# АСТРОФИЗИКА

**TOM 29** 

**ДЕКАБРЬ**, 1988

выпуск з

УДК: 524.316.7.022-52-645

## РЕШЕНИЕ НАТР-ЗАДАЧИ ДЛЯ Mg I В АТМОСФЕРЕ М-ГИГАНТА С ХРОМОСФЕРОЙ. II. ФУНКЦИИ ИСТОЧНИКОВ: И ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ПРОФИЛИ ЛИНИЙ АЛ 457.11, 516.73, 517.26, 518.36 НМ

## Я. В. ПАВЛЕНКО

Поступила 4 августа 1987 Принята к печати 7 декабря 1987

Рассчитаны функции источников и профили линий Mg I в атмосфере М-гиганта ( $T_{eff} = 3800$  K, lg g = 1.5). Модели атмосфер М-гиганта с хромосферами, которые различаются положением температурного минимума, задавались эмпирически. Сделан вывод о том, что вид интеркомбинационной линии Mg I  $\lambda$  457.11 нм существенно зависит от хода температуры в атмосфере звезды. В то же время сильные субординатные линии Mg I нечувствительны к строению внешних слоев атмосферы красного гитанта.

Важной проблемой теории атмосфер звезд поздних спектральных классов является уточнение структуры их внешних слоев. Эдесь возможны различные проявления звездной активности, а вещество и излучение находятся в условиях, далеких от термодинамического равновесия. Предельным случаем активности в атмосферах холодных звезд являются их хромосферы, которые обнаруживаются спектрально в виде многочисленных вмиссионных линий в ультрафиолете [1]. Мощным методом исследования строения звездных хромосфер является количественная интерпретация эмиссионных дофилей линий h и k Mg II, H и K Ca II. Для формирования этих линий требуются сравнительно высокие температуры, которые в хромосферах красных звезд имеются достаточно далеко ( $\tau_{ross} < < 10^{-5}$ ) от фотосферы ( $\tau_{ross} \sim 1$ ).

В то же время для ряда астрофизических задач наибольший интереспредставляет область атмосферы, где расположен температурный минимум. Наши знания о строении атмосфер холодных звезд в области температурного минимума пока недостаточны. Существуют указания на то, что, звезды одного спектрального класса и равной светимости могут иметь различающиеся по мощности энерговыделения хромосферы. в этом случае положение температурного минимума и величина градиента температуры в:

#### РЕШЕНИЕ НАТР-ЗАДАЧИ

хромосфере являются индивидуальными характеристиками конкретной звезды (см. [2]).

В настоящей работе исследовано формирование сильных линий Mg I  $\lambda\lambda$  457.11, 516.73, 517.23, 518.36 нм в атмосфере красного гиганта спектрального класса M2 ( $T_{eff} = 3800$  K,  $\lg g = 1.5$ ). Расчеты проводились для трех моделей атмосфер:

Модель A1 — самосогласованная модель атмосферы М-гиганта с солнечным химическим составом рассчитана автором в рамках классических приближений при помощи тартуской версии программы SAMI; учитывались молекулярные источники ипроэрачности (см. [3, 4]). Две другие модели различаются строением внешних слоев.

Модель A2 имеет хромосферу. Температурный минимум находятся в втой модели атмосферы на глубине

$$m_{\min} = \int_{0}^{p} p(x) dx = 0.8.$$
 (1)

Здесь  $\rho(x)$  — плотность вещества на геометрической глубине x. На глубине  $m_{\min}$  в модели атмосферы A2  $T_{\min}/T_{eff} = 0.72$ . У гигантов поздних спектральных классов  $T_{\min}/T_{eff} = [0.65 \div 0.89]$ , имеется слабая тенденция увеличения этого отношения с понижением  $T_{\min}$  (см. [2]).

Выше температурного минимума задавался рост температуры к внешней границе атмосферы с градиентом

$$\frac{\partial T}{\partial (\ln m)} = G_* = -950, \tag{2}$$

что меньше, чем G<sub>\*</sub> в модели атмосферы Солнца HSRA [5], но больше, чем в модели хромосферы Арктура, предложенной Айресом и Лински [6].

В модели АЗ температурный минимум расположен на глубине  $m_{\min} = 8.0$ , а градиент температуры в хромосфере такой же, как в модели А2:  $G_* = -950$ . Внешние границы моделей атмосфер ( $m = m_0$ ) были определены таким образом, чтобы в частотах связанно-связанных переходов моннохроматические оптические глубины  $\tau_v \lesssim 10^{-2}$  в первых точках моделей. В модели атмосферы А1  $m_0 = 10^{-5}$ , в моделях А2 и А3  $m_0 = 10^{-7}$ .

Изменение температуры T и өлектронной плотности  $n_e$  с глубиной в. модели атмосферы A2 шоказано на рис. 1. Расчет  $n_e$  до всей глубине атмосферы проводился в рамках ЛТР. Выше температурного минимума зависимость  $n_e = f(m)$  имеет два максимума. Первый из них ( $m \simeq 0.1$ ) находится в области, где мажсимальный вклад в  $n_*$  дают металлы, второй  $(m \simeq 2.5 \cdot 10^{-4})$  — где основным поставщиком свободных электронов является водород. Дальнейшее уменьшение  $n_*$  к внешней границе атмосферы сбусловлено падением плотности вещества.



Рис. 1. Температура (1) ж электровная плотность (2) в модели атмосферы А2.

В модели АЗ температурный минимум расположен глубже и области максимального вклада в n<sub>e</sub> металлов и водорода расположены ближе, чем в модели А2 — локальный минимум между ними выражен в меньшей степени. В модели А1 температура и электронная плотность монотонно уменьшаются к внешней границе атмосферы.

Следует отметить, что хромосферы в моделях A2 и A3 были определены простейшим образом при помощи двух параметров: С. и *m*ania. Эти модели атмосфер можно рассматривать только в качестве первого приближения, поскольку при шостроении их использовались достаточно грубые предположения. Самосогласованные модели хромосфер М-гигантов (и других звезд) в настоящее время отсутствуют.

НАТР-вадача для пятиуровенного атома Mg I была решена методом частичной линеаризации (см. [5]). Четыре уровня (3s<sup>2</sup> <sup>1</sup>S, 3p<sup>3</sup> P<sup>0</sup>, 3p<sup>1</sup> P, -4s<sup>3</sup>S) принадлежат Mg I. Mg II представлен основным состоянием 3s<sup>2</sup>S. Скорости переходов между уровнями описаны в работе [7]. В заданной модели атома магния учитывались три связанно-связанных радиативных перехода: два резонансных (нижний уровень — основное состояние Mg I) и один субординатный (см. табл. 1). Перенос излучения в частотах сильной линии  $\lambda$  285.16 нм ( $3s^{2} \, {}^{1}S - 3p'P$ , gf = 1.6) учитывался при решении НАТР-задачи в приближении полного перераспределения по частотам. Это позволило рассчитать скорости радиативных процессов  $R_{13}$  и  $R_{31}$ . Для точного анализа профиля этой линии требуется применение более совершелной концепции частичного перераспределения по частотам — уже в спехтре сравнительно горячего-гиганта «Boo (K2 III,  $T_{eff} = 4400$  K) крылья линии  $\lambda$  285.16 нм сравнимы по интенсивности с крыльями h и k Mg II [1], в спехтрах более колодных гигантов они могут быть сильнее.

Переход	1-j	Х, нм	$E_{aoa6}^l$ , cm <sup>-1</sup>	gf
3s <sup>21</sup> S-3p <sup>1</sup> P	1-2	457.11	0	4-10-6
3: <sup>21</sup> S-3p <sup>1</sup> P <sup>0</sup>	1-3	285.16	0	1.6
	1 1	516.73	21850.405	0.09
3p <sup>3</sup> P <sup>9</sup> -4s <sup>3</sup> S	2-4	517.26	21870.46	0.28
	-	518.36	21911.18	0.49

. Таблица 1 ХАРАКТЕРИСТИКИ СВЯЗАННО-СВЯЗАННЫХ ПЕРЕХОДОВ Mg I [7, 8]

В дальнейшем наш анализ будет посвящен спектральным линиям, зонзикающим вследствие переходов  $3s^{2} {}^{1}S - 3p^{3}P^{0}$  и  $3p^{3}P^{0} - 4s^{3}S$ . Линии  $\lambda\lambda$  457.11, 516.73, 517.26, 518.36 нм менее интенсивны, их анализ вполне возможен в приближении полного перераспределения по частотам. При решении НАТР-задачи триплет 516.73, 517.26, 518.36 нм заменен одной лиисей с силой осциллятора

$$f_{24} = \frac{\sum_{i} f_{24}^{i} \cdot g_{2}^{i}}{\sum_{i} g_{2}^{i}},$$
 (3)

где  $g_2'$  и  $f_{24}'$  — статистический вес нижнего уровня и сила осцилляторов соответствующей линии мультиплета. Профили коэффициента поглощения в спектральной линии определялись функцией Фойгта H(a, v) по всей толще атмосферы a = 0.01; микротурбулентная окорость  $v_a = 2$  км/с. Кроме трех радиативных связанно-связанных переходов уравнение переноса налучения решалось в частотах четырех связанно-свободных переходов.

## Я. В. ПАВЛЕНКО

Ревультаты. Несмотря на малое значение  $gf = 4 \cdot 10^{-6}$ , линия Mg I.  $\lambda$  457.11 нм в спектрах холодных звезд должна быть достаточно сильной населенности основного состояния Mg I ( $3s^2 \cdot S$ ) при  $T \leq 3000$  К значительны. На рис. 2 представлены рассчитанные для моделей атмосфер А1, А2, А3 функции источникоб в линии  $\lambda$  457.11 нм



Рис 2. Функция Плавка и функция источников ланив  $\lambda$  457.11 им в моделях. атмосфер A1 (1), A2 (2), A3 (3) — сплошиая и штриховая линии, соответственно. Крестики — значения  $S_{24}$  и  $B_{\gamma}(T)$  на глубинах  $\tau_{\gamma} = 1.0$ .

Здесь g, и  $n_i$  статистический вес и населенность i-го уровня. В области выше температурного минимума функция источников  $S_{24}$  оказывается связанной с функцией Планка  $B_*(T_e)$  — здесь она контролируется электронным ударом. В модели атмосферы A2 ход  $S_{24}$  с глубиной повторяет зависимость  $n_* = f(m)$  с двумя максимумами. В меньшей степени это прослеживается для модели A3 — в последнем случае области максимального.

(4)

вклада водорода и металлоз в *п.* не столь разнесены по глубине в хромосфере звезды. При этом функция источников S24 в модели атмосферы A3 над температурным минимумом больше, чем в модели A2 — в хромосфере модели A3 температура (и электронная плотность) больше.

Отрицательный градиент функции источников на монохроматической оптической глубине  $\tau_s = 1$  приводит к появлению эмиссионных деталей в профиле линии, величина которых определяется характером изменения функции источников и оптической глубины в частотах линии в хромосфере (см. [9]). На рис. 2 отмечены глубины в атмосфере М-гиганта. на которых  $\tau_s = 1.0$  в центре линии  $\lambda$  457.11 нм.

Отметим, что при расчетах в рамках АТР на глубинах  $\tau_{v}^{ATP} = 1$  $\frac{\partial B}{\partial m} < 0$ . Эти расчеты также дают эмиссионное ядро линии  $\lambda$  457.11 нм.

В хромосфере М-гиганта функция источников не превосходит функцию Планка. Отношение интенсивностей эмиссионных деталей в центре этой линии

$$\frac{I_{\star}(\mathrm{H}\mathrm{A}\mathrm{T}\mathrm{P})}{I_{\star}(\mathrm{A}\mathrm{T}\mathrm{P})} \approx \frac{S_{24}(\tau_{\star}^{\mathrm{H}\mathrm{A}\mathrm{T}\mathrm{P}}=1)}{B_{\star}(\tau_{\star}^{\mathrm{A}\mathrm{T}\mathrm{P}}=1)}$$
(5)

может быть больше 1 (для модели АЗ) и меньше 1 (в модели А2). Это объясняется тем, что населенности связанных уровней в хромосфере М-гиганта увеличены по сравнению с ЛТР [10]. Следовательно, уровень  $\tau_{+}^{\text{HATP}} = 1$  расположен на меньших глубинах (см. рис. 2), где  $S_{14}$  больше (или меньше), чем  $B_{11}$  ( $\tau_{-}^{\text{ATP}} = 1$ ).

Особый интерес представляет следующий результат решения НАТР задачи: эмиссионные ядра линии  $\lambda$  457.11 нм, рассчитанные для моделей атмосфер А2 и А3, существенно различаются по интенсивности (рис. 3). Анализ профилей этой линии может существенно дополнить информацию, которую получают при помощи моделирования сильных хромосферных линий h и k Mg II, H и K Ca II.

Субординатные линии Mg I  $\lambda\lambda$  516.73, 517.27, 518.36 нм формируются вследствие переходов между уровнями термов  $3p^3P^0$  и  $4s^3S$ . При решении НЛТР-задачи втот триплет был заменен отдельной линией. Такой подход применим, если между отдельными уровнями соответствующих термов происходит достаточно большое число переходов вследствие неупругих соударений — в втом случае населенности уровней распределены пропорционально их статистическим весам, а для линий мультиплета выполняется условие равенства функций источников (см. [9]). Наши расчеты показали, что спектральные линии  $\lambda\lambda$  516.73, 517.27 и 518.36 нм возника-

ют глубоко в атмосфере М-гиганта, поэтому замена термов 3р<sup>3</sup>Р<sup>0</sup> н 4s<sup>3</sup>S отдельными уровнями при решении НАТР-вадачи оправдана.



Рвс. 3. Профили линии  $\lambda$  457.11 ям, рессчитанные для моделей атмосфер А1 (1). А2 (2), А3 (3). Крыло линии, рассчитаниюепри ЛТР (4).

AA(HM)

Функции источников субординатных линий Mg I в меньшей степени: чувствительны к изменению электронной плотности в хромосфере М-гиганта, чем это было в случае линии 457.11 нм (см. рис. 2 и 4). Профили этих линий, рассчитанные при отказе от ЛТР, практически одинаковы для всех моделей атмосфер М-гиганта, которые использовались в нашей работе. Это сильные линии поглощения ( $r_{,o} \sim 0.01$ ) без каких-либо особенностей. Эмиссионные ядра в линиях 516.73, 517.27 и 518.36 нм появляютсятолько при расчетах в рамках ЛТР.

Переионизация. Эффект переионизации элементов с низкими потеяциалами ионизации  $\chi^{ion} \leqslant 8$  вВ состоит в уменьшения концентрации нейтральных атомов по сравнению с ЛТР. В атмосферах красных тигантов с

## РЕШЕНИЕ НАТР-ЗАДАЧИ

хромосферами металлы перемоннзованы только в области температурного минимума [10]. Крылья сильных линий поглощения, которые рассчитывались в нашей работе, формируются достаточно- глубоко в атмосфере:  $\tau_{,} = 1$  на  $m \ge 10$ , т. е. глубже, чем температурный минимум в моделях атмосфер A2 и A3. На таких тлубинах  $S_{ij} \approx B_i$  (T) во всех трех моделях атмосфер, а населенности связанных уровней меньше, чем при ATP. Как ревультат, выходящий из атмосферы поток излучения в крыльях линий больше рассчитанного в ражках ATP (рис. 3). Отметим, что крылья линий поглощения, рассчитанные для трех различающихся строением внешних слоев моделей атмосфер М-гиганта практически одинаковы — физические условия на глубинах их формирования не зависят от граничных условий.



Рис. 4. То же, что на рис. 2, но для линий ЛЛ 516.73, 517.26, 518.36 им.

Термаливация переходов. Поле излучения в частотах линии термализуется в случае баланса соответствующих радиативных переходов (см. [9]). На глубине термализации  $S_{ij} \simeq B$ . ( $T_e$ ). Наши расчеты показали, что очень сильная линия Mg I  $\lambda$  285.16 нм термализуется во всех моделях атмосфер первой. Процесс термализации других линий Mg I зависит от строения внешних слоев атмосферы М-гиганта. Из табл. 2 следует, что в том случае, когда хромосферы нет (модель A1) или температурный минямум расположен глубоко (модель A3), термализация линий Mg I  $\lambda$  457.11, 516.73, 517.26, 518.36 нм контролируется процессами взаимосвязи уровней. Глубины термализации этих линий в моделях А1 и А3 совпадают. В модели А2 линия  $\lambda$  457.11 нм термализуется на меньших глубинах, чем субординатные линии — на глубине  $m \gtrsim 31$  роль радиативных процессов в установлении баланса переходов меньше, чем столкновительных (см. [9]).

λ, πμ	m <sub>t</sub> , r/cm <sup>2</sup>				
	Модель А1	Модель А2	Модель АЗ		
285.16	0.330	0.810	0.05		
457.11	35.0	31.0	20.0		
516.73	35.0	121.0	20.0		
517.26	35.0	121.0	20.0		
518.36	35.0	121.0	20.0		

#### Таблица 2 ГЛУБИНЫ ТЕРМАЛИЗАЦИИ ИЗЛУЧЕНИЯ В СПЕКТРАЛЬНЫХ ЛИНИЯХ Mg I

Отказ от ряда приближений, которые были использованы в настоящей работе, может привести к количественным изменениям полученных результатов. Так, при решении НАТР-задачи не учитывалось потлощение излучения спектральными линиями атомов и ионов в частотах связанносвободных переходов Mg I. Как следствие, рассчитанная степень переионизации матния в атмосфере М-тиганта завышена. Эмиссионные ядра линии Mg I  $\lambda$  457.11 нм формируются в хромосфере красного гиганта выше температурного минимума на высотах, где электронная температура  $T_e$  превосходит радиативную  $T_r$ . Наличие эмиссионного ядра в линии  $\lambda$  457.11 нм обусловлено в конечном счете увеличением  $T_e$  в хромосфере звезды, его интенсивность в большой степени вависит от интенсивности процессов неупругих соударений со свободными электронами, атомами и молекулами.

В этой работе учитывались неупругие столкновения только со свободными электронами. Можно ожидать, что при учете соударений с атомами и молекулами функции источников линии 457.11 нм будет еще больше связанной с функцией Планка. Чувствительность этой линии к профилю температуры в атмосфере М-гиганта увеличится.

Таким образом, изучение линии Mg I λ 457.11 им представляет очевидный интерес при построении моделей внешних областей атмосфер звезд поздних спектральных классов. Эта линия достаточно сильна уже в спектрах ранних К-тигантов, она расположена в доступной для наземных наблюдений области спектра. Наши расчеты показали, что функция источников линии 457.11 им контролируется неупругими столкновениями. Наличие эмиссионных деталей в профиле этой линии прямо указывает на присутствие в атмосфере храсного гиганта протяженной области с отрицательным градиентом температуры (хромосферы).

Следует отметить, что у многих М-гигантов наблюденные профили линии Mg I  $\lambda$  457.11 нм не имеют эмиссионных деталей. Этот феномен можно объяснить следующими причинами:

1. У части М-гигантов хромосферы отсутствуют или слишком слабы, условия для формирования эмиссионных деталей в линии 457.11 нм в них отсутствуют.

2. Температурный минимум в атмосферах М-гигантов с хромосферами расположен глубже уровня, где оптическая толща в центре линии 457.11 нм достигает 1.

3. Температурная структура хромосфер М-гигантов существенно отличается от той, которая имеет место у более горячих звезд — Солнца, Проциона или Арктура (см. [2]). Действительно, если сбласть температурного минимума в М-гитантах менее протяженная, чем в моделях хромосфер, которые были определены в настоящей работе, а градиент температуры в них соответственно больше, эмиссионные ядра линии Mg I  $\lambda$  457.11 нм будут менее выражены. Окончательный вывод о свойствах хромосферы конкретной звезды в этом случае может дать изучение более сильных хромосферных линий h и k Mg II, H и K Ca II. Отметим, что для их моделирования требуется более сложная методика решения H $\Lambda$ TP-задачи с учетом частичного перераспределения фотонов по частотам.

Главная астрономическая обсерватория АН УССР

# THE NLTE-PROBLEM SOLUTION FOR Mg I IN THE M-GIANT ATMOSPHERE WITH A CHROMOSPHERE. SOURCE FUNCTIONS AND THEORETICAL PROFILES OF LINES 12 457.11, 516.73, 517.26, 518.36 nm

## YA. V. PAVLENKO

Source functions and theoretical Mg I line profiles in the M-giant atmosphere ( $T_{eff}$ =3800 K,  $\lg g$ =1.5) have been calculated. The M-giant atmosphere models with chromospheres which have different temperature minimum locations have been empirically constructed. A conclusion is drawn that the shape of the Mg I intercombinate line  $\lambda$  457.11 nm dcmonstrates a marked dependence on the temperature distribution in the 7-638 stellar atmosphere. At the same time strong subordinate Mg I lines are not sensitive to the outer layer structure of the red giant atmosphere.

## **ЛИТЕРАТУРА**

- 1. K. G. Carpenter, R. F. Wing, R. E. Stencel, Astrophys. J. Suppl. Ser., 57, 405, 1985.
- 2. Г. А. Гурвадян, Звездные хромосферы ими дублет 2800 А Mg II в астрофизние, Наука, М., 1984.
- 3. S. L. Wright, J. D. Argyros, Comm. Univ. London Observ., No. 75, 1975.
- 4. T. Kipper, M. Kipper, J. Sitska. in "Atmospheres of Late-Type Stars,, Valgus, Tallinn, 1981, p. 3.
- 5. O. Gingerich, R. W. Noyes, W. Kalkoffen, Y. Cuny, Solar Phys., 18, 347, 1971.
- 6. T. R. Ayres, J. L.Linsky, Astrophys. J., 200, 680, 1975.
- 7. Я. В. Павленко, Эффекты отклоневия от ЛТР в атмосферах М-гигантов, Валгус. Таллин, 1984.
- 8. R. L. Kurucz, E. Pegiremann, SAO Spec. Rep., No. 362, 1975.
- 9. Д. Михалас, Звездные атмосферы, Мяр. М., 1982.
- 10. Я. В. Певленко, в сб.: «Проблемы астрономин», дер. УкрНИИНТИ, № 430-87, 22, 1987.