

УДК 523.842

**БАЛОГ Н. И., ГОНЧАРСКИЙ А. В., ХРУЗИНА Т. С.,  
ЧЕРЕПАЩУК А. М.**

## ПАРАМЕТРЫ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ HD 153919 = 4U 1700–37

Построена непротиворечивая модель рентгеновской двойной системы HD 153919 = 4U 1700–37, на основе которой интерпретируется оптическая кривая блеска, исправленная за эффекты затмений. В рамках этой модели определены допустимые значения параметров системы. Показано, что степень заполнения полости Роша оптической звездой  $\mu < 1$ . Учет затмения оптической звезды аккреционным диском позволил описать наблюдаемую амплитуду оптической кривой блеска системы HD 153919 и разность глубин минимумов.

THE PARAMETERS OF THE X-RAY BINARY SYSTEM HD 153919 = 4U 1700–37, by Balog N. I., Goncharsky A. V., Khruzina T. S., Cherepashchuk A. M. — The self-consistent model of the X-ray binary HD 153919 = 4U 1700–37 for the interpretation of the optical light curve corrected for the eclipse effects is developed. In the framework of this model, the reliable values of the parameters for this system are determined. It is shown that the parameter of Roche Lobe filling for the optical star O6f is  $\mu < 1$ . The eclipses of the optical star by the accretion disk are taken into account too, allowing to describe the observed amplitude and the difference between the minima of the observed optical light curve of HD 153919.

### Введение

Рентгеновская двойная система HD 153919 = 4U 1700–37 ( $P_{\text{орб}} = 3^{\text{д}},4118$ ) состоит из оптической звезды O6f и компактного объекта рентгеновского источника ( $L_x \sim 3 \cdot 10^{36}$  эрг/с) с возможным периодом рентгеновских пульсаций 97 мин [1]. Большая длительность рентгеновского затмения у этой системы ( $\Delta T/P_{\text{орб}} = 0,14\text{--}0,18$ ) в рамках стандартной модели Роша для оптической звезды не согласуется с амплитудой оптической переменности ( $\sim 0^{\text{м}},05$ ), если ее трактовать как эффект эллипсоидальности оптической звезды. Поэтому удовлетворительного определения параметров системы HD 153919 из фотометрических данных до последнего времени не существовало.

Первый анализ параметров системы по оптическим кривым блеска был выполнен Хатчингсом [2]. Оказалось, что для согласования наблюдаемой длительности рентгеновского затмения (угол начала затмения  $\theta_e = 58^\circ$ ) с величиной менее глубокого оптического минимума на фазе орбитального периода  $\phi = 0,0$  ( $\sim 0^{\text{м}},04$ , рентгеновский источник затмевается оптической звездой) требуется предположить переполнение критической полости Роша оптической звездой, т. е. степень заполнения полости Роша  $\mu > 1$ .

Расчеты Авни и Бакала [3] параметров системы HD 153919 подтвердили выводы Хатчингса. Ни учет гравитационного потемнения, ни учет возможной асинхронности вращения оптической компоненты не позволили авторам согласовать длительность рентгеновского затмения с наблюдаемой амплитудой оптической переменности.

Независимую попытку определить параметры системы HD 153919 предприняли Парадайс и др. [4]. Для длительности рентгеновского затмения было взято значение  $\Delta\phi_x = \Delta T/P_{\text{орб}} = 0,138 \pm 0,032$ , полученное как удвоенное время между моментом середины затмения на фазе  $\phi = 0,0$ , определенным из фотометрических и спек-

тральных данных, и наблюдаемым моментом выхода компактного источника из рентгеновского затмения. Однако даже в этом случае ( $\theta_e = 25^\circ$ ) авторам не удалось устранить противоречия между теоретическими и наблюдаемыми кривыми блеска, что, по их мнению, свидетельствует о неправомерности описания формы оптической звезды в этой системе фигурой Роша; обсуждалась также гипотеза о колебаниях поверхности оптической звезды.

Недавно было показано [5], что система HD 153919 является затменной переменной в оптическом диапазоне с глубиной затмения  $\sim 0^m,04$  и амплитудой эффекта эллипсоидальности оптической звезды  $\Delta\phi \sim 0^m,03$ . Для интерпретации этих эффектов привлекалась модель, в которой оптические затмения вызываются аккреционной структурой и газовой струей, отслеживающими вынужденную прецессию оси вращения оптической звезды ( $P_{\text{прец}} = 32^d,46$ ), ориентированной неперпендикулярно к плоскости орбиты вследствие произошедшего в двойной системе взрыва сверхновой [6]. Было показано также [7], что длительность рентгеновского затмения в диапазоне 2–10 кэВ в системе HD 153919 меняется с прецессионным периодом  $32^d,46$ , причем минимальная длительность составляет  $\sim 0^m,14$ . Эта величина хорошо согласуется со значением  $\Delta\phi_x = 0,14 \pm 0,03$ , найденным Доланом и др. [8] по наблюдениям в жестком рентгеновском диапазоне 20–80 кэВ. Естественно предполагать, что изменение длительности рентгеновского затмения  $\Delta\phi_x$  от 0,18 до 0,14 вызвано переменным поглощением в газовых потоках и звездном ветре и что минимальное значение  $\Delta\phi_x = 0,14$  отражает затмение рентгеновского источника телом «собственно звезды» Обf.

В данной статье излагаются результаты интерпретации оптических кривых блеска системы HD 153919 с учетом эффектов затмений. Показано, что оптическая кривая блеска этой системы, исправленная за влияние эффектов затмений, хорошо согласуется с длительностью рентгеновского затмения  $\Delta\phi_x = 0,14$ . Решена обратная задача нахождения параметров системы HD 153919 и показано, что оптическая звезда Об1 не полностью заполняет свою полость Роша, что имеет значение для современной теории эволюции рентгеновских двойных систем [9, 10].

### Интерпретация «чисто» эллипсоидальной кривой блеска

«Чисто» эллипсоидальная  $V$ -кривая блеска системы HD 153919, построенная в работе Черепашука и Хрузиной [5], интерпретируется в рамках «стандартной» модели [3, 11]. В этой модели система состоит из оптической звезды, форма которой описывается фигурой Роша, и точечного рентгеновского источника на круговой орбите. В рамках такой модели теоретическая кривая блеска системы определяется заданием трех параметров — отношения масс  $q = M_x/M_v$ , наклона орбиты  $i$  и степени заполнения полости Роша  $\mu$ . Анализ кривых лучевых скоростей системы, построенных по линиям с высокими потенциалами ионизации (He II), приводит к выводу о том, что орбита системы HD 153919 близка к круговой [12].

При вычислении потока излучения от элементарной площадки на поверхности оптической звезды учитывался эффект гравитационного потемнения по закону  $T \sim T_0(g(\mathbf{r})/|g(\mathbf{r})|)^\beta$ , где  $\beta = 0,25$  для звезды Обf, оболочка которой находится в лучистом равновесии,  $T_0 = T_{\text{эф}} = 36\,000$  К и  $|g(\mathbf{r})|$  — средние по поверхности звезды значения эффективной температуры и ускорения силы тяжести. Учитывался также эффект прогрева поверхности оптической звезды рентгеновским излучением компактного объекта. Этот эффект для системы HD 153919 весьма мал, поскольку отношение болометрических светимостей  $L_x/L_v \approx 5 \cdot 10^{-4}$  [1]. Угловая зависимость выходящего излучения с каждой площадки описывалась в приближении линейного закона потемнения к краю. Значение коэффициента потемнения к краю  $u$  для звезды Обf принималось равным 0,3 [13], изменением  $u(T)$  в разных точках приливно деформированной поверхности Обf пренебрегалось. Контрольные вычисления при значении  $u = 0,6$  показали, что соответствующие теоретические кривые различаются не более чем на  $0^m,003$ .

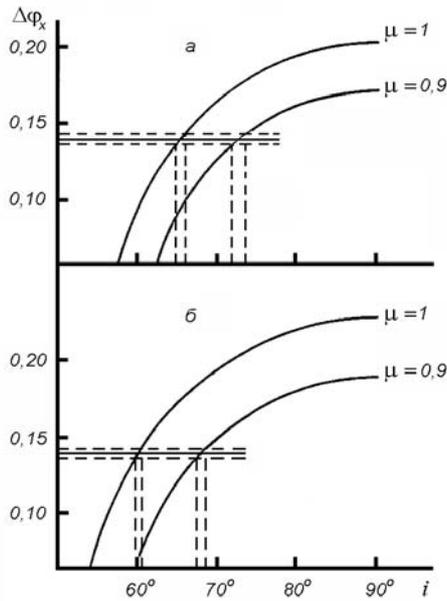


Рис. 1. Зависимость длительности рентгеновского затмения  $\Delta\varphi_x$  от параметров  $i$  и  $\mu$ , для  $q = 0,10$  (а) и  $q = 0,05$  (б). Изменение  $\Delta\varphi_x$  на 0,006 приводит к изменению величины  $i$  на  $1 - 1^{\circ},5$

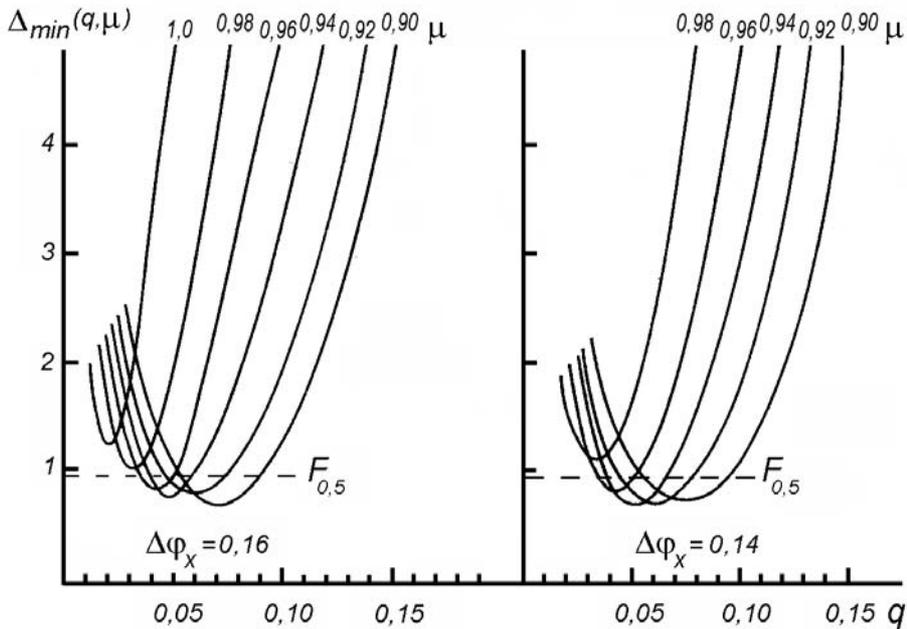


Рис.2

Искомými параметрами задачи являются параметры  $i$ ,  $q$ ,  $\mu$ . Использование информации о длительности рентгеновского затмения  $\Delta\varphi_x(q, \mu, i)$  позволило исключить параметр  $i$  и получить зависимость  $i = i(q, \mu)$ . Обратная задача решалась прогоном по параметрам  $q$  и  $\mu$  в области их допустимых значений. Погрешность  $\Delta\varphi_x$  приводит к неопределенности величины  $i$  при фиксированных значениях  $q$  и  $\mu$ . На рис. 1 приведены теоретические значения длительностей рентгеновских затмений при фиксированных  $q$  и  $\mu$  в зависимости от наклона орбиты  $i^1$ . Видно, что погрешность в длительности затмения  $\sim 0^m.01$  приводит к неопределенности в наклоне орбиты  $\sim 2^\circ$ .

<sup>1</sup>  $\Delta\varphi_x = \theta_e/\pi$ , где  $\theta_e$  – фазовый угол, при котором прямая, параллельная лучу зрения и проходящая через рентгеновский источник, касается поверхности Роша.

Зависимость невязки (2)  $\Delta_{\min}$  от параметров  $i, q, \mu$  для «чисто» эллипсоидальной кривой блеска HD 153919

$\mu$	Параметры	$q = M_x / M_v$						
		0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
1,00	$\Delta_{\min}$	2,80	4,84	7,28	9,27	12,86	15,03	18,01
	$i$	60	60	62	62	64	64	65
	$M_v(M_{\odot})$	86	45	25	16	10	7	5
0,98	$\Delta_{\min}$	1,30	1,65	2,54	3,76	5,12	6,70	8,12
	$i$	61	62	63	64	65	66	66
	$M_v(M_{\odot})$	83	42	24	15	10	7	5
0,96	$\Delta_{\min}$	0,86	0,84*	1,28	1,78	2,59	3,68	4,92
	$i$	62	63	65	65	66	97	68
	$M_v(M_{\odot})$	81	41	23	15	10	7	5
0,94	$\Delta_{\min}$	0,92	*0,74	*0,77	1,08	1,61	2,12	2,88
	$i$	64	65	66	67	68	68	69
	$M_v(M_{\odot})$	77	39	23	14	9	7	5
0,92	$\Delta_{\min}$	1,20	*0,81	*0,74	0,79	1,02	1,35	1,81
	$i$	66	67	68	68	69	70	71
	$M_v(M_{\odot})$	73	37	22	14	9	6	5
0,90	$\Delta_{\min}$	2,10	1,10	*0,87	0,76	0,78	0,89	1,09
	$i$	69	68	70	71	71	73	73
	$M_v(M_{\odot})$	70	37	21	13	9	6	5

*Примечание.* Здесь  $M_v$  – масса оптической компоненты для функции масс  $f_v(M) = 0,0033M_{\odot}$ ,  $i$  – наклонение орбиты (в градусах), найденное из условия длительности рентгеновского затмения  $\Delta\phi_x(i, q, \mu) = 0,14$ . Звездочками отмечены наборы допустимых значений параметров системы для уровня значимости  $F_{0,5} = 0,96$  и  $M_v = 15 \div 40M_{\odot}$ .

Таблица 2

Область допустимых параметров системы HD 153919 = 4U 1700–37 по уровню значимости  $\alpha = 0,5$  для  $M_v = 15 \div 40M_{\odot}$

Параметр	Длительность затмения $\Delta\phi_x$	
	0,14	0,16
$f_v(M) (M_{\odot})$	$0,0033 \pm 0,0007$	$0,0033 \pm 0,0007$
$i$ (град)	$63 \div 72$	$65 \div 77$
$\mu$	$0,89 \div 0,97$	$0,89 \div 0,97$
$q$	$0,045 \div 0,072$	$0,045 \div 0,071$
$M_x (M_{\odot})$	$0,95 \div 2,08$	$0,93 \div 2,04$
$M_x (M_{\odot})^*$	$1,43 \pm 0,12$	$1,40 \pm 0,12$

\* Данное значение  $M_x$  вычислено для случая, когда  $M_v = 25 M_{\odot}$ .

Решением обратной задачи [11, 14] является случайное множество параметров  $(q, \mu)$ , для которых невязка  $\Delta$  меньше критического уровня Фишера  $Pa$  при выбранном уровне значимости  $\alpha$

$$\Delta(q, \mu) < F_{M, \sum_{j=1}^M (n_j - 1), \alpha} \quad (1)$$

Невязка  $\Delta$  вычислялась согласно [15]:

$$\Delta(q, \mu) = \frac{\sum_{j=1}^M (n_j - 1) \sum_{j=1}^M n_j (I_j^H - I_j^T)^2}{M \sum_{j=1}^M n_j (n_j - 1) \bar{\sigma}_j^2}, \quad (2)$$

где  $I_j^T$  – теоретический блеска в  $j$ -й точке орбитальной фазы  $\phi$  ( $j = 1, \dots, M$ ) кривой

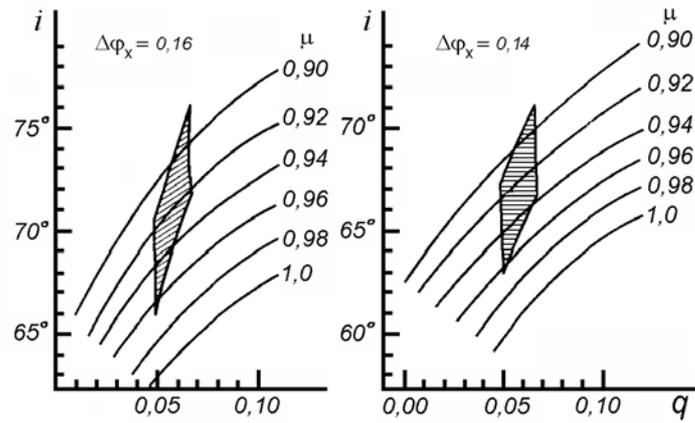


Рис. 3. Область допустимых значений параметров системы HD 153919 (заштрихованные фигуры) по уровню значимости  $\alpha = 0,5$  при  $M_v = 15 \div 40 M_\odot$ , для значений длительности рентгеновского затмения  $\Delta\phi_x = 0,14$  и  $0,16$

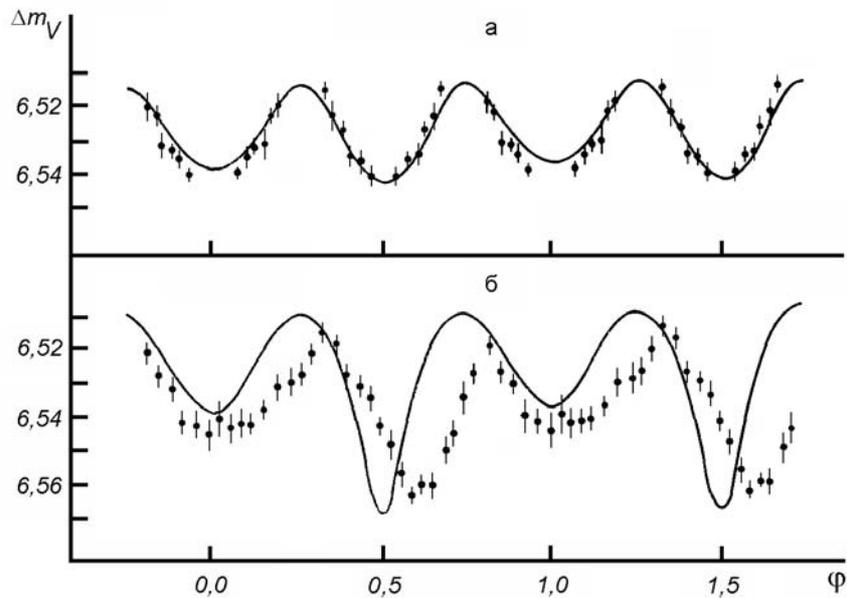


Рис. 4. Теоретические кривые блеска системы HD 153919 для параметров  $M_v = 25 M_\odot$ ,  $i = 68^\circ$ ,  $q = 0,058$ ,  $\mu = 0,92$ , *a* — описывающие «чисто» эллипсоидальную кривую блеска и *б* — наблюдаемую кривую блеска с учетом эффекта затмения аккреционным диском

блеска,  $l_j^H$  — средний наблюдаемый блеск системы в  $j$ -й точке, полученный усреднением  $n_j$  индивидуальных наблюдений,  $\overline{\sigma_j^2}$  — оценка для квадрата дисперсии среднего значения в  $j$ -й точке.

Существование неопределенности по  $i$  при фиксированных  $q$  и  $\mu$  приводят к тому, что из всех наклонностей орбиты, удовлетворяющих условию длительности рентгеновского затмения, выбиралось то значение, которое соответствовало минимуму невязки  $\Delta_{\min}$ .

Для нахождения параметров системы использовалась «чисто» эллипсоидальная кривая блеска системы HD 153919 в фильтре  $V$ , полученная путем исключения эффектов затмений и поглощения газовым потоком из наблюдаемой оптической кривой блеска [5], которая представлена 12 нормальными точками в районе орбитальных фаз  $\phi = 0,0-0,5$ . Для длительности затмения принимались значения  $\Delta\phi_x = 0,14$

как наиболее вероятное и  $\Delta\varphi_x = 0,16$  для оценки влияния изменения  $\Delta\varphi_x$  на решение задачи.

На рис. 2 показана зависимость невязок  $\Delta_{\min}$  при различных степенях заполнения полости Роша  $\mu$  от отношения масс компонент  $q$ . Пунктиром отмечена невязка  $F = 0,96$  [15], соответствующая критическому уровню значимости при  $\alpha = 0,5$ . Слабая зависимость  $\Delta_{\min}$  от  $\mu$  не позволяет существенно сузить область допустимых значений параметров. Поскольку для системы HD 153919 отсутствует информация о функции масс компактного объекта, а известно лишь ее значение для нормальной компоненты  $f_v(M) = (0,0033 \pm 0,0007) M_\odot$  [12], для ограничения возможных значений отношения масс  $q$  в системе необходимо привлечь дополнительную информацию, например данные о допустимых значениях массы оптической звезды  $M_v$ , определяемой по ее спектральному классу. Масса оптической звезды для спектрального класса Обf не может превышать  $40 M_\odot$  [16], минимальное ее значение для одиночных звезд составляет  $25 M_\odot$ . Учитывая обмен масс в системе и интенсивный звездный ветер, это значение можно уменьшить до  $15 M_\odot$  [17].

В табл. 1 приведены невязки  $\Delta_{\min}(q, \mu)$  для длительности затмения  $0^p,14$ . Звездочкой отмечены те наборы параметров  $(q, \mu)$ , которые удовлетворяют условию (1) для уровня значимости  $\alpha = 0,5$  и ограничениям на массу оптической звезды:  $15M_\odot \leq M \leq 40M_\odot$ . В табл. 2 и на рис. 3 дана сводка допустимых значений параметров системы HD 153919 по уровню значимости  $\alpha = 0,5$ . На рис. 4, а показана теоретическая кривая блеска системы в фильтре  $V$  для параметров  $i = 68^\circ$ ,  $q = 0,058$ ,  $\mu = 0,92$ ,  $M_v = 25M_\odot$  из области допустимых значений. Видно хорошее согласие теоретической и «чисто» эллипсоидальной кривых блеска.

### **Интерпретация наблюдаемой оптической кривой блеска системы HD 153919 с эффектами затмений**

Наряду с расчетом эллипсоидальной кривой блеска для системы HD 153919 исследована применимость к ней модели с диском [14]. В этой модели предполагается, что вокруг релятивистского объекта имеется плоский круглый оптически непрозрачный светящийся диск. Поскольку при анализе используются оптические кривые блеска системы HD 153919, усредненные за прецессионный цикл, естественно предполагать, что диск в среднем лежит в плоскости орбиты. При углах наклона орбиты  $i$ , близких к  $90^\circ$ , наблюдаются оптические затмения звезды диском и диска звездой, т. е. при суммировании потоков от элементарных площадок звезды и диска учитывались только те из них, которые не затмевались. Радиус аккреционного диска  $R_d$  составляет, согласно Пачинскому [18], половину радиуса полости Роша компактной звезды,  $R_d = 0,5(1 - \xi^*)$ , где  $\xi^*$  – максимальный размер полости Роша оптической звезды. Поскольку светимость рентгеновского источника в системе HD 153919 относительно мала, оптическая светимость аккреционного диска обусловлена в основном «отражением» света оптической звезды [19] и принималась равной  $K_1 = 0,01$  от светимости оптической звезды. Для оценки влияния эффектов затмения использовалась средняя наблюдаемая кривая блеска системы HD 153919 в фильтре  $V$ , не исправленная за эффекты затмений [5]. Исследование области допустимых значений параметров в этом случае с помощью описанной выше методики для эллипсоидальной переменности при значениях  $\Delta\varphi_x = 0,14$  и  $0,16$  показало, что в рамках модели Роша без эффектов затмений аккреционным диском не удается непротиворечиво описать эту кривую. Использование для анализа модели Роша с аккреционным диском при наилучших, найденных для «чисто» эллипсоидальной переменности, параметрах позволило согласовать разность глубин и амплитуду наблюдаемой кривой блеска (рис. 4, б). При этом минимум, соответствующий случаю «рентгеновский источник впереди», как уже отмечалось наблюдается на фазе  $\varphi = 0,6$ . Чтобы устранить это расхождение, необходима более сложная

модель, в которой затмение оптической звезды производится газовым потоком, расположенным под углом к линии центров компонент.

### Обсуждение результатов

Анализ «чисто» эллипсоидальной кривой блеска позволил найти параметры системы HD 153919, в частности, нами впервые были получены надежные оценки для значений наклона орбиты  $i$  и степени заполнения полости Роша  $\mu$  (см. табл. 2). Показано, что степень заполнения полости Роша в этой системе  $\mu < 1$ , что согласуется с современными представлениями об эволюции рентгеновских двойных систем [9, 10].

Существование прецессионного движения оси вращения оптической звезды искажает ее форму. Отклонения фигуры Роша в непрецессирующей модели от критической эквипотенциальной поверхности для систем с прецессирующей оптической звездой зависит от угла  $\eta$  между ее осью вращения и нормалью к плоскости орбиты, отношения масс компонент  $q$  и степени асинхронности вращения  $\Omega$  [20]. Анализ обобщенной модели фигуры Роша в случае  $\eta \neq 0$ ,  $\Omega = 1$ , выполненный Авни и Шиллером [20], показал, что в то время как физический объем звезды практически постоянен в ходе прецессионных движений, объем ее критической полости меняется с фазой орбитального периода и минимален в моменты, когда вторичная компонента находится на линии пересечения плоскости орбиты с экваториальной плоскостью оптической звезды, следовательно, здесь степень заполнения полости Роша  $\mu$  максимальна. Проведенный нами анализ параметров системы HD 153919 дает оценку минимального значения  $\mu$ . Степень увеличения  $\mu$  в моменты прохождения компактным объектом линии пересечения плоскостей при  $\eta \sim 25^\circ$  для  $\Omega = 1$  и  $q = 0,06$  составляет  $\sim 5\%$  [20], т. е. степень заполнения полости Роша в эти периоды достигает  $\sim 0,97$ , что может приводить к усиленному истечению вещества из полости Роша оптической звезды на этих фазах. Для количественных оценок этого эффекта необходимы дальнейшие исследования.

### ЛИТЕРАТУРА

1. *Bradt H. V., Doxsey R. E., Jernigan J. G.* Position and Identification of Galactic X-ray Sources, *Advances in Space Exploration*, 1979, 3.
2. *Hutchings J. B.* *Astrophys. J.*, 1975, **201**, 413.
3. *Avni Y., Bahcall J. N.* *Astrophys. J.*, 1975, **202**, L131.
4. *Paradijs J. A., Hammerschlag-Hensberge G., Zuiderwijk E. J.* *Astron. and Astrophys. Suppl. Ser.*, 1978, **31**, 189.
5. *Черепашук А. М., Хрузина Т. С.* *Астрон. ж.*, 1981, **58**, 1226.
6. *Черепашук А. М.* Письма в *Астрон. ж.*, 1981, **7**, 726.
7. *Хрузина Т. С., Черепашук А. М.* Письма в *Астрон. ж.*, 1983, **9**, 144.
8. *Dolan J. F., Coe M. J., Crannell C. J. et al.* *Astrophys. J.*, 1980, **238**, 238.
9. *Тутуков А. В., Юнгельсон Л. П.* *Научн. информ. Астрон. совета АН СССР*, 1973, вып. 27, 70.
10. *Van den Heuvel E. P. J.* In: *Mass Loss and Evolution of Close Binary Systems* / Eds. Eggleton P. et al. Dordrecht: Reidel, 1976, 35.
11. *Балог Н. И., Гончарский А. В., Черепашук А. М.* *Астрон. ж.*, 1981, **59**, 67.
12. *Асланов А. А., Черепашук А. М.* *Астрон. ж.*, 1982, **59**, 290.
13. *Grigar J; Cooper M. L., Gurkevich I.* *Bull. Astron. Inst. Czechoslovakia*, 1972, **23**, 147.
14. *Балог Н. И., Гончарский А. В., Черепашук А. М.* Письма в *Астрон. ж.*, 1981, **7**, 605.
15. *Худсон Д.* *Статистика для физиков*. М.: Мир, 1970.
16. *Conti P. S., Alshuler W. R.* *Astrophys. J.*, 1971, **170**, 325.
17. *Bolton C. T., Herbst W.* *Astron. J.*, 1976, **81**, 339.
18. *Paczynski B.* *Astrophys. J.*, 1977, **216**, 822.
19. *Бруевич В. В., Кулячков Н. Н., Сюняев Р. А.; Левченко В. С.* Письма в *Астрон. ж.*, 1978, **4**, 544.
20. *Avni Y., Schiller N.* *Astrophys. J.*, 1982, **257**, 703.

Московский гос. университет  
им. М. В. Ломоносова

Гос. астрономический ин-т  
им. П. К. Штернберга

Поступила в редакцию  
6.VII.1982