

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ МЕТОДАМИ СИНТЕЗА: ОТ БЕЛЫХ КАРЛИКОВ ДО ЗВЕЗД ВОЛЬФА–РАЙЕ И ЧЕРНЫХ ДЫР

© 2023 г. Э. А. Антохина^{1,*}, И. И. Антохин^{1,**}

¹Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова,
Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга, Москва, Россия

*E-mail: elant@sai.msu.ru

**E-mail: igor@sai.msu.ru

Поступила в редакцию 14.06.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

Методы синтеза кривых блеска и кривых лучевых скоростей в настоящее время являются одним из основных инструментов исследования тесных двойных систем (ТДС). В работе дан краткий обзор появления и развития методов синтеза и реализаций этих методов в ГАИШ МГУ, где к настоящему времени создан комплекс компьютерных программ для анализа наблюдений ТДС различных типов. Приведены результаты анализа предложенными нами алгоритмами трех интересных ТДС, находящихся на разных стадиях эволюции. В модели Роша с пятнами на звезде выполнен анализ необычных кривых блеска недавно открытой предкатаклизмической двойной системы GPX-TF16E-48. В модели с прецессирующим аккреционным диском проведен анализ рентгеновских кривых блеска микроквара SS 433. В модели Роша с учетом поглощения в мощном ветре звезды Вольфа–Райе выполнен анализ полученных из космоса кривых блеска массивной двойной системы с сильно эллиптической орбитой WR22. В результате детального анализа кривых блеска с привлечением спектроскопической информации найдены параметры ТДС и их компонентов. Статья основана на докладе, сделанном на астрофизическом мемориальном семинаре “Новое в понимании эволюции двойных звезд”, приуроченном к 90-летию профессора М.А. Свечникова.

Ключевые слова: затменные двойные системы, звезды Вольфа–Райе, белые карлики, черные дыры

DOI: 10.31857/S0004629923090013, **EDN:** XETYBU

1. ВВЕДЕНИЕ

Изучение тесных двойных систем представляет собой большой интерес для современной астрофизики, так как они являются одним из основных и самых надежных источников информации о фундаментальных параметрах звезд — их массах, радиусах, температурах, и, следовательно, светимостях. Также компонентами ТДС являются такие интереснейшие объекты, как звезды Вольфа–Райе, белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры, аккреционные диски, параметры которых можно определить из наблюдений двойных систем. В начале 1970-х годов появились первые методы синтеза кривых блеска, которые стали основным инструментом в исследовании ТДС. Они позволяют определять физические характеристики звезд и релятивистских объектов, необходимые для понимания физики звезд и построения теорий звездной эволюции.

Методы синтеза кривых блеска были предложены сразу несколькими авторами: Хиллом и

Хатчингсом [1], Вилсоном и Девиннеем [2], Вудом [3] и др. К настоящему времени наиболее часто используется алгоритм, предложенный Вилсоном и Девиннеем [2, 4]. Методы синтеза позволили анализировать наблюдения и получать параметры компонентов не только для классических двойных систем со сферическими звездами, но и для проэволюционировавших систем, в которых компоненты имеют сложную приливно-деформированную форму и неоднородное распределение температуры по поверхности.

Основная идея методов синтеза состоит в том, что сложные поверхности компонентов в двойной системе разбиваются на тысячи элементарных площадок. Для каждого элемента поверхности вычисляется выходящий поток излучения с учетом разнообразных физических эффектов. Затем в различных фазах орбитального периода эти потоки интегрируются по поверхности с учетом видимости площадок для наблюдателя и проверки затмений. В итоге вычисляется интегральный

поток излучения от системы на разных фазах — кривая блеска. При вычислении потока излучения учитываются эффекты гравитационного потемнения, потемнения к краю, эффект прогрева поверхности излучением спутника и другие более тонкие эффекты. В настоящее время с помощью методов синтеза моделируются не только кривые блеска, но и кривые лучевых скоростей, профили спектральных линий, спектры и кривые поляризации.

В нашей стране первые программы методов синтеза появились в конце 1970-х годов в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга. Бочкарев и др. [5] опубликовали модельные расчеты кривых блеска приливно-деформированной звезды в двойной системе с одним оптическим компонентом. Под руководством А.М. Черепашука в сотрудничестве с математиками физического факультета МГУ начали создаваться первые программы синтеза кривых блеска рентгеновских ТДС [6, 7]. Вычислительные алгоритмы постоянно совершенствовались, чтобы учесть более сложные физические эффекты. К настоящему времени в ГАИШ создан комплекс компьютерных программ для анализа кривых блеска ТДС различных типов. Помимо первых программ для моделирования рентгеновских двойных систем [6, 7], предложен алгоритм для рентгеновской двойной системы на эллиптической орбите [8], создан алгоритм для ТДС в модели Роша на круговой и эллиптической орбитах [9, 10], предложена модель с прецессирующим оптически толстым диском и джетами [11, 12], с пятнами на поверхности звезды [13], созданы модели, включающие аккреционные диски вокруг белого карлика и струи перетекающего вещества в системе [14, 15] и др. Также был предложен алгоритм для вычисления кривых лучевых скоростей звезд [16], создана модель для рентгеновских ТДС, позволяющая вычислять профили спектральных линий и кривые лучевых скоростей оптической звезды с учетом ее прогрева рентгеновским излучением компактного объекта [17]. Для анализа кривых блеска ТДС со звездами Вольфа—Райе был создан алгоритм, в котором стандартная модель Роша дополнена учетом сильного звездного ветра вокруг одного из компонентов [18, 19]. С использованием перечисленных вычислительных программ был выполнен анализ наблюдений большого количества ТДС разных типов, и определены физические параметры их компонентов.

С начала 1970-х годов в мире было создано достаточно много авторских программ синтеза, большинство из которых имеют свои индивидуальные особенности. Подробные обзоры разработанных алгоритмов приведены в статье Вилсона [20] и книге Каллафа и Милоне [21]. Также в настоящее время имеются компьютерные программы общего доступа, позволяющие выпол-

нять моделирование наблюдений двойных звезд и визуализировать результаты: Binary Maker (коммерческий продукт) и Nightfall (бесплатный продукт) (подробнее о них см. в [21]). Наиболее активно исследователями двойных систем используется бесплатный пакет программ PNOEBE (PPhysics Of Eclipsing BinariEs), предложенный в [22, 23], в его основе лежит алгоритм Вилсона—Девиннея [2, 4]. Это продвинутый пакет, который постоянно совершенствуется, в него вносятся дополнения, учитывающие различные эффекты. Полезно, что разработчики предлагают версии программного обеспечения для различных операционных систем. Пакет программ довольно сложен, и необходимо знание физики ТДС и навыки его использования, чтобы получать достоверные результаты. Авторы PNOEBE составили подробное руководство для пользователей, и, кроме того, для них организуются специальные международные обучающие школы.

В настоящее время авторские программы синтеза также продолжают активно развиваться, создаются более сложные, нестандартные модели, позволяющие изучать новые типы объектов и учитывать дополнительные физические эффекты, помогающие лучше понять физику звезд и физические процессы, происходящие в ТДС.

Цель данной работы — продемонстрировать достоинства методов синтеза и показать результаты нашей интерпретации нетривиальных кривых блеска трех ТДС, сильно различающихся по типу. Для анализа наблюдательных данных применялись три различные модели, созданные нами, две из них полностью оригинальны. Исследуемые двойные системы находятся на разных стадиях эволюции и содержат интереснейшие астрофизические объекты — белый карлик, черную дыру и звезду Вольфа—Райе.

2. ПРЕДКАТАКЛИЗМИЧЕСКАЯ СИСТЕМА GPX-TF16E-48

Этот раздел посвящен анализу необычных кривых блеска предкатаклизмической двойной системы GPX-TF16E-48 (2MASS J012943 + 6715). Объект был открыт в 2018 г. при получении обзора неба [24]. Найденный период переменности составляет 7.14 ч, наблюдается эллипсоидальная кривая блеска с амплитудой $\sim 0.2^m$, и в одном минимуме эллипсоидальной кривой происходит очень короткое полное затмение длительностью около 10 мин с малой амплитудой (рис. 1). В рамках международной компании по исследованию этого интересного объекта были получены спектральные и фотометрические наблюдения в пяти обсерваториях мира, возглавлял и координировал исследования сотрудник УрФУ В.В. Крушинский. Мы проводили интерпретацию многоцвет-

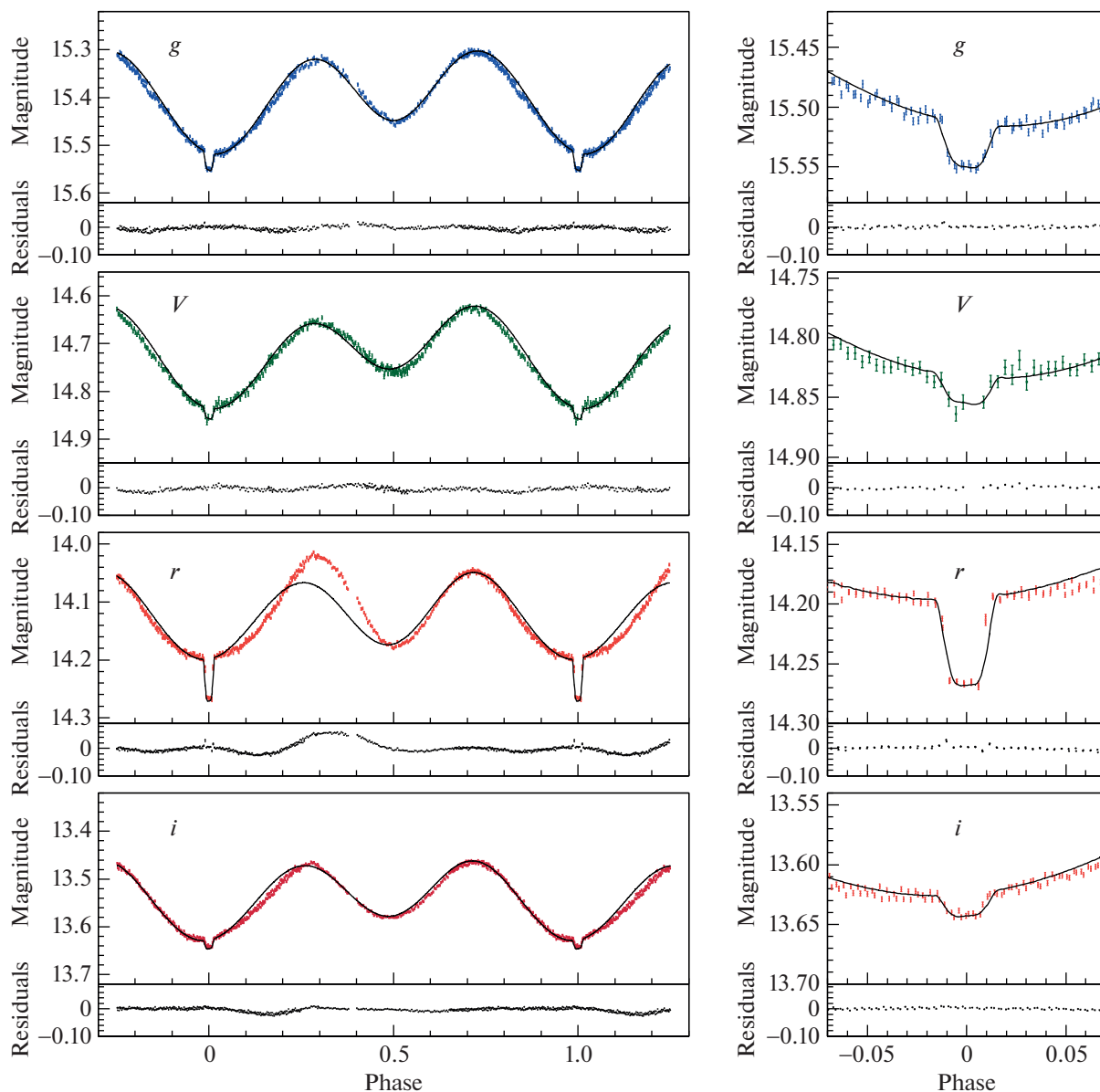


Рис. 1. Наблюдаемые и модельные кривые блеска GPX-TF16E-48 в фильтрах g , V , r , i . Сплошные линии — модельные кривые для оптимальных параметров двойной системы (табл. 1), точки — наблюдения. Слева показаны кривые блеска в течение полного орбитального периода. Справа — кривые блеска в области короткого полного затмения белого карлика (фаза 0). Наблюдаемая кривая блеска в фильтре r имеет аномальную форму, поэтому модельная кривая для r вычислена с геометрическими параметрами, полученными для остальных фильтров. Чтобы получить наблюдаемую глубину короткого затмения в r (справа), температуру белого карлика нужно формально существенно увеличить ($T_1 \sim 22\,000$ K). Таким образом, в фильтре r наблюдается избыток светимости (как выяснилось, он связан с циклотронным излучением вблизи белого карлика, подробнее см. текст).

ных кривых блеска GPX-TF16E-48 для определения параметров системы и компонентов.

Похожие, но отличающиеся амплитудами кривые блеска ранее были получены для RR Caeli и SDSS 0303 + 0054 (см. в [24]), которые были классифицированы как предкатаклизмические двойные системы, состоящие из белого карлика и звезды позднего спектрального класса. На

основе полученных спектральных наблюдений GPX-TF16E-48 сделана оценка спектрального класса звезды — K7 V и ее температуры — $T_2 = 4070$ K. Амплитуда эллипсоидальной переменности $\sim 0.2^m$ свидетельствует о том, что звезда K сильно деформирована и близка к заполнению внутренней критической полости Роша. Для оценки параметров компонентов двойной систе-

мы мы выполнили анализ четырех кривых блеска, полученных на телескопе 1.2 м в Коуровской обсерватории в апреле 2019 г. Амплитуды полного затмения белого карлика в различных диапазонах составляют $\sim 0.04^m$ (*SDSS g*), 0.03^m (*V*), 0.07^m (*SDSS r*), 0.03^m (*SDSS i*). Кривые блеска показывают заметную асимметрию, два максимума имеют разную яркость, также заметна асимметрия нисходящей и восходящей ветвей в области главного минимума. Это свидетельствует о наличии пятенной активности звезды Главной последовательности [25, 26].

Анализ кривых блеска проводился с использованием нашего программного кода для синтеза теоретических кривых блеска ТДС в модели Роша с учетом пятен на поверхности компонентов [27]. Часть входных параметров может быть зафиксирована, принимая во внимание имеющуюся информацию о системе. Средняя масса звезды спектрального класса K7 V составляет $M_2 \sim 0.64 M_\odot$ [28]. Также по спектральным данным получена оценка полуамплитуды кривой лучевых скоростей звезды $K_2 = 178$ км/с, по которой можно вычислить функцию масс $f_2(m) = 0.174 M_\odot$ и дать оценку массы белого карлика. Наше предварительное моделирование кривых блеска показало, что наклонение орбиты $i \sim 73^\circ$. Таким образом, с использованием третьего закона Кеплера по функции масс можно оценить массу белого карлика $M_1 \sim 0.72 M_\odot$ и отношение масс компонентов $q = M_2/M_1 = 0.88$. Это значение отношения масс было зафиксировано в дальнейшем анализе кривых блеска. Параметрами поиска являлись: наклонение орбиты i , коэффициенты заполнения компонентами полостей Роша μ_1, μ_2 и температура белого карлика T_1 . Для описания асимметричной формы кривых блеска понадобилось ввести одно или два пятна на поверхности звезды К. Поиск решений кривых блеска проводился в каждом цвете отдельно, детальное описание приведено в работе [24]. Полученные из наблюдений и модельные кривые блеска представлены на рис. 1.

Моделирование кривых блеска показало, что достаточно надежно определяются наклонение орбиты $i \sim 73.1^\circ$ и коэффициент заполнения звездой К полости Роша $\mu_2 \sim 0.86$. Таким образом, вторичная звезда имеет приливно-искаженную форму, но не заполняет полость Роша, т.е. в системе, вероятно, пока не происходит перетекание вещества от звезды К к компактному объекту через внутреннюю точку Лагранжа. Амплитуда внезатменной переменности двойной системы GPX-TF16E-48 связана в основном с приливно-вращательным искажением звезды К и наличием на ее тыльной стороне пятна с пониженной температурой (тыльная сторона звезды видна наблю-

дателю в промежутке фаз 0.75–0.25). Эффект отражения на поверхности вторичного компонента незначителен, так как оценка температуры белого карлика составляет $T_1 \leq 10\,000$ К как по УФ данным, так и из фотометрического решения для цветов g, V [24].

Узкое полное затмение белого карлика дает возможность оценить его температуру. Оказалось затруднительным описать затмение белого карлика во всех 4 фильтрах при одной и той же его температуре. Для фильтров g и V модельная кривая блеска соответствует наблюдениям при температуре белого карлика $T_1 \sim 8700 \pm 1000$ К (рис. 1, правая панель). Однако в красной области спектра, чтобы получить наблюдаемую глубину затмения, температуру белого карлика нужно увеличить. Для фильтра i температура увеличивается незначительно ($T_1 \sim 11\,000$ К), для фильтра r необходимо существенное увеличение температуры ($T_1 \sim 22\,000$ К). Такие значения температуры вступают в противоречие с информацией по УФ данным [24]. Также обращает на себя внимание аномальное поведение всей кривой блеска в фильтре r , когда первый максимум оказывается выше второго, в то время как в других цветах соотношение обратное. Этот феномен трудно понять, и возникает предположение о дополнительном источнике излучения в красной области спектра, и особенно в фильтре r . В нашей работе [24] была высказана гипотеза, что вероятное сильное магнитное поле белого карлика приводит к медленной аккреции ветра звезды К, т.е. объект относится к классу полярных звезд с медленным темпом аккреции (LARP). В результате может возникать циклотронное излучение, которое проявляется в красной области спектра.

Совсем недавно была опубликована работа с результатами поляриметрии нескольких преполярных [29]. Выводы нашей работы [24] подтвердились: у системы 2MASS J012943 + 6715 (GPX-TF16E-48) была обнаружена циклотронная эмиссия в красной области спектра, причем эмиссия наблюдалась точно в тех фазах орбиты, в которых присутствует избыток излучения на кривой блеска в красном фильтре.

В табл. 1 приведены основные параметры компонентов двойной системы, полученные из решения кривых блеска и по спектроскопическим данным. На рис. 2 показана компьютерная модель двойной системы в различных фазах орбитального периода.

3. МИКРОКВАЗАР SS 433

Уникальный объект SS 433 — пример необычной двойной системы, для которой нами были созданы специальные модели, они развивались и

Таблица 1. Параметры предкатаклизмической системы GPX-TF16E-48

Параметр	Белый карлик (компонент 1)	Звезда K7 V (компонент 2)
$q = M_2/M_1$ (отношение масс)	0.88	
$a, R_\odot$ (полуось орбиты)	2.082	
$i, ^\circ$ (наклонение орбиты)	73.1 ± 0.2	
μ (коэффициент заполнения полости Роша)	0.017 ± 0.002	0.86 ± 0.01
$M, M_\odot$ (масса)	0.72	0.64 (фикс.)
$R, R_\odot$ (радиус)	0.013 ± 0.003	0.645 ± 0.012
T, K (температура)	8700 ± 1100	4070 (фикс.)
$L_{bol}, L_\odot$ (болометрическая светимость)	$(8.7 \pm 4.0) \times 10^{-4}$	0.103 ± 0.003
$\log g$ (ускорение силы тяжести)	8.07 ± 0.21	4.66 ± 0.02

усложнялись в течение многолетних исследований. SS 433 – массивная затменная двойная система (орбитальный период $P_{orb} \simeq 13.082^d$), состоящая из оптической звезды-донора, заполняющей или переполняющей свою полость Роша, и релятивистского объекта, окруженного сверхкритическим аккреционным диском. Из центра диска вырываются узко-коллимированные джеты, скорость движения которых составляет $v \simeq 0.26c$. Аккреционный диск и джеты прецессируют в пространстве с периодом $P_{pres} \simeq 162.3^d$. Уже более 40 лет SS 433 активно изучается в различных диапазонах спектра, но главная загадка этой двойной системы в течение долгого времени остается неразгаданной – является ли релятивистский объект нейтронной звездой или черной дырой. Определить массы компонентов непросто, так как в спектре доминируют линии яркого сверхкритического аккреционного диска, и спектральные линии оптической звезды трудно обнаружить.

Еще в середине 1980-х годов мы выполнили анализ фотометрических кривых блеска SS 433 в полосе V [11, 30], для чего была создана модель двойной системы, включающая звезду в модели Роша, и прецессирующий сфероидальный оптически толстый аккреционный диск. В результате

анализа орбитальных кривых блеска на разных фазах прецессионного периода было найдено два решения задачи: отношение масс $q = M_x/M_v = 0.4$ и 1.2 , где M_x – масса релятивистского объекта, M_v – масса звезды. Был сделан вывод, что компактный объект, скорее всего, является черной дырой [11, 30].

В 1992 г. нами был выполнен анализ рентгеновских данных со спутника GINGA в диапазоне 4.6–27.6 кэВ. Была предложена более сложная модель двойной системы с прецессирующим диском и толстыми нерелятивистскими “джетами”, погруженными в конусообразную воронку [12]. В результате анализа орбитальных кривых блеска на трех фазах прецессионного периода был сделан вывод, что отношение масс в системе небольшое $q \simeq 0.15\text{--}0.25$, таким образом релятивистский объект может быть нейтронной звездой или маломассивной черной дырой. Этот результат противоречил выводам, сделанным ранее из анализа оптических кривых блеска [11, 30].

Существенный прогресс в исследованиях SS 433 произошел после запуска орбитальной рентгеновской и гамма-обсерватории INTEGRAL. Первые наблюдения в 2003 г. показали, что SS 433 является источником жесткого рентгеновского излучения с энергиями до 100 кэВ [31]. В 2003–

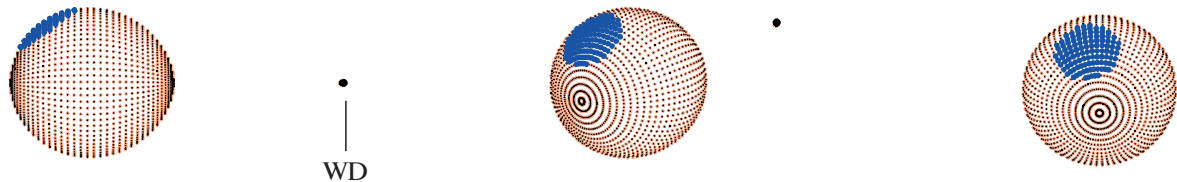


Рис. 2. Модель двойной системы GPX-TF16E-48 в трех фазах орбитального периода: 0.75, 0.90, 0.0 (слева направо). В фазе 0 происходит короткое полное затмение белого карлика. На поверхности звезды К присутствует холодное пятно, которое может объяснить асимметрию кривых блеска. Показано положение белого карлика, его размеры изображены условно для визуализации модели.

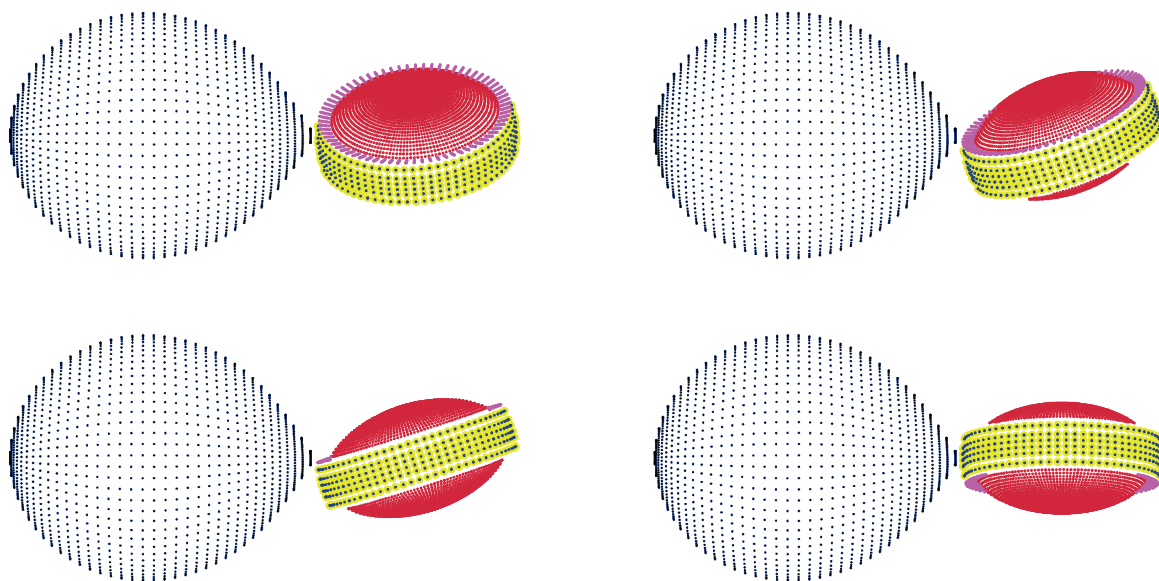


Рис. 3. Модель SS 433 для отношения масс $q = M_X/M_V = 0.3$. Показаны различные углы прецессии диска: $\alpha = 15^\circ$ и 70° (вверху), $\alpha = 118^\circ$ и 180° (внизу).

2011 гг. на спутнике INTEGRAL было получено 7 сетов наблюдений главного минимума SS 433 в диапазоне 18–60 кэВ вблизи момента T_3 прецессионной переменности (момент максимального раскрытия аккреционного диска в направлении наблюдателя) [32–34]. Также в различных фазах прецессии диска были получены наблюдения вне затмений, что позволило построить прецессионную кривую SS 433 и выполнить совместный анализ орбитальной и прецессионной переменности. Анализ новых рентгеновских данных привел к открытию протяженной горячей “короны” у основания релятивистских джетов, которая является источником жесткого рентгеновского излучения [32]. Детальное совместное исследование орбитальной и прецессионной переменности позволило наложить ограничения на отношение масс и на массу релятивистского объекта [33, 34].

Для анализа рентгеновских данных спутника INTEGRAL в диапазоне 18–60 кэВ мы применили модель, описанную в работе [12]. Геометрия модели для одного из решений показана на рис. 3 для различных фаз прецессии. Рассматривается тесная двойная система, состоящая из “нормальной” звезды, которая заполняет внутреннюю критическую полость Роша, и релятивистского объекта, окруженного геометрически толстым аккреционным диском. Под аккреционным диском понимается сам диск вместе с радиально оттекающей под действием давления излучения протяженной атмосферой. Диск наклонен к орбитальной плоскости на угол θ_0 . Релятивистские джеты направлены перпендикулярно экваториальной плоскости диска. Диск и джеты прецесси-

руют в пространстве и меняют свою ориентацию относительно “нормальной” звезды. Предполагается, что джеты, скорее всего, имеют двухкомпонентную структуру: толстый “джет” и тонкий джет. Наблюдаемые рентгеновские затмения, по-видимому, связаны с затмениями толстых “джетов”, которые представляют собой высокотемпературные области в атмосфере диска у основания тонких релятивистских джетов.

Фигура диска аппроксимируется поверхностью сфероида, нерелятивистские толстые “джеты” также аппроксимируются сфероидом, который может быть вытянут вдоль оси джета. Внутри аккреционного диска находится конусообразная воронка, угол раствора которой является параметром задачи. “Джеты” частично погружены в воронку, что качественно может объяснить изменение внезатменной рентгеновской светимости с фазой прецессии. В рентгеновском диапазоне излучают только толстые “джеты”, а звезда и диск в процессе орбитального и прецессионного движения затмевают их. Взаимное расположение компонентов системы по отношению к земному наблюдателю определяется наклоном орбиты $i \simeq 79^\circ$, углом наклона экваториальной плоскости диска к плоскости орбиты $\theta_0 \simeq 20^\circ$ (эти параметры хорошо известны из спектроскопии), углом прецессии α и фазой орбитального периода ϕ . В момент T_3 (максимальное раскрытие диска) $\alpha = 0^\circ$, в моменты, когда диск виден с “ребра”, $\alpha = 118^\circ$ и 242° . В главном минимуме (фаза $\phi = 0$) оптическая звезда находится впереди диска.

Расчеты в широком диапазоне параметров модели показали, что для малых отношений масс

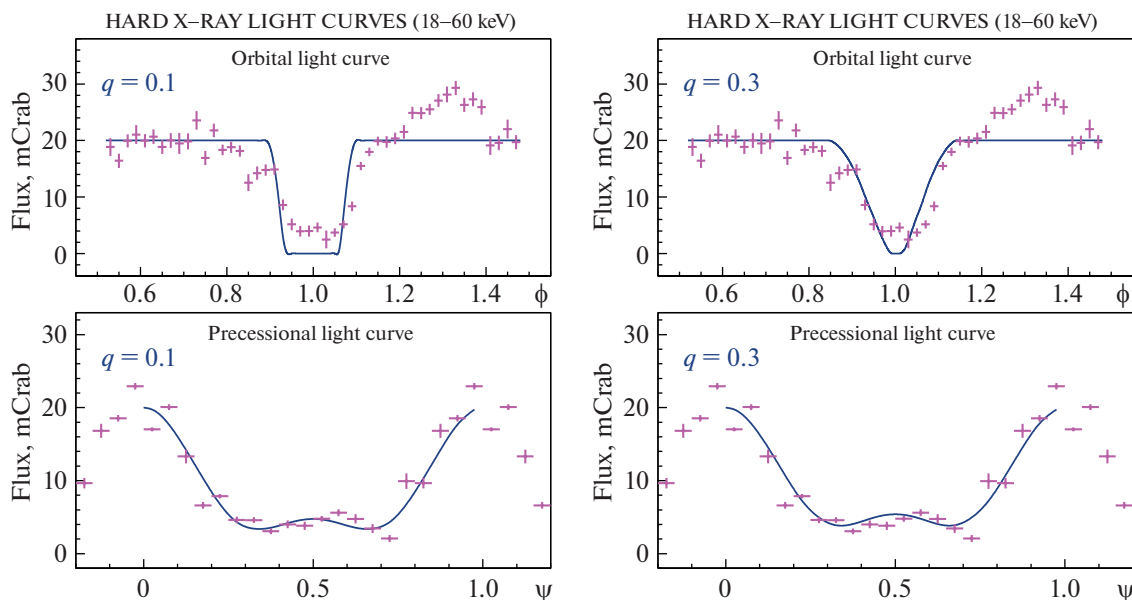


Рис. 4. Рентгеновские кривые блеска SS 433 в диапазоне 18–60 кэВ. Вверху приведены орбитальные кривые для $q = 0.1$ (слева) и $q = 0.3$ (справа). Внизу — прецессионные кривые блеска для $q = 0.1$ (слева) и $q = 0.3$ (справа). Сплошные линии — модельные кривые блеска при оптимальных параметрах, крестики — наблюдательные данные. Для малого значения $q = 0.1$ не удается одновременно описать орбитальную и прецессионную переменность, для $q = 0.3$ орбитальная и прецессионная переменность описываются удовлетворительно.

$q < 0.3$ невозможно одновременно описать орбитальную и прецессионную переменность, для примера на рис. 4 (слева) показаны кривые блеска для $q = 0.1$. С увеличением значения отношения масс это становится возможным. Было показано, что модельные кривые блеска достаточно хорошо описывают как орбитальную, так и прецессионную переменность SS 433 для диапазона отношений масс $q \simeq 0.3–0.5$ (см. рис. 4, справа). Из анализа кривых блеска было найдено, что угол раствора воронки составляет $\sim 70^\circ–80^\circ$ и видимые горизонтальные размеры “джетов” близки к размерам диска, т.е. над диском присутствует широкая горячая “корона”, являющаяся источником жесткого рентгеновского излучения. При прецессии “корона” частично затмевается краями аккреционного диска (см. рис. 3), что обеспечивает наблюдаемую прецессионную переменность. По результатам анализа рентгеновских кривых SS 433, полученных на обсерватории INTEGRAL, было сделано заключение, что отношение масс в системе $q \simeq 0.3–0.5$, и релятивистский объект с большой вероятностью является черной дырой [33, 34].

Позднее были опубликованы работы, в которых было предположено, что звезда-донор в SS 433 может значительно переполнять свою внутреннюю критическую полость Роша. Такие предположения высказаны как на основе детальных газодинамических расчетов течения веще-

ства в ТДС [35], так и при исследовании эволюции массивных рентгеновских двойных систем [36] (подробнее см. в обзорной статье Черепашука и др. [37]). Мы проверили, как в этом случае могут измениться выводы, сделанные нами ранее в [33, 34], рассмотрев три варианта модели. 1) Поверхность звезды совпадает с внутренней критической поверхностью (параметр переполнения полости Роша $f = 0$). Этот случай был уже исследован в наших предыдущих работах [33, 34]. 2) Поверхность звезды достигает внешней критической поверхности ($f = 1$). 3) Промежуточный случай, когда эквипотенциальная поверхность звезды находится в пространстве между внутренней и внешней критическими эквипотенциальными поверхностями ($f = 0.5$). Для двух значений параметра переполнения звездой полости Роша $f = 0.5$ и $f = 1$ был выполнен новый анализ орбитальных рентгеновских кривых блеска (18–60 кэВ) при различных отношениях масс q (подробнее см. [37]).

Результаты расчетов проиллюстрированы на рис. 5. Слева приведены орбитальные кривые для $q = 0.8$. Если в случае заполнения звездой внутренней полости Роша ($f = 0$) для решения задачи ширина теоретического минимума заметно меньше ширины наблюдаемого, то при переполнении звездой полости Роша ($f = 1$) теоретический минимум хорошо соответствует наблюдениям, что несложно понять, так как размер звезды увели-

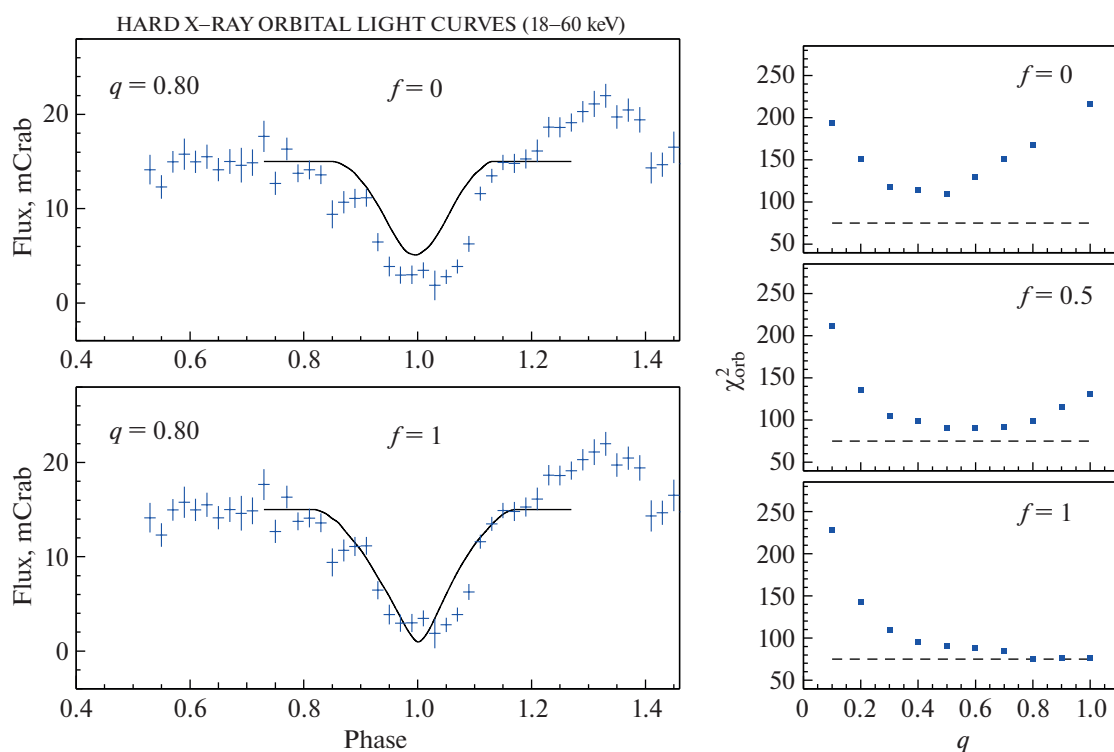


Рис. 5. Рентгеновские кривые блеска SS 433 (18–60 кэВ) в зависимости от параметра переполнения звездой полости Роша при $q = 0.8$ (слева). Сплошные линии – модельные кривые, крестики – наблюдательные данные. Вверху – случай заполнения звездой внутренней полости Роша ($f = 0$), внизу – звезда переполняет внутреннюю полость Роша ($f = 1$). Справа показаны графики невязок χ^2 для модельных орбитальных кривых при трех значениях параметра переполнения полости Роша $f = 0, 0.5, 1$ в зависимости от отношения масс q . Штриховые линии – минимальное значение χ^2 для $f = 1$.

чился. Кривые невязок для разных значений f показаны справа в зависимости от q . Видно, что с увеличением степени переполнения полости Роша f возрастают значения q , при которых модельные кривые соответствуют наблюдениям. Принимая во внимание прецессионную переменность, был сделан вывод, что при переполнении звездой внутренней полости Роша возможные значения отношения масс в SS 433 находятся в диапазоне $q \simeq 0.4\text{--}0.8$, и релятивистский объект, наиболее вероятно, является черной дырой [37].

Недавно независимым методом в статье Черепашука и др. [38] сделана оценка отношения масс в SS 433. В этой работе был открыт эксцентриситет орбиты SS 433, и доказано увеличение орбитального периода. По оценкам авторов отношение масс $q = M_X/M_V > 0.8$ и масса релятивистского объекта $M_X > 8 M_\odot$. Таким образом, совокупность наблюдательных данных, полученных к настоящему времени (подробнее см. [37, 38]), свидетельствует в пользу гипотезы о черной дыре в двойной системе SS 433.

4. МАССИВНАЯ ДВОЙНАЯ СИСТЕМА WR22

Двойная система WR22 состоит из звезды O9 III–V и звезды WN7h, массивной и горячей звезды с мощным звездным ветром. WR22 – одна из самых ярких звезд Вольфа–Райе на небе ($V = 6.4^m$), она расположена на южном небе в созвездии Киля и является членом ассоциации Сагина OB1, содержащей большое количество массивных звезд ранних спектральных классов. Система имеет длительный орбитальный период $P_{\text{orb}} = 80.336^d$ и большой эксцентриситет орбиты $e \sim 0.6$, она является спектроскопической двойной. Также было установлено, что система является затменно-двойной с единственным за период узким затмением глубиной $\sim 0.1^m$ (см. в [39]). Из-за большого периода фотометрические наблюдения представляют собой непростую задачу.

Согласно спектральным данным, в атмосфере звезды WR содержится значительное количество водорода ($\sim 44\%$ [40]). Спектр относят к подтипу WNL+abs, который выделяется среди звезд WR, такие звезды являются самыми яркими и массив-

ными. Предполагается, что они находятся на переходной стадии эволюции наиболее массивных Of звезд ($>60 M_{\odot}$) к звездам WR других типов, определение параметров таких звезд является актуальной задачей.

Спектроскопические элементы орбиты и отношение масс компонентов определены независимо в двух работах [41, 42]. Так как в спектре системы абсорбционные линии звезды O9 III–V очень слабы, построение кривых лучевых скоростей обоих компонентов – сложная задача, также оказалось сложным определить класс светимости звезды O9 (ее относят либо к звездам ГП, либо к гигантам), при этом оценочные радиусы звезды O9 отличаются почти в 2 раза. Согласно спектроскопическим данным [42], минимальная масса звезды Вольфа–Райе составляет $\sim 55 M_{\odot}$, и до недавнего времени она считалась самой массивной звездой WR, которую удалось “взвесить”, т.е. получить надежную оценку массы. Для более точной оценки массы нужно знать наклонение орбиты, которое можно получить из кривой блеска, кроме того, из кривых блеска можно оценить другие параметры компонентов.

С целью определения параметров системы WR22 были получены и проанализированы ряды наблюдений из космоса [39]. Наблюдения выполнялись в 2017–2018 гг. на телескопе BRITe-Heweliusz космического проекта BRITe-Constellation [43]. Длительность ряда фотометрических данных в красном фильтре составляет ~ 300 дней. Наблюдаемая кривая блеска включает три полных орбитальных цикла системы, в течение орбитального цикла наблюдается только один минимум $\sim 0.08^m$ (при этом звезда WR находится перед звездой O9, момент минимума почти совпадает с моментом прохождения периастра). Форма минимумов различается для разных орбитальных циклов (рис. 6, слева вверх), что связывают с неоднородной структурой звездного ветра [39]. Для анализа мы использовали кривую блеска, объединяющую три цикла (рис. 6, справа вверх показана область минимума, внизу – полная орбитальная кривая блеска, свернутая с орбитальным периодом).

Анализ кривых блеска WR22 [39] был выполнен с использованием модели, предложенной нами для исследования двойных систем, в состав которых входят звезды с сильным звездным ветром [18]. Стандартная модель Роша была дополнена учетом поглощения в звездном ветре вокруг одного из компонентов, основным механизмом поглощения считается электронное рассеяние, для скорости звездного ветра используется общепринятый β -закон. Для учета поглощения в звездном ветре задаются следующие параметры: $\dot{M}_{WR}$ – темп потери массы звездой Вольфа–Райе, V_{∞} – скорость звездного ветра на бесконечности,

β – параметр в законе скорости ветра, μ_e – средний электронный молекулярный вес вещества в звездном ветре, который зависит от соотношения водорода и гелия.

При вычислении модельных кривых блеска были приняты спектроскопические элементы из работы [42]. Поскольку на кривой блеска присутствует только одно затмение, которое к тому же может быть не геометрическим, а чисто атмосферным, найти из кривой блеска относительные радиусы компонентов невозможно. Поэтому мы были вынуждены зафиксировать радиусы обеих звезд. Для звезды O рассматривались два варианта класса светимости – O9 V (Модель 1) и O9 III (Модель 2). Соответствующие радиусы и температуры приняты согласно [44]. Для звезды WR радиус был принят согласно [40]. Параметр β в законе скорости ветра был зафиксирован равным 1, что считается характерной величиной для звезд WNh. Детальное описание процедуры решения кривой блеска WR22 содержится в работе [39]. Параметры модели и результаты решения кривой блеска представлены в табл. 2.

При минимизации по параметрам было получено два решения задачи, соответствующие двум возможным классам светимости звезды O9 V (Модель 1) и O9 III (Модель 2). Более предпочтительным по физическим соображениям является решение для звезды O9 V, поскольку в этой модели полученная температура звезды WN7 находится в хорошем согласии с данными [40]. В Модели 2 температура WN7 более, чем в два раза превышает значение, определенное по анализу спектра [40]. Установлено, что затмение в системе является комбинированным, т.е. сочетает геометрическое и атмосферное затмения звезды O9 V звездой WN7 и ее ветром. Показано, что попытка решения кривой блеска системы в модели Роша без учета влияния ветра приведет к получению заведомо неверных параметров. Несмотря на присутствие на кривых блеска всего одного неглубокого затмения, удалось надежно определить наиболее интересные и до сих пор остававшиеся неизвестными параметры WR22: угол наклонения орбиты $i = 83.5^\circ$, $T_{WR} \simeq 50\,000$ К (что хорошо согласуется с результатами спектрального анализа [40]), темп потери массы звездой Вольфа–Райе $\dot{M}_{WR} \sim 2 \times 10^{-5} M_{\odot}/\text{год}$, уточненные значения масс компонентов $M_{WR} = 56.4 M_{\odot}$, $M_O = 21.0 M_{\odot}$.

На рис. 6 показаны наблюдаемая и модельная кривые блеска для решения задачи в Модели 1. На рис. 7 показана геометрия затмения звезды O9 V звездой WN7.

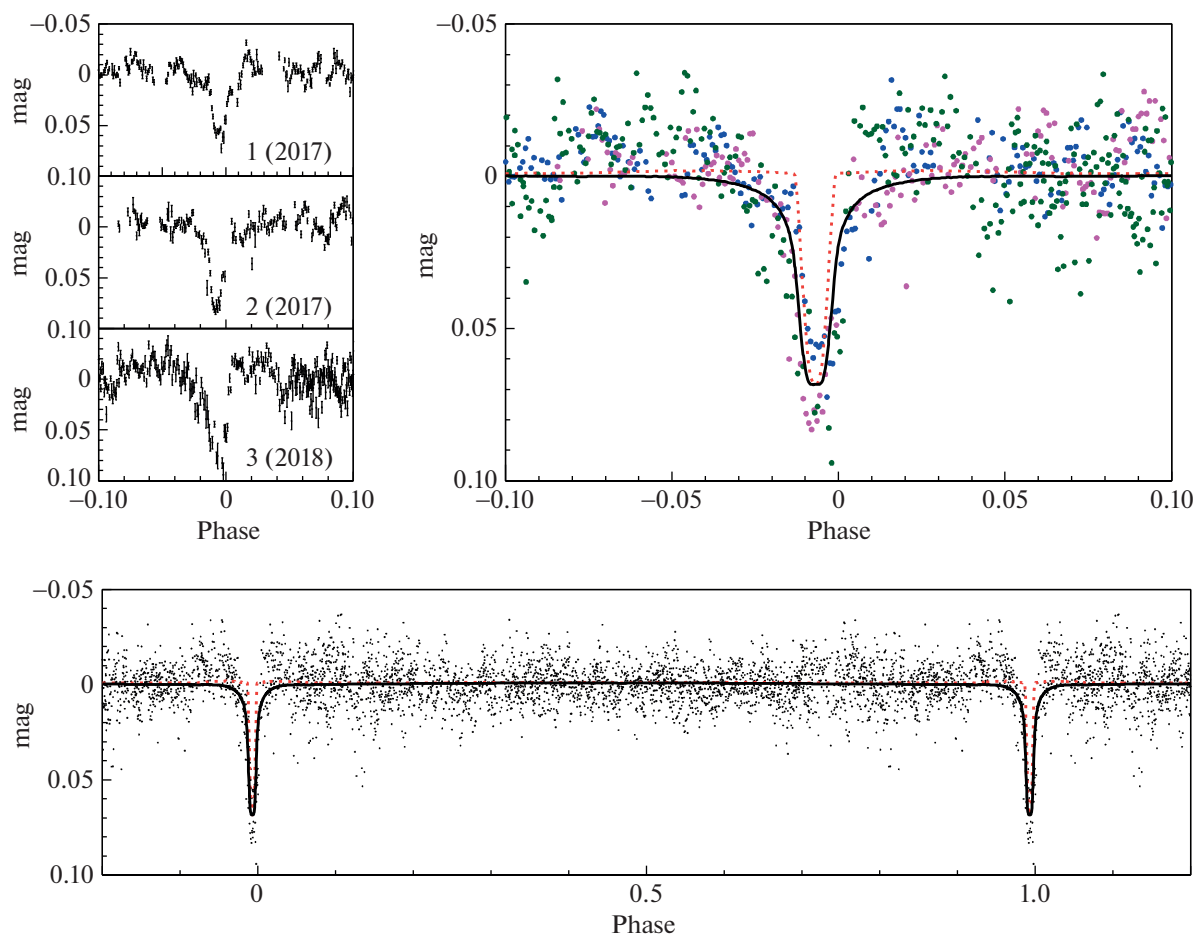


Рис. 6. Наблюдаемые и модельные кривые блеска WR22. Верхняя панель: слева — наблюдаемые минимумы трех орбитальных кривых, справа — решение кривых блеска в Модели 1 в области минимума. Нижняя панель: полная орбитальная кривая для решения задачи в Модели 1. Сплошная черная линия — модельная кривая блеска для оптимальных параметров (табл. 2), красная пунктирная линия — компонент модельной кривой блеска, соответствующий модели Роша без учета поглощения в ветре WR. Точки различных цветов — наблюдаемые минимумы в три различные эпохи (см. сверху слева).

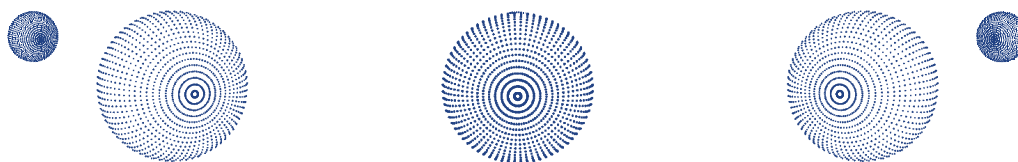


Рис. 7. Модель системы WR22 для наилучших параметров Модели 1 (WN7 + O9 V). Приведены изображения для фаз (слева направо) 0.99, 0.0, 0.01 (момент соединения соответствует фазе 0.0). Звезда WN7 находится впереди звезды O9 V, ветер звезды WN7 на рисунке не показан. В фазах 0.99 и 0.01 происходит атмосферное затмение звезды O9 V ветром звезды WN7.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе сделан краткий обзор методов синтеза ТДС, включая уникальные модели, созданные нашей группой в ГАИШ МГУ, и продемонстрировано, как применение методов синтеза позволяет получить физические характеристики компонентов ТДС различных типов.

1) Выполнен анализ многоцветных кривых блеска недавно открытой предкатаклизмической системы GPX-TF16E-48 с использованием нашего программного кода в модели Роша с учетом пятен на поверхности компонентов. Моделирование кривых блеска с привлечением спектроскопической информации позволило

Таблица 2. Основные параметры системы WR22 для Модели 1 (WN7 + O9 V)

Параметр	Звезда WN7		Звезда O9V
Параметры системы и компонентов			
P_{orb} , дни (орбитальный период)	80.336 ^a		
e (эксцентриситет)	0.598 ^a		
i , ° (наклонение орбиты)	83.5 ± 0.4		
ω , ° (долгота периастра)	268.2 ^a		88.2 ^a
$M \sin^3 i$, $M_{\odot}$	55.3 ^a		20.6 ^a
M , $M_{\odot}$ (масса звезды)	56.4		21.0
R , $R_{\odot}$ (радиус звезды)	22.65 ^c		7.53 ^b
T , К (температура звезды)	32900 ^b		50000
μ (коэффициент заполнения полости Роша)	0.340		0.184
$F_{\text{O}}/F_{\text{WR}}$ (отношение потоков O/WR)	0.064		
Параметры ветра звезды WR			
$\dot{M}_{\text{WR}}$, 10 ⁻⁵ $M_{\odot}$ /год (темп потери массы)	1.9 ± 0.2		—
β (параметр в законе скорости)	1.0		—
V_{∞} , км/с (скорость на бесконечности)	1785 ^c		—
μ_e (средний электронный молекулярный вес)	1.39 ^c		—
τ_0 (референсная оптическая толща)	0.0064 ± 0.0006		—

Примечание. Надстрочные символы a , b , c — ссылки на статьи, данные из которых приведены в таблице: a — [42], b — [44], c — [40].

оценить параметры системы и компонентов: наклонение орбиты $i = 73.1^{\circ} \pm 0.2^{\circ}$, отношение масс $q = M_2/M_1 \approx 0.88$, параметры звезды K7 V $M_2 \approx 0.64 M_{\odot}$, $R_2 = 0.645 \pm 0.012 R_{\odot}$, $T_2 \approx 4070$ К, параметры белого карлика $M_1 \approx 0.72 M_{\odot}$, $R_1 = 0.013 \pm 0.003 R_{\odot}$, $T_1 = 8700 \pm 1100$ К [24]. Показано, что вторичная звезда не заполняет свою полость Роша, и в системе, вероятно, пока не происходит перетекания вещества от звезды К к компактному объекту через внутреннюю точку Лагранжа. Наблюдаемая кривая блеска в фильтре r имеет аномальную форму, было высказано предположение о наличии дополнительного источника излучения в красной области спектра, которым может быть циклотронное излучение, возникающее при медленной аккреции ветра звезды К в сильном магнитном поле белого карлика. Этот вывод был недавно независимо подтвержден в работе [29], в которой была обнаружена циклотронная эмиссия в красной области спектра.

2) Кривые блеска микроквара SS 433 исследовались в течение многих лет, для этого нами были созданы специальные модели, они развивались и усложнялись. Существенный прогресс в исследованиях SS 433 произошел после запуска орбитальной рентгеновской и гамма-обсерватории INTEGRAL. Полученные наблюдения в диапазоне 18–60 кэВ привели к открытию горячей протяженной “короны” у основания релятивист-

ских джетов, которая является источником жесткого рентгеновского излучения. Совместный анализ орбитальной и прецессионной переменности в модели двойной системы с прецессирующим диском, воронкой и погруженной в нее “коронной” позволил наложить ограничения на отношение масс $q = M_{\text{X}}/M_{\text{V}} \simeq 0.3\text{--}0.5$, а с учетом возможного переполнения оптической звездой полости Роша возможные значения отношения масс возрастают: $q \simeq 0.4\text{--}0.8$. Полученные оценки массы релятивистского объекта соответствуют черной дыре. Независимые наблюдательные данные также свидетельствуют в пользу того, что релятивистский объект в SS 433, скорее всего, является черной дырой.

3) Выполнен анализ кривых блеска системы WR22 (WN7h + O9 V) в течение трех полных орбитальных циклов ($P_{\text{orb}} = 80.3^{\text{д}}$). Анализ кривых блеска проводился в рамках оригинальной модели с учетом поглощения в ветре звезды Вольфа–Райе. Показано, что учет звездного ветра существенно влияет на результаты решения кривой блеска. Получено два решения задачи, соответствующие двум возможным классам светимости звезды O9, более предпочтительным по физическим соображениям является решение для звезды O9 V. Найдено, что затмение в системе является комбинированным, т.е. сочетанием геометрического и атмосферного затмения звезды O9 V звездой WN7 и ее ветром. Несмотря на наличие на

кривых блеска всего одного неглубокого затмения, удалось надежно определить наиболее интересные и до сих пор остававшиеся неизвестными параметры WR22: $i = 83.5^\circ$, $T_{\text{WR}} \simeq 50\,000$ К, темп потери массы звездой Вольфа–Райе $\dot{M}_{\text{WR}} \sim 2 \times 10^{-5} M_\odot/\text{год}$, уточненные значения масс компонентов $M_{\text{WR}} \simeq 56.5 M_\odot$, $M_O \simeq 21 M_\odot$.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа Э.А.А. поддержана Междисциплинарной научно-образовательной школой МГУ им. М.В. Ломоносова “Фундаментальные и прикладные космические исследования”. Работа И.И.А. поддержана грантом Российского научного фонда 23-12-00092 (анализ кривых блеска, разработка методики учета звездного ветра в двойной системе).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. G. Hill and J. B. Hutchings, *Astrophys. J.* **162**, 265 (1970).
2. R. E. Wilson and E. J. Devinney, *Astrophys. J.* **166**, 605 (1971).
3. D. B. Wood, *Astron. J.* **76**, 701 (1971).
4. R. E. Wilson, *Astrophys. J.* **234**, 1054 (1979).
5. Н. Г. Бочкарев, Е. А. Карицкая, Н. И. Шакура, *Астрон. журн.* **56**, 16 (1979).
6. Н. И. Балог, А. В. Гончарский, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **58**, 67 (1981).
7. N. I. Balog, A. V. Goncharov, Z. Yu. Metlitskaya, and A. M. Cherepashchuk, *Peremennye Zvezdy* **21**, 695 (1982).
8. Т. С. Хрузина, *Астрон. журн.* **62**, 94 (1985).
9. Э. А. Антохина, *Астрон. журн.* **65**, 1164 (1988).
10. Э. А. Антохина, *Астрон. журн.* **73**, 532 (1996).
11. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **64**, 562 (1987).
12. Э. А. Антохина, Е. В. Сейфина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **69**, 282 (1992).
13. Т. С. Хрузина и А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **72**, 203 (1995).
14. Т. С. Хрузина, *Астрон. журн.* **82**, 881 (2005).
15. Т. С. Хрузина, *Астрон. журн.* **88**, 463 (2011).
16. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **71**, 420 (1994).
17. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, В. В. Шиманский, *Астрон. журн.* **82**, 131 (2005).
18. E. A. Antokhina, I. I. Antokhin, and A. M. Cherepashchuk, *Astron. Astrophys. Trans.* **28**, 3 (2013).
19. E. A. Antokhina, I. I. Antokhin, and A. M. Cherepashchuk, *Bull. Crimean Astrophys. Observ.* **109**, 54 (2013).
20. R. E. Wilson, *Publ. Astron. Soc. Pacific* **106**, 921 (1994).
21. J. Kallrath and E. F. Milone, *Eclipsing Binary Stars: Modeling and Analysis* (New York: Springer-Verlag, 2009).
22. A. Prsa and T. Zwitter, *Astrophys. J.* **628**, 426 (2005).
23. A. Prsa, K. E. Conroy, M. Horvat, H. Pablo, et al., *Astrophys. J. Suppl.* **227**, id. 29 (2016).
24. V. Krushinsky, P. Benni, A. Burdanov, I. Antokhin, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **493**, 5208 (2020).
25. C. Tappert, B. T. Gansicke, L. Schmidtobreick, A. Aun-gwerojwit, R. E. Mennickent, and D. Koester, *Astron. and Astrophys.* **474**, 205 (2007).
26. S. G. Parsons, C. A. Hill, T. R. Marsh, B. T. Gansicke, et al., *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **458**, 2793 (2016).
27. E. A. Antokhina, A. F. J. Moffat, I. I. Antokhin, J.-F. Bertrand, and R. Lamontagne, *Astrophys. J.* **529**, 463 (2000).
28. T. S. Boyajian, K. von Braun, G. van Belle, H. A. McAlister, et al., *Astrophys. J.* **757**, id. 112, (2012).
29. P. Hakala, S. G. Parsons, T. R. Marsh, B. T. Gansicke, G. Ramsay, A. Schwobe, and J. J. Hermes, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **513**, 3858 (2022).
30. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Письма в Астрон. журн.* **11**, 10 (1985).
31. A. M. Cherepashchuk, R. A. Sunyaev, E. V. Seifina, I. E. Pan-chenko, S. V. Molkov, and K. A. Postnov, *Astron. and Astrophys.* **411**, L441 (2003).
32. A. M. Cherepashchuk, R. A. Sunyaev, S. N. Fabrika, K. A. Postnov, et al., *Astron. and Astrophys.* **437**, 561 (2005).
33. A. M. Cherepashchuk, R. A. Sunyaev, K. A. Postnov, E. A. Antokhina, and S. V. Molkov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **397**, 479 (2009).
34. A. M. Cherepashchuk, R. A. Sunyaev, S. V. Molkov, E. A. Antokhina, K. A. Postnov, and A. I. Bogomazov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **436**, 2004 (2013).
35. K. Pavlovskii, N. Ivanova, K. Belczynski, and K. X. Van, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **465**, 2092 (2017).
36. E. P. J. van den Heuvel, S. F. Portegies Zwart, and S. E. de Mink, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **471**, 4256 (2017).
37. A. M. Cherepashchuk, K. Postnov, S. Molkov, E. Antokhina, and A. Belinski, *New Astronomy Rev.* **89**, id. 101542 (2020).
38. A. M. Cherepashchuk, A. A. Belinski, A. V. Dodin, and K. A. Postnov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **507**, L19 (2021).
39. G. Lenoir-Craig, I. I. Antokhin, E. A. Antokhina, N. St-Louis, and A. F. J. Moffat, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **510**, 246 (2022).
40. W.-R. Hamann, G. Grafener, A. Liermann, R. Hainich, et al., *Astron. and Astrophys.* **625**, id. A57 (2019).
41. G. Rauw, J.-M. Vreux, E. Gosset, D. Hutsemekers, P. Magain, and K. Rochowicz, *Astron. and Astrophys.* **306**, 771 (1996).
42. J. Schweickhardt, W. Schmutz, O. Stahl, Th. Szeifert, and B. Wolf, *Astron. and Astrophys.* **347**, 127 (1999).
43. W. W. Weiss, S. M. Rucinski, A. F. J. Moffat, A. Schwarzenberg-Czerny, et al., *Publ. Astron. Soc. Pacific* **126**, 573 (2014).
44. F. Martins, D. Schaerer, and D. J. Hillier, *Astron. and Astrophys.* **436**, 1049 (2005).

DETERMINATION OF THE CLOSE BINARY SYSTEMS PARAMETERS BY SYNTHESIS METHODS: FROM WHITE DWARFS TO WOLF–RAYET STARS AND BLACK HOLES

E. A. Antokhina^a and I. I. Antokhin^a

^a*Sternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Synthesis methods for light and radial velocity curves are currently one of the main tools for studying close binary systems (CBS). The paper gives a brief overview of the history and development of the methods and their implementations at the SAI MSU, where a set of computer programs has been created to analyze observations of various types of CBS. As a demonstration, we present the results of the analysis by our algorithms of three interesting CBSs at different evolutionary stages. An analysis of the unusual light curves of the recently discovered pre-cataclysmic binary GPX-TF16E-48 was performed using the Roche model with spots on the normal star. The X-ray light curves of the microquasar SS433 were analyzed in a model with a precessing accretion disk. Thanks to the photometric data obtained from space, the highly elliptical Wolf–Rayet binary WR22 was studied in the Roche model accounting for the absorption in the powerful wind of the Wolf–Rayet star. As a result of this detailed analysis of the light curves and involving spectroscopic information, the parameters of the CBSs and their components were found. The paper is based on a talk presented at the astrophysical memorial seminar “Novelties in Understanding the Evolution of Binary Stars”, dedicated to the 90th anniversary of Professor M.A. Svechnikov.

Keywords: eclipsing binary stars, Wolf–Rayet stars, white dwarfs, black holes