46	8.85	-2.41	3	8.69	3.5	8.72
6595.24	8.85	-2.41	2.8	8.67	2.5	8.64
6602.41	8.85	-2.38	5	8.83	3.2	8.68
6605.78	8.85	-2.31	1.1	8.51	1.2	8.38
6611.35	8.85	-1.84	2.5	7.97	3.2	8.12
7116.99	8.65	-0.91	40	8.48	42	8.52
7119.66	8.64	-1.15	31.9	8.55	35	8.60
7132.11	8.65	-2.2	3.4	8.53	7	8.67
9061.43	7.48	-0.35	214	8.69	224	8.82
9062.49	7.48	-0.46	185.4	8.58	195.4	8.72
9078.29	7.48	-0.58	160.4	8.48	187.4	8.76
9088.52	7.48	-0.43	167.5	8.40	177.5	8.56
9094.83	7.49	0.15	218	8.26	228	8.44
9111.80	7.49	-0.3	184.9	8.45	225	8.78

Таблица 5. Параметры линий и эквивалентные ширины NI и содержание азота в атмосферах компонент а и б 41 Dra

$\lambda, \text{Å}$	ε_i, eV	$\lg gf$	$W_\lambda^a, \text{mÅ}$	$\lg N(N)^a$	$W_\lambda^b, \text{mÅ}$	$\lg N(N)^b$
4253.39	10.34	-1.37	7.5	8.66	2	7.99
7442.30	10.33	-0.38	9.4	7.98	10	8.00
8184.86	10.33	-0.29	7.6	7.87	5.8	7.60
8188.01	10.32	-0.29	16.8	8.15	23	8.35
8216.33	10.34	0.13	21.2	7.92	16	7.66
8680.28	10.34	0.35	30.9	7.93	38.2	8.06
8683.40	10.33	0.09	26.5	8.04	28.5	8.07
8686.15	10.33	-0.3	19.6	8.17	23.8	8.29
8703.25	10.33	-0.32	8.4	7.85	8.5	7.80
8711.71	10.33	-0.23	16.1	8.02	12.5	7.92
8718.83	10.34	-0.34	11.2	7.97	18.5	8.17

$W_\lambda^{a,obs}$ и $W_\lambda^{b,obs}$ разделяющихся линий. При этом использовалось соотношение яркостей компонент равное $l = E^b/E^a = 0.68$. Реальные значения эквивалентных ширин в спектрах каждого компонента определяются соотношениями: $W_\lambda^a = 1.68W_\lambda^{a,obs}$ и $W_\lambda^b = 2.50W_\lambda^{b,obs}$.

Используемые модели атмосфер и методика определения содержания элемента здесь те же, что брались и для анализа линий железа. Величины $\lg gf$ выбирались в основном из списка VALD [20].

При вычислении эквивалентной ширины мы учитываем четыре механизма уширения коэффициента поглощения: затухание вследствие излучения, доплеровское уширение, уширение квадратичным эффектом Штарка и эффектом Ван-дер-Ваальса. Величины, обусловленные этими эффектами, входят в коэффициент поглощения в виде:

$$a = (\Delta\lambda_R + \Delta\lambda_{st} + \Delta\lambda_w)/\Delta\lambda_D,$$

$$v = (\Delta\lambda + d)/\Delta\lambda_D,$$

где $\Delta\lambda_R$ — ширина линии вследствие затухания излучения, $\Delta\lambda_{st}$ — штарковская ширина, $\Delta\lambda_w$ — обусловлена эффектом Ван-дер-Ваальса, d — штарковский сдвиг.

Величина $\Delta\lambda_w$ вычисляется по приближенной формуле Унзоляда:

$$\Delta\lambda_w = \lambda^2/(4\pi c)C_6^{0.4} \times (34N(\text{HeI}))(8kT/\pi m_H)^{0.3},$$

при этом учитывается уширение линии за счет соударений с нейтральными атомами водорода и гелия, константа C_6 может быть задана (мы брали ее значение из списка VALD) или посчитана по формуле

$$C_6 = 6.5 \times 10^{-9}((Z + 1)^2 + 13.595)/\chi_{up}^{4/5},$$

где Z — заряд иона, χ_{up} — потенциал ионизации с верхнего уровня.

Учет квадратичного эффекта Штарка проводился двумя способами. Для линий с имеющимися данными точных расчетов задаются зависящие от температуры электронная ударная полуширина w , ионная ударная полуширина α , и сдвиг d [21]. Тогда штарковская ширина линии и сдвиг вычисляются в каждой точке атмосферы по формулам

$$\Delta\lambda_{st} = 2wN_e \times 10^{-16}(1 + \alpha N_e^{1/4}A)$$

$$d = wN_e \times 10^{-16}(d/w + \alpha N_e^{1/4}B),$$

где $A = 1.75(1 - 0.75r)$, $B = 2(1 - 0.75r)$ для нейтральных атомов и $A = 1.75(1 - 1.2r)$, $B = 2(1 - 1.2r)$, для ионов, $r = 1.85\pi^{1/6}N_e^{1/6}(e^2/kT)^{1/2}$ — радиус дебаевского экранирования.

Если данные о параметрах w , α и d отсутствуют, то для оценки уширения Штарка принимается аппроксимация

$$\Delta\lambda_{st} = \lambda^2/(4\pi c)C_4N_e,$$

где константа C_4 бралась из списка VALD или вычислялась по формуле

$$C_4 = 10^{-8} \times ((Z + 1)^2 + 13.595)/\chi_{up}^{5/2}.$$

Средние величины содержания углерода, определенные по сравнению наблюдаемых и рассчитанных значений эквивалентных ширин, для атмосфер компонент а и б равны:

$$a: \lg N(C) = 8.524 \pm 0.036,$$

$$b: \lg N(C) = 8.576 \pm 0.031.$$

Линий азота в спектрах компонент 41 Dra существенно меньше, чем линий углерода. Причем практически все линии, доступные измерениям и незаблендированные линиями других элементов, находятся в спектральной области с $\lambda > 8000 \text{ Å}$.

Таблица 6. Параметры линий и эквивалентные ширины OI и содержание кислорода в атмосферах компонент а и b 41Dra

$\lambda, \text{\AA}$	ε_i, eV	$\lg gf$	$W_{\lambda}^a, \text{m\AA}$	$\lg N(\text{O})^a$	$W_{\lambda}^b, \text{m\AA}$	$\lg N(\text{O})^b$
6155.96	10.74	-1.36	1.9	8.83	2.4	8.86
6155.97	10.74	-1.01	3.6	8.78	4.8	8.83
6155.98	10.74	-1.12	3	8.80	3.8	8.84
6156.74	10.74	-1.49	1.5	8.84	1.7	8.84
6156.76	10.74	-0.9	4.6	8.78	5.2	8.80
6156.78	10.74	-0.69	6.3	8.75	7.1	8.76
6158.14	10.74	-1.84	1	8.91	—	—
6158.18	10.74	-1.00	4.9	8.85	—	—
6158.19	10.74	-0.41	11.6	8.77	—	—
7771.94	9.15	0.37	143.6	9.02	131.6	8.97
7774.16	9.15	0.22	123.3	8.93	117.6	8.94
7775.39	9.15	0.00	99.1	8.85	90.5	8.81
8446.25	9.52	-0.46	35.1	8.46	42.7	8.69
8446.36	9.52	0.24	51.7	8.09	63	8.31
8446.76	9.52	0.01	48	8.24	58.5	8.46

В более коротковолновой области спектра мы смогли выделить только две линии NI $\lambda 4253.39 \text{ \AA}$ и $\lambda 7442.30 \text{ \AA}$ с эквивалентными ширинами меньше 10 m\AA . В табл. 5 приведены данные для линий NI аналогичные тем, что содержатся в таблице для углерода. Средние величины содержаний азота в атмосферах компонент а и b 41 Dra составляют:

$$a: \lg N(\text{N}) = 8.051 \pm 0.068,$$

$$b: \lg N(\text{N}) = 7.991 \pm 0.034.$$

Содержание кислорода в атмосферах компонент 41 Dra определялось по линиям пяти триплетов в красной области с $\lambda 6100 \text{ \AA}$. Данные о параметрах измеренных линий и величины $\lg N(\text{O})$ для атмосфер обеих компонент приведены в табл. 6. Здесь линии достаточно сильны и практически не блендированы, поэтому содержание кислорода определяется довольно уверенно. Для атмосфер каждого из компонент эти величины равны:

$$a: \lg N(\text{O}) = 8.727 \pm 0.067,$$

$$b: \lg N(\text{O}) = 8.761 \pm 0.055.$$

7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Комплексные спектральные и спекл-интерферометрические наблюдения двойной системы 41 Dra, входящей в иерархическую кратную систему ADS 11061, проведенные в моменты

близкие к прохождению периастра, позволили проделать отдельный анализ атмосфер каждого из компонент 41 Dra. Все наблюдательные данные в пределах точности измерений указывают на то, что величины эффективных температур компонент системы составляют 6370 K и 6410 K соответственно для а и b.

Замечательно практически полное совпадение содержаний исследованных элементов в атмосферах компонент 41 Dra с содержанием в солнечной атмосфере и метеоритах [22], различия в несколько сотых dex связаны, скорее всего, с ошибками измерений эквивалентных ширин и не являются значимыми. Указанный факт может свидетельствовать о том, что за время с момента образования Солнечной системы, примерно 5 млрд. лет назад и до момента образования системы 41 Dra 2.5 млрд. лет назад [2] в окрестностях солнца в радиусе в 50 пк не было заметных изменений химического состава межзвездной среды. Одновременно отсутствие каких либо значимых отличий в соотношении C : N : O для атмосфер компонент 41 Dra от солнечных свидетельствует о полном отсутствии перемешивания между ядром и атмосферой несмотря на то, что звезды периодически при прохождении периастра испытывают ударные гравитационные нагрузки при сближении на расстояния всего в несколько радиусов.

Авторы благодарят Ф.А. Мусаева и Д.О. Кудрявцева за получение спектров 41 Дра.

Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 01-02-16563-а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. А. Киселев, Л. Г. Романенко, *Астрон. журн.* **40**, 795 (1996).
2. A. Tokovinin, Yu. Yu. Balega, and E. A. Pluzhnik, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **409**, 245 (2003).
3. Yu. Yu. Balega, V. V. Leushin, and G. Weigelt, *Bull. Spec. Astrophys. Observ.* **54**, 5 (2003).
4. А. А. Токовинин, Письма в "Астрон. журн." **21**, 286 (1995).
5. И. И. Балегга, Ю. Ю. Балегга, Г. Фальке и др., Письма в "Астрон. журн." **23**, 774 (1997).
6. V. A. Al-Wardat, Yu. Yu. Balega, V. V. Leushin, *et al.*, *Modelling of Stellar Atmospheres*. IAU Simp. No. 210, June 17–21, 2002. Uppsala, Sweden
7. *The Hipparcos and Tycho Catalogues*. ESA SP-1200, ESA, 1997.
8. Ф. А. Мусаев, Письма в "Астрон. журн." **19**, 776 (1993).
9. V. E. Panchuk, I. D. Najdenov, V. G. Klochkova, *et al.* *Bull. Spec. Astrophys. Observ.* **44**, 127 (1998).
10. В. Е. Панчук, С. В. Ермаков, Научно-технический отчет Специальн. астрофиз. обсерв. №267, 1999.
11. Ф. А. Мусаев, Г. А. Галазутдинов, А. В. Сергеев и др., *Кинематика и физ. небес. тел.* **15**, 282 (1999).
12. Yu. Yu. Balega, V. V. Leushin, and E. A. Pluzhnik, *Bull. Spec. Astrophys. Observ.* **51**, 61 (2001).
13. А. В. Харитонов, В. М. Терещенко, Л. Н. Князева, *Спектрофотометрический каталог звезд* (Алма-Ата: Наука, 1988).
14. H. L. Johnson and W. W. Morgan, *Astrophys. J.* **117**, 313 (1953).
15. В. Г. Корнилов, И. М. Волков, А. И. Захаров, и др., *Каталог UBVR ярких звезд северного неба* (Тр. Гос. астрон. ин-та им. П.К. Штернберга, 1991), т. 63.
16. R. Kurucz, <http://kurucz.harvard.edu>
17. Г. А. Галазутдинов, САО Препринт Специальн. астрофиз. обсерв., вып. 92, 1992.
18. В. В. Цимбал, *Магнитные звезды* (Нижний Архыз, САО РАН, 2003, в печати).
19. В. В. Леушин, Г. П. Топильская, *Астрофизика* **22**, 121 (1985).
20. F. Kupka, N. E. Piskunov, T. A. Ryabchikova, *et al.*, *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.* **138**, 119 (1999).
21. Г. Грим, *Уширение спектральных линий в плазме* (М.: Мир, 1978).
22. N. Grevesse and A. J. Sauval, *Solar composition and its evolution – from core to corona* (Eds. C. Frolich, M. C. E. Huber, S. K. Solanki, and R. von Steiger, Dordrecht: Kluwer, 1998), p. 161.

THE ABUNDANCE IN THE ATMOSPHERES OF COMPONENTS OF THE MULTIPLE STAR ADS 11061. 41 DRACONIS

Y. Y. Balega, V. V. Leushin, G. Weigelt

The system 41 Dra was observed speckle interferometric and spectroscopic during the passage of the periastron in 2001. Are received spectra with the divided lines of components in spectral area 3700–9200 Å. On to basis of the observable dependence of the magnitude difference of the components from length of a wave the values $B - V$ for each of the components separately are appreciated: $B - V = 0.511$ for the component a and $B - V = 0.502$ for the component b. From $B - V$ and the contours of hydrogen lines the values of effective temperatures for each components have been derived. The data of observation are described in parameters of system 41 Dra: $T_{eff}^a = 6370$ K, $\lg g^a = 4.05$, $T_{eff}^b = 6410$ K, $\lg g^b = 4.20$. The abundance iron, carbon, nitrogen and oxygen are determined in atmospheres of each of the components. These values are equal: $\lg N(\text{Fe})^a = 7.55$, $\lg N(\text{Fe})^b = 7.60$, $\lg N(\text{C})^a = 8.52$, $\lg N(\text{C})^b = 8.58$, $\lg N(\text{N})^a = 8.05$, $\lg N(\text{N})^b = 7.99$, $\lg N(\text{O})^a = 8.73$, $\lg N(\text{O})^b = 8.76$.