АКАДЕМИЯ НАУК АРМЯНСКОЙ ССР

АСТРОФИЗИКА

ТОМ 4 МАЙ, 1968 ВЫПУСК 2

# СПЕКТРОФОТОМЕТРИЯ F-ЗВЕЗД. III. АТМОСФЕРА σ Boo

М. А. КИППЕР, Т. А. КИППЕР

Поступила 27 декабря 1967
Исправлена 20 февраля 1968

В статье приводятся результаты анализа атмосферы σ Boo методом кривых роста. Определены температуры возбуждения и ионизации, микротурбулентная скорость, электронное давление и относительное содержание элементов. Обнаружен дефицит металлов.

Статья является продолжением цикла работ по F-звездам, выполненных на основе спектрограмм с высокой дисперсией [1—3]. В статье приведены результаты анализа атмосферы σ Boo (F2V) методом кривых роста. В качестве наблюдательного материала используются эквивалентные ширины, полученные авторами [3], а также результаты наблюдений, опубликованные К. О. Райтом и др. [4].

1. *Кривые роста.* При анализе наблюдательных данных, как и в предыдущей статье [2], использовалась кривая роста Унзольда [5]. Кривые роста построены отдельно для всех изученных элементов. Если число линий, которые можно было использовать, мало, то предположено, что вертикальный сдвиг $\lg c/2R_c v_0$ у этих элементов не отличается от среднего по другим элементам. При построении кривых роста в большинстве случаев применялись экспериментальные силы осцилляторов Корлисса и Бозмана [6]. В остальных случаях, если это оказалось возможным, силы осцилляторов согласованы с их системой. На рис. 1 приведена кривая роста для Fe I (линии, возникшие с уровней с различными потенциалами возбуждения, нанесены разными значками). На рис. 2 приведена составная кривая роста, которая получена в результате совмещения кривых роста для отдельных элементов.

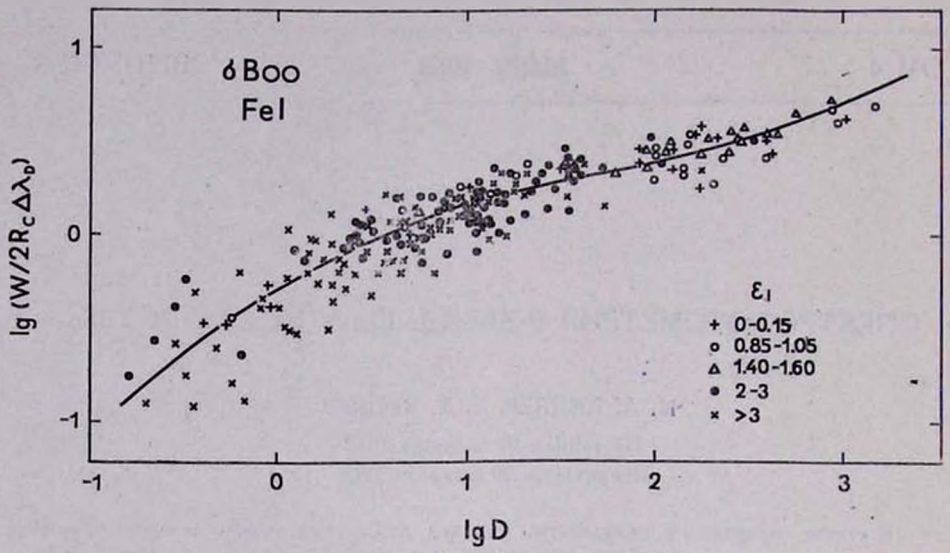
δ Boo
Fe I
$\varepsilon_I$
+ 0-0.15
○ 0.85-1.05
△ 1.40-1.60
● 2-3
× >3
lg (W/2R_c Δλ_D)
lg D

Рис. 1.

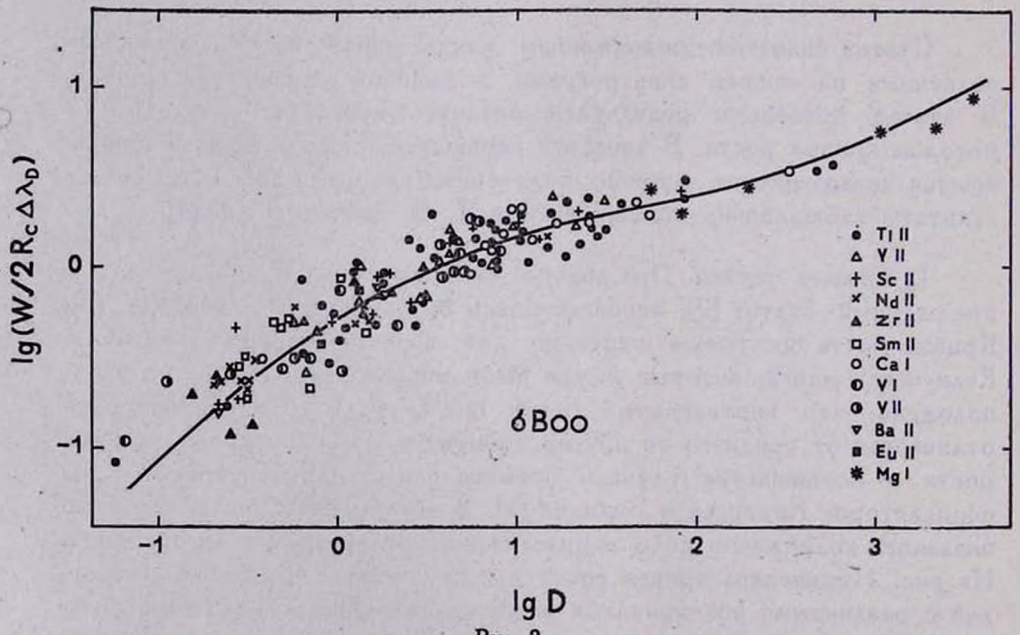
δ Boo
Ti II
V II
Sc II
Nd II
Zr II
Sm II
Ca I
V I
V II
Ba II
Eu II
Mg I
lg (W/2R_c Δλ_D)
lg D

Рис. 2.

В качестве предварительной температуры возбуждения была по спектральному классу выбрана $\theta = 0.90$. Уточнение с помощью кривых роста дало

$$\theta_B = 0.91.$$

Зависимость $\theta_B$ от потенциала возбуждения $\varepsilon_i$ не найдена. Лучшее совпадение наблюденных кривых роста получается с теоретической кривой с постоянной затухания, при которой $\lg 2\alpha = -1.5$ (по всем линиям Fe I). Линии, возникшие с уровней с низким потенциалом возбуждения, согласуются лучше с несколько меньшей постоянной затухания. Это наверно обусловлено тем, что они, в среднем, возникают в более поверхностных слоях атмосферы, где затухание вследствие давления меньше.

2. *Турбулентная скорость.* Вертикальный сдвиг $\lg c\,2K_c v_0$ даст возможность найти микротурбулентную скорость $v_0$. Она получается одинаковой по нейтральным и ионизованным атомам и не зависит от потенциала возбуждения $\varepsilon_i$.

Если принять по водородным линиям $R_c = 0.83$, то $v_0 = 2.9$ *км/сек.*

3. *Ионизационная температура и электронное давление.* Ионизационная температура найдена по средней зависимости [7]

$$\frac{\theta_И}{\theta_B} = 0.91. \qquad (1)$$

Отсюда $\theta_И = 0.83$. Далее, используя для Fe, Ti, V и Cr формулу Саха

$$\lg \frac{N_{r+1}}{N_r} = -\lg P_e - \chi\theta - \frac{5}{2}\lg\theta + 9.079 + \lg \frac{U_{r+1}}{U_r}, \qquad (2)$$

найдено

$$\lg P_e = 1.51.$$

Эти значения $\theta_И$ и $\lg P_e$ были впоследствии использованы при нахождении содержания элементов в атмосфере $\sigma$ Boo.

Электронное давление найдено и по формуле Инглиса-Теллера

$$\lg n_e = 23.26 - 7.5 \lg m, \qquad (3)$$

где $m$ — номер последней видимой бальмеровской линии.

Чтобы использовать эту формулу, придется экстраполяцией определить эквивалентные ширины последних водородных линий. Таким путем найдено, что номер последней видимой линии $m = 18$. Тогда, если принять $\theta = 0.83$, получим

$$\lg P_e = 1.74.$$

Формула (3) даст завышенные значения, так как в ней учитывается расширение водородных линий только ионами. По И. М. Копылову [8] поправка к $\lg n_e$ из-за влияния электронов для спектрального класса F 2 составляет примерно — 0.30. Тогда полученное из (3) значение хорошо согласуется с результатами из формулы Саха. Правда, номер последней наблюдаемой линии определен весьма неуверенно.

Полученные значения $\lg P_e$ несколько меньше среднего по спектральному классу.

4. *Водородные линии.* Контуры бальмеровских линий не показывают эффекта абсолютной величины по сравнению с $\nu$ Her (F2 II—III).

Эквивалентные ширины бальмеровских линий позволяют найти число водородных атомов на втором квантовом уровне над 1 $см^2$ фотосферы $\lg N_2H$ по формуле Унзольда

$$W_\lambda = \frac{\pi e^2 \lambda^2}{m_e c^2} f_{2n} N_2 H. \qquad (4)$$

По (4) найдено

$$\lg N_2H = 16.05.$$

Если использовать в качестве температуры возбуждения для водорода ($\varepsilon_2 = 10.15$ *эв*) среднюю температуру ионизации и температуру возбуждения для металлов ($\bar{\theta}_B = 0.87$), получим число водородных атомов на основном уровне

$$\lg N_1H = 24.18.$$

Это значение может иметь весьма большую ошибку из-за неточности температуры.

5. *Содержание элементов.* Горизонтальный сдвиг эмпирической кривой роста до совпадения с теоретической даст число поглощающих атомов в данном состоянии ионизации над 1 $см^2$ фотосферы $\lg N_r H$. Результаты определений $\lg N_r H$ приведены в табл. 1 (двоеточием отмечены неуверенные результаты, а $\lg N_r H$, найденные по формуле Саха, заключены в скобки). Там же отмечены литературные источники сил осцилляторов. При нахождении содержания элементов использовались суммы по состояниям Корлисса и Бозмана [6].

Сравнение с относительным содержанием элементов в атмосфере Солнца [12] приведено на рис. 3. По оси ординат нанесены величины $[\varepsilon] = \lg \varepsilon - \lg \varepsilon_\odot$. Для более тяжелых элементов приведено сравнение со средним космическим содержанием [13] (темные кружки).

Содержания Si, Al, Ba. Eu, Hf определены только по одной — двум линиям. Содержание Si, определенное по Si I (это содержание нанесено на рис. 3), значительно меньше солнечного, а определенное по Si II значительно больше.

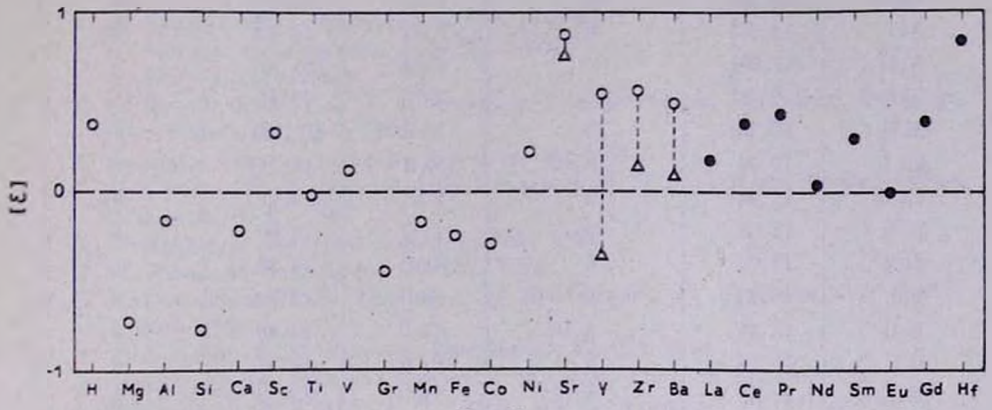


Рис. 3.

В настоящей работе использованы для всех элементов те же силы осцилляторов, что и в нашей предыдущей работе об атмосферах 41 Cyg и $\nu$ Her [2].

Там же для всех случаев, где это оказалось возможным, при сравнении содержания элементов с солнечным [12] сравнивались и системы сил осцилляторов. Для остальных случаев мы были вынуждены провести сравнения с другими источниками сил осцилляторов, главным образом с данными работы М. Е. Боярчук и А. А. Боярчука [10].

Кривые роста для Sc II и Ba II построены по экспериментальным силам осцилляторов, „звездные" силы осцилляторов [10] для Sc II больше экспериментальных примерно на 0.35, а для Ba II меньше на 0.60. Кривая роста для Cr II основана на звездных силах осцилляторов, которые больше экспериментальных примерно на 0.44. Поэтому полученные аномалии в содержании этих элементов могут быть нереальными.

В отличие от работы [2] у нас появилась возможность более надежно сравнивать с солнечным содержанием содержания Sr, Y, Zr, Ba: Аллер [4] определил снова содержания некоторых элементов в атмосфере Солнца, используя тот же метод, что и в работе [12], но силы осцилляторов Корлисса и Бозмана [6]. Результаты сравнения с его определениями также нанесены на рис. 3 (треугольники). От-

*Таблица 1*

| Элемент | lg $N_r H$ | Источник lg $gf\lambda$ | Элемент | lg $N_r H$ | Источник lg $gf\lambda$ |
|---|---|---|---|---|---|
| Mg I | 16.70 | 6,10 | Fe I | 16.56 | 9.6 |
| Mg II | 20.50: | 10 | Fe II | 18.24 | 11 |
| Al I | 15.77: | 6 | Co I | 14.90 | 6 |
| Al II | (17.89) | | Co II | (16.20) | |
| Si I | 17.68: | 6 | Ni I | 15.56 | 6 |
| Si II | 20.36: | 10 | Ni II | (17.99) | |
| Ca I | 17.74 | 6,10 | Sr II | 15.29: | 6 |
| Ca II | 17.08: | 13 | Y II | 14.61 | 6 |
| Sc I | 12.08: | 6 | Zr II | 14.60 | 6 |
| Sc II | 15.07 | 6 | Ba II | 14.28: | 6 |
| Ti I | 14.03 | 6 | La II | 13.98 | 6 |
| Ti II | 16.45 | 6,10 | Ce II | 14.48 | 6 |
| V I | 13.50 | 6 | Pr II | 13.94 | 6 |
| V II | 15.63 | 6,10 | Nd II | 14.14 | 6 |
| Cr I | 14.73 | 6 | Sm II | 14.06 | 6 |
| Cr II | 16.66 | 10 | Eu II | 13.0 : | 6 |
| Mn I | 14.71 | 6 | Gd II | 14.20 | 6 |
| Mn II | (16.57) | | Hf II | 14.34 | 6 |

сюда видно также, что указанные нами в [2] аномалии в содержании Zr и Y для атмосфер $\nu$ Her (F2 II—III) и 41 Cyg (F2—4 $I_b$) нереальные.

Отношение Fe/H для $\sigma$ Boo примерно в 4 раза меньше солнечного. Значительно меньше также содержание Mg. Дефицит содержания металлов является, наверно, одной из причин низкого электронного давления по сравнению со средним по спектральному классу.

Содержание Sr несколько больше, чем в атмосфере Солнца. Содержание тяжелых элементов Pr, Gd, Hf больше, чем среднее космическое содержание.

Институт физики и астрономии
АН ЭССР

## THE SPECTROPHOTOMETRY OF F-STARS. III. ATMOSPHERE OF $\sigma$ Boo

M. A. KIPPER, T. A. KIPPER

A curve of growth analysis has been used to find atmospheric parameters of $\sigma$ Boo. The excitation and ionization temperatures, the micro-

turbulent velocity, the electron pressure and the relative abundances of elements are found. A metal deficiency for the atmosphere is found.

## ЛИТЕРАТУРА


1. *Т. А. Киппер*, Публ. Тартуской обс. (в печати).
2. *Т. А. Киппер*, Астрофизика, 3, 3, 397, 1967.
3. *Т. А. Киппер*, (рукопись).
4. *K. O. Wright, E. K. Lee, T. V. Jacobson, J. L. Greenstein*, Publ. Dom. Astrophys. Obs., Victoria 12, № 7, 1964.
5. *А. Унзольд*, Физика звездных атмосфер, М., 1949.
6. *C. H. Corliss, W. R. Bozman*, NBS Monograph 53, U. S. Governm. Printing Office, Washington P. C., 1962.
7. *Э. Р. Мустель*, Звездные атмосферы, М., 1960.
8. *И. М. Копылов*, Изв. КрАО, 26, 232, 1961.
9. *В. К. Прокофьев, Е. И. Никонова, Ц. Ф. Груздев, М. С. Фриш*, Изв. КрАО, 31, 281, 1964.
10. *М. Е. Боярчук, А. А. Боярчук*, Изв. КрАО, 22, 234, 1960.
11. *B. Warner*, Comm. from the University of London Obs., № 70, 1966.
12. *L. Goldberg, E. A. Müller, L. H. Aller*, Ap. J., Suppl. ser., 5, № 45, 1960.
13. *К. У. Аллен*, Астрофизические величины, М., 1960.
14. *L. H. Aller*, Technical Note № 2, Office of Research Administration, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Mich., 1962.