АСТРОФИЗИКА

TOM 50

АВГУСТ, 2007

выпуск 3

ФИЗИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИЗЛУЧАЮЩЕГО В КОНТИНУУМЕ СЛОЯ ЗВЕЗД ТИПА МИРЫ. I. СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ

Е.В.РУБАН, А.А.АРХАРОВ, Е.И.ГАГЕН-ТОРН, Т.Ю.ПУЗАКОВА Поступила 21 марта 2007 Принята к печати 6 июня 2007

На основе результатов наблюдений, имеющихся в Пулковской базе спектрофотометрических данных в диапазоне 320-1080 нм, были определены спектрофотометрические температуры пяти переменных звезд типа Миры. Все полученные температуры оказались ниже эффективных температур звезд соответствующих подклассов. Вблизи максимума блеска отмечено уменьшение температуры при удалении момента наблюдения от максимума.

Ключевые слова: звезды: спектрофотометрия: переменность

1. Введение. Исследуя распределение энергии в спектре Миры (о Cet, BS 681) по результатам наблюдений, имеющимся в Пулковской базе спектрофотометрических данных (ПБСД), мы получили различие спектроэнергетических кривых звезды в разных фазах цикла [1]. Различие соответствующих температур излучающего слоя составило 100-700 К. Наибольшая температура (3000 К) была зарегистрирована при наблюдениях вблизи максимума блеска. По мере удаления момента наблюдения от эпохи максимума температура уменьшалась. Уменьшение температуры сопровождалось увеличением расстояния излучающих слоев от центра звезды. Во всех фазах спектрофотометрическая температура была ниже эффективной температуры звезд данного подкласса (3126 К [2]). Это объяснялось тем, что при движении слоев наружу, излучение в непрерывном спектре приходило из более удаленных (более холодных) слоев звезды.

Существование движущихся слоев, излучающих и поглощающих в линиях и полосах, в атмосферах переменных звезд типа Миры считается установленным. Слой же, излучающий непрерывный спектр, практически не исследовался из-за трудностей, связанных с сильным "загрязнением" континуума молекулярными полосами. Преодолев эти трудности при исследовании непрерывного спектра Миры, мы расширили исследование на другие звезды этого типа с целью определения физических параметров слоя, излучающего в континууме. В качестве наблюдательного материала также использовались данные ПБСД. В настоящей статье приводятся результаты этого исследования, касающиеся определения спектрофотометрических температур звезд.

2. Результаты наблюдений. В ПБСД имеется пять звезд типа Миры. Основные данные о переменности этих звезд приведены в табл.1 в соответствии с [3]. В таблице для каждой звезды даны: номера по каталогам HD и BS; название по Общему каталогу переменных звезд; спектральный класс, Sp; величина в максимуме блеска, V_{max} , и минимуме, V_{min} ; $\Delta V = V_{min} - V_{max}$; период изменения блеска, P.

Таблица 1

HD BS I	Название	Sp	Vmax	V _{min}	Δ٧	Р
14386 681 ON 69243 3248 3248 84748 3882 117287 117287 5080 152783	MICR CET	M7IIIe	2.0	10.1	8.1	331.96d
	R CNC	M7IIIe	6.07	11.8	5.73	361.60d
	R LEO	M8IIIe	4.4	11.3	6.9	309.95d
	R HYA	M7IIIe	3.5	10.9	7.4	388.87d
	RR SCO	M6II-IIIe-	5.0	12.4	7.4	281.45d

ДАННЫЕ О ЗВЕЗДАХ

Как неоднократно отмечалось, результаты наблюдений всех звезд, находящиеся в ПБСД, сгруппированы в сезонные каталоги. Сезонные каталоги относятся к разным периодам наблюдений и условно пронумерованы от 1 до 21 [4]. В течение одного сезона звезда могла наблюдаться несколько раз в разные ночи. В течение одной ночи звезда наблюдалась, как правило, один раз вблизи кульминации.

В каждом сезонном каталоге для звезды даны квазимонохроматические величины, m_{λ} , и их среднеквадратичные (стандартные) относительные ошибки, S_{λ} , во всем спектральном диапазоне с шагом 2.5 нм. Величина m_{λ} в длине волны λ определена из соотношения: $m_{\lambda} = -2.5 \log E_{\lambda}$, где

Таблица 2

Название	k-N	Год	JD24476	Место	λλ (нм)	n
OMICR CET	17	1988	10 10 100	A	510-1080	2
	19	1989				1
R CNC	11	1984	-	н		1
R LEO	21	1991	-	п	600-1110	2
R HYA	H		-	-		Ī
RR SCO	18-1	1989	61.73	Б	485-1105	1
	" 2		67.72		H	lī
	" 3		68.88			1
	" 4	-	69.73			1 i
	" 5	-	77.76	н		1
	" 6		81.75	(20400

ДАННЫЕ О НАБЛЮДЕНИЯХ

 E_{λ} - усредненное за сезон значение квазимонохроматической освещенности от звезды на внешней границе земной атмосферы, выраженное в эрг см⁻² с⁻¹ см⁻¹.

Возможная переменность потока излучения от звезды не учитывалась, и результаты наблюдений переменных звезд усреднялись так же, как и у других звезд. Даты наблюдений не сохранялись. Исключением являлась Мира (BS 681, HD 14386) и звезда RR SCO (HD 152783). Даты наблюдений Миры приведены в работе [1]. Там же даны фазы цикла, соответствующие датам наблюдений. Распределения энергии, полученные в каждом сезоне наблюдений, приведены в [3]. Поскольку результаты всех наблюдений Миры мы исследовали в работе [1], то здесь использовали (для сравнения) только данные 17-го и 19-го сезонов, показавшие наибольшее расхождение результатов. Для звезды RR SCO, наблюдавшейся в Боливии, моменты наблюдений, фазы цикла и квазимонохроматические величины опубликованы в [3,5]. В настоящей



Рис.1. Распределение энергии в спектрах звезд: a) R LEO, R HYA, R CNC и OMICR CET; b) RR SCO.

работе рассмотрены результаты всех наблюдений этой звезды. Наблюдения звезды RR SCO проводились на телескопе АЗТ-7, остальных - на телескопе IIEЙCC-600.

Данные о наблюдениях исследуемых звезд приведены в табл.2, в которой даны: название звезды; обозначение сезона наблюдений, k, согласно [4], и номер по порядку наблюдения в сезоне, N (для звезды RR SCO); год, соответствующий сезону наблюдений; момент наблюдения в юлианских днях, JD (для звезды RR SCO); место наблюдений (А - Армения, Б - Боливия); спектральный диапазон в нм, $\lambda\lambda$; количество наблюдений, *n*.

На рис.1 приведено распределение энергии в спектрах звезд: a - R CNC, R LEO, R НҮА и OMICR CET в 17-м и 19-м сезонах; b - RR SCO в разные даты, N, 18-го сезона. По оси абсцисс отложена длина волны, λ , в нм; по оси ординат - наблюденная величина, m_{λ} . Здесь и на других рисунках, на отрезках даны максимальные величины случайных ошибок [6].

Определим далее, каким температурам соответствуют приведенные распределения.

3. Спектрофотометрические температуры звезд R CNC, R LEO и R HYA. Как известно, спектрофотометрическая температура определяется из совпадения наблюдаемого распределения энергии в непрерывном спектре звезды с распределением энергии в спектре абсолютно черного тела.

В работе [7] мы подробно рассматривали известные трудности определения спектрофотометрических температур звезд поздних спектральных классов. Здесь мы на них останавливаться не булем. Отметим лишь, что сильное бланкетирование континуума линиями и молекулярными полосами поглощения очень усложняет задачу выделения континуума в спектрах этих звезд. Для звезд типа Миры задача еще более усложняется наличием эмиссии в их спектрах. Особенно сильно влиянию эмиссии и поглощения подвержен непрерывный спектр в визуальном диапазоне, в котором "чистых" участков континуума практически нет. И хотя в длинноволновой области, в которой представлены результаты наблюдений исследуемых звезд, континуум искажен меньше, неопределенность континуума все-таки остается большой. Большая неопределенность континуума сказывается и на большой неопределенности спектрофотометрической температуры. При исследовании спектров Миры [1], для уменьшения этой неопределенности, мы использовали два метода определения температуры: абсолютный и дифференциальный. Здесь мы также будем использовать оба эти метода. Кроме того, применяя их, проведем дополнительное сравнение распределений энергии в спектрах звезд и Миры, используя для Миры температуры, полученные в [1].

На рис.2а построены наблюдаемые спектральные распределения энергии для звезд R CNC, R LEO, R HYA и OMICR CET, а также кривые энергии абсолютно черных тел с температурами 2200 К и 2900 К. Эти температуры были получены для Миры по данным 17-го и 19-го сезонов, соответственно. Нормировка всех кривых произведена



Рис.2. а) Распределение энергии в спектрах звезд и теоретические распределения для абсолютно черного тела разных температур. b) Спектральные зависимости разностей наблюдаемых и теоретических величин.

к потоку в длине волны 1040 нм. По оси абсцисс отложены длины волн λ в нм, по оси ординат - $m_{\lambda} - m_{1040}$.

Видно, что для звезды R CNC кривая практически совпадает с кривой OMICR CET-17, т.е. можно считать, что спектрофотометрические температуры, которые определяют ход этих кривых, близки и равны ~2200 К. Ход же кривых для звезд и R НҮА и R LEO соответствует более низким

419

температурам.

Чтобы установить, насколько отличаются спектрофотометрические температуры звезд R НҮА и R LEO от температуры Миры, мы воспользовались дифференциальным методом. Рис.2b иллюстрирует его применение. Для исследуемых звезд на рисунке показаны зависимости от длины волны разности $\Delta m_{\lambda} = m_{\lambda} - m_{\lambda}(17)$, где m_{λ} - квазимонохроматическая величина звезды, а m₂(17) - квазимонохроматическая величина Миры, полученная в 17-м сезоне. Здесь также даны аналогичные зависимости разностей величин абсолютно черных тел с температурами. различающимися на 200 ÷ 400 К: $\Delta m_{\lambda} = m_{\lambda}(T) - m_{\lambda}(2200)$, где T=1800, 2000 К. В качестве исходной температуры для теоретических кривых принята температура 2200 К, полученная по результатам наблюдений Миры в 17-м сезоне [1]. Нормировка всех кривых та же. По оси орлинат отложена величина $\Delta m_{\lambda} - \Delta m_{1040}$. Составляющая непрерывного спектра в наблюдаемой дифференциальной кривой является монотонной функцией длины волны и определяет общую тенденцию длинноволновой зависимости Δm_{λ} . Сопоставляя ход дифференциальных кривых с ходом теоретических кривых, можно видеть, что отличие распределений энергии в спектрах звезд от распределения в спектре OMICR CET-17 связано с более низкими температурами звезд: T ≤ 2000 К. Погрешность определения температуры составляет половину интервала температур соседних теоретических кривых, $\Delta T = \pm 100$ К. Различие температур R НҮА и R LEO, по-видимому, существует, но, как следует из рис.2b, находится на пределе точности наших измерений. Поскольку для наших дальнейших выводов оно несущественно, его мы учитывать не будем.

Таким образом, из сравнения распределений энергии в спектрах исследуемых звезд с распределениями в спектрах Миры и абсолютно черного тела были получены следующие значения спектрофотометрических температур: для звезды R CNC $T = 2200 \pm 100$ K, для R HYA $T = 1900 \pm 100$ K и для R LEO $T = 1900 \pm 100$ K.

4. Спектрофотометрические температуры звезды RR SCO в разные даты. Распределения энергии в спектре звезды RR SCO, полученные в 18-м сезоне в разные даты, N (см. табл.2), приведены на рис.3а. Здесь же даны для сравнения распределения энергии в спектре Миры в 17-м и 19-м сезонах. Обозначения осей те же, что и на рис.2a. Видно, что кривые RR SCO расположились между кривыми Миры, и что распределение энергии, описанное кривой 3, ближе всех кривых к распределению ОМІСК СЕТ-19.

Чтобы определить температуру, характеризующую каждое полученное распределение, мы провели сравнение кривых RR SCO с чернотельными кривыми разных температур, которые построены на рис.3b. Нормировка та же. Сравнение кривых показывает, что спектральная зависимость квазимонохроматических освещенностей от звезды, полученная в 3-й дате, определялась температурой ~2800 К. Эта температура была



Рис.3. Распределение энергии в спектре звезды RR SCO в разные даты, N, и а) распределения в спектре Миры, b) теоретические распределения для абсолютно черного тела разных температур.

наибольшей из возможных температур для рассматриваемых кривых и близкой к температуре OMICR CET-19 (~2900 К). Заметим, что, как видно на рис.1b, квазимонохроматические потоки от звезды в эту дату также были наибольшими практически во всем диапазоне спектра.

Приняв результат наблюдения в 3-й дате за основу, мы определили, как отличаются квазимонохроматические величины звезды в другие даты от величин в 3-й дате, и исследовали длинноволновые зависимости этих отличий. Так, на рис.4 построены зависимости от длины волны разности наблюденных величин: $\Delta m_{\lambda} = m_{\lambda}(N) - m_{\lambda}(3)$, где N - номер наблюдения в сезоне 18 (см. табл.2). На рисунке показаны также спектральные

421



Рис.4. Спектральные зависимости разностей квазимонохроматических величин звезды RR SCO для различных дат и разностей теоретических величин для абсолютно черного тела различных температур.

зависимости разности монохроматических величин абсолютно черных тел разных температур: $\Delta m_1 = m_1(T) - m_1(2800)$, где T = 2400, 2600 K. За исходную температуру принята температура 2800 К, полученная выше для наблюдаемой кривой 3. Нормировка та же. По оси абсцисс отложена длина волны λ в нм, по оси ординат - $\Delta m_{\lambda} - \Delta m_{1040}$. Из сравнения кривых можно заключить, что спектрофотометрическая температура звезды в моменты наблюдений 1, 2 и 4 была ниже на ~200 К, чем во время наблюдения 3. B моменты 5 6 a И ниже на ~400 К. Она составляла ~2600 К и ~2400 К соответственно.

5. Соотношение между спектрофотометрическими и эффективными температурами звезд. Полученные спектрофотометрические температуры, T_c , исследуемых звезд приведены в табл.3. Для звезды RR SCO представлена наибольшая температура, то же для Миры по данным [1]. В таблице даны также эффективные температуры,

Таблица 3

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ И ЭФФЕКТИВНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗВЕЗД

Название	<i>T_e</i> , K	T _o , K
OMICR CET	3000	3126
R CNC	2200	3126
R LEO	1900	2891
R HYA	1900	3126
RR SCO	2800	3251

 $T_{\rm eff}$ [2], звезд соответствующих подклассов. Имеется более позднее определение эффективной температуры Миры, равное 3192 К в фазе 1.13 [8]. Это значение, как видно, мало отличается от $T_{\rm eff}$ приведенного в таблице. Поэтому для единообразия мы привели данные для всех звезд по одному источнику.

Из таблицы следует, что все полученные температуры ниже эффективных температур звезд своих подклассов. Более низкие спектрофотометрические температуры исследуемых звезд могут быть связаны с протяженностью фотосфер и являться общим свойством всех холодных гигантов, когда, проходя через протяженную фотосферу, свет выходит из более удаленных, более холодных слоев звезды.

Мы проверили это и провели сравнение средних кривых распределения энергии в спектрах гигантов поздних подклассов М (M5 III, M6 III, M7 III и M8 III) [2] с кривыми для абсолютно черных тел разных



Рис.5. Средние распределения энергии в спектрах М-гигантов различных подклассов и теоретические распределения для абсолютно черного тела различных температур.

температур. Результат приведен на рис.5. Действительно, как следует из сравнения кривых, распределения энергии в спектрах холодных гигантов определяются более низкими температурами, чем эффективные температуры (3420, 3251, 3126 и 2891 К [2]) звезд данных подклассов.

6. Зависимость температуры от фазы цикла. Спектрофотометрические температуры, T_e , и фазы цикла, ph, в моменты наблюдений исследуемых звезд приведены в табл.4. Поскольку фазы цикла известны не для всех звезд, то для оценок фаз мы использовали результаты наших наблюдений, а именно, вычислили отношения $p = 1 + (m_{610} - V_{max})/\Delta V$, где m_{610} - наблюденная квазимонохроматическая величина звезды в длине волны 610 нм. Эти отношения даны в последнем

столбце таблицы. В скобках указаны отклонения отдельных значений p от приведенного среднего (при n > 1). Отклонения, как видно, малы, и они для нас несущественны. (Строго говоря, длина волны 610 нм не является изофотной (550 нм) длиной волны полосы V, но она близка к ней, не попадает на место сильной линии или полосы поглощения, и для наших, довольно грубых, оценок фазы ее использовать можно).

Сопоставляя между собой данные двух последних столбцов, легко увидеть уменьшение величины p с приближением момента наблюдения к моменту максимального блеска, когда ph = 1.00. (Значение p в фазе

Таблица 4

Название	T _e	ph	p
OMICR CET-17	2200	1.22	1.43(.01)
" 19	2900	1.09	1.20
R CNC	2200	-	1.20
R LEO	1900		1.41(.02)
R HYA	1900		1.40
RR SCO -1	2600	0.97	1.19
" 2	2600	0.99	1.20
" 3	2800	1.00	1.16
" 4	2600	1.00	1.23
" 5	2400	1.03	1.28
" 6	2400	1.04	1.28

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ЗВЕЗД

максимального блеска не равно единице, поскольку разность $m_{510} - V_{max}$ в максимуме не равна нулю из-за несоответствия спектрофотометрических величин фотометрическим).

К этому выводу можно прийти, рассматривая в таблице спектрофотометрические температуры, полученные для звезды RR SCO в разных фазах цикла. Видно, что максимальная температура была в фазе максимального блеска. (Наблюдаемое уменьшение температуры еще при ph = 1.00 может быть связано с более короткой продолжительностью спектрофотометрического максимума по сравнению с продолжительностью фотометрического).

Та же зависимость температуры от фазы цикла отчетливо проявилась и для Миры: чем ближе к максимуму, тем температура выше (см. табл.4).

Учитывая зависимость *p* от фазы, можно предположить, что момент наблюдения R CNC пришелся на фазу, более близкую к фазе максимального излучения звезды, чем моменты R LEO и R HYA к фазам своих максимумов. Как следует из таблицы, температура R CNC в этот момент была выше, чем температуры R LEO и R HYA.

Таким образом, полученные спектрофотометрические температуры

всех исследуемых звезд зависели от фазы цикла переменности их блеска и были тем меньше, чем дальше момент наблюдения отстоял от момента максимума.

7. Заключение. В результате исследования распределений энергии в спектрах пяти долгопериодических переменных звезд были получены спектрофотометрические температуры слоев, ответственных за излучение в непрерывном спектре. Температуры несколько различались у разных звезд, но все они были ниже эффективных температур звезд соответствующих подклассов, что связано, по-видимому, с протяженностью фотосфер, характерной для холодных гигантов.

Для исследуемых звезд наблюдалась зависимость спектрофотометрической температуры от фазы цикла, аналогичная известной зависимости от фазы эффективной температуры: при удалении момента наблюдения от фазы максимального блеска температура звезды уменьшалась.

В следующей части работы мы определим радиусы излучающего слоя в разных фазах цикла, установим их связь с другими параметрами и определим скорости расширения слоя.

Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, Россия, e-mail: rubane@mail.ru

PHYSICAL PARAMETERS OF THE LAYER RESPONSIBLE FOR RADIATION IN CONTINUUM OF MIRA TYPE STARS. I. THE SPECTROPHOTOMETRIC TEMPERATURES

E.V.RUBAN, A.A.ARKHAROV, E.I.HAGEN-THORN, T.YU.PUZAKOVA

The spectrophotometric temperatures of five Mira-type variable stars have been found on the basis of the data of the Pulkovo spectrophotometric base which contains the data in the range 320-1080 nm. For all stars the temperatures obtained are less than the effective temperatures of stars of corresponding spectral subclasses. It is noted that near the brightness maximum the larger is the distance from maximum the lower is the temperature.

Key words: stars: spectrophotometry: variability

Е.В.РУБАН И ДР.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, Т.Ю.Пузакова, Е.В.Рубан, Астрофизика, 48, 175, 2005.
- 2. M.A.Fluks, B.Plez, P.S.The et al., Astron. Astrophys. Suppl. Ser., 105, 311, 1994.
- 3. Е.В.Рубан, Г.А.Алексеева, А.А.Архаров и др., Письма в Астрон. ж., 32, 672, 2006.
- 4. А.А.Архаров, Т.Ю.Пузакова, Е.В.Рубан, Изв. ГАО, 212, 247, 1998.
- G.A.Alekseeva, V.D.Galkin, I.N.Nikanorova, V.V.Novikov, Baltic Astronomy, 3, 361, 1994.
- 6. Е.И.Гаген-Торн, Изв. ГАО, 211, 26, 1996.
- 7. А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, Т.Ю.Пузакова, Е.В.Рубан, Изв. ГАО, 216, 496, 2002.
- 8. H.C.Woodruff, M.Ederhardt, T.Driebe et al., Astron. Astrophys., 421, 703, 2004.