ИССЛЕДОВАНИЕ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ДВОЙНЫХ СИСТЕМ, ПРОШЕДШИХ СТАДИЮ ОБЩЕЙ ОБОЛОЧКИ

Н. Н. Шиманская, В. В. Шиманский, И. Ф. Бикмаев, А. И. Галеев

Казанский государственный университет, Казань, Россия
e-mail: Nelli.Shimanskaya@ksu.ru

В работе выполнен анализ химического состава атмосфер вторичных компонентов двух тесных двойных систем V471 Tau и FF Aqr, прошедших стадию общей оболочки. Серия спектров высокого разрешения в разных фазах орбитального периода получена на кудэ-эшеле-спектрометре Российско-турецкого телескопа (РТТ150). Содержания химических элементов в атмосферах вторичных компонентов определены с использованием метода моделирования синтетических спектров и дифференциального анализа химического состава V471 Tau и FF Aqr относительно солнечного. На основе анализа солнечного спектра уточнены эмпирические значения сил осцилляторов более 1330 спектральных линий. Тестовое определение химического состава звезды HD 115404 показало его хорошее соответствие данным литературных источников. В результате исследования усредненного спектра V471 Tau получены 178 оценок содержаний 16 химических элементов, для FF Aqr получены 539 оценок содержаний 21 элемента. Для V471 Tau найдены избытки элементов α- и s-процессов, вероятно аккрецированных на поверхность вторичного компонента в стадии общей оболочки. Одновременно, дефицит Mg и избытки Si и Ni не могут быть объяснены в рамках современной теории химической эволюции. Полученный химический состав FF Aqr не показывает аномалий элементов тяжелее Ne. Это может быть обусловлено невозможностью синтеза элементов тяжелее ^{16}O в ядре маломассивного главного компонента FF Aqr на поздних стадиях его эволюции или большой разделенностью компонентов, ограничивающей механизм аккреции синтезированного вещества в стадии общей оболочки.

ВВЕДЕНИЕ

Тесные двойные системы (ТДС) образуются из широких звездных пар в процессе их прохождения стадии общей оболочки. Вследствие торможения компонентов веществом оболочки в системе начинается быстрая потеря углового момента, уменьшение большой полуоси и перемешивание вещества в недрах главного компонента. Это вещество, обогащаясь продуктами ядерных реакций, происходящих в ядре и слоевом источнике, аккрецирует на поверхность спутника, изменяя его первичный химический состав. Таким образом, в атмосферах вторичных компонентов могут появляться аномалии в содержаниях химических элементов, доступные для наблюдений после выхода систем из стадии общей оболочки.

Для проведения точного анализа химсостава вторичного компонента в ТДС должны отсутствовать эффекты аккреции, а его светимость должна быть сравнима или выше, чем у главного компонента. Оптимально отвечают данным условиям старые предкатаклизмические переменные (ПП), состоящие из остывших белых карликов с $T_{\text{эф}} < 40\,000$ K и звезд, близких к звездам главной последовательности G0–M2 классов. Предыдущие исследования спектров таких объектов [7, 10] показали, что в их атмосферах наблюдаются аномалии содержаний химических элементов, вызванные их прохождением стадии общей оболочки.

В рамках данной работы мы провели детальное исследование и сравнение химического состава атмосфер вторичных компонентов двух ПП – FF Aqr и V471 Tau, а также звезды HD 115404 близкого спектрального класса. Для всех исследуемых звезд содержания элементов получены дифференциальным способом относительно солнечного химического состава.

V471 Tau, открытая Нельсоном и Янгом [8] как затменная система ($P_{\text{orb}} = 0.52118^d$, $m_b = 10.24^m$, $m_v = 9.48^m$), состоит из белого и красного карликов. Объект имеет переменность с нестабильной амплитудой, обусловленную взаимодействием магнитных полей компонентов. Для вторичного компонента Мартин и др. [7], Стилл и Хусейн [9] получили оценки содержаний для 4–5 элементов, имеющие низкую точность и показывающие существенные различия.

FF Aqr $\equiv$ BD –3°5357 была открыта Дворецки и др. [3] как затменная система ($P_{\text{orb}} = 9.1207755^d$, $\Delta V = 0.35^m$, $\Delta B = 0.33^m$, $\Delta U = 0.22^m$), состоящая из sdB-субкарлика и гиганта класса G8 III. В системе найдены эффекты отражения и запятненность поверхности магнитоактивного холодного компонента [6]. Химический состав компонентов FF Aqr не исследовался.

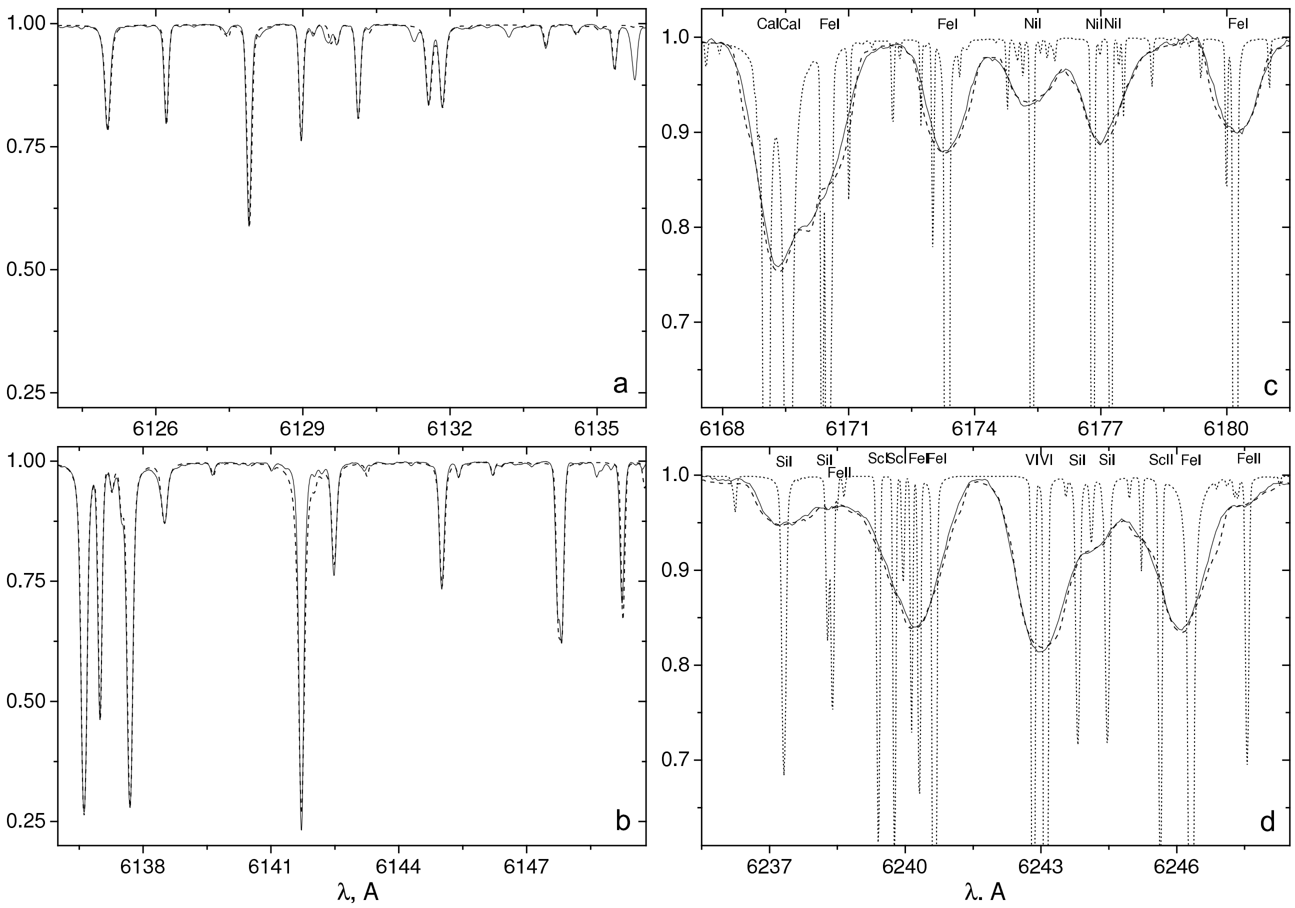

Рис. 1. Согласование теоретических и наблюдаемых спектров Солнца (*a*, *b*) и FF Aqr (*c*, *d*)

НАБЛЮДЕНИЯ

Эшеле-спектры V471 Tau, FF Aqr и HD 115404 высокого разрешения ($\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 40\,000$) в диапазоне $\Delta\lambda = 3900 - 8700$ Å получены нами на Российско-турецком 1.5-м телескопе РТТ150. При наблюдениях применялся кудэ-эшеле-спектрометр CES, оснащенный ПЗС-матрицей (1160×1040 элементов) производства САО РАН.

Обработка спектров проведена с применением программного комплекса DECH. На этапе обработки спектров были выполнены все стандартные процедуры. Для корректного учета вкладов теллурических линий были получены спектры яркой звезды спектрального класса B7 HD 11415. Сравнение спектров V471 Tau в разных фазах показало, что в бальмеровских линиях водорода формируются эмиссионные компоненты, связанные с влиянием эффектов отражения. Профили линий тяжелых элементов не изменяются и могут использоваться для анализа химического состава на основе метода моделей атмосфер одиночных звезд. В спектрах FF Aqr наблюдаются изменения интенсивности абсорбционных линий с фазой, обусловленные запятненностью вторичного компонента. Поэтому спектры, полученные в разных фазах, суммировались.

МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ СПЕКТРОВ

Параметры атмосферы красного карлика в V471 Tau ($T_{эф} = 5040$ K, $\lg g = 4.44$) взяты из работы О'Брайна и др. [1]. Параметры атмосферы вторичного компонента FF Aqr получены нами: $T_{эф}$ (4690 ± 90 K) – по показателям цвета [6], lg g (2.90 ± 0.12) – с использованием радиуса и массы вторичного компонента из работы Ваккаро, Вильсон [11]. Предварительное изучение металличности атмосфер вторичных

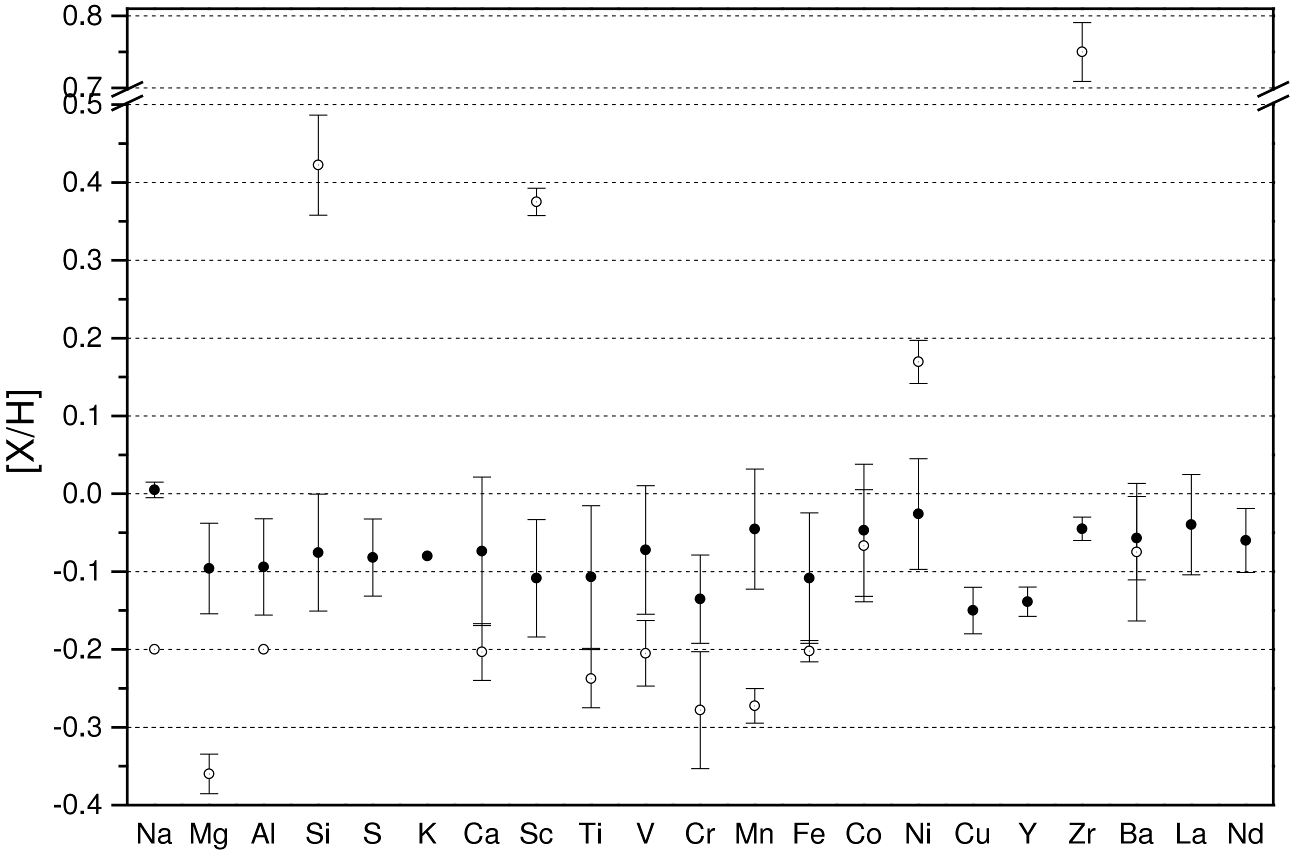

Рис. 2. Сравнение химических составов V471 Tau (открытые кружки) и FF Aqr (закрытые кружки)

компонентов исследуемых ПП на основе анализа линий Fe I и Ni I показало, что она близка к солнечной. Поэтому при моделировании использовались модели атмосферы с солнечной металличностью $[A] = 0.0$.

Расчеты показали, что суммарные ошибки определения содержаний различных элементов в исследуемых звездах, обусловленные неточностями в параметрах атмосферы, не превышают 0.09 dex, а ошибки, вызванные неопределенностью проведения континуума могут достигать 0.14 dex.

Высокая скорость вращения вторичного компонента в V471 Tau ($V\sin(i) = 83$ км/с) и FF Aqr ($V\sin(i) = 38$ км/с) приводит к сильной блендированности линий в их наблюдаемых спектрах. Корректно анализировать такие спектры можно, только используя метод синтетического спектра. В данной работе моделирование спектров выполнялось с применением программного комплекса $SYNTH$ и моделей звездных атмосфер Кастелли, Куруца [2]. При расчетах профилей линий учитывалось доплеровское уширение от теплового движения и микротурбулентности, принятой единой для всех линий в V471 Tau и FF Aqr ($\xi_{\rm turb} = 1.0$ км/с), естественное затухание, штарковское и ван-дер-ваальсовское уширение. Полученные спектры сворачивались с аппаратной функцией спектрографа и уширялись за вращение звезд и макротурбулентность ($V_{\rm macr} = 1.8$ км/с и $V_{\rm macr} = 2.5$ км/с для V471 Tau и FF Aqr соответственно). Содержания элементов определялись путем варьирования их значений до достижения наилучшего согласия теоретических и наблюдаемых спектров (см. рис. 1, *c, d*).

При использовании синтетического спектра для анализа профилей спектральных линий необходимо использование точных сил осцилляторов линий. Поэтому мы определили эмпирические значения gf на основе согласования теоретических и наблюдаемых профилей линий в Атласе Солнца [4]. При моделировании солнечного синтетического спектра скорость микротурбулентности принималась равной $\xi_{\rm turb} = 1.0$ км/с, скорость вращения – $V\sin(i) = 1.8$ км/с. Скорость макротурбулентности, силы осцилляторов и константы ван-дер-ваальсовского уширения варьировались для каждой линии до согласования ее наблюдаемого и теоретического профилей (см. рис. 1, *a, b*). Всего были проанализированы около 1330 профилей наблюдаемых линий в диапазоне длин волн $\Delta\lambda$ 5350–7900 Å.

Предварительно использованная нами методика моделирования синтетических спектров была протестирована на основе анализа спектра холодной красной звезды HD 115404 с определенным ранее химическим составом [5]. При моделировании были приняты следующие значения параметров атмосферы из работы [5]: $T_{эф} = 5035$ K, $\lg g = 4.30$, $\xi_{turb} = 0.5$ км/с, металличность модели принята равной солнечной. Расчет теоретических профилей линий в спектре звезды выполнялся по методике, описанной выше для V471 Tau и FF Aqr. Всего нами были проанализированы 795 линий и бленд в интервале $\Delta\lambda$ 5350–7900 Å и получены 832 оценки содержаний для 23 химических элементов. Для четырнадцати элементов полученные нами результаты в пределах 0.07 dex согласуются с данными [5] и только для Mg, Sc и V различия превышают 0.1 dex. Различия в значениях $\varepsilon_{\rm Mg}$, вероятно, обусловлены неточным учетом константы ван-дер-ваальсовского уширения в работе [5], а $\varepsilon_{\rm Sc}$ и $\varepsilon_{\rm V}$ – малым числом оценок содержаний (не более двух). Отметим, что все полученные нами для HD 115404 содержания элементов соответствуют средней металличности звезды ([Fe/H] = –0.12 dex). Таким образом, используемая нами методика моделирования спектров при определении химического состава атмосфер звезд позволяет получать корректные результаты и может использоваться для анализа спектров FF Aqr и V471 Tau.

АНАЛИЗ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА V471 Tau и FF Aqr

При исследовании спектра V471 Tau нами проанализированы профили 102 бленд линий и получены 178 оценок содержаний для 16 элементов. Для FF Aqr проанализированы профили 376 бленд, по которым получены 539 оценок содержаний 21 элемента. Точность определения содержаний элемента по десяти и более оценкам составляет в среднем 0.05 dex, при ограниченном числе линий – 0.08 dex, по единичным оценкам – 0.10 dex. Полученные значения [X/H] и дисперсии содержаний для FF Aqr и V471 Tau приведены на рис. 2.

Анализ этих данных для атмосферы красного карлика в V471 Tau позволяет сделать следующие выводы.

1. Значение [Fe/H] (-0.20 ± 0.02) указывает на принадлежность звезды к системе тонкого галактического диска. Данное значение меньше средней металличности звезд скопления Гиады, что согласуется с гипотезой О'Брайна и др. [1] о неродственности V471 Tau данному скоплению.
2. Содержания нечетных элементов и элементов группы железа (Na, Al, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Co, Ba) соответствуют металличности. Данные результаты согласуются с теоретическими представлениями, согласно которым такие элементы не синтезируются в звездах с массами 5–7 $M_\odot$.
3. Большие избытки C, O и Zr говорят об аккреции на поверхность красного карлика вещества главного компонента, обогащенного продуктами α- и s-процессов, при прохождении системой стадии общей оболочки.
4. Дефицит Mg при очевидном избытке Si противоречит прогнозам теории химического синтеза и может объясняться наличием дополнительного механизма переработки магния в кремний при прохождении звездой стадии сверхгиганта.
5. Избыток Ni также противоречит современным теоретическим представлениям о ядерном синтезе, согласно которым данный элемент вырабатывается одновременно с Fe в реакциях нейтронного захвата перед взрывами сверхновых I типа.

Анализ содержаний элементов для атмосферы гиганта в FF Aqr позволяет сделать следующие выводы.

1. Металличность звезды ([Fe/H] = -0.11 ± 0.08) соответствует металличности звезд тонкого галактического диска. Полученный результат согласуется с положением системы вблизи галактической плоскости ($z = 30$–50 пк) и малым значением лучевой скорости ее центра масс ($\gamma = 29$ км/с [6]). Используя значение массы вторичного компонента и зная его современный статус, мы оценили возраст системы как $(5–8) \cdot 10^9$ лет, что также подтверждает ее принадлежность диску Галактики.
2. Содержания всех элементов тяжелее неона в пределах ошибок соответствуют металличности. Заметим, что анализ инфракрасного триплета O I указывает на вероятный избыток кислорода около 1.0 dex, что соответствует его избытку в атмосфере V471 Tau (1.3 dex).

Таким образом, наше исследование показало, что в атмосфере вторичного компонента FF Aqr для большинства элементов отсутствуют аномалии содержаний, связанные со стадией общей оболочки, тогда как в атмосфере красного карлика V471 Tau наблюдаются аномалии ряда химических элементов. Причины таких различий в химсоставах двух ПП, возможно, объясняются малой массой главного компонента FF Aqr ($M \approx 0.35 M_\odot$), что соответствует ее массе на главной последовательности около $M \approx 2.0 M_\odot$. В недрах таких звезд на стадии сверхгиганта могут проходить только начальные реакции α-процесса с синтезом углерода и кислорода. Масса главного компонента V471 Tau ($M = 0.83 M_\odot$)

указывает на ее начальную массу $M \approx 5.0 M_{\odot}$, что давало возможность синтезу в ее ядре элементов α-процесса до серы, а также элементов параллельных s- и r-процессов.

Заметим однако, что величина большой полуоси FF Aqr ($A = 25 R_{\odot}$) исключала прямой контакт ее вторичного компонента ($R_2 = 6 R_{\odot}$) с ядром главного компонента ($R \approx 1.5 R_{\odot}$) при прохождении последней стадии сверхгиганта. Таким образом, в стадии общей оболочки на вторичный компонент FF Aqr мог существовать лишь перенос вещества слоевого источника, в малой степени обогащенного продуктами ядерных реакций.

Для проверки справедливости высказанных нами предположений о различии химических составов V471 Tau и FF Aqr необходимы исследования аналогичных систем с орбитальными периодами в интервале $P_{\rm orb} = 1.0^d$–3.0^d и различными массами главных компонентов. Такие исследования позволят установить эмпирическую зависимость избытков содержаний различных химических элементов от масс главных компонентов систем.

Исследования в рамках данной работы проведены при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (09–02–97017–р) и Программы “Ведущие научные школы” (НШ–4224.2008.2).

[1] *O'Brien S. M., Bond H. E., Sion E. M.* // Astrophys. J. – 2001. – **563**. – P. 971.

[2] *Castelli F., Kurucz R. L.* // IAU Symp N 210 “Modelling of Stellar Atmospheres”. – 2004. – A20.

[3] *Dworetsky M. M., Lanning H. H., Etzel P. E., Patenaude D. J.* // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.–1977.–**181**.–P. 13.

[4] *Kurucz R. L., Furenlid I., Brault J., Testerman L.* // Solar Flux Atlas from 296 to 1300nm. Nat. Solar Obs. Sunspot, New Mexico. – 1984.

[5] *Luck R. E., Heiter U.* // Astrophys. J. – 2005. – **129**. – P. 1063.

[6] *Marili E., Frasca A., Terra B. M., Catalano S.* // Astron. and Astrophys. – 1995. – **295**. – P. 393.

[7] *Martin L., Pavlenko J., Rebolo R.* // Astron. J. – 1997. – **326**. – P. 731.

[8] *Nelson B., Young A.* // Publs Astron. Soc. Pacif. – 1970. – **82**. – P. 699.

[9] *Still M., Hussain G.* // Astrophys. J. – 2003. – **597**. – P. 1059.

[10] *Thevenin F., Jasniewicz G.* // Astron. and Astrophys. – 1997. – **320**. – P. 913.

[11] *Vaccaro T. R., Vilson R. E.* // Mon. Notic. Roy. Astron. Soc. – 2003. – **342**. – P. 564.