

УДК: 524.387—355

## СОДЕРЖАНИЕ МЕТАЛЛОВ В АТМОСФЕРЕ ГЛАВНОГО КОМПОНЕНТА $\upsilon$ Sgr

В. В. ЛЕУШИН, Г. П. ТОПИЛЬСКАЯ

Поступила 21 апреля 1987

Принята к печати 10 ноября 1987

С использованием полученной ранее модели атмосферы главного компонента тесной двойной системы  $\upsilon$  Sgr рассчитан синтетический спектр для ряда участков в диапазоне 3900—4900 Å. Сравнением с наблюдаемым спектром определены содержания 33 элементов. Анализируется точность определения содержаний элементов.

1. *Введение.* В предыдущих работах [1, 2, 4], посвященных изучению тесной двойной системы  $\upsilon$  Sgr были определены параметры атмосферы главного компонента,  $T_e$  и  $\lg g$ , построена модель атмосферы и получены содержания легких элементов: водорода, гелия, углерода, азота и кислорода. В этой работе определяются содержания более тяжелых элементов. Поскольку для изучения химической эволюции звезд важным вопросом является точность получения содержаний элементов, здесь будет детально рассмотрена процедура определения содержания каждого элемента и проведен анализ рассчитанных участков спектра  $\upsilon$  Sgr.

2. *Метод анализа.* Особенности структуры атмосферы  $\upsilon$  Sgr обуславливают присутствие в видимой области спектра линий практически всех элементов таблицы Менделеева. С одной стороны, это позволяет получить максимальную информацию о химическом составе, но, с другой стороны, усложняет задачу из-за сильного blending линий, полностью разделить которые не удастся даже на спектрах с высокой дисперсией, поэтому для определения химического состава необходимо применять метод синтетического спектра.

Построенная в работах [1, 2] модель атмосферы  $\upsilon$  Sgr с параметрами  $T_e = 13500$  K,  $\lg g = 1.5$ ,  $N(\text{H})/\Sigma N = 5 \cdot 10^{-4}$ ,  $N(\text{He})/\Sigma N = 0.95$  использовалась здесь для расчетов участков линейчатого спектра, включающих линии тяжелых элементов. Расчеты проводились по программе KONTUR [3]. Участки спектра в области от 3900 Å до 5000 Å рассчитывались с

уширением вращением и сравнивались с наблюдаемыми. Скорость вращения, определенная по узким линиям Fe II, составляет 20 км/с, для скорости микротурбуленции принималось значение 7.1 км/с, полученное в работе [4] по кривым роста, там же приведены данные об используемом спектральном материале. Для учета штарковского уширения линий в большинстве случаев применялась приближенная формула из работы [5], при расчетах линий Na I, Mg II, Si II, Ca II использовались более точные данные о параметрах штарковского уширения, приведенные в работах [6, 7].

Из-за сильного блендирования многие слабые линии на спектрах сливаются, поэтому получить по ним оценку на содержание элементов оказывается очень сложно. Для определения химического состава каждый участок спектра рассчитывался несколько раз с варьированием содержаний элементов, формирующих этот участок. Выделенные из общего фона линии, дающие вполне определенные содержания элементов, приведены в табл. 1, где указаны также содержание элемента по каждой линии, его среднее значение и ошибка определения содержания. Для большинства элементов разброс невелик, что подтверждает правильность расчетов, адекватность используемой модели атмосферы, правильность отождествления линий и определения содержаний элементов. О точности свидетельствует и то, что в большинстве случаев рассчитанный синтетический спектр, состоящий из нескольких линий разных элементов, достаточно хорошо описывает наблюдаемый участок спектра  $\nu$  Sgr. Это видно на рис. 1, где сплошной линией показаны результаты расчетов, штриховой линией — наблюдаемые профили.

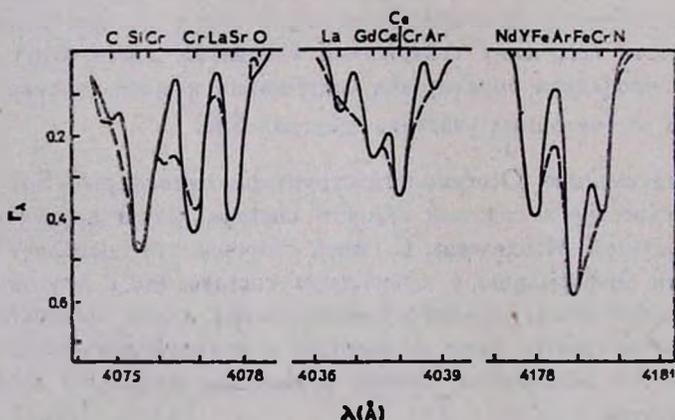


Рис. 1. Сравнение наблюдаемых (штриховая линия) и теоретических (сплошная линия) участков спектра  $\nu$  Sgr.

Необходимо, однако, отметить, что профили некоторых очень сильных линий, наблюдаемых в спектре  $\nu$  Sgr, явно не согласуются с рассчитанными и требуют очень больших избытков в содержаниях элементов, проти-

воречащих определениям, сделанным по линиям средней и слабой интенсивности. Такова ситуация с линиями Mg II  $\lambda$  4481, Ca II  $\lambda$  3933 и отчасти с Si II  $\lambda\lambda$  4128—4130 А. Можно указать три причины расхождений. Во-первых, приближения при построении модели, из которых наиболее некорректными при анализе сильных линий становятся гидростатическое и плоско-параллельное приближения. Во-вторых, возможное влияние оболочки и газовых потоков в системе  $\nu$  Sgr, которое особенно существенно, по-видимому, для резонансных линий H и K Ca II. В третьих, при расчетах профилей сильных линий, формирующихся в атмосфере сверхгиганта, необходимо учитывать отклонения от ЛТР. По этим причинам сильные линии, наблюдаемые профили которых не удалось описать, мы не использовали при определении содержаний элементов.

3. Система сил осцилляторов. При выборе линий, включенных в расчеты синтетического спектра, использовались списки линий [8—14]. Наиболее полным из них является список [8], причем для каждой линии здесь даны и сила осциллятора и потенциалы возбуждения, но эти данные содержат большие ошибки, как систематические, так и случайные. Поэтому все параметры линий из списка [8] необходимо сопоставлять с данными из других источников, особенно острой является проблема сил осцилляторов, так как ошибки в них могут достигать порядка величины.

Проверить все линии, которые мы брали из списка [8], было невозможно, поскольку в спектре  $\nu$  Sgr имеется много линий, которые редко видны в спектрах других звезд и для которых отсутствует достоверная информация об их атомных параметрах. Поэтому для каждого элемента и каждого иона были построены редуцированные графики между силами осцилляторов из списка [8] и другими списками по сильным, часто встречающимся, хорошо изученным линиям. Для некоторых элементов такие графики показали только случайный разброс, иногда очень большой, до одного порядка, например, для линий Cg II, в таких случаях слабые линии из списка [8] оставались без контроля. Для других элементов были выявлены систематические расхождения, по которым силы осцилляторов из списка [8] исправлялись в соответствии с полученной редуцированной формулой. Значения  $fg$  для линий Ni II, например, переводились из списка [8] в систему [10] по формуле

$$\lg (fg)_{10} = 0.96 \lg (fg)_8 - 0.90.$$

С помощью таких редуцированных формул силы осцилляторов всех линий, для которых это было возможно, были сведены в одну систему, за основу которой были приняты данные из [10].

4. Точность определений содержаний элементов. Ошибки в содержаниях элементов, приведенных в табл. 1, неодинаковы и зависят от следую-

СОДЕРЖАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ В  $\nu$  Sgr

| Ион                       | Линия | $\lg \frac{N_{эл.}}{\Sigma N}$ | Ион                       | Линия                     | $\lg \frac{N_{эл.}}{\Sigma N}$ | Ион  | Линия                     | $\lg \frac{N_{эл.}}{\Sigma N}$ |      |      |
|---------------------------|-------|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|--------------------------------|------|---------------------------|--------------------------------|------|------|
| Si II                     | 3918  | -1.6                           | Среднее: -4.75 $\pm$ 0.25 | Ti II                     | 4290                           | -5.5 | Среднее: -7.35 $\pm$ 0.15 |                                |      |      |
|                           | 3920  | -2.4                           | Si II                     |                           | 4075                           | -4.0 |                           | 4294                           | -5.7 |      |
|                           | 4017  | -2.4                           |                           |                           | 4077                           | -4.2 |                           | 4387                           | -6.0 |      |
|                           | 4074  | -2.4                           |                           |                           | 4188                           | -4.2 |                           | 4395                           | -5.5 |      |
|                           | 4267  | -2.4                           | Среднее: -4.13 $\pm$ 0.07 |                           |                                | 4396 |                           | -5.5                           | 4396 | -5.5 |
|                           | 4326  | -2.4                           | P II                      |                           | 4109                           | -5.1 |                           | 4464                           | -5.8 | 4468 |
| Среднее: -2.27 $\pm$ 0.13 |       | 4554                           | -4.7                      | 4636                      | -5.5                           |      |                           |                                |      |      |
| Ni                        | 4109  | -2.1                           | Среднее: -4.9 $\pm$ 0.2   | Cr II                     | 4003                           | -5.1 | Среднее: -5.66 $\pm$ 0.07 |                                |      |      |
|                           | 4151  | -1.9                           | Si II                     |                           | 3991                           | -4.5 |                           | VII                            | 4017 | -6.6 |
|                           | 4554  | -1.9                           |                           |                           | 4215                           | -4.5 |                           | 4231                           | -6.8 |      |
|                           | 4664  | -1.4                           |                           |                           | 4267                           | -4.8 |                           |                                |      |      |
|                           | 4665  | -1.4                           |                           |                           | 4291                           | -4.5 |                           | Среднее: -6.70 $\pm$ 0.10      |      |      |
|                           | 4759  | -1.9                           |                           |                           | 4293                           | -4.6 |                           | Cr II                          | 4017 | -5.3 |
| Ni II                     | 4175  | -2.1                           |                           | 4391                      | -4.5                           | 4038 | -5.3                      |                                |      |      |
|                           | 4236  | -1.9                           |                           | 4463                      | -4.5                           | 4075 | -4.9                      |                                |      |      |
|                           | 4237  | -1.9                           |                           | 4713                      | -4.4                           | 4111 | -5.2                      |                                |      |      |
|                           | 4442  | -2.0                           | Среднее: -4.54 $\pm$ 0.04 |                           | 4127                           | -5.3 | 4132                      | -5.1                           |      |      |
|                           | 4643  | -1.9                           | Ar II                     | 4013                      | -3.7                           | 4179 | -5.1                      |                                |      |      |
|                           | 4788  | -2.0                           |                           | 4038                      | -3.5                           |      |                           |                                |      |      |
| Среднее: -1.87 $\pm$ 0.07 |       | 4039                           | -3.5                      | Среднее: -5.16 $\pm$ 0.05 |                                |      |                           |                                |      |      |
| O II                      | 4078  | -2.7                           | 4131                      | -3.8                      | Mn II                          | 4292 | -5.5                      |                                |      |      |
|                           | 4642  | -2.7                           | 4178                      | -3.3                      | 4326                           | -5.6 |                           |                                |      |      |
| Среднее: -2.7             |       | 4179                           | -3.3                      | Среднее: -5.55 $\pm$ 0.05 |                                |      |                           |                                |      |      |
| Ne I                      | 4715  | -1.7                           | 4266                      | -3.9                      | Fe II                          | 3918 | -3.8                      |                                |      |      |
|                           | 4789  | -1.7                           | 4637                      | -3.7                      | 4108                           | -3.8 |                           |                                |      |      |
| Среднее: -1.7             |       | 4656                           | -3.5                      | 4128                      | -2.8                           |      |                           |                                |      |      |
| Mg II                     | 4387  | -4.0                           | Среднее: -3.58 $\pm$ 0.09 | 4177                      | -3.2                           |      |                           |                                |      |      |
|                           | 4390  | -4.0                           | K II                      | 4186                      | -4.0                           |      |                           |                                |      |      |
|                           | 4436  | -4.2                           | Ca II                     | 4097                      | -4.3                           |      |                           |                                |      |      |
| Среднее: -4.07 $\pm$ 0.07 |       | Sc II                          | 4246                      | -7.5                      |                                |      |                           |                                |      |      |
| Al II                     | 4639  | -4.5                           |                           | 4325                      | -7.2                           |      |                           |                                |      |      |
|                           | 4663  | -5.0                           |                           |                           |                                |      |                           |                                |      |      |

Таблица 1 (окончание)

| Ион      | Линия            | $\lg \frac{N_{эл.}}{\Sigma N}$ | Ион      | Линия            | $\lg \frac{N_{эл.}}{\Sigma N}$ | Ион      | Линия            | $\lg \frac{N_{эл.}}{\Sigma N}$ |
|----------|------------------|--------------------------------|----------|------------------|--------------------------------|----------|------------------|--------------------------------|
|          | 4385             | -3.6                           | Среднее: | -4.78 $\pm$ 0.09 |                                | Среднее: | -5.35 $\pm$ 0.25 |                                |
|          | 4439             | -3.3                           | ZnI      | 4310             | -5.6                           | CaII     | 4036             | -7.4                           |
|          | 4461             | -2.8                           | StrII    | 4077             | -8.0                           |          | 4186             | -7.2                           |
|          | 4472             | -3.8                           |          | 4215             | -8.0                           |          | 4187             | -7.2                           |
|          | 4474             | -3.4                           | Среднее: | -8.0             |                                | Среднее: | -7.27 $\pm$ 0.14 |                                |
|          | 4554             | -3.6                           | ZrII     | 3991             | -7.1                           | NdII     | 4232             | -6.0                           |
| Среднее: | -3.33 $\pm$ 0.10 |                                |          | 4149             | -7.7                           | SmII     | 4188             | -7.0                           |
| NiII     | 4015             | -5.2                           |          | 4187             | -7.6                           | EuII     | 4205             | -8.3                           |
|          | 4067             | -4.8                           |          | 4231             | -7.6                           | GdII     | 4037             | -6.6                           |
|          | 4198             | -4.8                           | Среднее: | -7.50 $\pm$ 0.14 |                                | TaII     | 4177             | -12.2                          |
|          | 4554             | -4.8                           | MoII     | 3941             | -7.3                           |          | 4236             | -12.2                          |
|          | 4640             | -4.9                           | BaII     | 4554             | -7.0                           | Среднее: | -12.2            |                                |
|          | 4665             | -4.5                           | LaII     | 4036             | -5.1                           | ClII     | 4235             | -4.1                           |
|          | 4666             | -4.5                           |          | 4077             | -5.6                           |          | 4810             | -4.1                           |

дких факторов: количества линий данного элемента, интенсивности этих линий, степени блендирования линиями других элементов. По точности определения содержания все элементы можно разделить на две группы. К первой относятся элементы с надежно определенными содержаниями, это C, N, Mg, Si, S, Ar, Ti, Cr, Fe, Ni, для анализа которых использовано сравнительно большое количество линий — больше пяти. Сюда же входят магний и кремний, хотя для них бралось всего по три линии, но это линии средней интенсивности, изолированные, с хорошо известными атомными параметрами. Для остальных, перечисленных здесь элементов, линии в большинстве случаев искажены блендами, но расчет синтетического спектра позволяет уверенно определить содержание по каждой из них и получить среднее значение с высокой точностью.

Содержания элементов второй группы определены всего по одной—двум линиям, к тому же искаженным блендами, поэтому каждый из них требует подробного обсуждения.

Неон имеет первый потенциал ионизации 21.56 эВ, поэтому в атмосфере  $\nu$  Sgr неон находится в нейтральном состоянии. В исследуемой спектральной области сильных линий Ne I нет, ряд слабых линий имеется между  $\lambda$  4500—4900 А. Наиболее сильная из них, линия Ne I  $\lambda$  4788.93,  $f_g = 0.015$ ,  $\epsilon_H = 18.3$  эВ, отчетливо видна на регистртраммах и блендируется только линиями азота, содержание которого определяется уверенно и с

малым разбросом. По этой линии содержание неона в  $\nu$  Sgr  $\lg N(\text{Ne})/\Sigma N = -1.7$ , то есть неон оказывается наиболее обильным элементом после гелия. Другие линии неона на порядок и более слабее, на спектрах удалось выделить только линию  $\text{Ne I } \lambda 4715.12$ ,  $fg = 2.1 \cdot 10^{-3}$ ,  $\epsilon_H = 18.30$  эВ, которая находится в крыле линии  $\text{S II } \lambda 4716.22$  и блендируется со слабыми линиями  $\text{Cr II}$ ,  $\text{Ni I}$ ,  $\text{Ag II}$ . Расчеты этого участка спектра дали то же значение содержания неона,  $\lg N(\text{Ne})/\Sigma N = -1.7$ .

Для содержания натрия удалось получить только весьма неуверенную верхнюю оценку, поскольку ни линии  $\text{Na I}$ , ни линии  $\text{Na II}$  в спектре  $\nu$  Sgr не видны. На исследуемую спектральную область приходятся две линии  $\text{Na I } \lambda 4664.81$  и  $\lambda 4668.56$  А, по отсутствию которых на регистрируемых можно сделать верхнюю оценку содержания натрия,  $\lg N(\text{Na})/\Sigma N = -4.2$ , однако даже такая оценка крайне ненадежна, так как этот участок спектра, на который приходятся линии  $\text{Ni I}$ ,  $\text{Ni II}$ ,  $\text{Al II}$ ,  $\text{Ca II}$ ,  $\text{Fe II}$ ,  $\text{Ni II}$ , вообще описывается очень плохо, по-видимому из-за низкой точности атомных параметров.

Содержание алюминия было определено по группе линий 69 мультиплета,  $\text{Al II } \lambda 4639.33$ ,  $\lambda 4639.78$ ,  $\lambda 4640.38$  (в табл. 1 они указаны как одна линия) и по линии второго мультиплета,  $\text{Al II } \lambda 4663.05$  А. Эти определения нельзя считать надежными, так как участки спектра, на которых находятся линии  $\text{Al II}$ , плохо описываются теоретически. Рядом с линиями 69 мультиплета находятся неотожествленные линии,  $\lambda 4638$  и  $\lambda 4641$ , первая, возможно, принадлежит  $\text{Si III } \lambda 4638.12$ , 13 мультиплета, для которой неизвестны атомные параметры. Кроме того, линии  $\text{Al II}$  блендируются линиями  $\text{Ni II}$ . Другие линии  $\text{Al II}$  в спектре  $\nu$  Sgr найти не удалось, полученное содержание алюминия  $\lg N(\text{Al})/\Sigma N = -4.75 \pm 0.25$ .

Содержание фосфора определялось по двум линиям  $\text{P II}$ ,  $\lambda 4109.19$  и  $\lambda 4554.82$  А. Первая линия на спектрах сливается с линиями  $\text{Ca II } \lambda 4109.82$ ,  $\text{Ni I } \lambda 4109.98$  и  $\text{Ni II } \lambda 4110.00$  А, хотя теоретически она отделяется от них, промежутки на спектрах замывает либо зерно, либо неизвестной спектральной линией. Линия  $\text{P II } \lambda 4554.82$  блендируется с  $\text{Ni I } \lambda 4554.85$  и находится в крыле более сильной линии  $\text{Fe II } \lambda 4555.88$ . Среднее содержание фосфора  $\lg N(\text{P})/\Sigma N = -4.9 \pm 0.20$ . Содержание хлора определялось по линиям  $\text{Cl II } \lambda 4235.3$ ,  $\lambda 4235.47$  (в табл. 1 указаны как одна линия) и  $\lambda 4810.00$ , по всем линиям получено одинаковое значение, на 2.5 порядка превышающее солнечное. Первые две линии блендируются с линией  $\text{Ta II } \lambda 4235.94$ , вторая — с  $\text{Ni I } \lambda 4810.11$  и  $\text{Ni II } \lambda 4810.30$ , все они слабые, но рассчитанный и наблюдаемый спектр совпадают хорошо.

Содержание калия, определенное по одной линии  $\text{K II } \lambda 4186.13$ ,  $fg = 2.45$  [8],  $\epsilon_H = 23.11$  эВ, на 3 порядка больше солнечного. Линия: слабая и на спектре сливается с другими слабыми линиями  $\text{Nd II}$ ,  $\text{Cr II}$ ,

Fe II, Ce II, но при расчете синтетического спектра отделяется от них уверенно.

Содержание кальция определялось по одной слабой изолированной линии Ca II  $\lambda$  4097.11, при расчетах учитывалось блендирование ее линией Cr II  $\lambda$  4097.11, которая, однако, дает малый вклад. Были рассчитаны также резонансные линии K и H Ca II, их профили не удается согласовать с наблюдаемыми при любых значениях содержания кальция. Кроме того, профили этих линий на регистрограммах, полученных в разные фазы, а также в одну фазу, но разные эпохи, значительно различаются между собой; на некоторых спектрах линии расщепляются, все это вызвано влиянием оболочки и газовых потоков, существующих в системе  $\nu$  Sgr. Другие слабые линии Ca II в спектре  $\nu$  Sgr сильно блендируются линиями других элементов, их не удастся выделить из общего фона и использовать для определения содержания кальция.

Содержание скандия определялось по двум линиям: линия Sc II  $\lambda$  4246.83 почти изолированная, при расчетах учитывалась только бленда Nd II в красном крыле, линия Sc II  $\lambda$  4325.01 сама находится в крыле более сильных линий Cr II  $\lambda$  4325.40 и Fe II  $\lambda$  4325.54; среднее содержание скандия  $\lg N(\text{Sc})/\Sigma N = -7.35 \pm 0.15$ .

Линии V II весьма многочисленны в видимой области спектра в F-звездах, но все они слабы, и в спектре  $\nu$  Sgr до такой степени блендируются более сильными линиями других элементов, что оказывается очень трудно определить по ним содержание ванадия. Нам удалось использовать для этой цели только две линии V II, и то весьма неуверенно, линия V II  $\lambda$  4017.28 почти совпадает с линией C II  $\lambda$  4017.27, причем они примерно одинаковы по интенсивности, а линия V II  $\lambda$  4232.07 едва видна на спектрах в крыле линии Fe II 4233.17 и к тому же блендируется линиями Nd II, Ce II и Zr II. Но содержание ванадия по этим двум линиям получилось близким, среднее значение  $\lg N(\text{V})/\Sigma N = -6.70 \pm 0.10$ .

Содержание марганца определялось по линиям Mn II  $\lambda$  4292.25 и  $\lambda$  4326.63, которые дали очень близкие значения,  $-5.5$  и  $-5.6$  соответственно. Обе линии практически изолированные, если судить по расчетам, но с двух сторон от линии Mn II  $\lambda$  4292.25 наблюдаются примерно равные ей по интенсивности неотожествленные линии, положение линии марганца локализуется уверенно по двум соседним сильным линиям Ti II  $\lambda$  4290.22 и Ti II  $\lambda$  4294.10.

Цинк в атмосфере  $\nu$  Sgr почти полностью ионизован (потенциалы ионизации 9.39 эВ и 17.96 эВ), однако данные о силах осцилляторов линий Zn II в оптическом диапазоне отсутствуют. Поэтому для определения содержания цинка была выбрана наиболее сильная линия Zn I  $\lambda$  4810.53,  $f_g = 0.74$  [14],  $\epsilon_H = 4.06$  эВ. В работе [8] дано на порядок большее зна-

чение  $fg = 7.24$ , но мы использовали значение из работы [14], поскольку оно согласуется с системой сил осцилляторов линий Zp I, Zp II, которая принималась при определении содержания цинка в атмосфере Солнца [17]. Линия Zp I  $\lambda$  4817.53 в атмосфере  $\nu$  Sgr сильно блендируется с линиями N II и Fe II, но содержания этих элементов надежно определены по большому числу линий, и для согласования наблюдаемого спектра с синтетическим необходимо допустить избыток цинка на 3 порядка. Для дополнительного контроля правильности наших расчетов линия Zp I  $\lambda$  4810.53 была рассчитана для модели Проциона с параметрами  $T_e = 6400$  K,  $\lg g = 4.1$  [15]. Сравнение ее с наблюдаемой линией, эквивалентная ширина которой измерена в работе [16], дало солнечное содержание цинка в атмосфере Проциона.

Содержание стронция определялось по двум линиям, по сильной линии Sr III  $\lambda$  4077.71, которая блендируется только с La II  $\lambda$  4977.35, и более слабой изолированной линией Sr II  $\lambda$  4215.52. Эти линии дают значительно различающиеся содержания стронция,  $-7.2$  — первая линия,  $-8.0$  — вторая. Это расхождение можно снять, если допустить для лантана избыток на 5 порядков по сравнению с солнечным содержанием, что не противоречит определению его содержания по другой линии La II  $\lambda$  4036.78, которая дает избыток на 5.5 dex. Эта линия лантана, в свою очередь, блендируется только с линией V II  $\lambda$  4036.78, содержание которого уже определено независимо по двум другим линиям (в эту бленду ванадий вносит значительно меньший вклад, чем лантан). Тогда можно считать содержание стронция одинаковым по двум линиям и равным  $-8.0$  в логарифме числа атомов, и содержание лантана  $-\lg N(\text{La})/\Sigma N = -5.35 \pm 0.25$  тоже со сравнительно небольшим разбросом.

Ситуация с итрием такая же, как с ванадием. Линии этого элемента весьма многочисленны, но сравнительно слабые, и из-за блендирования линиями других элементов надежно определить содержание итрия не удастся. По отсутствию следов линии Y II  $\lambda$  4177.54 в крыле линии Fe II  $\lambda$  4177.77 можно сделать верхнюю оценку содержания итрия: его избыток в атмосфере  $\nu$  Sgr не должен превышать два порядка по числу атомов. Можно оценить содержание итрия еще по слабой линии Y II  $\lambda$  4374.94. Это бленда с N II  $\lambda$  4374.96, изолированная от других линий. При содержании азота  $\lg N(\text{N})/\Sigma N = -1.9$  точное согласование наблюдаемого профиля этой линии с теоретическим можно получить при  $\lg N(\text{Y})/\Sigma N = -8.1$ , что подтверждает оценку, полученную по линии Y II  $\lambda$  4177.54.

Содержание циркония определялось по четырем слабым линиям: линия Zr II  $\lambda$  3991.14 блендируется с S II  $\lambda$  3990.14, Zr II  $\lambda$  4149.20 — практически изолированная, Zr II  $\lambda$  4187.70 блендируется с Ce II  $\lambda$  4187.60 и Si II  $\lambda$  4187.13,  $\lambda$  4187.15, очень слабая линия Zr II  $\lambda$  4231.64 нахо-

дится в синем крыле линии Fe II  $\lambda$  4233.17. Разброс в содержании циркония по этим четырем линиям — 0.6 dex, среднее содержание —  $\lg N(\text{Zr})/\Sigma N = -7.50 \pm 0.14$ .

Содержание молибдена в  $\upsilon$  Sgr определено по одной изолированной линии Mo II  $\lambda$  3941.48,  $fg = 2.04 |12|$ ,  $\epsilon_H = 3.12$ . Причем, как и во всех подобных случаях, в окрестностях линии рассчитывался синтетический спектр на участке шириной в 2 Å, от  $\lambda$  3940.32 до  $\lambda$  3942.22 Å, где учитывались 11 линий разных элементов. Поскольку вклад в интенсивность от всех этих линий, содержания элементов для которых уже были определены, оказался мал, то наблюдаемая на этом участке линия была однозначно отождествлена с линией Mo II  $\lambda$  3941.48, и дала избыток молибдена на 2.7 dex по сравнению с солнечным содержанием.

Барий, с потенциалами ионизации  $\chi_1 = 5.21$  эВ,  $\chi_2 = 10.00$  эВ, в атмосфере  $\upsilon$  Sgr находится преимущественно в состоянии Ba III, однако данных о линиях Ba III в литературе нет. Поэтому содержание бария определялось по наиболее сильной резонансной линии Ba II  $\lambda$  4554.02,  $fg = 1.48$ , которая блендируется с Ni II  $\lambda$  4553.91 и Zr II  $\lambda$  4553.97. Линия слабая, но отождествляется на спектрограммах уверенно и дает содержание бария  $\lg N(\text{Ba})/\Sigma N = -7.0$ , что на 3.2 dex больше солнечного. Другие линии Ba II на спектрограммах не выделяются и позволяют получить лишь верхнюю оценку содержания, которая не противоречит результату, полученному по линии Ba II  $\lambda$  4554.03. Например, по отсутствию линии Ba II  $\lambda$  4326.70,  $fg = 0.06$ ,  $\epsilon_H = 0.73$  эВ, можно сделать вывод, что содержание бария меньше — 6.0.

Многочисленные линии Ce II в спектре  $\upsilon$  Sgr очень слабы, сильно блендируются линиями других элементов и позволяют получить лишь верхнюю оценку содержания церия. Наименьшая верхняя граница содержания церия в атмосфере  $\upsilon$  Sgr получается по линиям Ce II  $\lambda$  4037.67 —  $\lg N(\text{Ce})/\Sigma N \leq -7.4$ , и Ce II  $\lambda$  4186.60,  $\lambda$  4187.32 —  $\lg N(\text{Ce})/\Sigma N \leq -7.2$ , следовательно, можно считать, что избыток церия не превышает 3 dex.

Содержание неодима удалось только приближенно оценить по единственной слабой линии Nd II  $\lambda$  4232.38,  $fg = 0.10$ ,  $\epsilon_H = 0.06$  эВ, которая находится в крыле Fe II  $\lambda$  4233.17. По этой линии избыток неодима составляет 4.5 порядка, ошибка здесь может быть  $\pm 0.5$  dex, но эта линия явно присутствует, так как видна на всех спектрах и не может быть приписана какому-либо другому элементу. По ряду других линий Nd II, включенных в расчеты синтетического спектра, но незаметных на спектрограммах, верхняя граница содержания неодима получилась + 5 dex по сравнению с солнечным.

Содержание самария было определено по линии  $\text{Sm II } \lambda 4188.13$ ,  $fg = 0.18$ ,  $\epsilon_H = 0.54$  эВ. С точностью до  $\pm 0.5$  получен избыток на 4 порядка. Для проверки правильности используемых атомных параметров эта линия была посчитана для Проциона и дала избыток самария на 0.8 dex. Даже если считать, что в атмосфере Проциона самария должно быть столько же, сколько на Солнце, и скорректировать соответственно значение  $fg$ , то для  $\upsilon \text{Sgr}$  все равно остается избыток, превышающий 3 порядка. Необходимо еще отметить, что на спектрах  $\upsilon \text{Sgr}$  линия  $\text{Sm II } \lambda 4188.13$  блендируется с  $\text{Ni II } \lambda 4187.85$  и  $\text{Gd II } \lambda 4188.10$ , обе линии учитывались при расчетах, а содержания этих элементов были определены независимо. В спектре Проциона линия  $\text{Ni II } \lambda 4187.85$  отсутствует и обе линии —  $\text{Sm II}$  и  $\text{Gd II}$  находятся в крыле линии  $\text{Fe I } \lambda 4188.73$ , которая отсутствует в спектре  $\upsilon \text{Sgr}$  (но включалась в расчеты). Этот участок,  $\lambda\lambda 4185.95\text{—}4187.85$  хорошо описывается теоретически для обеих звезд, что позволяет считать, что имеющийся список линий достаточно полный и правильный.

Содержание европия определялось по резонансной линии  $\text{Eu II } \lambda 4205.05$ ,  $fg = 0.83$ , которая по расчетам получается изолированной. Получен избыток европия на 3 порядка. Наблюдаемая линия заметно шире теоретической и имеет бленду в красном крыле, отождествить которую не удалось. Возможно, рассогласование профилей также связано с присутствием каких-то неотожествленных бленд. Поэтому определение содержания европия производилось по сопоставлению теоретической и наблюдаемой центральных глубин, если делать это по  $W_\lambda$ , то требуемый избыток будет гораздо больше. Определение содержания европия по этой линии с использованием тех же атомных параметров было проведено для Проциона, там получен небольшой дефицит,  $-0.23$  dex, причем профиль линии описывается точно.

Содержания гадолиния было определено по линии  $\text{Gd II } \lambda 4037.33$ ,  $fg = 1.79$ ,  $\epsilon_H = 0.66$  эВ, которая блендируется с более слабыми линиями  $\text{Sr II}$ ,  $\text{Ce II}$  и на спектре сливается с более сильной линией  $\text{Sr II } \lambda 4038.03$ . Описывается этот участок достаточно хорошо, содержание гадолиния получается  $\lg N(\text{Gd})/\Sigma N = -6.6$ . Другие линии  $\text{Gd II}$  более слабые и в спектре  $\upsilon \text{Sgr}$  не видны.

Тантал — это единственный элемент, кроме водорода, для которого для атмосферы  $\upsilon \text{Sgr}$  получен дефицит. Его содержание было определено по двум линиям:  $\text{Ta II } \lambda 4176.90$ ,  $fg = 1.0$ ,  $\epsilon_H = 1.80$  эВ и  $\text{Ta II } \lambda 4235.94$ ,  $fg = 12.0$ ,  $\epsilon_H = 3.07$  эВ. Уже при нормальном содержании тантала по расчетам получаются заметные линии  $\text{Ta II}$ , в то время как на спектрах их нет, хотя соответствующие участки описываются уверенно и положение линий  $\text{Ta II}$  локализуется точно по соседним сильным линиям  $\text{Fe II}$ . Значе-

ния сил осцилляторов были взяты из [8], они совпадают с приведенными в [12], других данных об атомных параметрах этих линий нет. Содержание талала по двум линиям Та II получилось одинаковым и равным — 12.2 в логарифме числа атомов.

5. *Заключенис.* Детальный анализ спектра  $\upsilon$  Sgr и сравнение его с рассчитанными участками синтетического спектра позволяет с хорошей точностью,  $\pm 0.04$  в логарифме числа атомов, спределить содержание 10 элементов, перечисленных в табл. 1. Анализ интенсивностей и контуров спектральных линий остальных элементов дает оценки содержаний с формальной точностью не хуже  $\pm 0.50$  dex. Однако нужно иметь в виду, что уникальный спектр  $\upsilon$  Sgr не позволяет с достаточной уверенностью проводить отождествление линий элементов, которые слабо представлены в оптической области спектра. Погрешности в отождествлении могут привести к значительным ошибкам в определении содержаний, достигающим нескольких порядков. Анализ полученных содержаний будет опубликован в следующей статье.

Ростовский государственный  
университет

## THE METAL CONTENT IN THE ATMOSPHERE OF THE BRIGHT COMPONENT $\upsilon$ SGR

V. V. LEUSHIN, G. P. TOPILSKAYA

The synthetic spectrum for the bright component of the close binary system  $\upsilon$  Sgr in the wavelength region 3700—4800 Å was computed using the model atmosphere with the following parameters:  $T_e = 13\,500$  K,  $\lg g = 1.5$  and  $N(\text{H})/N(\text{He}) = 5 \cdot 10^{-4}$ . From the comparison of the observed and the synthetic spectrum in the wavelength region 3900—4900 Å the abundances of 33 chemical elements were estimated. The errors of the obtained abundances were discussed.

### ЛИТЕРАТУРА

1. В. В. Леушин, Г. П. Топильская, *Астрофизика*, 22, 121, 1985.
2. В. В. Леушин, Г. П. Топильская, *Астрофизика*, 26, 195, 1987.
3. В. В. Леушин, Г. П. Топильская, *Астрофизика*, 25, 103, 1986.
4. В. В. Кравцов, В. В. Леушин, *Спектрофотометрический анализ атмосферы яркого компонента двойной системы  $\upsilon$  Sgr*, Деп. № 99-82, 1981.
5. S. Sahal-Brechot, B. Segre, *Astron. and Astrophys.*, 13, 161, 1971.
6. Г. Грим, *Спектроскопия плазмы*, Мир, М., 1969.
7. Г. Грим, *Уширение спектральных линий в плазме*, Мир, М., 1978.

8. *R. Kurucz, E. Peytremann*, *SAO Spec. Rept.*, 362, 1, 1975.
9. *C. E. Moor*, *Atomic energy levels.*, *Nat. bur. Stand. Circular* 467, V. 1—3, Washington, 1949—1958.
10. *S. Adelman*, *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.*, 206, 637, 1984.
11. *Г. А. Касабов, В. В. Елисеев*, *Спектроскопические таблицы для низкотемпературной плазмы*, Атомиздат, М., 1973.
12. *Ч. Корлисс, У. Бозман*, *Вероятности переходов и силы осцилляторов 70 элементов*, Мир, М., 1968.
13. *А. Н. Зайдель, В. К. Прокофьев, С. М. Райский и др.*, *Таблицы спектральных линий*, Наука, М., 1969.
14. *А. А. Боярчук, М. Е. Боярчук*, *Изв. Крым. астрофиз. обсерв.*, 63, 66, 1981.
15. *В. В. Леушин, В. В. Соколов*, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 12, 42, 1980.
16. *И. А. Зенина, О. А. Зенина, В. В. Леушин*, *Астрофиз. исслед. (Изв. САО)*, 8, 25, 1976.
17. *O. Haug, O. Engvold*, *Inst. Theor. Astrophys. Univ. Oslo, Rep. No. 49*, 1977.