АСТРОФИЗИКА

TOM 48

МАЙ, 2005

ВЫПУСК 2

УДК: 524.3:520.44

СПЕКТРОФОТОМЕТРИЧЕСКАЯ ПЕРЕМЕННОСТЬ МИРЫ

А.А.АРХАРОВ, Е.И.ГАГЕН-ТОРН, Т.Ю.ПУЗАКОВА, Е.В.РУБАН Поступила 15 декабря 2004 Принята к печати 12 января 2005

На основе данных Пулковской спектрофотометрической базы об абсолютных квазимонохроматических потоках от звезды *о* Сеt, в диапазоне длин волнн 320-1080 нм, были определены ес физические параметры в различных фазах кривой блеска. Показано, что слой, излучающий в непрерывном спектре, расширился между фазами цикла, приходящимися на восходящую и нисходящую ветви кривой блеска. Расширение происходило со средней скоростью 32 км/с. В момент, когда блеск звезды упал примерно на три величины, ее радиус увеличился почти в три раза. За это же время температура слоя уменьшилась с 3000 К до 2200 К. Учитывая полученную скорость расширения, была сосчитана скорость потери массы. Она составила 3.7 · 10⁻⁷ M_☉ /год.

1. Введение. Настоящая работа является продолжением работ по исследованию переменности звезд спектрофотометрической базы данных ГАО РАН в Пулкове. База данных содержит квазимонохроматические величины звезд в абсолютных энергетических единицах в диапазоне от 320 до 1080 нм.

В данной работе ставилась задача исследования спектральной переменности монохроматических потоков от звезды *о* Cet, Миры, BS 681, красного гиганта спектрального класса М7 IIIe, с целью получения физических параметров звезды в различных фазах цикла.

Мира является родоначальником большого класса долгопериодических переменных звезд типа М, меняющих блеск в визуальном диапазоне спектра в очень больших пределах (до 8^m) в течение почти годового цикла. Несмотря на то, что Мира наблюдалась с конца XVIв., а последнее столетие изучалась особенно широко, проявление ее переменности настолько многообразно и сложно, что многие его детали до сих пор до конца не ясны. Так, из-за сильного бланкетирования континуума молекулярными полосами, практически нет работ, связанных с исследованием переменности непрерывного спектра звезды, не известны температура и радиус излучающего слоя в разных фазах цикла.

Настоящая работа дает полезную информацию об этом слое.

2. Квазимонохроматические освещенности. Звезда BS 681 представлена в базе данными трех сезонных каталогов, полученных на Безымянном перевале в Армении (информацию о сезонах наблюдений

и методике обработки результатов см. в [1-3]). Данные о наблюдениях приведены в табл.1. Здесь в первом столбце даны даты наблюдений (в течение одной ночи звезда наблюдалась один раз); во втором - юлианские дни, JD; в третьем - названия телескопов; в четвертом - спектральные диапазоны, $\lambda\lambda$, (в нм); в чятом - фазы цикла, ph₁ (фаза цикла определялась от нулевой эпохи, приведенной в [4], с периодом 333.4d, там же); о содержании шестого столбца будет сказано ниже; в последнем, седьмом столбце приведены обозначения сезонов наблюдений, *P*, согласно [3].

Таблица 1 .

Дата	JD	Телескоп	λλ ΗΜ	ph,	ph ₂	Р
14.02.1988	2447 206	ЦЕЙСС-600	510-1080	0.25	0.20	17
26.02.1988	" 218			0.28	0.23	n
- 22.09.1989	" 792	A3T-7	320-740	0.00	-0.05	8
23.09.1989	" 793	77	37	0.01	-0.04	n
24.09.1989	" 794		77	0.01	-0.04	99
25.09.1989	" 795		27	0.01	-0.04	17
26.10.1989	" 826	17		0.11	0.06	97
03.11.1989	" 834	33	37	0.13	0.08	21
04.11.1989	" 835	11	17	0.13	0.08	н
06.11.1989	" 837	tt	*1	0.14	0.09	19

ДАННЫЕ О НАБЛЮДЕНИЯХ

Из таблицы видно, что наблюдения звезды не охватывали весь период переменности. Это связано с тем, что при составлении программы создания базы данных задача исследования переменности не ставилась, и наблюдения любой переменной звезды случайным образом попадали на отдельные фазы цикла.

Результаты наблюдений отдельных сезонов обрабатывались независимо. Для каждого наблюдения в каждой длине волны λ спектрального диапазона Обыли получены значения квазимонохроматических освещенностей от звезды на внешней границе земной атмосферы, E_{λ} , в эрг см⁻² с⁻¹ см⁻¹. Эти значения усреднялись по количеству наблюдений звезды за сезон и представлялись в величинах $m_{\lambda} = -2.5\log E_{\lambda}$. Средние величины m_{λ} , а также их среднеквадратичные (стандартные) ошибки, S_{λ} , заносились в текущий (сезонный) каталог с шагом 2.5 нм.

На рис.1 приведены кривые распределения энергии в спектре o Cet, соответствующие результатам наблюдений в разные сезоны (указаны в скобках). По вертикальной оси отложены звездные величины m_{λ} ; по горизонтальной - длины волн, λ , в нм. Для 19-го сезона на рисунке приведена одна кривая 3 (одно наблюдение). Для остальных сезонов даны границы коридора, в который попадают наблюдаемые величины в разные даты. Так, линиями 1 и 2 отмечены границы разброса величин,

176

полученных в 8-м сезоне: кривая 1 проведена через точки, соответствующие $(m_{\lambda} + S_{n\lambda})$, а кривая 2 - соответственно через точки $(m_{\lambda} - S_{n\lambda})$, где *n* - количество наблюдений за сезон, а $S_{n\lambda} = \sqrt{n} \cdot S_{\lambda}$. Аналогично проведены кривые 4 и 5 для 17-го сезона. На отрезках отложены максимальные величины случайных ошибок, $S_{0\lambda}$ [5], в разных участках спектра: в области длин волн короче 400 нм они не превышают 0^m.1, в визуальной области - 0^m.04, в инфракрасной - 0^m.02.



Рис.1. Распределение энергии в спектре о Сет по данным различных сезонов наблюдений.

Очевидно, что для переменной звезды дисперсия результатов наблюдений, S², складывается из дисперсии случайного разброса наблюденных величин, S² и дисперсии, обусловленной переменностью светового сигнала, $S_{V\lambda}^2$. Для наблюдений в 8-м сезоне $S_{V\lambda}^2 >> S_{0\lambda}^2$ [6], поэтому $S_{n\lambda} \approx S_{V\lambda}$, а различие кривых 1 и 2 не является случайным. Оно отражает реальные различия монохроматических потоков излучения от звезды. Чтобы установить, к каким датам относятся эти кривые, рассмотрим внимательнее табл.1. Даты наблюдений в 8-м сезоне (см. табл.1) представляют две группы: первые четыре даты (в начале сезона) и последние три (в его конце). Различие дат внутри групп не превышает 10 суток, между группами - превосходит месяц. Учитывая, что изменение потока излучения звезды происходит медленно в течение почти года, можно предположить, что различие величин, наблюденных в разных датах каждой группы, незначительно и сравнимо со случайным разбросом Sox. Значительно же превышающее случайный разброс различие кривых 1 и 2 относится к систематическому расхождению данных указанных групп. При этом можно считать, что кривые 1 и 2, с точностью до разброса результатов наблюдений

в группах, характеризуют средние распределения энергии, полученные в соответствующих датах. Поскольку даты конца 8-го сезона близки к дате 19-го сезона, то близость кривой 2 к кривой 3, полученной в 19-м сезоне (см. рис.1), позволила отнести кривую 2 к концу 8-го сезона (8_к), а кривую 1, следовательно, к его началу (8_к).

Расхождения же данных 4 и 5 имеют тот же порядок, что и случайные расхождения ($S_{V\lambda} \approx S_{0\lambda}$), и в дальнейшем мы на них останавливаться не будем, используя для 17-го сезона усредненные значения.

Соотнесем наши наблюдения с кривой блеска.

3. Фазы цикла. На рис.2а, b приведена кривая блеска o Cet из [4]. На рис. 2а нанесены для фаз ph, из табл. 1 точки, соответствующие наблюдаемым величинам то в изофотной длине волны 550 нм (номера точек соответствуют номерам кривых на рис.1). Очевидно, что монохроматические величины могут быть не равны величинам / для конкретной даты (фазы), но разности в любые два момента наблюдений между фотометрическими величинами и соответствующими этим моментам монохроматическими величинами должны, по определению, совпадать. Как видно из рис.2а, для всех дат, кроме сезона 8 (точки 1 и 2), это условие более или менее соблюдается. Что касается сезона 8, то приходящийся на начало сезона максимум кривой блеска вовсе не соответствует наблюдениям (точка 1). Напротив, именно в эти даты зарегистрирован наименьший за сезон поток. Создается впечатление, что период изменения блеска звезды, который мы использовали для вычисления фаз, 333.4d, несколько меньше, чем реальный период. Действительно, небольшая неточность в его определении могла дать за 28 циклов (с момента нулевой эпохи, используемой нами, [4]) заметный сдвиг максимума.

Мы попытались подобрать такой период, который бы устранил наблюдаемое несоответствие. Лучше всего наблюдаемым данным удовлетворил период 334.0d. Фазы цикла, ph_2 , полученные при пересчете с этим периодом от нулевой эпохи [4], приведены в столбце 6 табл.1, а на рис.2b точками отмечены те же величины m_{550} , что и на рис.2a, но для фаз ph_2 . Чтобы привести в соответствие монохроматические и фотометрические величины, для всех значений m_{550} была введена поправка. Она определялась как средняя разность между монохроматическими и фотометрическими данными в фазах ph_2 и оказалась равной $-0^m.20$. Вычисленные с этой поправкой значения $V_a = m_{550} - 0^m.20$ соответствовали фотометрическим величинам звезды в моменты наблюдений. Как видно на рис.2b, вычисленные величины V_a (крестики) практически легли на кривую блеска, а разности между фотометрическими величинами в различные фазы цикла совпали с разностями монохроматических величин в те же фазы. Для найденного периода 334.0d можно посчитать дату максимума в исследуемом цикле. Он пришелся на 8.10.1989г. Наблюдений в эту ночь не было (см. табл.1).



Рис.2. Кривая блеска о Сеt [4] (сплошная линия) и наблюдаемые квазимонохроматические величины m₃₅₀ (точки) в изофотной длине волны 550 нм для фаз ph₁ (a) и ph₂ (b). Крестики - вычисленные величины V для фаз ph₂.

• Заметим, что в 1937г. в обзоре [7] для звезды о Сеt дан период изменения блеска 330d. В работе [4] авторы привели определенный до 1971г. средний период изменения блеска о Сеt, который составил 331.65d. Сами же они определили период в 333.4d. Чтобы удовлетворить нашим данным, период должен быть 334.0d. Учитывая, что каждый раз период корректировался в сторону увеличения, можно предположить, что поправки периода связаны не с неточностью его определения в то или иное время, а с постепенным увеличением самого периода изменения блеска данной звезды.

Итак, наблюдения в первые даты 8-го сезона попали на восходящую

ветвь кривой блеска, когда поток излучения от звезды увеличивался (точка 1 на рис.2b). Затем блеск достиг максимума и начал падать. Начало падения блеска зарегистрировано наблюдениями последних дат 8-го сезона (точка 2). Наблюдения во все остальные сезоны (точки 3, 4 и 5) пришлись на нисходящую ветвь кривой блеска.

Посмотрим далее, как менялись физические параметры звезды.

4. Спектрофотометрические температуры излучающих слоев. Как известно, спектрофотометрическая температура определяется из совпадения наблюдаемого распределения энергии в непрерывном спектре звезды с распределением энергии в спектре абсолютно черного тела.

В предыдущей работе [8] мы подробно рассматривали известные трудности определения спектрофотометрических температур звезд поздних спектральных классов. Здесь мы на них останавливаться не будем. Заметим лишь, что для данной звезды эти трудности особенно усугубляются, поскольку она является самой поздней из всех звезд Пулковской спектрофотометрической базы.

Одной из перечисленных в [8] трудностей является наличие эмиссии в спектре. При проведении континуума на графиках спектрального распределения энергии возможное присутствие эмиссии не позволяет использовать теоретические кривые, огибающие наблюдаемые точки сверху. Еще более усложняет задачу бланкетирование континуума линиями и молекулярными полосами поглощения.

При большой неопределенности проведения континуума возникает и большая неопределенность спектрофотометрической температуры. Поэтому для повышения достоверности результата мы старались использовать несколько методов, чтобы более уверенно оценить диапазон возможных значений температуры.

Рассмотрим разные участки спектра раздельно. На рис.За построена в инфракрасном диапазоне сеть спектроэнергетических кривых абсолютно черного тела различной температуры и наблюдаемые спектральные распределения энергии для звезды *о* Cet, полученные в 17-м и 19-м сезонах. На отрезке отложена величина средней ошибки наблюдений в представленном диапазоне. Все данные нормированы к потоку в длине волны 820 нм. Строго говоря, континуум в λ 820 нм несколько искажен вследствие бланкетирования полосами поглощения TiO и VO [9]. Это искажение может отразиться на значении спектрофотометрической температуры. Но, поскольку метод определения температуры основан не на одной точке спектра, то можно надеяться, что влияние бланкетирования в данном случае не сильно испортит результат. Ниже мы еще вернемся к влиянию бланкетирования.

На рис. За видно, что в 17-м сезоне наблюдаемая кривая континуума

лежит между теоретическими кривыми с температурами 2100 + 2300 К, а 19-м - с температурами 2800 + 3000 К. Различие температур двух кривых, ΔT , таким образом, составляет ~700 К.

На рис.3b представлена визуальная область спектра. Результаты наблюдений, полученные в 8-м сезоне, нормированы к потоку в длине волны 380 нм, где континуум менее искажен линиями. Также нормированы и



Рис.3. Распределение энергии в спектре абсолютно черного тела различной температуры: 3100 K (1), 2900 K (2), 2700 K(3), 2500 K (4), 2300 K (5), 2100 K(6), 1900 K (7) и наблюдаемые распределения в спектре о Сет в разные сезоны в диапазонах: инфракрасном (а) и визуальном (b).

теоретические данные. На отрезках отложены величины ошибки наблюдений в разных частях спектра. Видно, что распределения энергии в спектре звезды в начале и конце 8-го сезона практически не различаются и соответствуют температурам 2800 + 3000 К. Можно считать, что температура оставалась постоянной, а, если и менялась, то в сторону, небольшого повышения температуры к концу сезона.

181

19430102455 194605 Получить различие спектрофотометрических температур двух кривых можно также дифференциальным методом, а именно, сравнить зависимости от длины волны наблюдаемых и теоретических разностей монохроматических величин для разных наблюдений и разных температур. Составляющая непрерывного спектра в наблюдаемой дифференциальной кривой является монотонной функцией длины волны и определяет общую тенденцию длинноволновой зависимости Δm_{λ} . Установив, с какой теоретической зависимостью она совпадает, можно определить ΔT сравниваемых наблюдаемых кривых.

Применение дифференциального метода иллюстрируется рис.4. На рис.4а нанесены разности $\Delta m_{\lambda} = m_{\lambda}(17) - m_{\lambda}(19)$ в зависимости от длины



Рис.4. Зависимости разности монохроматических величин от длины волны для абсолютно черных тел различной температуры и для o Cet в разные сезоны: a) $m_{\lambda}(17) - m_{\lambda}(19)$, нормировка в λ 820 нм, b) $m_{\lambda}(19) - m_{\lambda}(8x)$, нормировка в λ 740 нм.

волны и построена сеть теоретических разностей величин абсолютно черных тел, для которых температуры излучения различаются от -100 до -900 К. Исходная температура - 2900 К (наиболее вероятная температура для кривой 19, полученная абсолютным методом). Длина волны нормировки - 820 нм. На отрезках отложены средние ошибки Δm_{λ} .

Несмотря на огромное количество деталей в наблюдаемой кривой, можно отчетливо видеть рост Δm_{λ} с увеличением длины волны. Закономерность этого роста хорошо описывается теоретической кривой с $\Delta T = 700$ К в обоих диапазонах спектра, визуальном и инфракрасном. Следовательно, различие спектрофотометрических температур в 17-м и 19-м сезонах составляет 700 К. Такая же разность температур получается и абсолютным методом.

Совпадение температур в разных участках спектра свидетельствует о том, что излучение фотосферы в области длин волн 510-1080 нм определялось равновесным излучением слоев с температурой ~2900 К (сезон 19) и ~2200 К (сезон 17).

На рис.4b показаны разности монохроматических величин звезды, наблюдаемых в 19-м и 8-м (8к) сезонах, $\Delta m_{\lambda} = m_{\lambda}(19) - m_{\lambda}(8\kappa)$, в зависимости от длины волны. Здесь же дана сеть аналогичных зависимостей разностей величин абсолютно черных тел с температурами, различающимися на -100 + -800 К. Длина волны нормировки 740 нм. За исходную температуру принята температура 3000 К. Видно, что наблюдаемая дифференциальная кривая лучше всего соответствует теоретической кривой с $\Delta T \approx -100$ К. Если 2900 К является спектрофотометрической температурой, описывающей наблюдаемую кривую в 19-м сезоне, $T_{19} = 2900$ К, то $T_{8\kappa} = 3000$ К. Такое значение температуры в конце 8-го сезона совпадает с температурой, полученной абсолютным методом.

Таким образом, использование при сильном искажении континуума различных методов определения спектрофотометрической температуры и различных длин волн нормировки позволило нам взаимно контролировать результаты и довольно уверенно утверждать, что температуры слоев лежат в следующих диапазонах: $T_{g_{H}} = 2800 - 3000$ K, $T_{g_{K}} = 2800 - 3000$ K, $T_{ig} = 2800 - 3000$ K и $T_{ig} = 2100 - 2300$ K.

Если соотнести наблюдения с фазами цикла (см. рис.2), то можно сказать, что между 1-й и 2-й фазами температура слоев, излучающих в непрерывном спектре, практически оставалась постоянной и была равна 2800 + 3000 К. На нисходящей ветви кривой блеска между 3-й и 4-й фазами температура падала и в 4-й фазе уменьшилась на ~700 К.

Посмотрим теперь, как менялись радиусы слоев.

5. Радиусы слоев. Зная температуры слоев, излучающих в непрерывном спектре в любых двух фазах цикла (ф1 и ф2), а также изменение светового потока в отдельных длинах волн в этих фазах, $m_{\phi 2} - m_{\phi 1}$, можно определить изменение радиуса излучающего слоя звезды, $R_{\phi 2}/R_{\phi 1}$. Для этого воспользуемся известной формулой, связывающей абсолютную величину звезды M в длине волны λ с ее температурой T и радиусом R,

$$M = C_{\lambda} - 5\log R + 1.56/\lambda T + 2.5\log(1 - 10^{-0.624/\lambda T}), \tag{1}$$

где C_{λ} - член, зависящий только от λ . Для наших значений температур последний член в формуле (1) <<-0.01, и им можно пренебречь. Учитывая, что разность абсолютных величин звезды (ΔM) в разные моменты времени равна разности ее видимых величин (Δm), получим следующую формулу, определяющую отношение радиусов в моменты времени, соответствующие фазам ф1 и ф2:

$$\log(R_{\phi 2}/R_{\phi 1}) = 1.56 \left(\frac{1}{T_{\phi 2}} - \frac{1}{T_{\phi 1}}\right) / 5\lambda - \left(\frac{m_{\phi 2} - m_{\phi 1}}{1}\right) / 5.$$
⁽²⁾

В табл.2 приведены длины волн условного континуума, в которых наблюдаемые потоки лучше, чем в других длинах волн, совпали с теоретическими значениями во всех фазах цикла. Для каждой длины волны даны наблюденные квазимонохроматические величины в различных фазах: 1-й (m₁), 2-й (m₂), 3-й (m₃) и 4-й (m₄).

Таблица 2

КВАЗИМОНОХРОМАТИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ ЗВЕЗДЫ В РАЗНЫХ ФАЗАХ ЦИКЛА

λ (нм)	<i>m</i> ₁	<i>m</i> ₂	<i>m</i> ₃	m ₄
380.0	6.820	5.718	-	And a second second
390.0	6.787	5.627		100 C
490.0	5.281	4.205		
525.0	5.094	4.028	4.144	6.212
530.0	4.782	3.792	3.978	6.001
535.0	4.707	3.711	3.900	5.871
540.0	4.665	3.637	3.951	5.847
545.0	4.818	3.790	4.147	6.052
550.0	5.188	4.048	4.227	6.111
555.0	4.935	3.869	4.186	6.120
575.0	4.851	3.727	3.954	5.776
580.0	4.705	3.645	4.005	5.800
650.0	4.072	3.172	3.256	4.735
740.0	2.552	2.048	2.095	3.531
815.0			1.975	2.880
820.0	A COLUMN TWO IS NOT	1.00	1.952	2.867
902.5		The Part of Street of Stre	1.874	2.654
905.0	The second s	and the second	1.880	2.598
907.5			1.876	2.568
1020.0			1.936	2.389
1022.5		11 Malur	1.927	2.380
1025.0			1.928	2.374
1027.5	5 181		1.938	2.369

В предыдущем разделе были определены следующие диапазоны температур слоев: $T_1 = 2800 - 3000 \text{ K}$ (в 1-й фазе), $T_2 = 2800 - 3000 \text{ K}$ (во 2-й фазе), $T_3 = 2800 - 3000 \text{ K}$ (в 3-й фазе) и $T_4 = 2100 - 2300 \text{ K}$ (в 4-й фазе).

Используя данные табл.2 и наиболее вероятные значения температур 3000 К (T_1) , 3000 К (T_2) , 2900 К (T_3) и 2200 К (T_4) (см. раздел 4), можно вычислить отношения радиусов слоев в различных фазах по формуле

Таблица 3

λ (ΗΜ)	R_2/R_1	R_{1}/R_{1}	R_{\star}/R_{\star}	$R_{\rm I}/R_{\rm I}$
380.0	1.66			
390.0	1.71		-	- 1
490.0	1.64		a land	
525.0	1.63	1.11	1.73	3.14
530.0	1.58	1.07	1.74	2.95
535.0	1.58	1.07	1.76	2.98
540.0	1.61	1.01	1.79	2.91
545.0	1.61	0.99	1.77	2.80
550.0	1.69	1.07	1.76	3.18
555.0	1.63	1.00	1.70	2.78
575.0	1.68	1.04	1.70	2.97
580.0	1.63	0.98	1.70	2.71
650.0	1.51	1.09	1.70	2.81
740.0	1.26-	1.09	1.50-	2.07-
815.0			1.73	110 2 13
820.0			1.72	I DATE IN
902.5			1.67	and the second
905.0			1.72	S. C. C.
907.5		-	1.73	
1020.0		1	1.76	States and
1022.5	Southern II.	1.1.1.2	1.75	100 million (100 million)
1025.0	and the second		1.70	S. C. P. C. 117
1027.5			1./0	
$(R_{\star}/R_{1}) = 2.96 \pm .12$	1.63±.05	1.05±.04	1.73±.03	2.92±.15
T = 3000 K, T = 3000 K			·	
$T_3 = 2900 \text{K}, T_4 = 2200 \text{K}$			2.2	
$(R_1/R_1) = 2.32 \pm .13$	1.63±.05	0.90±.03	1.60±.04	2.27±.09
T = 3000 K, T = 3000 K	Town Parks	• •	1	a di band date
T_{4} =3000K, T_{4} =2300K				
$(R_{\star}/R_{\star}) = 2.80 \pm .15$	1.63±.05	0.90±.03	1.93±.06	2.84±.14
T=2800K, T=2800K	1973 E-778 P	Contraction of the second second	1000	01 C 11 1.
T = 2800 K, T = 2100 K	CALIFORN P.	I HOW MADE	- Inclusion of	Manual Street.
$(R/R) = 2.69 \pm .17$	1.15±.05	1.21±.06	1.93±.06	2.84±.14
T = 2800 K, T = 3000 K				
T.=2800K, T.=2100K		3		and the second s
(R/R) = 213 + 16	1 15+ 05	1 21+ 06	1 53+ 05	2.15+.08
T = 2800 K, T = 3000 K	1.151.05	1.211.00	1.552.05	2.101.00
T = 2800 K, $T = 2200$ K	and a state of the	Callor Store	1022 V 1852	50 472 10 h 3
addening at anothe				

ОТНОШЕНИЯ РАДИУСОВ СЛОЕВ

(2). В табл.3 приведены результаты вычислений в каждой длине волны и усредненные по длинам волн значения и их погрешности без учета отскакивающих значений (помечены в таблице знаком "-"). Усредненные значения приведены как для указанных температур, так и для других возможных температур, полученных нами. Температуры даны в левом столбце. Здесь же приведены отношения радиусов в крайних фазах, (R_4/R_1) ', вычисленные как произведение отношений в последовательных промежуточных фазах: $(R_4/R_1)' = (R_2/R_1) \cdot (R_3/R_2) \cdot (R_4/R_3)$. Равенство отношений, вычисленных через промежуточные фазы и полученных путем прямого сравнения данных, $R_4/R_1 \approx (R_4/R_1)'$, подтверждает достоверность результатов.

По результатам, приведенным в табл.3, можно судить о роли бланкетирования континуума в отдельных длинах волн, в частности, в длинах волн нормировки: λ 380 нм, λ 740 нм и λ 820 нм. Видно, что его влияние в λ 740 нм сказывается на результатах вычислений довольно заметно: отношение размеров слоев может отличаться от среднего значения на 25%. Влияние же бланкетирования в λ 380 нм и λ 820 нм не превышает 5% и сравнимо с величиной случайной ошибки.

Из таблицы видно, что наблюдаемые потоки излучения в последовательных фазах цикла приходили к нам из слоев, все более и более удаленных от центра звезды. Исключение составляет отношение R_3/R_2 при равных температурах слоев. По-видимому, предположение о равных температурах во 2-й и 3-й фазах неверно.

6. Скорости слоев. Увеличение размера излучающего слоя может обеспечиваться двумя путями.

С одной стороны, ударная волна (действием ее объясняются многие особенности в спектрах Миры [10,11]) приводит газ в движение.

С другой стороны, проходя через атмосферу, волна нагревает газ, ионизуя его. После прохождения волны газ высвечивается. Вслед за волной высвечиваются все более высокие слои. Однако энергии волны недостаточно, чтобы за счет нее объяснить всю излучаемую звездой энергию [10]. Кроме того, настоящее исследование показало, что распределение энергии в спектре практически соответствует равновесному излучению.

Поэтому более вероятно, что полученное нами увеличение размеров слоев во всех последовательных фазах цикла связано, в основном, с их движением наружу. Это согласуется с фактом, установленным по линиям и известным еще из работ Г.А.Шайна (см., например, [12]), что в атмосфере долгопериодических переменных звезд имеются только восходящие движения материи. Впоследствии эти движения были объяснены действием ударной волны, которая возникает в глубоких слоях атмосферы и приводит в движение неподвижный газ [10].

Если принять, что причиной движения исследуемых нами слоев также является ударная волна, то она, очевидно, пришла из более глубоких подфотосферных слоев. Приведенные в движение слои фотосферы достигли в 4-й фазе цикла расстояния, почти в три раза превышающего радиус звезды. Зная время между фазами шикла, t, и изменение за это время радиуса излучающего слоя, ΔR , можно определить скорость движения слоя: $v = \Delta R/t$.

За радиус слоя в 1-й фазе, R_1 , мы приняли значение, которое равно наименьшему значению радиуса Миры - $1.3 \cdot 10^{13}$ см [13]. С этим значением R_1 мы получили следующие средние скорости расширения между последовательными фазами (в скобках приведены минимальная и максимальная скорости): $v_{1-2} = 15(6 \pm 25)$ км/с, $v_{2-3} = 45(23 \pm 67)$ км/с, $v_{3-4} = 37(27 \pm 47)$ км/с.

Средняя скорость между 1-й и 4-й фазами равна (32±16) км/с. Однако видно, что распределение скоростей не случайное: между 1-й и 2-й фазами скорость меньше, чем между 2-й и 4-й (средняя скорость 41км/с). Повидимому, скорость на нисходящей ветви кривой блеска больше.

Подобное распределение скоростей согласуется с распределением скоростей слоев, излучающих в линиях. Хотя последние по величине больше, но они также увеличиваются с фазой цикла и равны 30-35 км/с на восходящей ветви кривой блеска и 50-55 км/с в максимуме [10].

7. Потеря массы. Как известно, восходящие движения в атмосфере Миры приводят к выбрасыванию вещества и образованию движущейся протяженной оболочки. В этой оболочке на разных уровнях образуются как эмиссионный спектр, так и спектр поглощения. В ней же в 4-й фазе цикла образовался, по-видимому, и непрерывный спектр. Размер и скорость слоя, излучающего непрерывный спектр, несколько меньше размера и скорости слоя, излучающего линейчатый спектр.

Исследования показали, что в ближней инфракрасной области в переменности доминирует слой воды [14]. "Горячий" ($T \approx 2000$ K) слой H_2O высокой плотности находится вблизи поверхности звезды около минимума и движется вместе со звездной пульсацией. Толщина слоя равна 1-2 звездных радиуса. Расстояние; пройденное между 1-й и 4-й фазами цикла исследуемым нами слоем, также составило (1.15+1.92) R_1 (см. табл.3). По-видимому, именно "горячий" слой воды был выброшен звездой за время $t=7.214 \cdot 10^6$ с.

Посчитаем, какую массу вещества потеряла при этом звезда. Скорость потери массы за год (3.16 · 10⁷ с) определяется формулой:

$$M = 4\pi \cdot R_1^2 \ \rho \cdot \nu \cdot 3.16 \ 10^7 , \qquad (3)$$

где р - плотность вещества, v - скорость расширения слоев. Если в

формулу (3) подставить выражение для $\rho = n \cdot \mu$ (*n* - количество молекул в см³, μ - масса одной молекулы) и для $\nu = (R_4 - R_1)/t$, то она преобразуется в следующую:

$$M = 4\pi R_1^2 \mu N \cdot 3.16 \cdot 10^7 / t, \qquad (4)$$

где N - количество молекул по лучу зрения в столбце с площадью основания 1 см^2 (предполагаем, что подавляющее большинство молекул сосредоточено в слое толщиной R_i - R_i).

Принимая $N(H_2O) = 3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ [14] и $\mu(H_2O) = 3 \cdot 10^{-23} \text{ г}$, получим $M = (3.7 \pm 0.2) \cdot 10^{-7} M_{\odot}$ /год. Это значение является, по-видимому, нижним пределом скорости потери массы, поскольку приведенное значение N, согласно [14], есть нижний предел плотности. Потери массы, полученные по данным ИК-фотометрии, составляют $2.5 \cdot 10^{-7} M_{\odot}$ /год для Миры [15] и ~ $10^{-7} M_{\odot}$ /год для некоторых подобных ей звезд [16].

Значение скорости потери массы можно вычислить по известному статистическому закону Реймерса [17]:

$$M = -4 \cdot 10^{-13} \ L \ R/M , \qquad (5)$$

где L, R и M - светимость, радиус и масса звезды в солнечных единицах. Подставив в эту формулу значения $R = 186 + 286 R_{\odot}$ [13], $M = 0.8 \pm 1.5 M_{\odot}$ [13] и $L = 2500 L_{\odot}$ [18], получим скорость, равную $(1.2 + 3.6) \cdot 10^{-7} M_{\odot}/$ год. С верхним пределом этой скорости практически совпала найденная нами скорость, хотя мы предполагаем, что она несколько занижена.

8. Заключение. Исследования непрерывного спектра Миры показали, что слой, излучающий в непрерывном спектре, расширился между фазами цикла, приходящимися на восходящую и нисходящую ветви кривой блеска. Расширение происходило со средней скоростью 32км/с. В результате в 4-й фазе радиус слоя почти в 3 раза превысил радиус звезды. За это же время температура слоя уменьшилась с 3000 К до 2200 К. С учетом полученной скорости расширения, скорость потери массы составила $3.7 \cdot 10^{-7} M_{\odot}$ /год.

Главная (Пулковская) астрономическая абсерватория РАН, Россия, e-mail: root@VG3823.spb.edu

SPECTROPHOTOMETRIC VARIABILITY OF MIRA

A.A.ARKHAROV, E.I.HAGEN-TORN, T.U.PUZAKOVA, E.V.RUBAN

The physical parameters of o Cet for different phases of its light curve have been found on the basis of the data of Pulkovo spectrophotometric base of the absolute quasi-monochromatic fluxes in wavelength range of 320-1080 nm. The layers, which radiate in continuum is shown to be expanded between the phases of cycle, which fall on the ascending and descending branches of light curve. The mean velocity of expansion was 32 km/s. When the brightness of the star decreased by about three magnitudes its radius increased by three times. At the same time the temperature of the layers decreased from 3000 K to 2200 K. Taking into account the expansion velocity the mass loss was found to be $3.7 \cdot 10^{-7} M_{\odot}$ /year.

Key words: stars:variables:spectra - individual: o Cet

ЛИТЕРАТУРА

- 1. G.Alexeeva, A.Arkharov, V.Galkin et al., Baltic Astron., 5, 603, 1996.
- 2. G.Alexeeva, A.Arkharov, V.Galkin et al., Baltic Astron., 6, 481, 1997.
- 3. А.А.Архаров, Т.Ю.Пузакова, Е.В.Рубан, Изв. ГАО, 212, 247, 1998.
- 4. G.W.Lockwood, R.F.Wing, Astrophys. J., 169, 63, 1971.
- 5. Е.И.Гаген-Торн, Изв. ГАО, 211, 26, 1996.
- 6. А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, Е.В.Рубан, Изв. ГАО, 215, 21, 2000.
- 7. Б.В.Кукаркин, П.П.Паренаго, Физические переменные звезды, ОНТИ НКТП СССР, 1937.
- 8. А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, Т.Ю.Пузакова, Е.В.Рубан, Изв. ГАО, 216, 496, 2002.
- 9. A.P.Jacob, M.Scholz, Mon. Notic., Roy. Astron. Soc., 336, 1377, 2002.
- В.Г.Горбацкий, И.Н.Минин, Нестационарные звезды, Физ.-мат. лит., М., 1963.
- 11. В.Г.Горбацкий, Изв. КрАО, 90, 64, 1995.
- 12. Г.А.Шайн, Изв. АН СССР, сер. физ., 9, 161, 1945.
- 13. S.J.Hill, L.A. Willson, Astrophys. J., 229, 1029, 1979.
- 14. M.Matsuura, I.Yamamura, J.Cami, T.Onaka, H.Murakami, Astron. Astrophys., 383, 972, 2002.
- 15. N.Ryde, F.L.Schoier, Astrophys. J., 547, 384, 2001.
- 16. M.Jura, S.G.Kleinmann, Astrophys. J. Suppl. Ser., 79, 105, 1992.
- 17. D. Reimers, Problems in Stellar Atmospheres and Envelopes, Berlin, 1975.
- А.А.Архаров, Е.И.Гаген-Торн, В.Д.Галкин и др., Каталог спектральных, фотометрических, пространственных и физических характеристик 693 ярких звезд, деп. в ВИНИТИ, №2327-В97, 1997.