

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ ОКСИ ТИТАНА И АТОМАРНОГО КИСЛОРОДА В АТМОСФЕРАХ М-ЗВЕЗД

А. В. Шаврина

Линии атомов легких элементов (С, N, O) отсутствуют в спектрах М-звезд, и поэтому содержание их можно получить лишь из анализа молекулярного спектра. Характерная особенность звезд класса М — молекулярные полосы окиси титана, доминирующие в их спектрах. Однако количественные оценки содержания этой молекулы до последнего времени были невозможны из-за отсутствия электронных сил осцилляторов. Совсем недавно появились первые лабораторные измерения абсолютных сил осцилляторов для шести полос α - и γ -систем (по три полосы в каждой системе) [1].

Мы определили содержание TiO у М-сверхгигантов α Sco, δ^2 Lyr, R Lyr и α Her A. Данные о спектрограммах приведены в [2, 3]. Для анализа была выбрана ветвь R_3 полосы γ (1,0) ($\lambda = 6651 \text{ \AA}$, переход $^3\Phi_3 - ^3\Delta_2$), образованная большим числом вращательных линий. Длины волн этих линий и соответствующие константы определены Филлипсом [4]. Содержание окиси титана находили, сопоставляя наблюдаемый профиль полосы с теоретическим.

Профиль полосы можно представить формулой Миннаэрта

$$\frac{1}{R_\lambda} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{\tau_\lambda}. \quad (1)$$

Здесь $\tau_\lambda = N_{J''} \alpha_\lambda$, где α_λ — коэффициент поглощения в линии, $N_{J''}$ — число молекул на нижнем вращательном уровне J'' . Выражение для α_λ (при учете доплеровского расширения и эффектов затухания) имеет вид:

$$\alpha_\lambda = \frac{\pi^{1/2} e^2 \lambda}{mc} f_{J''} \sqrt{\frac{A m_0}{2kT}} H(a, v), \quad (2)$$

где

$$f_{J''} = f_{el}(\lambda_{v'v''}) q_{v'v''} \frac{S_{J''}}{2J'' + 1} \cdot \frac{\lambda_{v'v''}}{\lambda_{J''}}.$$

Электронная сила осциллятора f_{el} взята из [1], фактор Франка—Кондона $q_{v'v''}$ — из [5], факторы Хенля—Лондона $S_{J''}$ — из [6]. Принимая больцмановское распределение молекул по энергетическим уровням, можно переписать уравнение (1) в виде

$$\frac{1}{R_\lambda} = \frac{1}{R_c} + \frac{1}{\Sigma K S_{J''} H(a, v) \exp\left[-B J''(J'' + 1) \frac{hc}{kT}\right]}. \quad (3)$$

Здесь

$$K = \frac{\pi^{1/2} e^2 \lambda}{mc} \sqrt{\frac{A m_0}{2kT}} N \frac{\omega_{el} \omega_{vib} \exp\left[-\frac{(E_{el} - E_{vib})}{kT}\right]}{Q_{int}}, \quad (4)$$

где N — полное число молекул TiO над 1 см^2 фотосферы, $\omega_{el} = 2\delta_{0,\lambda}$ для каждого из $(2S + 1)$ состояний и $\omega_{vib} = 1$ — статистические веса.

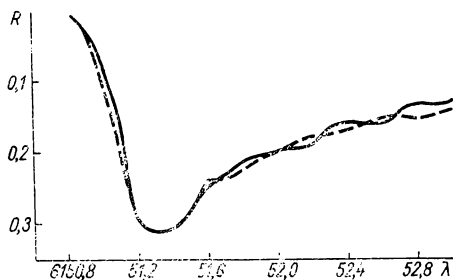
Сумма по состояниям Q_{int} приведена в [7]. Значения температуры ($T = T_{\text{возб}}$) и постоянной затухания a взяты из [8]. По наблюдаемым профилям линий доплеровская полуширина $\Delta\lambda_D = 0,2 \text{ \AA}$.

Поскольку голова полосы ($\lambda\lambda 6651 - 6653 \text{ \AA}$) образуется наложением большого числа вращательных линий, наклон профиля мало за-

висит от формы отдельной линии. Расчеты показывают, что он также мало зависит от температуры, а определяется, в основном, выбором R_c и принятым положением непрерывного спектра. Мы проводили непрерывный спектр по ближайшим верхним пикам за головой полосы. Неуверенность в проведении уровня континуума приводит к ошибке в величине N_{TiO} , достигающей у звезд поздних подклассов 40%. Точность сил осцилляторов в [1] примерно такая же.

Варируя R_c , можно добиться наилучшего совмещения рассчитанного профиля с наблюдаемым. На рисунке показан профиль головы полосы для R Lyr. В таблице приведены значения K , определенные из совмещения теоретического и наблюдаемого профилей для каждой спектрограммы и среднее по двум спектрограммам $K_{ср}$.

В [9] дано определение величины K для β Peg, выполненное по полосе (0,0) γ -системы TiO ($\lambda = 7054 \text{ \AA}$). При этом использовались факторы Хёнля—Лондона для перехода ${}^3\Delta - {}^3\Pi$. Как показано в [10], полосы γ -системы образуются при переходе ${}^3\Phi - {}^3\Delta$. Поэтому в работе [11] мы вычислили K с новыми факторами интенсивности. Кроме того, была выбрана другая константа затухания — $a = 0,0001$, определенная Ямашита [12], вместо $a = 1,0$, принятой в [9]. Величины $\lg N_{TiO}$, вычисленные по формуле (4), приведены в таблице.



Профиль головы полосы $\lambda 6651$ для R Lyr. ----- наблюдаемый профиль, ——— рассчитанный.

Звезда, Sp	Дата	K	$K_{ср}$	$\lg N_{TiO}$	$\lg N_{TiII}$	$\lg n_{O1}$
α Sco	26.6 1968	$4,35 \cdot 10^{-3}$	$3,82 \cdot 10^{-3}$	14,8	18,9	9,2
M1 Ib	8.7 1968	$3,29 \cdot 10^{-3}$				
δ^2 Lyr	9.7 1968	$8,31 \cdot 10^{-3}$	$7,82 \cdot 10^{-3}$	14,9	—	—
M4 IIb	26.4 1970	$7,33 \cdot 10^{-3}$				
R Lyr	26.6 1968	$1,04 \cdot 10^{-3}$	$8,89 \cdot 10^{-3}$	15,0	18,6	7,3
M5 IIb	25.4 1970	$7,42 \cdot 10^{-3}$				
α Her A	27.6 1968	$9,83 \cdot 10^{-3}$	$1,04 \cdot 10^{-2}$	15,0	18,2	7,8
M5+ Ib	26.4 1970	$1,10 \cdot 10^{-2}$				
β Peg	[9]	$4,56 \cdot 10^{-2}$	—	15,7	18,0	10,8
M2+ III a						

В работах [8, 13, 14] методом кривой роста определено содержание TiII в атмосферах исследуемых нами звезд. Зная N_{TiO} и N_{TiII} , можно получить концентрацию атомарного кислорода из уравнения диссоциации

$$\frac{n_{TiII} n_O}{n_{TiO}} = \frac{K_{TiO}}{kT},$$

где n_{TiII} , n_O , n_{TiO} — концентрации атомов титана и кислорода и молекулы окиси титана. При этом считаем, что

$$\frac{n_{TiII}}{n_{TiO}} = \frac{N_{TiII}}{N_{TiO}}$$

Для R Lyr и α Her A мы приняли N_{TiII} , определенные по красной и инфракрасной областям спектра [14], где непрерывный спектр прово-

дится довольно уверенно и блендирование сравнительно невелико. Для звезды раннего подкласса α Sco принято значение из [8], полученное только по красной области. Для δ^2 Lyr (M4 II b) достаточно надежной величины содержания титана не оказалось.

Принятые значения $\lg N_{\text{Ti}}$ и концентрация атомарного кислорода, определенная из уравнения диссоциации, даны в последних столбцах таблицы.

Парциальное давление свободного кислорода (или его концентрация), а также концентрация молекул, в состав которых входит кислород, очень чувствительны к отношению содержаний кислорода и углерода ($[\text{O}]/[\text{C}]$). Мы не располагаем необходимыми расчетами для условий в исследуемых звездах, которые позволили бы оценить $[\text{O}]/[\text{C}]$ по нашим результатам.

Автор благодарит М. Я. Орлова за внимательное руководство работой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Price M. L., Sulzmann K. G. P., Penner S. S. — J. Quant. Spectrosc. Rad. Transfer, **11**, 427, 1971.
2. Орлов М. Я., Родригес М. Г., Шаврина А. В. — В кн.: Астрометрия и астрофизика, вып. 9. «Наукова думка», К., 1970.
3. Шаврина А. В. — В кн.: Астрометрия и астрофизика, вып. 15. «Наукова думка», К., 1972.
4. Phillips J. G. — Astrophys. J., **114**, 152, 1951.
5. Fraser P. A., Jormain W. R., Nicholls R. W. — Astrophys. J., **119**, 286, 1954.
6. Tatum J. B. — Monthly Notices, **141**, 459, 1968.
7. Tatum J. B. — Publ. DAO Victoria, **13**, 1, 1966.
8. Орлов М. Я., Родригес М. Г., Шаврина А. В. — АЖ, **47**, 1970, 859.
9. Phillips J. G. — Astrophys. J., **115**, 183, 1952.
10. Phillips J. G. — Astrophys. J., **157**, 449, 1969.
11. Шаврина А. В. — В кн.: Астрометрия и астрофизика, вып. 12. «Наукова думка», К., 1971.
12. Yamashita Y. — Publ. Astron. Soc. Japan, **17**, 55, 1965.
13. Шаврина А. В., Яковина Л. А. — В кн.: Астрометрия и астрофизика, 19. «Наукова думка», К., 1973.
14. Yamashita Y. — Publ. Astron. Soc. Japan, **17**, 27, 1965.

DETERMINATION OF TITANIUM OXIDE AND ATOMIC OXYGEN ABUNDANCES IN THE ATMOSPHERES OF THE M-TYPE STARS

A. V. SHAVRINA

Summary

The abundance of titanium oxide in the atmospheres of five M-stars (α Sco, δ^2 Lyr, R Lyr, α Her A and β Peg) was determined from the profile of the (0.1) band head of TiO v -system. The atomic oxygen concentration is obtained from dissociation equilibrium equation for α Sco, R Lyr, α Her A and β Peg, for which the reliable values of TiI abundances are available.