

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ФИЗИКА И АСТРОФИЗИКА

УДК 524.338.3

ЭФФЕКТ ЭЛЛИпсоИДАЛЬНОСТИ ХОЛОДНЫХ КОМПОНЕНТОВ СИМБИОТИЧЕСКИХ ЗВЕЗД

А. А. Татарникова, А. М. Татарников

Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга

В работе представлены результаты анализа наблюдений двух симбиотических звезд: Т Северной короны и ВФ Лебеда в ИК-диапазоне. Переменность ИК-блеска звезд объяснена в рамках эффекта эллипсоидальности холодных компонентов этих двойных систем, которые полностью заполняют свою полость Роша.

***Ключевые слова:** симбиотические звезды, эффект эллипсоидальности холодных компонентов, полость Роша*

Введение. Симбиотические звезды представляют собой особый класс тесных долгопериодических двойных систем, в спектрах которых наблюдаются как линии и полосы поглощения, характерные для холодных звезд, так и эмиссионные линии, характерные для спектров планетарных туманностей. Эти звезды являются чрезвычайно интересными объектами, т.к. у них встречаются практически все возможные проявления звездной активности. Симбиотические звезды выступают в роли своеобразных физических лабораторий, позволяющих изучить различные аспекты эволюции звезд в двойных системах.

История исследования симбиотических звезд интересна и поучительна [10]. В настоящее время существует две популярные модели, объясняющие феномен симбиотической звезды. В качестве горячего компонента рассматривается либо белый карлик, либо пограничный слой вокруг звезды главной последовательности (есть так же несколько систем, в которых горячими компонентами являются нейтронные звезды).

В обеих моделях одним из важнейших является вопрос о степени заполнения холодным компонентом своей полости Роша. Именно это является основным фактором, определяющим механизм и темп потери вещества холодным компонентом, от чего, в свою очередь, зависит характер активности системы в целом.

Еще чуть более 10 лет назад практически единодушно считалось, что холодные компоненты классических симбиотических звезд не заполняют свою полость Роша [1, 4]. В начале текущего столетия точка зрения на этот вопрос начала меняться. Сейчас появляется все больше свидетельств в пользу обратного [5–7, 15].

Одним из следствий приближения размеров холодного компонента к размерам своей полости Роша является искажение формы звезды – из сферической она становится близка вначале к эллипсоидальной, а затем к каплевидной. В итоге, в ходе орбитального движения постоянно меняется площадь проекции холодного компонента на картиную плоскость и система меняет свой блеск. При этом говорят, что наблюдается эффект эллипсоидальности.

Целью настоящей работы является рассмотрение вопроса о степени заполнения полости Роша холодными компонентами двух симбиотических систем: классической симбиотической звезды ВF Лебеда и повторной симбиотической новой Т Северной Короны, и связи этого параметра с характером активности.

Переменная звезда ВF Лебеда была открыта в 1914 г. [13]. Она принадлежит к классическим симбиотическим звездам (типа Z Андромеды). Отличительной особенностью этой подгруппы являются новоподобные вспышки. Нарастание блеска происходит в течение 1–3 месяцев, а спад блеска длится несколько лет. Сильные вспышки (амплитуда в фильтре U до 3^m) повторяются через несколько десятилетий. Помимо сильных вспышек, характерных для классических симбиотических звезд, у ВF Суг наблюдалось [9] также несколько слабых вспышек с амплитудой до 2^m и быстрым последующим спадом блеска.

Симбиотическая звезда Т Северной Короны является прототипом малочисленного подкласса симбиотических звезд: повторных симбиотических новых. За время наблюдений эта звезда испытала две сильные вспышки в 1866 и 1946 гг. (амплитудой свыше 8^m). Кривые блеска во время обеих вспышек были достаточно схожими: быстрый подъем к максимуму, наличие вторичного более слабого максимума (через ~ 100 дней после главного максимума) и дальнейшее медленное ослабление блеска. Анализ ИУЕ-спектров, проведенный Селвилли [8], выявил наличие горячего ($T \sim 10^5$ К) источника излучения, который не дает существенного вклада в излучение в оптическом диапазоне. Отсутствие существенных фазовых вариаций UV-континуума и эмиссионных линий, свидетельствует о том, что Т Северной Короны не является затменной системой.

Наблюдения. Для выявления эффекта эллипсоидальности у симбиотических звезд требуются специально организованные

наблюдения в ИК-диапазоне, где максимальный вклад в излучение дает именно холодный компонент. Во-первых, сам эффект обычно невелик – не более $0.^m3$. Во-вторых, присутствует "шум" – собственная переменность красного гиганта. В-третьих, эффект проявляется на больших временных интервалах – орбитальные периоды симбиотических звезд составляют, как минимум, несколько сотен суток. Чтобы обнаружить эффект и построить надежную кривую блеска требуются длительные (в течение нескольких орбитальных периодов) наблюдения.

Фотометрические наблюдения Т Северной Короны и ВФ Лебеда в фильтрах J ($\lambda=1.25$ мкм) и K ($\lambda=2.2$ мкм) проводились на 1.25 м телескопе Крымской лаборатории ГАИШ в 1987–2003 гг. с использованием инфракрасного фотометра ГАИШ. Описание фотометра и методики наблюдений приведено в работе Наджиба [3]. Стандартом для Т Северной Короны служила звезда BS 5947 ($J=2.^m09$, $K=1.^m30$), а для ВФ Лебеда – BS 7417 ($J=1.^m01$, $K=0.^m16$). Ошибки наблюдений не превышали $0.^m02$.

На рис. 1 приведены кривые блеска Т Северной Короны и ВФ Лебеда в фильтре J . Видно, что за период наблюдений средний уровень блеска первой звезды не изменился. У ВФ Лебеда, напротив, наблюдалась большая вспышка в 1989 г. Как показано в работе Юдина и др. (2005b) звезда вернулась к спокойному состоянию в 1993 г. На рис. 1 видно, что с этого времени на кривой блеска становятся заметны регулярные колебания.

У Т Северной Короны средний уровень показателя цвета составил $\langle J-K \rangle \approx 1.^m175$. При $E(B-V) = 0.15$ [8] исправленный показатель цвета $\langle J-K \rangle_0 = 1.095$ и холодный компонент может быть классифицирован как M3.5III, если его сравнивать с показателями цвета красных гигантов в окрестностях Солнца [2].

Для ВФ Лебеда среднее значение показателя цвета после 1993 г. $\langle J-K \rangle \approx 1.^m35$. При $E(B-V) = 0.4$ [4] по показателю цвета $\langle J-K \rangle_0$ красный гигант может быть классифицирован как M4-M5.

Периодограммный анализ проводился с помощью программы L2 (автор Колпаков Ю. К.). Метод, используемый программой, заключается в аппроксимации заданного временного ряда полином третьей степени (восстанавливает кубический тренд постоянной составляющей сигнала) и в разложении в ряд Фурье вплоть до третьей гармоники. Коэффициенты полученного аппроксимирующего многочлена находятся методом наименьших квадратов. Для каждой из звезд было найдено по два периода изменения блеска примерно равной мощности:

Т Северной Короны: $P_1 = 227.56 \pm 0.42$ сут $\approx P_{orb}$, $P_2 = 113.85 \pm 0.17$ сут $\approx \frac{1}{2} P_{orb}$.

BF Лебеда: $P_1 = 767 \pm 20$ сут ($\approx P_{orb}$) и $P_2 = 381 \pm 7$ сут ($\approx \frac{1}{2} P_{orb}$).

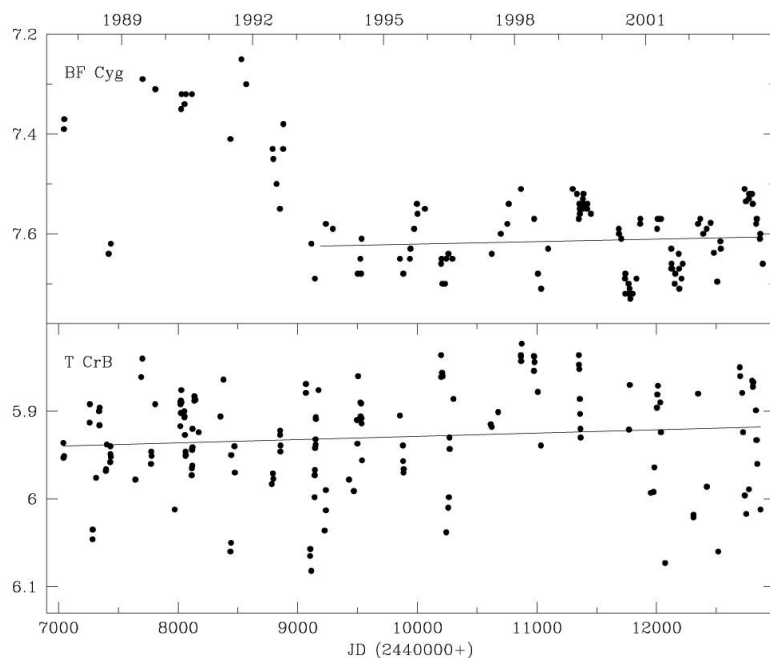


Рис. 1. Кривые блеска BF Лебеда и Т Северной Короны в фильтре J. Сплошными линиями показана линейная аппроксимация рассматриваемых в работе участков кривой

Под орбитальным периодом мы подразумеваем периоды, полученные Фекелом и др. (2000 и 2001) при анализе кривых лучевых скоростей $P_{orb} = 227.5687 \pm 0.0099$ сут (для Т Северной Короны) и $P_{orb} = 57.2 \pm 3.9$ сут (для BF Лебеда). Видно, что периоды P_1 в пределах ошибок совпадают с орбитальными периодами.

Такую переменность в двойных системах, когда наблюдается два максимума блеска за один орбитальный период, обычно связывают с эллипсоидальной формой холодного компонента.

Моделирование кривых блеска. Рассмотрим простейшую модель, когда система состоит из холодного компонента, близкого к заполнению полости Роша или заполняющего ее, и точечного горячего компонента (Гончарский и др. (1985), Тьемкес и др. (1986)). При этом будем считать, что гравитационный потенциал обоих компонентов описывается гравитационным потенциалом двух точечных масс, осевое вращение красного гиганта синхронизировано с орбитальным

обращением, орбиты звезд круговые. Выполнение последнего условия для Т Северной Короны и ВФ Лебеда описано у Фекела [11, 12].

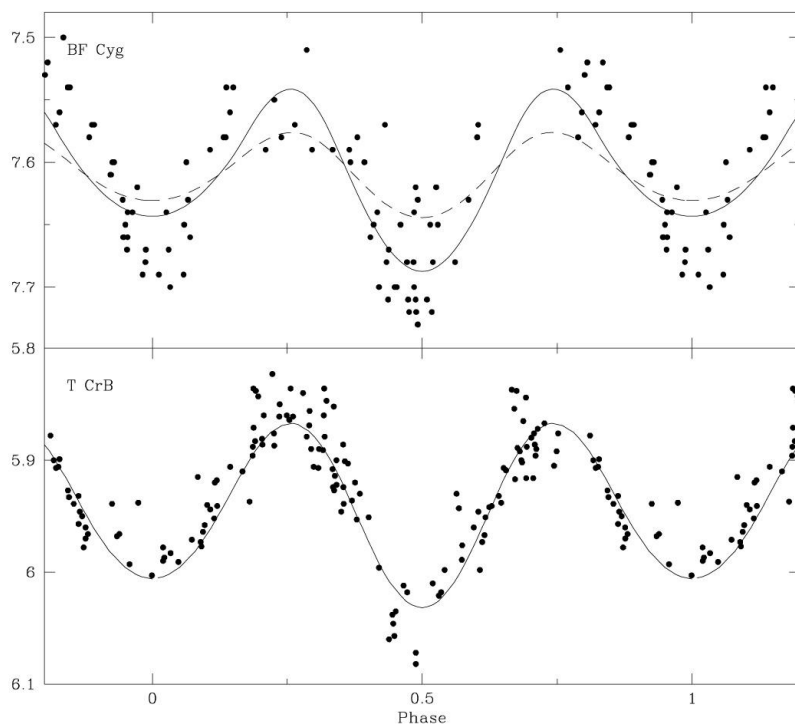
При расчетах предполагалось, что средняя по поверхности температура холодного компонента равна его эффективной температуре $T_{\text{eff}} = 3300$ К (для Т Северной Короны) и $T_{\text{eff}} = 3000$ К (для ВФ Суг). Каждый элемент его поверхности излучает как чернотельный источник с различной температурой, которая задается законом гравитационного потемнения (использовался закон Люси для звезд с конвективными оболочками с показателем экспоненты $\beta = 0.08$). Закон потемнения к краю был взят из работы Кларета (2000).

В рамках принятой модели теоретическая кривая блеска будет зависеть от трех параметров: угла наклона плоскости орбиты к лучу зрения i , степени заполнения холодным компонентом своей полости Роша μ (при полном заполнении полости $\mu = 1$) и отношения масс компонентов $q = M_{\text{cool}}/M_{\text{hot}}$. Вычисления показали (см. ниже рис. 2), что амплитуда теоретической кривой блеска очень сильно зависит от параметра μ . При $\mu = 0.9$ амплитуда в 2 раза меньше амплитуды при $\mu = 1$ и наблюдаемое значение амплитуды колебаний блеска для обеих систем не удастся получить при любых значениях других параметров. Поэтому в нашем случае можно принять $\mu = 1$. Соответственно, решалась задача вычисления доверительных интервалов для оставшихся двух параметров.

Как показано в работе Шабаца и др. (1997) полоса J является наиболее подходящей из JHK -полос, если заменять реальное распределение энергии в спектре красного гиганта функцией Планка. Поэтому мы моделировали кривую блеска холодного компонента Т Северной Короны, полученную в фильтре J .

В предположении нормального распределения наблюдаемых точек для определения области допустимых значений параметров (q, i) мы привлекали критерий Фишера (в применении к рассматриваемой задаче см. Гончарский и др., 1985). В ходе моделирования была получена сетка моделей для набора значений (q, i) в широком интервале их изменения.

На рис. 2 показаны свертки кривых блеска ВФ Лебеда и Т Северной Короны в фильтре J с соответствующими периодами P_1 , а также модельные кривые. Видно, что модельные кривые хорошо описывают наблюдения. Однако, существует достаточно большой диапазон значений параметров q и i , которые попадают в доверительные интервалы (по уровню 90 %). Для ограничения этих диапазонов необходимо привлекать дополнительные данные о системе.



Р и с . 2. Свертки кривых блеска BF Лебеда и Т Северной Короны в фильтре J с соответствующими периодами P_1 . Сплошными линиями показаны модельные кривые блеска с параметрами $\mu=1$, $q=3$, $i=80^\circ$ (для BF Лебеда) и $\mu=1$, $q=0.7$, $i=55^\circ$ (для Т Северной Короны). Штриховой линией показана модельная кривая, полученная для неполного заполнения холодным компонентом BF Лебеда своей полости Роша ($\mu=0.9$, $q=3$, $i=80^\circ$)

В случае с Т Северной Короны такими ограничениями будут – отсутствие затмений в системе (в основном – ограничение на угол i) и минимальная масса холодного компонента ($M_{\text{cool}} \geq 0.6 M_\odot$; звезда меньшей массы за время жизни Галактики не успеет проэволюционировать до стадии красного гиганта, в основном – ограничение на параметр q). По уровню 90 % получается все еще широкий интервал возможных значений

$$0.5 < q = M_{\text{cool}}/M_{\text{hot}} < 1.8, 50^\circ < i < 65^\circ.$$

Горячий компонент в системе может быть либо белым карликом, либо звездой главной последовательности. Если предположить, что горячий компонент Т Северной Короны – белый карлик, то его максимальная масса не может быть больше предела Чандрасекара ($M_{\text{hot}} = 1.44 M_\odot$). В этом случае оказывается, что масса горячего компонента будет заключена в очень узком интервале – $1.3 < M_{\text{hot}} < 1.44$

M_{\odot} , а угол i – в интервале $50\text{--}60^{\circ}$. Если же предположить, что горячий компонент является звездой главной последовательности, то мы должны были бы видеть его излучение в спектре Т Северной Короны, чего не наблюдается [8].

Для ВФ Лебеда ограничения на параметры будут другие. У этой системы наблюдаются затмения горячего компонента красным гигантом и, соответственно, $i = 70\text{--}90^{\circ}$. Моделирование показывает, что для ВФ Лебеда возможны следующие значения параметров: $q = 2\text{--}4$, $i = 70\text{--}90^{\circ}$. Горячий компонент ВФ Лебеда скорее всего является белым карликом с массой $M_{\text{hot}} \geq 0.6 M_{\odot}$. В этом случае, диапазон возможных значений масс холодного компонента: $M_{\text{cool}} = 1.2\text{--}5 M_{\odot}$.

Заключение. В настоящее время растет число симбиотических звезд, для которых доказано, что их холодные компоненты заполняют свою полость Роша [6]. Эти звезды по типам активности относятся к самым разным подклассам симбиотических звезд, в том числе и к не вспыхивающим симбиотическим звездам (как, например, RW Hyd).

Проведенное нами моделирование ИК-кривых блеска двух симбиотических звезд разных типов показало, что у обеих систем холодные компоненты заполняют свои полости Роша и основная потеря вещества холодным компонентом должна идти через внутреннюю точку Лагранжа. Несмотря на сходство механизмов потери вещества, системы показывают разную форму активности – у Т Северной Короны наблюдаются вспышки повторной новой (раз в несколько десятилетий – резкое возрастание светимости в несколько тысяч раз), а у ВФ Лебеда – вспышки по типу классических симбиотических звезд (практически без изменения болометрической светимости горячего компонента).

В классической симбиотической системе ВФ Лебеда холодный компонент массивнее горячего ($q = M_{\text{cool}}/M_{\text{hot}} = 2\text{--}4$). Это говорит о том, что в прошлом в системе произошла «смена ролей»: нынешний горячий компонент имел большую массу, чем холодный, и, быстрее проэволюционировав, передал значительную часть массы второму компоненту.

Горячий компонент Т Северной Короны, вероятно, представляет собой массивный белый карлик с массой $1.3\text{--}1.4 M_{\odot}$. Из-за аккреции вещества холодного компонента на его поверхности накапливается слой водорода. При достижении некоторой критической массы происходит вспышка новой. В результате вспышки теряется не все накопленное вещество и масса горячего компонента постепенно увеличивается, приближаясь к пределу Чандрасекара. Таким образом, эта система может считаться возможной предшественницей будущей вспышки Сверхновой.

Список литературы

1. Iben Jr. Hot accreting white dwarfs in the quasi-static approximation // *Astrophys. J.* 1982. V. 259. P. 244.
2. (Lee T.A. Photometry of high-luminosity M-type stars // *Astrophys. J.* 1970. V. 162. P. 217–238.
3. Наджип А.Э., Шенаврин В.И., Тихонов В.Г. Новый высокочувствительный инфракрасный фотометр ГАИШ с фотогмьваническим приемником // *Тр. Гос. астрон. ин-та им. П.К. Штернберга.* 1986. Т. 58. С. 119.
4. Mikolajewska J., Kenyon S.J., Mikolajewski M. On the Nature of the Symbiotic Star BF Cygni // *Astron. J.* 1989. V. 98. P. 1427.
5. Mikolajewska J. Symbiotic stars in the Magellanic clouds // *RevMexAA.* 2004. V. 20. P. 33.
6. Mikolajewska J. Binary Paths to Type Ia Supernovae // *Proceedings IAU Symposium.* 2011. No. 281.
7. Rutkowski A., Mikolajewska J. and Whitelock P. Modeling Light Curves of Symbiotic Stars // *Balt. Astron.* 2007. V. 16. P. 49.
8. Selvelli P.L., Cassatella A., Gilmozzi R. The nature of the recurrent nova T Coronae Borealis - Ultraviolet evidence for a white dwarf accretor // *Astrophys. J.* 1992. V. 393. P. 289.
9. Skopal A., Vittone A., Errico L., Bode M.F., Lloyd H.M., Tamura S. A photometric and spectroscopic study of the symbiotic binary BF CYG // *Monthly Notice Roy. Astron. Soc.* 1997. V. 292. P. 703.
10. Татарников А.М. Симбиотические звезды: история исследования и нерешенные проблемы // *Вестник ТвГУ. Серия «Физика».* 2010. Вып. 11. С. 59–74.
11. Fekel F., Hinkle K.H., Joyce R.R., Skrutskie M.F. Infrared Spectroscopy of Symbiotic Stars. III. First Orbits for Three S-Type Systems // *Astron. J.* 2001. V. 121. P. 2219.
12. Fekel F., Joyce R.R., Hinkle K.H. Infrared Spectroscopy of Symbiotic Stars. I. Orbits for Well-Known S-Type Systems // *Astron. J.* 2000. V. 119. P. 1375–1388.
13. Hoffmeister C. Helligkeitsschätzungen am Kometen // *Astron. Nachr.* 1915. V. 201. P. 43.
14. Yudin B.F., Kolotilov E.A., Shenavrin V.I., Tatarnikova A.A., Tatarnikov A.M. UVB photometry of the classical symbiotic star BF Cygni // *Astron. and Astrophys. Trans.* V. 24. P. 447. 2005.
15. Юдин Б.Ф., Шенаврин В.И., Колотилов Е.А., Татарникова А.А., Татарников А.М. ИК-фотометрия симбиотической звезды BF CYG: открытие эллипсоидальной переменности блеска красного гиганта // *Астрономический журнал.* 2005. Т. 82. С. 262–272.

ELLIPSOIDAL EFFECT OF COLD COMPONENTS OF SYMBIOTIC STARS

A. A. Tatarnikova, A. M. Tatarnikov

Lomonosov Moscow State University
Sternberg State Astronomical Institute

An analysis of the IR observation results of two symbiotic stars: North T-corona and BF Sygnus is presented. The variability of the star IR brightness is explained in the framework of the effect of ellipsoidal cold components of these binary systems which fill their Roche cavity completely.

Keywords: *symbiotic stars, ellipsoidal effect of cold components, Roche cavity*

Об авторах:

ТАТАРНИКОВА Анна Александровна – научный сотрудник государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В.Ломоносова, 119899, Москва, Университетский проспект, 13, МГУ, ГАИШ;

ТАТАРНИКОВ Андрей Михайлович – научный сотрудник государственного астрономического института им. П.К. Штернберга МГУ им. М.В.Ломоносова, *e-mail:* andrey.tatarnikov@gmail.com.