

УДК: 524.316.022

РЕШЕНИЕ НЛТР-ЗАДАЧИ ДЛЯ Mg I В АТМОСФЕРЕ
М-ГИГАНТА С ХРОМОСФЕРОЙ. I. МЕНЗЕЛОВСКИЕ
КОЭФФИЦИЕНТЫ

Я. В. ПАВЛЕНКО

Поступила 26 сентября 1986

Принята к печати 20 октября 1987

Описаны результаты решения НЛТР-задачи для магния в атмосфере М-гиганта ($T_{eff} = 3800$ К, $\lg g = 1.5$) с хромосферой. Модель хромосферы задавалась эмпирически. Показано, что в атмосфере с хромосферой избыточная ионизация магния значительна только в области температурного минимума. В хромосфере М-гиганта степень ионизации магния уменьшена по сравнению с ЛТР.

Для построения моделей внешних слоев атмосфер звезд поздних спектральных классов, изучения их физических характеристик наибольший интерес представляют сильные линии H и K Ca II, h и k Mg II. При теоретическом моделировании процесса их образования степень однократной ионизации магния и кальция обычно рассчитывается в рамках приближения локального термодинамического равновесия (ЛТР). В работах [1, 2] было показано, что ионизация металлов в атмосферах звезд-гигантов поздних спектральных классов увеличена по сравнению с ЛТР. Отметим, что эффекты переионизации металлов исследовались до сих пор только в атмосферах холодных гигантов без хромосфер, температура в которых монотонно падает к внешним слоям.

Представляет интерес оценка величины переионизации металлов в атмосферах красных гигантов с хромосферами. Мы исследовали эту проблему на примере решения НЛТР-задачи для магния в атмосфере с хромосферой гиганта спектрального класса M2 $T_{ef} = 3800$ К, $\lg g = 1.5$. Модель атмосферы без хромосферы гиганта с такими же T_{eff} и $\lg g$ использовалась в работе [2] при решении совместной системы уравнений стационарности и уравнения переноса излучения, т. е. НЛТР-задачи для Mg I. Расчет самосогласованной модели атмосферы гиганта M2 с солнечным химическим составом производился при помощи программы SAM1 [3]. В разных спектральных участках учитывалось поглощение молекулами H_2O , CO, OH, TiO, MgH, CN [4].

Модель хромосферы М-гиганта была задана нами следующим образом. Известно, что температурный минимум в атмосферах звезд поздних спектральных классов расположен на глубине [5, 6]

$$m_{\min} = \int_0^H \rho(z) dz \simeq 0.3 - 2.0, \quad (1)$$

где $\rho(z)$ — плотность вещества на геометрической глубине z . В области температурного минимума температура

$$T = T_{\min} \simeq 0.7 T_{\text{eff}}. \quad (2)$$

В настоящее время считается установленным, что звезды одного спектрального класса обладают хромосферами различной мощности [7].

Для определения простейшей модели хромосферы звезды требуется определить положение температурного минимума m_{\min} и градиент температуры в хромосфере G_* . Подобным образом построены модели внутренних областей хромосфер Солнца [8] и Арктира [5], причем m_{\min} и G_* подбираются таким образом, чтобы теоретические расчеты давали наилучшее совпадение с наблюдениями. Мы определили модель хромосферы с характеристиками

$$m_{\min} = 0.3, \quad \frac{\partial T}{\partial (\ln m)} = G_* = G_{\odot}, \quad (3)$$

где $G_{\odot} = 357.7$ — значение соответствующего градиента в атмосфере Солнца [8]. Модель хромосферы была определена до уровня, где $m = 10^{-7}$. Оптические глубины в частотах связанно-связанных переходов, которые рассчитывались в нашей работе, на таких высотах в атмосфере меньше 1. Физические характеристики (P , n_e , k , σ), а также концентрации атомов, ионов и молекул выше температурного минимума рассчитывались так же, как и для фотосферы, в рамках ЛТР. Описанные выше изменения в структуре модели атмосферы звезды не привели к заметным изменениям выходящего в непрерывном спектре излучения, поскольку на глубинах $\tau_c < < 10^{-4}$ взаимодействием излучения и вещества за пределами ядер сильных линий можно пренебречь.

НЛТР-задача для Mg I в атмосфере М-гиганта с хромосферой была решена методом частичной линеаризации [9]. Использовалась пятиуровневая модель атома Mg I. Континуум Mg I представлен в виде отдельного уровня со статистическим весом, равным сумме по состояниям Mg II. Уравнение переноса излучения решалось в частотах 7 переходов (см. табл. 1). Кроме радиативных переходов, учитывались переходы вследствие неупругих

столкновений со свободными электронами. Вероятности этих переходов рассчитывались по формулам Регимортера и Лотца (см. [2]). В результате решения НЛТР-задачи были определены мензеловские коэффициенты уровней Mg I (рис. 1)

$$b_i = \frac{n_i}{n_i^*}, \quad i = 1, 5, \quad (4)$$

где n_i^* и n_i — населенности уровней при ЛТР и при отказе от ЛТР, соответственно. Для сравнения на рис. 2 представлена зависимость $b_i = f(\tau)$ в атмосфере гиганта спектрального класса M2 без хромосферы [2]. Как видно из рис. 1, переионизация магния наибольшая в области температурного минимума. Решение НЛТР-задачи при $\tau_{\text{ross}} > 10^{-4}$ практически совпадает с решением НЛТР-задачи на этих глубинах в атмосфере без хромосферы. Здесь для континуума $b_k > 1$, для связанных уровней $b_i \leq 1$.

Таблица 1
ПЕРЕХОДЫ МАГНИЯ, В ЧАСТОТАХ КОТОРЫХ РЕШАЛОСЬ
УРАВНЕНИЕ ПЕРЕНОСА ИЗЛУЧЕНИЯ

	l	i	$E_{l(\text{эВ})}^{\text{возб.}}$	$E_{i(\text{эВ})}^{\text{возб.}}$	F_{li}^*
1	1(3 s ² 1S)	2(3 p ³ P ⁰)	0	2.715	4.E-6
2	1(3 s ² 1S)	3(3 p ¹ P ⁰)	0	4.384	1.6
3	1(3 s ² 1S)	5(cont)	0	7.646	1.E-18
4	2(3 p ³ P ⁰)	4(4 s ³ S)	2.715	5.110	0.1
5	2(3 p ³ P ⁰)	5(cont)	2.715	7.646	20.E-18
6	3(3 p ¹ P ⁰)	5(cont)	4.834	7.646	16.E-18
7	4(4 s ³ S)	5(cont)	5.110	7.646	2.1E-18

* Для свободно-связанных переходов F_{li} — сечение фотоионизации, для связанно-связанных переходов F_{li} — сила осцилляторов.

С ростом электронной температуры T_e во внешней части атмосферы с хромосферой переионизация магния уменьшается. Начиная с некоторого уровня в хромосфере выполняется условие

$$T_e \geq T_r, \quad (5)$$

где T_r — температура, характеризующая поле излучения в частотах свободно-связанных переходов Mg I. В этом случае процесс фоторекомбинаций более эффективен, чем фотоионизации. В результате мензеловские ко-

эффиценты связанных уровней магния в хромосфере больше. Линии h и k Mg II формируются во внешних областях звездных хромосфер [7]. Как показывают наши расчеты, магний в хромосфере М-гиганта на таких вы-

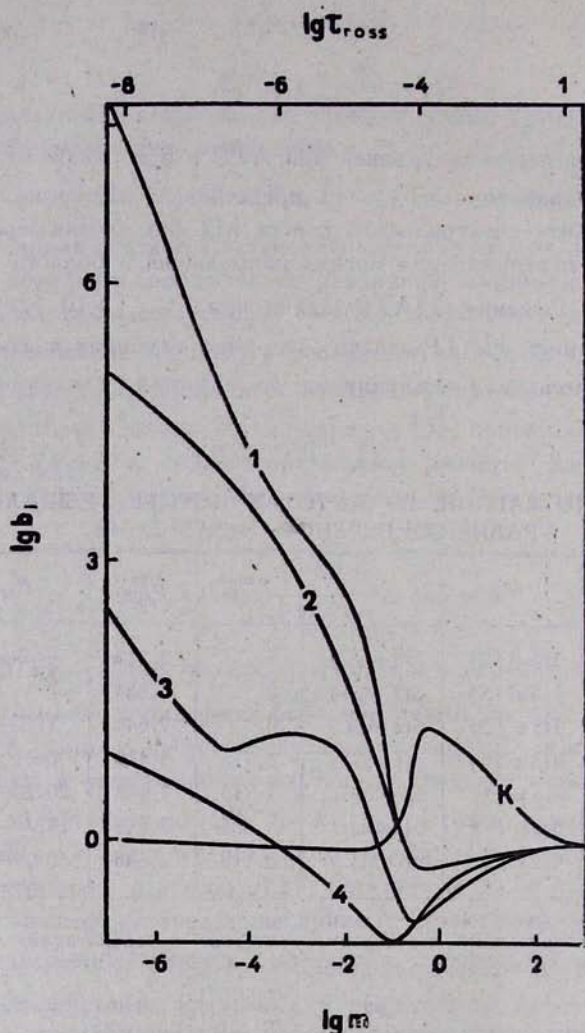


Рис. 1. Мензеловские коэффициенты уровней магния в атмосфере М-гиганта с хромосферой.

сотах практически полностью однократно ионизован. Здесь $b_k \approx 1$. Температурный минимум в атмосфере звезды в нашем случае располагался на глубине $m_{\min} = 0.3$. Если он находится ближе к фотосфере звезды, протяженность области переионизации уменьшается, поскольку при том же G_* нижняя граница зоны в хромосфере, где $T_e > T_r$ перемещается в более

глубокие слои атмосферы. Численные расчеты показали, что абсолютные значения мензеловских коэффициентов в области переионизации уменьшаются.

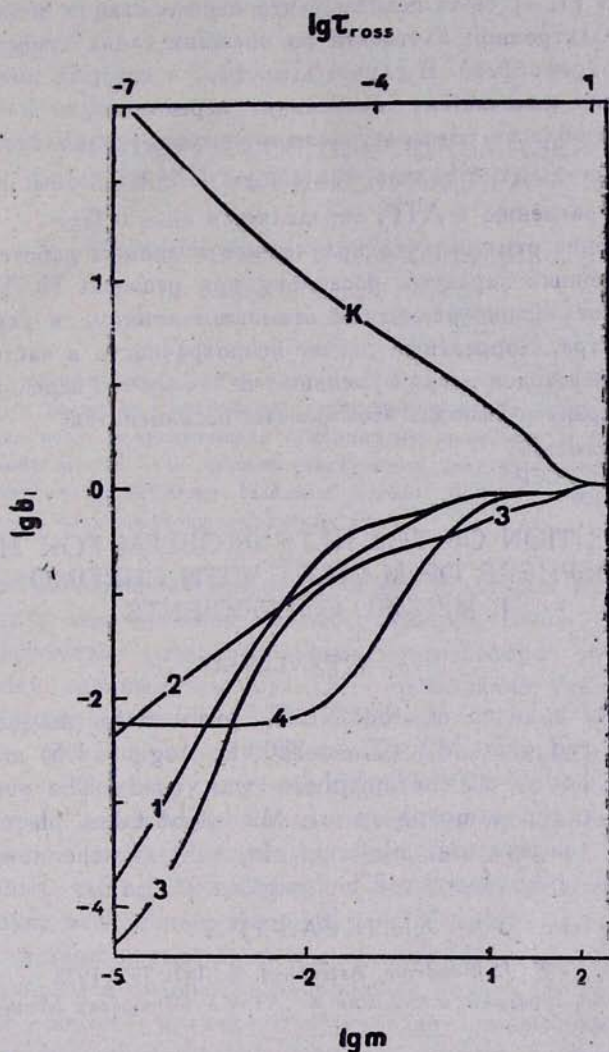


Рис. 2. Мензеловские коэффициенты уровней магния в атмосфере М-гиганта без хромосферы.

В настоящее время считается общепринятым, что последовательный учет переионизации в атмосферах холодных звезд позволяет устранить ряд несоответствий между наблюдаемыми и рассчитанными характеристиками спектральных линий атомов и ионов одного и того же элемента [10]. Из сравнения результатов, представленных на рис. 1 и рис. 2, следует, что

последовательный учет переионизации элементов в атмосферах холодных звезд возможен только при наличии дополнительной информации о хромосферах.

В работах [1, 2] было показано, что переионизация металлов приводит к росту электронной плотности во внешних слоях атмосфер красных гигантов (без хромосфер). В случае атмосфер, в которых имеются хромосферы, ситуация изменяется: поскольку переионизация металлов имеет место только в области температурного минимума, увеличение электронной плотности будет заметно только возле T_{\min} . Ширина зоны, где n_e будет увеличено по сравнению с ЛТР, определяется T_{\min} и G_* .

В заключение отметим, что полученные в данной работе результаты имеют качественный характер, поскольку при решении НЛТР-задачи не учитывалось поглощение излучения атомными линиями в ультрафиолетовой части спектра. Корректный расчет непрозрачности в частотах связанно-свободных переходов магния уменьшит величину его переионизации. Однако общий характер выводов этой работы не изменится.

Главная астрономическая
обсерватория АН УССР

SOLUTION OF THE NLTE PROBLEM FOR Mg I IN ATMOSPHERE OF M-GIANT WITH CHROMOSPHERE. I. MENZEL COEFFICIENTS

YA. V. PAVLENKO

Results of solution of the NLTE problem for magnesium in the atmosphere of red giant M2 ($T_{\text{eff}} = 3800 \text{ K}$, $\log g = 1.5$) are discussed. The empirical model of chromosphere was used. The over-ionization of magnesium in the atmosphere of M2 giant takes place only in the region of the temperature minimum. In contrast the number of Mg^+ ions in chromosphere decreased compared with LTE.

ЛИТЕРАТУРА

1. J. R. Auman, J. E. J. Woodrow, *Astrophys. J.*, 157, 795, 1975.
2. Я. В. Павленко, Эффекты отклонения от ЛТР в атмосферах М-гигантов, Валгус, Таллин, 1984.
3. S. L. Wright, *Comm. Univ. London Observ.*, 76, 1, 1975.
4. T. Kipper, J. Sitska, *Tartu Astrofüüs. Observ. Teated*, 64, 15, 1981.
5. T. R. Ayres, J. L. Linsky, *Astrophys. J.*, 205, 874, 1976.
6. W. L. Kelch, S. L. Linsky, G. S. Basri, *Astrophys. J.*, 220, 962, 1978.
7. Г. А. Гурздян, Звездные хромосферы, Наука, М., 1985.
8. O. Gingerich, R. W. Noyes, W. Kalkoffen, Y. Cuny, *Solar Phys.*, 2, 347, 1971.
9. M. L. Auer, I. N. Heasley, *Astrophys. J.*, 205, 165, 1976.
10. А. А. Боярчук, Л. С. Любимков, Н. А. Сахибуллин, *Астрофизика*, 22, 339, 1984.