

МАССИВНАЯ ДВОЙНАЯ СИСТЕМА RY Sct - НОВОЕ РЕШЕНИЕ КРИВЫХ БЛЕСКА

Н.КОЧИАШВИЛИ¹, И.КОЧИАШВИЛИ¹, Р.НАЦВЛИШВИЛИ¹,
С.БЕРАДЗЕ^{1,2}, М.ВАРДОСАНИДЗЕ^{1,2}

Поступила 15 ноября 2019

Принята к печати 11 марта 2020

RY Sct - уникальная массивная двойная звездная система в короткой переходной эволюционной фазе. Это затменная двойная, где обе звезды переполнили свои полости Роша, в результате чего система находится в "сверхконтактном" состоянии. Она окружена молодой околозвездной туманностью. Двойная считается редким прародителем системы типа WR + OB. RY Sct близка к пределу светимости Эддингтона, поэтому радиационное давление играет важную роль в потере массы. По крайней мере, один из компонентов тесной двойной может быть связан с редким классом звезд LBV, или так называемыми переменными S Doradus. Мы вычислили орбитальные элементы, используя старые фотометрические данные Закирова и Кумсиашвили и новые спектральные данные вместе с результатами анализа наблюдений HST. Была рассмотрена модель, согласно которой компоненты RY Sct находятся в сверхконтактном состоянии и заполняют свои полости Роша. Более яркий первичный компонент передает массу более массивному, но менее яркому вторичному компоненту. Двойная система окружена общей оболочкой. Для начальных параметров мы взяли отношение масс $q = 4.42$; орбитальный период $P = 11^d.12471$, а для наклона орбиты мы использовали $i = 75^\circ.6$.

Ключевые слова: *UBVRI-фотометрия; тесные двойные; RY Scuti*

1. Введение. История исследования RY Sct. Тесная двойная система RY Sct подвергается процессам массопередачи и массообмена и имеет сложную структуру в своих внешних атмосферных слоях. Возможно, что она претерпевает эволюционные изменения в относительно короткие сроки, что важно для построения эволюционной модели системы.

Краткая история исследования этой двойной системы такова: Меррилл [1] обнаружил линию HeII $\lambda 4686$ в спектре RY Sct, которая специфична только для планетарных туманностей и их ядер. В спектре присутствуют сильные запрещенные линии [FeIII] и [SiIII], а также линии излучения водорода, гелия и других элементов. RY Sct наблюдался как радиоисточник [2]. Наличие интенсивных линий излучения и радиоизлучения (как в β Lyr) указывает на то, что вокруг RY Sct может быть небольшая область HII [3]. Звезда сильно покраснела от окружающей газовой и пылевой оболочки [4]. На основании спектральных наблюдений Каули и Хатчингс [5] обнаружили, что двойная система состоит из двух сверхгигантов раннего типа с отношением масс

$q = M_2/M_1 = 1.25$. Кинг и Джеймсон [3] предложили следующую модель для RY Sct: более яркая первичная (B0V) заполняет свою полость Роша и быстро переносит свою массу на более массивную, но менее яркую вторичную звезду. Гирисин и Мардироссян [6] предположили, что вторичный компонент должен быть окружен геометрически толстым аккреционным диском, что объясняет его аномально низкую светимость. Согласно [6], RY Sct подобна пекулярной системе β Лур и в настоящее время находится на пути становления Wolf-Rayet (WR) системы. Милано и др. [7], Гирисин и Мардироссян [6] проанализировали фотометрические кривые блеска Чати и др. [8], предполагая отношение массы компонентов $q = M_2/M_1 = 1.25$ по Каули и Хатчингсу [5]. Позже ряд авторов, работающих в рамках Международной скоординированной программы (Абастуманская астрофизическая обсерватория была координатором этой программы), использовали спектроскопические данные, полученные Р. Вестом по запросу Абастуманской обсерватории и получили новое соотношение масс компонентов $q = M_2/M_1 = 3.3$ [9]. Спектральные наблюдения RY Sct были выполнены Р. Вестом в области $\lambda\lambda 3450 - 5160 \text{ \AA}$ с дисперсией $12 \text{ \AA /мм}$. Антохина и Кумсиашвили [10] приняли это новое отношение масс $q = 3.3$ и применили метод синтетической кривой блеска для интерпретации фотометрических наблюдений, сделанных Кумсиашвили [11]. Модель (рис.1), которая включает в себя вторичный компонент в виде геометрически толстого диска, удовлетворительно описывает кривые блеска и согласуется с наблюдаемыми особенностями двойной системы. Был сделан вывод, что параметры RY Sct делают ее очень похожей на двойную типа WR + OB, если предположить, что менее массивная звезда находится в конце стадии предварительного переноса масс и обнажает свое гелиевое ядро на пути к превращению в систему WR. Были получены следующие параметры двойной: $i = 85^\circ \pm 2$; экваториальный радиус аккреционного диска $a = 0.6 R_{orb}$ (диск сильно уплощен и имеет отношение

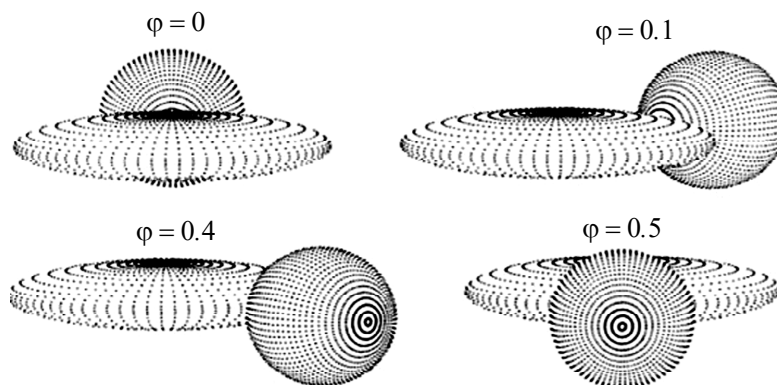


Рис.1. Модель RY Sct по Антохиной и Кумсиашвили [10].

осей $b/a=0.2$); экваториальная (19000 K) и полярная (43000 K) температуры аккреционного диска.

RY Sct был повторно исследован на основе спектральных данных, полученных в La Silla (ESO) и в СТЮ, охватывающих спектральные области 3400-5150 Å и 5700-6700 Å, а также с IUE [12]. В этой статье авторы пришли к выводу, что RY Sct представляет собой взаимодействующую двойную, образованную первичным $B0 \sim 10 M_{\odot}$ и вторичным $\sim 36 M_{\odot}$ компонентами. Среди ее эмиссионных особенностей есть ряд линий, которые характерны для планетарных туманностей. Вторичный компонент системы, окруженный непрозрачной оболочкой, излучает в HeII $\lambda 4686$. Авторы предполагают, что вокруг системы существует тройная туманность.

Джурашевич и др. [13] решили кривые блеска RY Sct, полученные Закировым и Эшанкуловой в Майданакской обсерватории в 1979-1994гг. Они использовали метод обратной задачи [14] и исходные параметры $q=3.3$, $i=84^{\circ}.3$. Согласно этому решению, потеря массы происходит через внешнюю лагранжеву точку L3, и этот процесс "рассматривается как возможный механизм формирования околозвездной оболочки тороидальной формы, лежащей в плоскости орбиты системы" [13]. Для звездных масс авторы получили $M_{hot} \sim 8 M_{\odot}$ и $M_{cool} \sim 26 M_{\odot}$. Согласно этому решению, более массивная, но

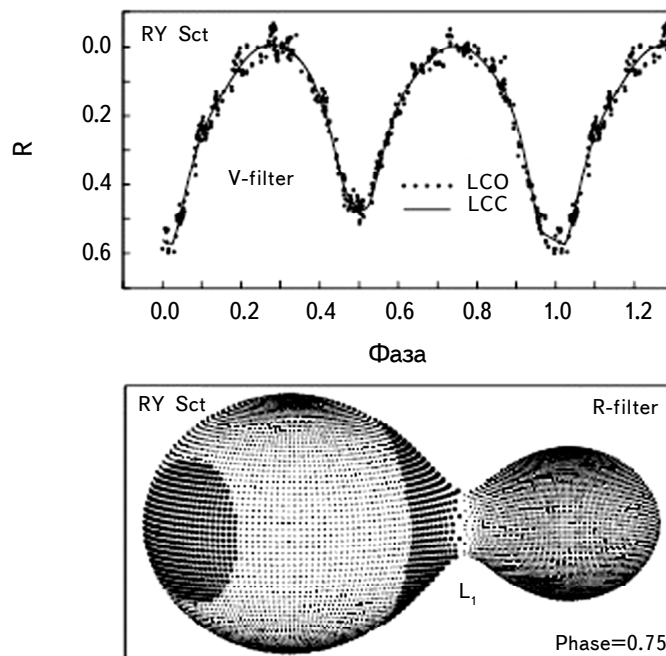


Рис.2. R кривая блеска и модель RY Sct по Джурашевичу и др. [13].

более холодная звезда имеет две горячие точки на поверхности (см. рис.2). Авторы предположили, что RY Sct принадлежит к ассоциации Ser OB1.

"Новая эра" исследования RY Sct началась статьями американской группы авторов [15]. Результаты в основном касаются физических характеристик компактной туманности вокруг RY Sct (рис.3). Авторы получили и проанализировали богатые высококачественные данные наблюдений в различных спектральных интервалах: визуальном, ИК и радио. Используя спектральные данные, полученные в ESO, HST, KPNO и СТЮ, а также изображения HST, 5-м телескопа обсерватории Паломар, 10-м телескопа Keck и карты радио-континуума радиобсерватории VLA (Very Large Array), авторы представили подробный анализ пекулярной туманности вокруг RY Sct в работах [15-18].

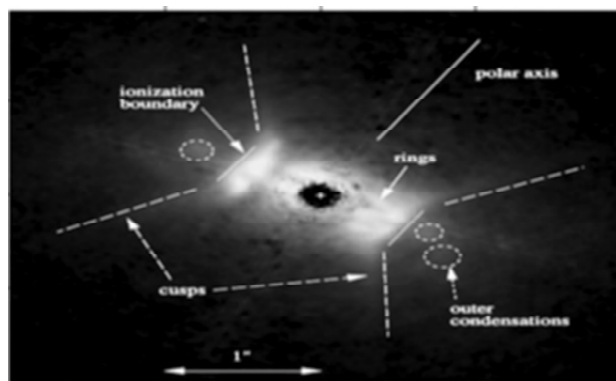


Рис.3. HST WFPC2 изображения RY Scuti [15].

Авторы определили массы звезд-компаньонов (49 и $39 M_{\odot}$) и общую болометрическую светимость $3.4 \cdot 10^6 L_{\odot}$ [19]. Для этой системы данное значение близко к пределу Эддингтона. Для спектральных классов звезд-компаньонов они получили O9.5 и O6.5, а для расстояния между ними - 0.43 AU. На снимках HST и Keck они впервые показали, что вокруг тесной двойной существует туманность с двумя лепестками $1'' \times 2''$, соответствующая радиусам в несколько тысяч а.е. на расстоянии 1.8 кпк [15-18].

Наиболее полное исследование компактной туманности RY Sct было выполнено после анализа данных наблюдений, полученных на различных инструментах в разных областях спектра. Они оценили системную скорость -20 ± 3 км/с; плотность электронов $n_e = 2 \cdot 10^5 \text{ см}^{-3}$ и температуру в туманности RY Sct - $9000^\circ \text{K} < T < 10000^\circ \text{K}$ [17]. Скорость расширения туманности на юго-западной стороне в два раза больше, чем на северо-восточной стороне. Для этих оценок они использовали разные методы и получили сходные значения, что указывает на правильность их подхода. Для массы туманности они получили $M \approx 0.003 M_{\odot}$. Авторы установили, что "туманность RY Sct

богата He и N, в то время как O и C, вероятно, имеются в малом количестве по сравнению с солнечными значениями, что указывает на то, что материал, обработанный в течение CNO цикла, экспонируется на поверхности звезды, которая выбросила туманность" [17]. Это очень важно для понимания текущего эволюционного статуса системы.

На изображение HST показывает очень сложную ионизированную туманность. Выявлено несколько интересных структур, в том числе пара концентрических ионизированных колец выше и ниже экваториальной плоскости системы, расположенных на внутреннем краю более вытянутого пылевого тора [15]. Авторы нашли, что изображение было снято при фазе $P=0.37$ и рассчитали наклонение орбиты системы $i=75^\circ.6$ (рис.3, [15]).

Все эти выводы согласуются с гипотезой о том, что туманность RY Sct образовалась в результате потери массы из внешних лагранжевых точек из-за переполнения полости Роша, когда объект эволюционирует к двойной системе типа WR + OB [17].

Если иметь в виду, что туманность, по-видимому, была выброшена недавно (~120 лет назад) во время взрыва звезды [16] и сильно асимметрична, то можно предположить, что эта короткая эволюционная фаза характеризуется спорадической потерей массы. Имеющиеся данные [16] указывают на то, что RY Sct, возможно, претерпел что-то аналогичное вспышкам S Doradus, ярких синих переменных (LBV), хотя этот тип вспышки может казаться феноменологически отличным в контактной двойной системе [17].

Согласно новым исследованиям системы RY Sct, "массивная затменная двойная поймана в короткой фазе переполнения полости Роша, где она лишается своей H-оболочки, чтобы достичь фазы звезды Вольфа-Райе и, в конечном счете, SN типа Ibc" (см. [20]). Окончательные результаты, полученные для масс и спектральных типов компонентов RY Sct: O9.7Ibpe - первичный компонент с массой $8 M_\odot$ и B0.5I вторичный, с массой $30 M_\odot$ [20].

2. Данные, использованные в этой статье. Мы использовали *UBVRI* фотометрические данные Закирова [21] и *UBV* фотометрические данные Кумсиашвили [11]. Оба наблюдателя использовали стандартную процедуру обработки данных.

UBVRI кривые блеска были получены в Майданакской обсерватории в течение 1979-1981гг. с использованием 40-см рефлектора, 48-см AZT-14 и 60-см рефлектора Zeiss. BD-12°5036 и BD-12°5049 использовались в качестве звезд сравнения, а BD-12°5031 - в качестве контрольной звезды. Было получено 408 отдельных наблюдений в *U*-полосе, 413 - в *B*, 424 в *V*, 407 в *R* и 296 в *I*-полосе [21].

UBV фотоэлектрические наблюдения проводились в Абастуманской

обсерватории на горе Канобили с использованием 0.48-м рефлектора AZT-14 в течение 1972-1985гг. BD-12°5049 использовалась как звезда сравнения, а BD-12°5031 служила эталонной звездой. Существует более 1000 индивидуальных наблюдений в каждом цвете в отдельности. Это соответствует 106 наблюдательным ночам.

Для обоих данных наблюдений [21,11] орбитальные фазы были рассчитаны с помощью эфемеридной формулы [8]:

$$\text{Min } I = 2443342.42 + 11^{\text{d}}.12471E. \quad (1)$$

3. *Модельные расчеты.* Мы вычислили орбитальные элементы с использованием *UBVRI* фотометрических данных Закирова [21] и *UBV* фотометрических данных Кумсиашвили [11] и рассмотрели модель, согласно которой компоненты RY Sct находятся в контактном состоянии - они

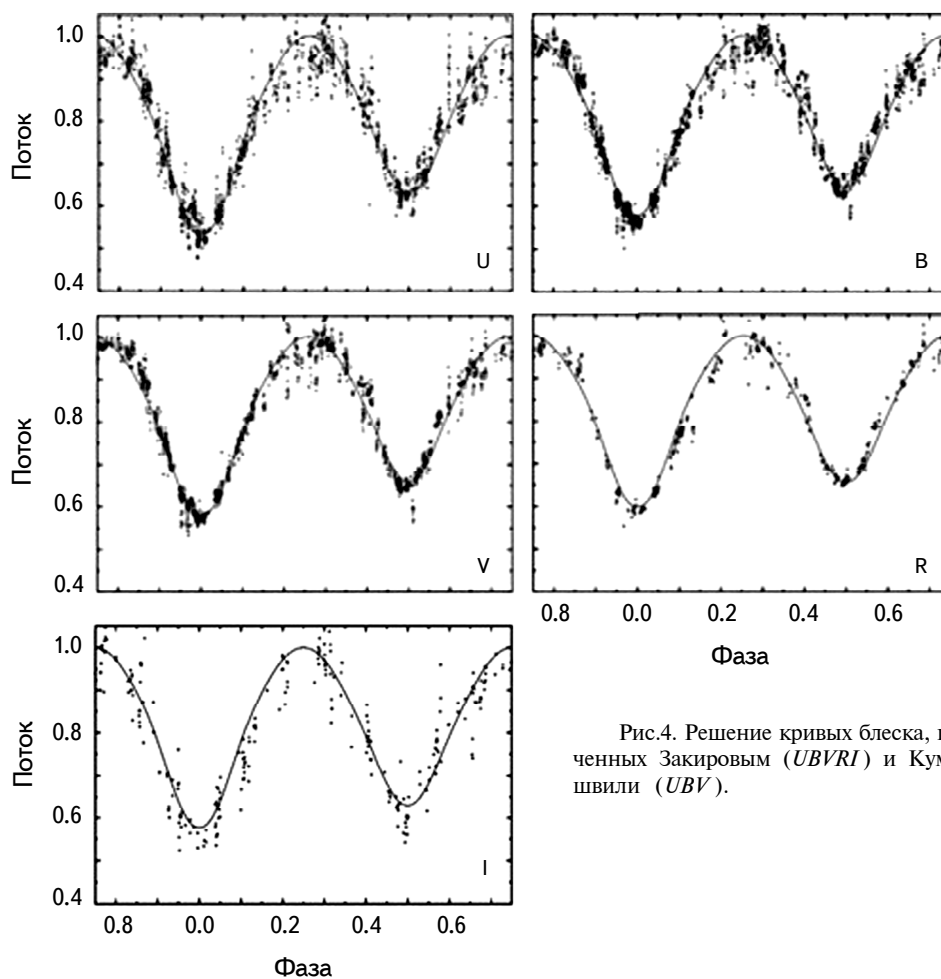


Рис.4. Решение кривых блеска, полученных Закировым (*UBVRI*) и Кумсиашвили (*UBV*).

Таблица 1

ВЫХОДНОЙ ФАЙЛ ДАННЫХ ВМЗ, V ФИЛЬТР

Входное отношение масс = 4.200000	Отношение масс <1 = 0.238095
Омега 1 = 7.532593	Омега 2 = 7.722304
Омега внутренняя = 8.164964	Омега внешняя = 7.532593
С 1 = 1.488685	С 2 = 1.506058
С внутренний = 1.546594	С внешний = 1.488685
Заполнение 1 = 1.000000	Заполнение 2 = 0.700000
Лагранжиан L1 = 0.642611	Лагранжиан L2 = 1.463698
AG = r1(задний) = 0.603615	AS = r2(задний) = 0.358150
BG = r1(боковой) = 0.565157	BS = r2(боковой) = 0.288131
CG = r1(полюсный) = 0.509609	CS = r2(полюсный) = 0.272477
Площадь поверхности 1 = 4.003030	Площадь поверхности 2 = 1.141156
Объем 1 = 0.705732	Объем 2 = 0.107637
Средний радиус 1 = 0.559460	Средний радиус 2 = 0.306253
Средний радиус 1 (об.) = 0.552311	Средний радиус 2 (об.) = 0.295092
Эксцентриситет = 0.00000	Долгота периастра = 0.0000
Фаза периастра = 0.00000	Фаза соединения = 0.00000
Угловое вращение F1 = 1.0000	Угловое вращение F2 = 1.0000
Фаза нормализации = 0.25000	Коэффициент нормализации = 1.00000
Наклонение = 75.600	Длина волны = 5500.00
Температура 1 = 31000.00	Температура 2 = 30000.00
Светимость 1 = 0.7864	Светимость 2 = 0.2136
Коэффициент гравитации 1 = 3.000	Коэффициент гравитации 2 = 1.700
Потемнение к краю 1 = 0.200	Потемнение к краю 2 = 0.350
Отражение 1 = 3.000	Отражение 2 = 0.000
Третий источник света = 0.0000	Период = 11.12471000
K1 = 250.000000	K2 = 59.000000
V0 = -20.000000	

заполняют свои полости Роша. Более яркий первичный компонент передает массу более массивному, но менее яркому вторичному компоненту. Для входных параметров имеем отношение масс $q=4.2$ [22]. Период обращения

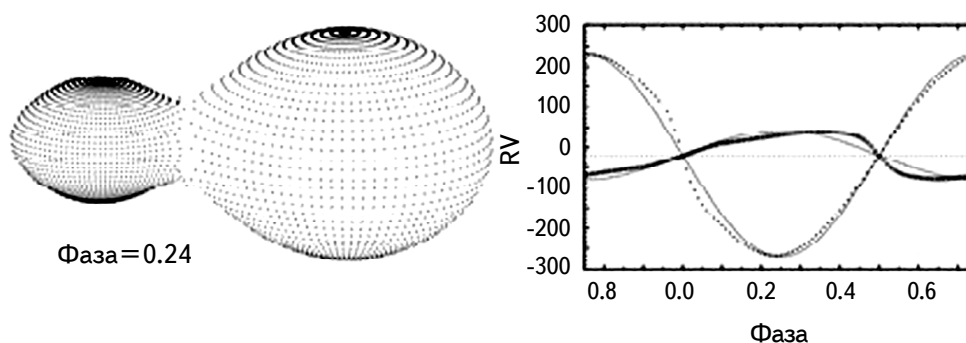


Рис.5. 3D-модель и модельные RV кривые RY Sct в V фильтре.

$P = 11^d.12471$ ([21,11]). Для наклона орбиты мы использовали $75^\circ.6$, который был получен после анализа изображений HST [15]. Код Вильсона-Девинния (ВМЗ) использовался для модельных расчетов [23] (см. рис.4 и рис.5).

Линии на рис.4 представляют теоретические кривые блеска ВМЗ. Точки соответствуют данным наблюдений. Выходные параметры системы приводятся в табл.1 (V фильтр).

4. *Абсолютные параметры RY Sct.* Код также дает абсолютные параметры системы (см. табл.2):

Таблица 2

АБСОЛЮТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ RY Sct (V ФИЛЬТР)

Масса 1 = 7.171583 солнечных массы	Масса 2 = 30.388062 солнечных массы
Большая полуось = 48.799229 млн км	Большая полуось = 70.113835 солнечных радиусы
Средний радиус 1 = 27.301238 млн км	Средний радиус 1 = 39.225917 солнечных радиусы
Средний радиус 2 = 15.395562 млн км	Средний радиус 2 = 22.120060 солнечных радиусы

5. *Дискуссия.* После решения $UBVRI$ кривых блеска для RY Sct, с использованием кода Вилсона-Девинния, мы получили следующую модель системы: менее массивный, но более яркий компонент заполняет свою полость Роша. Перенос массы к более массивной звезде происходит через лагранжеву точку L1. Следовательно, массивный компонент "сидит" в газовой оболочке. Кроме того, наблюдается интенсивный отток массы из границ Роша первичного компонента, поскольку он переполняет свою полость Роша. Этот процесс оттока массы от границ полости Роша является основным источником общей оболочки. Это мнение подтверждается также спектральными наблюдениями (см. например [24]), где авторы сообщают об "интенсивном, переменном оттоке вещества" из системы. Потоки газа и общая оболочка оказывают лишь слабое влияние на кривые блеска. Мы воспользовались вновь определенными параметрами для исходных данных, которые были получены с использованием новых инструментов, и получили новое модельное решение, которое намного проще - оно не содержит аккреционный диск или горячие точки.

Соответственно, мы пришли к выводу, что можно определить структуру/структуры газовой оболочки/оболочек, используя спектральные данные (или изображения с высоким разрешением) высокого разрешения. Но эти оболочки не оказывают существенного влияния на кривые блеска.

Эта работа была поддержана Национальным научным фондом Шота Руставели (SRNSF), грант № 218070, "Следующая возможная вспышка Р Cygni".

¹ Абастуманская астрофизическая обсерватория им. Е.Харадзе,
Государственный университет им. Ильи, Тбилиси, Грузия,
e-mail: nino.kochiashvili@iliauni.edu.ge

² Самцхе-Джавахети, Государственный университет, Грузия

MASSIVE BINARY SYSTEM RY Sct - NEW SOLUTION OF LIGHT CURVES

N.KOCHIASHVILI¹, I.KOCHIASHVILI¹, R.NATSVLISHVILI¹,
S.BERADZE^{1,2}, M.VARDOSANIDZE^{1,2}

RY Scuti is a unique massive binary star system in a short transitional evolutionary phase. It is an eclipsing binary where both stars have overfilled their Roche lobes causing the system to be in an "overcontact" state and it is surrounded by a young circumstellar nebula. The binary is thought to be a rare progenitor of a WR+OB system. RY Sct is near the Eddington luminosity limit, so radiation pressure plays an important role in the mass loss. At least one of the components of the close binary may be related to a rare class of LBV stars, or so called S Doradus variables. We calculated orbital elements using old photometric data by Zakirov and Kumsiashvili and new spectral data together with results of analysis of HST observations. There was considered a model, according which the components of RY Sct are in overcontact condition - they are filling their Roche Lobes. The brighter primary component transfers mass to the more massive, but less bright secondary. The binary system is surrounded by a common envelope. For input parameters we used the mass ratio of $q=4.2$, the orbital period of $P=11^d.12471$ and for orbital inclination we used $i=75^\circ.6$.

Keywords: *UBVRI photometry: close binaries: RY Scuti*

ЛИТЕРАТУРА

1. *P.W.Merrill*, *Astrophys. J.*, **67**, 179, 1928.
2. *V.A.Hughes, A.Woodsworth*, *Nature*, **242**, 116, 1973.
3. *A.R.King, F.R.Jameson*, *Astron. Astrophys.*, **71**, 326, 1979.
4. *G.L.Grasdalen, J.A.Hackwell, R.D.Gehrz et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, **234**, L129, 1979.
5. *A.P.Cowley, J.B.Hutchings*, *Publ. Astron. Soc. Pacif.*, **88**, 456, 1976.
6. *G.Giuricin, F.Mardirossian*, *Astron. Astrophys.*, **101**, 138, 1981.
7. *L.Milano, A.Vittone, F.Ciatti et al.*, *Astron. Astrophys.*, **100**, 59, 1981.
8. *F.Ciatti, A.Mammano, R.Margoni et al.*, *Astron. Astrophys. Suppl.*, **41**, 143, 1980.
9. *M.Yu.Skul'skii*, *Bull. AbAO*, **58**, 101, 1985.
10. *E.A.Antokhina, M.I.Kumsiashvili*, *Pis'ma Astron. Zh.*, **25**, 662, 1999.
11. *M.Kumsiashvili*, *Bull. AbAO*, **58**, 93, 1985.
12. *J.Sahade, R.M.West, M.Yu.Skul'skii*, *Rev. Mex. Astron. Astrophys.*, **38**, 259, 2002.
13. *G.Djurasevic, M.Zakirov, M.Eshankulova et al.*, *Astron. Astrophys.*, **374**, 638, 2001.
14. *G.Djurasevic*, *Astrophys. Space Sci.*, **197**, 17, 1992.
15. *N.Smith, R.D.Gehrz, R.M.Humphreys et al.*, *Astron. J.*, **118**, 960, 1999.
16. *N.Smith, R.D.Gehrz, W.M.Goss*, *Astron. J.*, **122**, 2700, 2001.
17. *N.Smith, R.D.Gehrz, O.Stahl et al.*, *Astrophys. J.*, **578**, 464, 2002.
18. *R.D.Gehrz, N.Smith, B.Jones et al.*, *Astrophys. J.*, **559**, 395, 2001.
19. *R.D.Gehrz, T.L.Hayward, J.R.Houck et al.*, *Astrophys. J.*, **439**, 417, 1995.
20. *R.D.Gehrz, N.Smith, D.Shenoy*, *EAS Publ.*, **71-72**, 109, 2015.
21. *M.M.Zakirov*, *Bull. AbAO*, **58**, 425, 1985.
22. *E.D.Grundstrom, D.R.Gies, T.C.Hillwig et al.*, *Astrophys. J.*, **667**, 505, 2007.
23. *D.H.Bradstreet*, *The Society for Astronomical Sciences 24th Annual Symposium on Telescope Science*, **24**, 23, 2005.
24. *N.D.Melikian, V.S.Tamazian, J.A.Docobo et al.*, *Astrophysics*, **53**, 202, 2010.