ОСОБЕННОСТИ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПЕРЕМЕННОЙ ЗВЕЗДЫ V346 ОРИОНА

Г. У. Ковальчук

Главная астрономическая обсерватория НАН Украины
ул. Академика Заболотного, 27, 03680 Киев, Украина
e-mail: `koval@mao.kiev.ua`

Приведены предварительные результаты определения химического состава переменной звезды V346 Ori. Спектры умеренного разрешения получены на спектрографе LYNX (телескоп БТА Специальной астрофизической обсерватории РАН). Анализировался участок спектра 430–780 нм. Уверенно отождествлены более 500 линий 35 химических элементов. Обнаружен общий дефицит легких элементов (за некоторыми исключениями), избыток железа достигает 0.9 dex. Наблюдается типичный для Am-звезд ход химических аномалий с ростом Z. Ширина большинства неблендированных линий соответствует скорости осевого вращения $v \sin i = 33$ км/с.

SOME FEATURES IN THE CHEMICAL COMPOSITION OF THE VARIABLE STAR V346 ORIONIS, by Kovalchuk G. – We derived preliminary abundances for the variable star V346 Ori, based on a middle-resolution spectrum recorded at the Special Astrophysical Observatory with the LYNX spectrograph. The line list covers the range 430–780 nm. We identified more than 500 spectral lines of 35 chemical species. The general deficiency of light elements with few exceptions is found, at the same time the excess of Fe reaches 0.9 dex. The trend of chemical anomalies with increasing of Z typical for Am-stars is discovered. The width of the majority of unblended lines is consistent with the rotational velocity of $v \sin i = 33$ km/s. Some emission lines are identified.

ВВЕДЕНИЕ

V346 Ori принадлежит к небольшой группе быстрых неправильных переменных звезд с алголеподобными ослаблениями блеска, известных под более общим названием “Ae/Be звезды Хербига – (Herbig Ae/Be stars – HAEBES)”. Эти объекты представляют интерес с точки зрения их места среди других родственных объектов. Исторически сложилось представление, что эти переменные, как и феноменологически сходные с ними другие неправильные переменные (звезды T Tau, члены экстремально молодых скоплений) – это молодые объекты, не достигшие главной последовательности, но обладающие более высокими по сравнению со звездами T Tau массами. Считается, что они находятся в начале своего эволюционного пути, и их возраст не превышает $10^6 - 10^7$ лет. В спектрах всех достаточно хорошо изученных звезд этого типа выделяется яркая эмиссионная линия H_α, следы эмиссии есть иногда и в последующих членах бальмеровской серии, вплоть до H_δ. Водородная эмиссия проявляет черты переменности, а характеристики эмиссионной линии H_α изменяются даже в отсутствие фотометрической переменности. Во время активного фотометрического состояния возрастает относительный вклад поляризованного излучения. При этом изменяется профиль эмиссионной линии, варьируют положение центральной абсорбции и отношение V/R, увеличивается эквивалентная ширина.

Исследуемая переменная была достаточно хорошо изучена фотометрически автором и другими исследователями [1, 2]. Фотометрическая переменность проявляется в виде непредсказуемых алголеподобных ослаблений блеска продолжительностью несколько десятков часов и амплитудой до 2^m [1]. В минимуме блеска показатели цвета $U-B$, $B-V$, $V-R$, $V-I$ уменьшаются, тогда как в промежуточных стадиях блеска между максимумом и минимумом они в подавляющем большинстве случаев нормальные. В состоянии нормального блеска переменная показывает неправильные и быстрые вариации яркости с амплитудой до 0.3^m (V) и изменения показателей цвета с максимальной амплитудой в ультрафиолете. Как и большинство звезд этого типа (с глубокими ослаблениями блеска), V346 Ori на начальных стадиях этого процесса “краснеет” – показатели блеска увеличиваются, но заключительные этапы сопровождаются уменьшением показателей цвета – известное явление “поголубения” (bluening), наблюдавшееся впервые у переменной CQ Tau [3].

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В противовес общепринятому предположению о молодости HAEBES киевскими астрономами была выдвинута альтернативная гипотеза о продвинутом эволюционном статусе этих объектов [4]. Основанием для такого вывода послужили:

а) картина фотометрической переменности, напоминающая переменность звезд типа R Северной Короны (RCB) – объектов, уже покинувших главную последовательность;

б) тождественные оптические свойства околозвездных оболочек, окружающих звезды обоих типов;

в) признаки дефицита водорода, обнаруженные в некоторых HAEBES, объединяют их с классическими водорододефицитными звездами – переменными типа RCB;

г) положение звезд обоих типов над главной последовательностью – в области сверхгигантов.

Единственным, на наш взгляд, способом разрешить коллизию возраста HAEBES была бы попытка определить особенности их химического состава и сопоставить с таковым для хорошо исследованных звезд RCB. Поскольку все яркие HAEBES являются быстрыми ротаторами (скорость осевого вращения близка к 100 км/с) [5–7], единственным объектом для такого исследования оставалась переменная V346 Ori – для нее $v \sin i = 33$ км/с.

НАБЛЮДЕНИЯ

Наблюдательный материал получен на 6-м телескопе БТА (САО РАН) с использованием эшельного спектрографа LYNX, спектральное разрешение которого ($R \approx 27\,000$) и широкий спектральный диапазон (450–900 нм) позволили достаточно уверенно зарегистрировать большое число спектральных линий. Первичная обработка наблюдательного материала (удаление помех, создаваемых космическими частицами, нарезка изображений, учет аппаратных констант) проводилась по программе DECH, разработанной изготовителями спектральной аппаратуры. Окончательная обработка спектров и отдельных линий проводилась по составленным В. О. Скаржевским программам (не опубликовано). Для линеаризации шкал длин волн использовались линии торий-аргонового спектра [9]. Линии этого спектра также использовались для определения инструментального профиля спектрографа (естественное уширение линий предполагалось пренебрежимо малым). Поскольку инструментальные профили для разных длин волн почти полностью совпадали с гауссианой в пределах $\pm 2\sigma$ ее ширины, при дальнейших операциях свертки синтетического спектра использовался параметр $FWHM$, выраженный в пикселах. Хотя из-за присущей эшельным спектрам скважности часть линий не была зарегистрирована, удалось уверенно отождествить около 500 линий 35 химических элементов. При идентификации использовались синтетические спектры, рассчитанные для каждого вектора (стрипа) наблюденного спектра. Для расчета синтетического спектра использовался список линий, созданный с использованием данных Венской базы атомных параметров спектральных линий VALD [10].

Определение микротурбулентной скорости. В основу метода определения микротурбулентной скорости положено очевидное положение о том, что определяемое значение содержания элемента не должно зависеть от потенциала возбуждения использованных линий. Линии с низким потенциалом возбуждения κ чувствительны к изменениям температуры; влияние микротурбулентной скорости меньше всего сказывается на слабых линиях. Поэтому при ошибочно выбранном значении микротурбулентной скорости ζ значения содержания ϵ какого-либо элемента, определенные отдельно по слабым и сильным линиям, будут заметно отличаться. Очевидно, что за истинное значение ζ следует принимать то значение, при котором нет зависимости содержания элемента от эквивалентной ширины EW выбранных линий. Приведенные соображения справедливы при допущении о том, что величина ζ не зависит от высоты образования линии; в частности, значение $\lg g = 2.1$ для V346 Ori, определенное по водородным линиям [11], не противоречит этому допущению. Для определения ζ по 57 линиям железа рассчитывалось его содержание при разных ($\zeta = 1$, 2 и 3 км/с) значениях микротурбулентной скорости. Для каждого значения ζ строилась зависимость содержания [Fe/H], полученная по отдельным линиям, от их эквивалентной ширины EW. С использованием линейной аппроксимации из семейства прямых линий выбиралась линия с нулевым градиентом. Из рис. 1 видно, что подобному требованию более всего отвечает линия для значения $\zeta = 2$ км/с. В дальнейших расчетах использовалось именно это значение микротурбулентной скорости.

Определение $v \sin i$. Параметр $v \sin i$ находился путем сравнения наблюденного спектра с синтетическим, свернутым с инструментальным профилем и текущим значением скорости вращения.

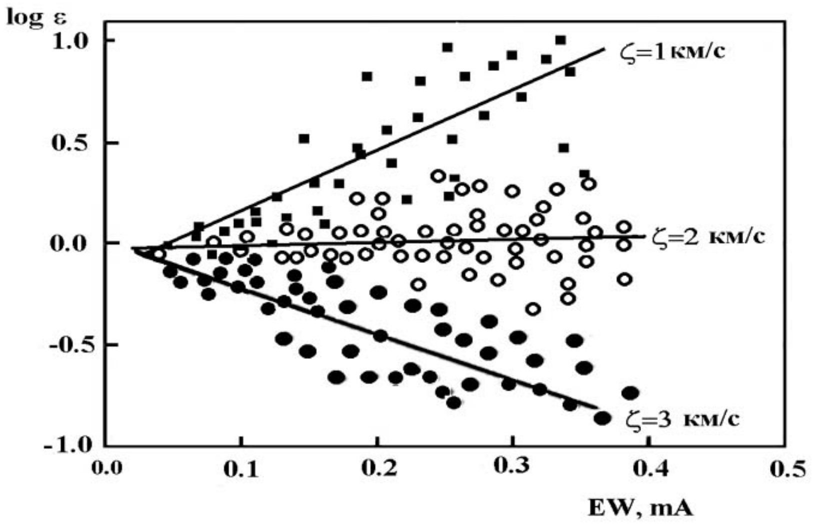

Рис. 1. Определение микротурбулентной скорости

То текущее значение $v \sin i$, при котором наблюдалось наилучшее совпадение, принималось за значение проекции скорости осевого вращения. По 28 линиям различных элементов получено среднее значение $v \sin i = 33 \pm 3$ км/с.

Определение лучевой скорости V_t и ее приведение к центру Солнца осуществлялись с использованием программы DECH, она оказалась равной 14.4 ± 2 км/с.

Определение химического состава. Знания величин T_{eff}, $\lg g$ и ζ достаточно для определения содержания элементов, представленных достаточным количеством подходящих для измерения линий (для исследуемой звезды использовались значения T_{eff} и $\lg g$, определенные в работе [11]). Нами был использован метод синтетических спектров, ибо он позволяет дополнительно использовать большое количество линий, недоступных для измерения способом прямого сравнения эквивалентных величин (последний требует учитывать только неблендированные линии). Синтетические спектры рассчитывались по моделям атмосфер Куруца [12]. Сетка моделей для разных значений T_{eff} (3500 K – 50 000 K) и $\lg g$ (0 – 5.5) рассчитывалась с помощью программы ATLAS 2, в которой учитывался покровный эффект приблизительно от $5 \cdot 10^7$ линий и конвективный перенос энергии в звездах с эффективными температурами ниже 8000 K. Кроме того, при расчетах использовались значения атомных констант, опубликованные в работе [12]. Для расчета синтетических спектров использовался пакет программ STARSP, разработанный В. Цымбалом [13]. С целью удобства сравнения наблюденного и синтетического спектров, последний сворачивался с инструментальным профилем и величиной v sin i. Рассчитанный для какого-либо определенного значения $\lg \epsilon$ данного элемента спектр сравнивался с наблюденным и, в случае необходимости, содержание изменялось в ту или другую сторону до наилучшего совпадения с последним. Содержания 31 элемента, выраженные в терминах [El/H]$= \lg \epsilon_{\rm V346 Ori} - \lg \epsilon_{\odot}$, (т. е. отнесенных к солнечному содержанию), представлены в таблице и для наглядности – на рис. 2.

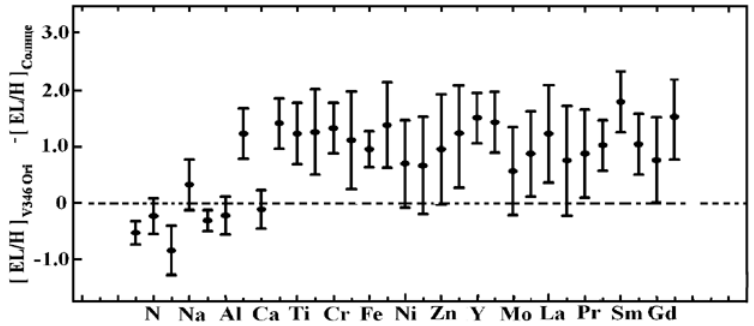

Рис. 2. Химический состав переменной V346 Ori

Результаты определения химического состава V346 Ori

N	Элемент	$[El/H]_{V346Ori} - [El/H]_{\odot}$	N	Элемент	$[El/H]_{V346Ori} - [El/H]_{\odot}$
6	C	–0.54	29	Cu	0.66
7	N	–0.24	30	Zn	0.95
8	O	–0.85	38	Sr	1.24
11	Na	0.32	39	Y	1.51
12	Mg	–0.32	40	Zr	1.43
13	Al	–0.23	42	Mo	0.56
14	Si	1.23	56	Ba	0.87
20	Ca	–0.12	57	La	1.23
21	Sc	1.41	58	Ce	0.75
22	Ti	1.23	59	Pr	0.87
23	V	1.26	60	Nd	1.02
24	Cr	1.33	62	Sm	1.80
25	Mn	1.11	63	Eu	1.04
26	Fe	0.95	64	Gd	0.76
27	Co	1.38	74	W	1.53

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Данная работа является вторым исследованием химического состава звезд типа Ae/Be Хербига. Первая работа [14] была посвящена определению химического состава звезды RZ Psc с алголеподобными ослаблениями блеска. Однако спектр последней (K0 IV) не является типичным для класса звезд Ae/Be Хербига (как правило, от поздних B- до ранних F-звезд), хотя в фотометрическом отношении это очень похожие объекты. Поэтому к сравнению химического состава этих звезд следует относиться весьма и весьма осторожно, особенно с учетом того обстоятельства, что это пионерские работы, и требуется более богатый материал для корректного сравнения. В отношении самой исследуемой звезды следует отметить существенное отличие ее химического состава от солнечного, что само по себе еще не дает четкого ответа на вопрос о направлении движения звезды по отношению к главной последовательности (в работе [4] было показано, что звезда на диаграмме Герцшпрунга–Рессела лежит над главной последовательностью). Более того, содержание группы элементов до натрия включительно в общих чертах близко к их содержанию в нормальных звездах класса A, например Веги [15, 16]. Однако тенденция изменения химсостава с дальнейшим увеличением номера элемента очень напоминает таковую для магнитных Ap [17] и пекулярных Am [18] звезд. Можно было бы искать какое-либо подобие в химсоставе исследуемой звезды и бариевых звезд, но статистика для такого сравнения в нашем случае довольно скудная. Однако в спектре V346 Ori вовсе не наблюдается типичного для звезд типа RCB избытка углерода или азота и кислорода [19]. Кроме того, для звезд RCB типично близкое к солнечному содержание элементов позже Y, чего нельзя сказать об V346 Ori. Таким образом, следует сделать такие выводы:

1. Химический состав фотосферы V346 Ori (не совпадающий с солнечным) не противоречит положению звезды на диаграмме Г–Р.
2. Значения содержания отдельных элементов не позволяют однозначно говорить о принадлежности звезды к какому-либо из типов пекулярных объектов – бариевых, Ap- или Am-звезд.
3. Химсостав звезды трудно интерпретировать в рамках гипотезы об общности звезд HAEBES (к группе которых она относится) и переменных типа RCB.
4. Поскольку еще нет определений химического состава других HAEBES, полученные выводы касаются только этой конкретной звезды, и их следует крайне осторожно применять к группе HAEBES в целом.

ВЫВОДЫ

В работе определен химический состав фотосферы переменной звезды V346 Ori. Полученные оценки содержания 31 химического элемента показывают существенный (до 1.5 dex) избыток всех элементов после Al (по сравнению с солнечным химсоставом). Этот результат не позволяет однозначно говорить о возможной принадлежности звезды к какому-либо типу пекулярных звезд и оставляет вопрос о ее эволюционном статусе открытым.

Результаты проведенного исследования элементного состава фотосферы переменной звезды V346 Ori не дали однозначного ответа на вопрос об эволюционном статусе как самой переменной, так и всей группы HAEBES. Вторая часть вопроса вряд ли когда-нибудь будет решена в полном объеме, ибо в этой группе совершенно произвольно, на основании очень разнородных классификационных критериев, объединены разительно отличающиеся по своим физическим и кинематическим характеристикам объекты.

Автор выражает глубокую благодарность сотрудникам САО РАН В. Г. Клочковой и В. Е. Панчуку за помощь при получении наблюдательного материала и полезные советы при его обработке.

[1] *Ковальчук Г. У.* Об изменениях блеска антивспыхивающей звезды V346 Ori // Астрофизика.–1985.–**23**.–С. 255–264.

[2] *Sterken C., Manfroid J., et al.* Second Catalogue of stars measured in the Long-Term Photometry of variables Project // Scientific report of ESO.–1983.–**12**.–P. 12–23.

[3] *Wenzel W.* Extremely young stars // Non-periodic Phenomena in variable stars: IAU colloq., Budapest, 1968.–P. 61–73.

[4] *Пугач А. Ф., Ковальчук Г. У.* Морфология группы Is(A) переменных. II. Положение на диаграмме Герцшпрунга–Рессела // Кинематика и физика небес. тел.–1991.–**7**.–С. 43–52.

[5] *Bohm T., Catala C.* Rotation, winds and active phenomena in Herbig Ae/Be stars // Astron. and Astrophys.–1995.–**301**.–P. 156–163.

[6] *Mora A., Merin B., Montesinos B., et al.* EXPORT: Spectral classification and projected rotational velocities of Vega-type and pre-main sequence stars // Astron. and Astrophys.–2001.–**354**.–P. 345–356.

[7] *Гринин В. П., Козлова А. М.* Фотометрическая активность и скорости вращения звезд типа UX Ori и родственных им объектов // Астрофизика.–2000.–**43**.–С. 329.

[8] *Finkenzeller U.* Rotational velocities, spectral types, and forbidden lines of Herbig Ae/Be stars // Astron. and Astrophys.–1985.–**151**.–P. 340–348.

[9] *D'Odorico S., Dous C., Pons D., Tanne L.* Atlas of the thorium-argon spectrum of the ESO Echelle-spectrograph in the $\lambda\lambda$ 3400–9000 Å region // ESO Sci. Rep.–1987.–N 7.–P. 1–3.

[10] *Piskunov N. E., Kupka F., Ryabschikova T. A., et al.* VALD: The Vienna Atomic Line Data Base // Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.–1995.–**112**.–P. 525–536.

[11] *Kovalchuk G. U., Pugach A. F.* Determination of $\lg g$ of several variable Herbig Ae/Be stars // Astron. and Astrophys.–1997.–**325**.–P. 1077–1082.

[12] *Kurutz R. L.* Type list, 1988 (Список на магнитной ленте).

[13] *Tsymbal V. V.* STARSP: A Software System For the Analysis of the Spectra of Normal stars // Odessa Astron. Publ.–1994.–**4**.–P. 146–149.

[14] *Каминский Б. М., Ковальчук Г. У., Пугач А. Ф.* Спектральные характеристики RZ Psc – холодной звезды с алголеподобными ослаблениями блеска // Письма в Астрон. журн.–2000.–**44**.–С. 611–702.

[15] *Roby S. W., Lambert D. I.* Carbon, nitrogen, and oxygen abundance in the chemically regular stars of the upper main sequence // Astrophys. J. Suppl. Ser.–1990.–**73**.–P. 67–102.

[16] *Саванов И. С., Халилов А. М.* Исследование α Lyr и γ Gem методом моделей атмосфер // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.–1985.–**72**.–С. 106–119.

[17] *Саванов И. С., Малянушенко В. П.* Содержание элементов в атмосфере химически пекулярной звезды β CrB // Астрофизика.–1990.–**33**.–С. 251–263.

[18] *Любимков Л. С., Саванов И. С.* Исследование Am звезды 16 Ori методом моделей атмосфер // Изв. Крым. астрофиз. обсерватории.–1983.–**68**.–С. 121–129.

[19] *Asplund M., Gustafsson B., Lambert D. L., Rao N. K.* The R Coronae Borealis stars – atmospheres and abundances // Astron. and Astrophys.–2000.–**353**.–P. 287–310.