

РЕШЕНИЕ КРИВОЙ БЛЕСКА ЗАТМЕННО-ДВОЙНОЙ ТИПА ВОЛЬФА—РАЙЕ CQ CEP

Т. А. Карташева *

Описан метод разделения кривой блеска CQ Cep на «звездную» и «оболочечную». «Звездные» кривые блеска решены методом Мерилла в «U-гипотезе», получены абсолютные элементы системы CQ Cep. Приведены предварительные оценки размеров оболочки звезды WR, полученные из анализа «оболочечных» кривых блеска.

A method is described of deviding the light-curve of CQ Cep into «stellar» and «shell» ones. The «stellar» light-curves are solved by Merrill's method in the «U-hypothesis». Absolute elements of the CQ Cep system are obtained. Estimates of the shell size of the WR — component are obtained from the analysis of the «shell» light — curves.

Система CQ Cep исследована довольно хорошо, но ее кривая блеска до сих пор не была решена. Решение, полученное в 1944 г. Гапошкиным [1], представляет лишь исторический интерес, поскольку совсем не учитывает сложной структуры WR-компонента и наличие общей оболочки, искажающей форму кривой блеска (в обоих минимумах наблюдается резкая асимметрия ветвей, оба максимума сильно сдвинуты относительно своих нормальных положений, что, в частности, исключает возможность определения из их формы коэффициентов ректификации).

При решении кривой блеска CQ Cep мы исходили из упрощенной модели звезды Вольфа—Райе, предложенной Кроном и Гордон для V 444 Cyg [2]. Предполагалось, что помимо светящегося и затмевающего ядра звезда Вольфа—Райе имеет мощную оболочку, которая проявляет себя и как светящийся, и как затмевающий полупрозрачный объект. В основу решения было положено разбиение кривой блеска на две самостоятельные кривые — «звездную», обуславливаемую затмениями в системе «WR-ядро + В-звезда», и «оболочечную», обуславливаемую затмениями в системе «WR-оболочка + В-звезда». При этом кривую блеска можно описать следующей простой формулой:

$$l(\theta_i) = L_1(\theta_i) + L_2(\theta_i) + L_3(\theta_i) - \delta'_i - \delta''_i, \quad (1)$$

где $l(\theta_i)$ — наблюдаемый блеск системы в некоторой фазе θ_i ; L_1 — блеск ядра WR-звезды; L_2 — блеск В-звезды; L_3 — блеск оболочки WR-звезды, причем $L_1 + L_2 + L_3 = 1$; δ'_i — потеря блеска в результате затмения в системе «WR-ядро + В-звезда»; δ''_i — потеря блеска в результате затмения в системе «WR-оболочка + В-звезда». Очевидно, что

$$\begin{aligned} \delta'_i &= (L_1(\theta_i) + L_2(\theta_i)) - l'(\theta_i), \\ \delta''_i &= (L_2(\theta_i) + L_3(\theta_i)) - l''(\theta_i), \end{aligned}$$

* В настоящее время — в Коуровской обсерватории Уральского университета имени А. М. Горького.

где $l'(\theta_i)$ — блеск системы «WR-ядро + В-звезда», $l''(\theta_i)$ — блеск системы «WR-оболочка + В-звезда». В выражение для δ'_i входит не блеск В-звезды, а его функция (f). Это вызвано тем, что в фазах вторичного минимума «оболочечной» кривой (WR-оболочка затмевает В-звезду) участвует не весь блеск В-звезды, а только та его часть, которая не подвержена затмению ядром WR-звезды. После подстановки выражений для δ'_i и δ''_i в (1) получаем

$$l(\theta_i) = l'(\theta_i) + l''(\theta_i) - f(L_2(\theta_i)). \quad (2)$$

Эта формула и лежит в основе разбиения наблюдаемой кривой блеска. Эффектом отражения мы пренебрегали и ректификацию производили только за эффект эллипсоидальности, который у столь тесной системы должен быть значительным. Как это следует из (1), $l_{\text{rect}}(\theta_i) = 1 - \delta'_{i \text{ rect}} - \delta''_{i \text{ rect}}$. При рассмотрении ректифицированной кривой блеска

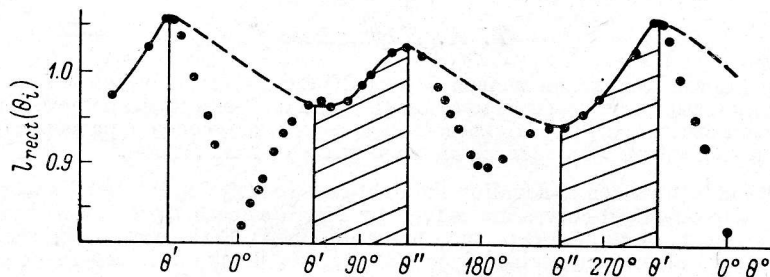


Рис. 1. Ректифицированная кривая блеска CQ Сер в синих лучах (наблюдения автора 1969 г.).

(рис. 1) выявляются точки перегиба θ' и θ'' , которые, как установили еще Крон и Гордон [2], соответствуют моментам начала и конца затмений в «звездной» кривой. Рассмотрим внезатменные участки «звездной» кривой (т. е. области $\theta' - \theta''$ и $\theta'' - \theta'$). На этих участках $\delta'_{i \text{ rect}} = 0$ и $l_{\text{rect}}(\theta_i) = 1 - \delta_{i \text{ rect}} = A_i$. Очевидно, что ход величины A_i можно продолжить и на фазы затмения «звездной» кривой, если предположить его плавность, а также воспользоваться тем, что падение блеска в системе «звезда + звезда» должно быть симметричным относительно центральной фазы затмения. Образуя затем для фаз затмения «звездной» кривой разности вида

$$A(\theta_i) - l_{\text{rect}}(\theta_i) = 1 - \delta'_{i \text{ rect}} - 1 + \delta'_{i \text{ rect}} + \delta''_{i \text{ rect}} = \delta''_{i \text{ rect}},$$

получаем потери ректифицированного блеска в системе «WR-ядро + В-звезда». Это позволяет провести решение «звездной» кривой блеска, не зная ни суммарного блеска $(L_1 + L_2)_{\text{max}}$, ни самого блеска системы $l'(\theta_i)$. Определив из решения блески L_1 , L_2 , $L_3 = 1 - (L_1 + L_2)$, получим возможность найти $l_{\text{rect}}(\theta_i)$ и $l'(\theta_i)$. Далее из формулы (2) легко находится и блеск «оболочечной» кривой $l''(\theta_i)$.

Поскольку эллипсоидальность звезд и оболочки могут существенно различаться, решение пришлось вести последовательными приближениями. В первом приближении мы полагали, что $Z_{\text{зв}} = Z_{\text{об}}$ и делали перебор ряда значений Z , которые могут соответствовать столь тесной системе ($Z = 0.14, 0.16, 0.17, 0.20$). С этими значениями коэффициента эллипсоидальности мы проводили ректификацию, решение «звездных» и последующее разделение наблюдаемых кривых блеска. Решение «звездных» кривых позволило уточнить значение $Z_{\text{зв}}$ (так как система по типу, вероятно, близка к контактному системам, а для них $b/a \cong 0.9$, $(b/a)^2 =$

$= 1 - Z/\sin^2 i$). Выделение же «оболочечных» кривых позволило графическим способом уточнить эллипсоидальность оболочки. С помощью блесков L_1 , L_2 и L_3 , полученных из решения «звездных» кривых, мы определили затем значение $Z_{эфф}$. С этим $Z_{эфф}$ и с уточненными значениями $Z_{зв}$ и $Z_{об}$ производилось второе приближение, которое дало хорошее согласие с принятым значением коэффициента эллипсоидальности оболочки. Кроме того, второе приближение дает возможность произвести уточнение точек перегиба, что мы, однако, не делали, поскольку с точностью ~ 0.5 теоретические значения θ' и θ'' совпали с принятыми.

Само решение «звездных» кривых производилось методом Мерилла в «U-гипотезе». Главный и вторичный минимумы решались самостоятельно, так как размеры светящегося и непрозрачного ядра WR-звезды могут различаться. Первоначально мы полагали, что в обоих минимумах происходит частное затмение. Из формы минимумов определялось несколько пар возможных значений $k_1 \alpha_{01}$ и $k_2 \alpha_{02}$, которые использовались для нахождения ряда решений. При сопоставлении решений, даваемых главным и вторичным минимумами, оказалось, что наилучшее согласие между значениями наклонности орбиты достигается при $\alpha_{01} = 1.0$ и $\alpha_{02} = 1.0$, т. е. при целых затмениях в обоих минимумах. Для главного минимума (WR-звезда затмевается В-звездой) это, вероятно, касательное полное затмение, так как в отличие от вторичного главный минимум не имеет фазы постоянного блеска. Сопоставление решений для главного и вторичного минимумов показало, что В-звезда (размеры которой как затмеваемого и как светящегося объекта должны быть одинаковыми) является большим по размерам объектом в обоих минимумах. Отсюда следует, что во вторичном минимуме происходит кольцеобразное затмение. Наконец, при довольно хорошем совпадении значений наклонности орбиты и размеров большой полуоси В-звезды, получаемых из главного и вторичного минимумов, оказалось, что и размеры светящегося ядра звезды WR лишь незначительно превосходят размеры ее непрозрачного ядра.

Изложенная методика решения была применена к трем фотоэлектрическим кривым блеска CQ Сер, полученным нами в феврале—марте 1969 г. на 45-сантиметровом рефлекторе Коуровской обсерватории в системе, близкой к U, B, V [3], а также к двум фотоэлектрическим кривым Хилтнера [4] и к фотографической кривой Гапошкина [1]. Все элементы, полученные из решения «звездных» кривых блеска, представлены в таблице. Здесь же приведены и абсолютные элементы системы, полученные с помощью спектроскопических данных Хилтнера [5]:

$$f = \frac{\mathfrak{M}_B \cdot \sin^3 i}{\left(1 + \frac{\mathfrak{M}_{WB}}{\mathfrak{M}_B}\right)^2} = 4.38 \mathfrak{M}_\odot, \quad A_{WR} \cdot \sin i = 5.97 R_\odot$$

Отношение масс компонент ($q = \mathfrak{M}_{WB}/\mathfrak{M}_B$) определялось из предположения о заполнении В-компонентой своей полости Роша. Оказалось, что при этом предположении WR-компонент также заполняет свою полость Роша. Модель системы приведена на рис. 2.

Выделенные из наблюдений разных лет «звездные» кривые оказались подобными по форме и дали очень близкие решения. Необходимо отметить, что относительный блеск В-звезды и в меньшей мере блеск WR-ядра обнаружили тенденцию к уменьшению со временем, что, вероятно, вызвано возрастанием блеска оболочки. Размеры, масса, температура и светимость, полученные для WR-ядра, оказались в хорошем согласии с общепринятыми для звезд типа Вольфа—Райе оценками этих величин. Из полученного решения следует, что у В-компонента спектральный класс В1 (при этом предполагалось, что излучение обоих компонент чернотель-

Результаты решения «звездных» кривых блеска SQ CEP (второе приближение)

Параметры	Наши наблюдения 1969 г.				Наблюдения Хиллнера 1947 г.		Наблюдения Гапопкина 1901—1942 гг.
	U		B		V		
	a	b	a	b	a	b	
Размеры полуосей: WR-звезды: святищееся ядро непрозрачные ядра ВКП (WR) B-звезды	0.370 0.373 0.479	0.333 0.336 (0.324) 0.431	0.379 0.362 0.482	0.339 0.326 (0.320) 0.432	0.388 0.363 0.470	0.349 0.326 (0.326) 0.425	a b 0.296 0.314 (0.330) 0.421
Наклонность орбиты: Блески: WR-ядро WR-оболочки B-звезды	85°5	85°0	0.208 0.631 0.161	0.339 0.326 (0.320) 0.432	83°0	83°4	0.329 0.349 0.468 84°0
Отношение поверхностных яркостей I_{WR}/I_B	2.17	1.98	0.184 0.666 0.150	0.188 0.659 0.153	0.179 0.651 0.170	0.241 0.601 0.188	0.200 0.593 0.207
Отношение масс	0.55	0.54	1.98	1.80	2.10	2.29	1.96
Массы: WR-звезды B-звезды			0.54	0.58	0.58	0.55	0.61
Радиус орбиты:			6.0 M_{\odot} 10.8 M_{\odot} 15.0 R_{\odot}		6.2 M_{\odot} 10.9 M_{\odot} 15.0 R_{\odot}		7.0 M_{\odot} 11.4 M_{\odot} 15.5 R_{\odot}
Размеры больших полуосей в R_{\odot} : WR-звезда: святищееся ядро непрозрачное ядро B-звезда	5.6 R_{\odot} 5.6 R_{\odot} 7.2 R_{\odot}	5.7 R_{\odot} 5.4 R_{\odot} 7.2 R_{\odot}	5.8 R_{\odot} 5.4 R_{\odot} 7.1 R_{\odot}	5.8 R_{\odot} 5.4 R_{\odot} 7.1 R_{\odot}	4.9 R_{\odot} 4.7 R_{\odot} 6.9 R_{\odot}	4.9 R_{\odot} 5.0 R_{\odot} 7.0 R_{\odot}	4.8 R_{\odot} 5.4 R_{\odot} 6.8 R_{\odot}
Светимости: WR-звезды B-звезды	-6 ^m 7	-6 ^m 6 -5 ^m 1	-6 ^m 5	-6 ^m 5	-6 ^m 7 -4 ^m 9	-6 ^m 7	-6 ^m 4 -5 ^m 3

ное, а для В-компоненты применялись соотношения масса—светимость и масса—радиус).

Из сопоставления «оболочечных» кривых оказалось, что кривая, выделенная из наблюдений Гапошкина, имеет примерно в два раза меньшую амплитуду изменения блеска по сравнению с кривой наших наблюдений и наблюдений Хилтнера. Этот факт нашел естественное объяснение после того, как графическим путем была определена эллипсоидальность оболочки: для кривой Гапошкина коэффициент эллипсоидальности оказался равным 0.05, для наших кривых и кривых Хилтнера — 0.23. Все «оболочечные» кривые оказались сдвинутыми по фазе относительно «звездных» кривых, причем этот сдвиг, имеющий примерно одинаковую величину на большом участке «оболочечной» кривой, составил в среднем для кривой Гапошкина — 6° , для кривых Хилтнера — 13° , для наших кривых — 12° . Если предполагать, что центр оболочки совпадает с центром звезды WR, то напрашивается вывод об асимметрии оболочки, растущей со временем.

Окончательное решение «оболочечных» кривых блеска пока не получено, так как здесь возникает сложная задача решения модели двух неподобных и неподобно расположенных эллипсоидов. Были сделаны лишь грубые ректификации и грубые решения без учета неподобного расположения эллипсоидов. Поскольку после ректификации «оболочечных» кривых затмение светящейся оболочки В-звездой исчезло, был сделан вывод о том, что размеры этой оболочки явно превосходят $1.5A = 22R_\odot$ (A — радиус орбиты); иначе говоря, В-звезда полностью погружена в светящуюся оболочку. Грубое решение вторичного минимума «оболочечных» кривых дало следующие размеры затмевающей, полупрозрачной оболочки звезды WR (см. рис. 2): $12R_\odot$ (кривая Гапошкина), $13.5R_\odot$ (кривая Хилтнера), $16.5R_\odot$ (наши кривые). В результате ректификации «оболочечных» кривых блеска выявляются горячее пятно и предшествующее ему поглощение (фазы $\approx 230^\circ - 340^\circ$), возможно, связанные с потоком вещества от звезды В.

Автор искренне благодарен М. А. Свечникову за руководство работой.

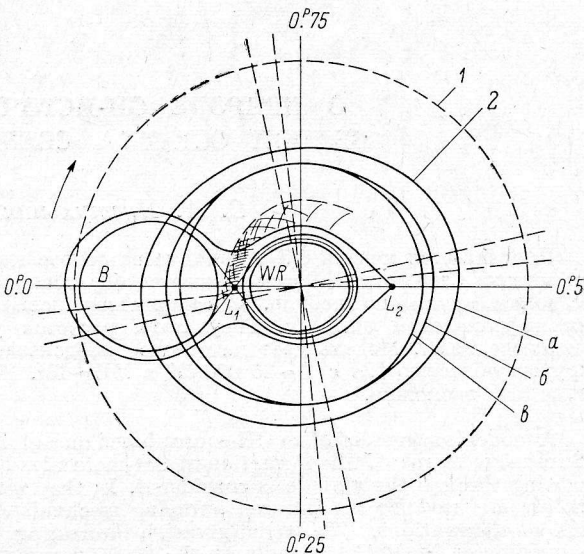


Рис. 2. Модель системы SQ Сер.

1 — светящаяся оболочка WR-звезды; 2 — затмевающая оболочка WR-звезды; а — наши наблюдения 1969 г., б — наблюдения Хилтнера 1947 г., в — наблюдения Гапошкина 1920 г.

Литература

1. S. G a p o s h k i n, *Astrophys. J.*, 100, 242, 1944.
2. G. E. K r o n and K. C. G o r d o n, *Astrophys. J.*, 111, 454, 1950.
3. Т. А. К а р т а ш е в а, П. З., (в печати).
4. W. A. H i l t n e r, *Astrophys. J.*, 112, 477, 1950.
5. W. A. H i l t n e r, *Astrophys. J.*, 99, 273, 1944.