

РЕНТГЕНОВСКАЯ АСТРОНОМИЯ И ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ

© 2023 г. А. М. Черепашук^{1,*}

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

*E-mail: cherepashchuk@gmail.com

Поступила в редакцию 12.06.2023 г.

После доработки 17.07.2023 г.

Принята к публикации 17.07.2023 г.

Открытие в 1962 г. компактного источника Sco X-1 — первого рентгеновского источника, расположенного за пределами Солнечной системы, ознаменовало новую (“золотую”) эру в исследованиях тесных двойных систем (ТДС). Были открыты аккрецирующие нейтронные звезды и первые кандидаты в черные дыры в ТДС. Возможность “взвешивать” нейтронные звезды и черные дыры в ТДС позволила отличать аккрецирующие черные дыры от нейтронных звезд. Развилась теория аккреции вещества на релятивистские объекты в ТДС, а также теория эволюции ТДС с обменом масс вплоть до самых поздних стадий, включая двойные черные дыры и нейтронные звезды. Тесные двойные системы стали передним фронтом астрофизики. Последующие гравитационно-волновые наблюдения и наблюдения на межконтинентальном радиоинтерферометре ЕНТ с угловым разрешением $\sim 10^{-5}$ сек позволили окончательно доказать существование черных дыр во Вселенной. Таким образом, современный триумф черных дыр в значительной степени был обеспечен развитием науки о тесных двойных системах. 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: рентгеновское излучение, двойные звезды, нейтронные звезды, черные дыры, эволюция, обмен масс

DOI: 10.31857/S0004629923090025, **EDN:** UTBZEW

1. ВВЕДЕНИЕ

В 1962 г. с борта американской ракеты Аэробе (Aerobee) под руководством профессора Рикардо Джаккони (в будущем Нобелевского лауреата) был открыт первый рентгеновский источник, расположенный за пределами Солнечной системы [1]. Этот источник был отождествлен с переменной голубой звездой ~ 12.7 звездной величины в созвездии Скорпиона и получил название Sco X-1. Тем самым было положено начало рентгеновской астрономии. Объект Sco X-1 оказался маломассивной рентгеновской двойной системой, состоящей из маломассивной оптической звезды с массой $\sim 0.4 M_{\odot}$, которая является донором вещества, и аккрецирующей нейтронной звезды — мощного рентгеновского источника со светимостью $\sim 10^{37}$ эрг/с (см., например, [2, 3] и ссылки там). Таким образом, открытие первого рентгеновского источника Sco X-1 положило начало исследованиям тесных двойных систем на качественно новом уровне. В случае рентгеновских двойных систем рентгеновские и оптические наблюдения прекрасно дополняют друг друга: рентгеновские наблюдения позволяют обна-

ружить аккрецирующий релятивистский объект (нейтронную звезду или черную дыру), а оптические наблюдения по движению оптической звезды-донора вещества дают возможность оценить массу релятивистского объекта. Известно, с учетом эффектов ОТО, что если в конце эволюции массивной звезды масса ее коллапсирующего ядра превышает $3 M_{\odot}$, то образуется черная дыра; если же масса этого ядра менее $3 M_{\odot}$, то образуется нейтронная звезда или белый карлик. Поэтому возможность “взвешивать” релятивистские объекты делает тесные двойные системы мощным инструментом для отождествления компактных рентгеновских источников с нейтронными звездами и черными дырами. Таким образом, с началом эры рентгеновской астрономии тесные двойные системы стали передним фронтом современной астрофизики (см. обзор [4] и ссылки там).

2. ЧЕТЫРЕ ЭПОХИ ИССЛЕДОВАНИЙ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Тесные двойные системы (ТДС) всегда привлекали внимание ученых, поскольку, в частно-

сти, по движению и взаимодействию компонентов системы можно определять массы, радиусы и температуры звезд независимо от расстояния до системы (система может находиться даже в другой галактике). Можно выделить следующие эпохи исследований ТДС. Отметим, что это выделение условно, поскольку разные эпохи взаимно проникают друг в друга. Например, архивные фотографические наблюдения используются в астрономии до сих пор. Наиболее определенно можно указать лишь начало соответствующих эпох.

2.1. Эпоха визуальных и фотографических наблюдений ТДС (1782–1950 гг.)

Первые визуальные наблюдения затменных двойных систем проводились еще в 18-м веке. В ноябре 1782 г.—мае 1783 г. Эдвардом Пиготтом и Джоном Гудрайком была открыта строгая периодичность изменения блеска Алголя (β Per). Гудрайк же высказал смелую по тем временам гипотезу о том, что периодические уменьшения блеска Алголя вызваны наличием спутника у звезды и затмениями. Эта идея Гудрайка опередила время на целое столетие! Окончательно двойственность Алголя была доказана в 1889 г., когда Фогель обнаружил периодические доплеровские смещения линий в спектре этой звезды, обусловленные орбитальным движением компонентов. Сейчас известно, что Алголь — тройная система. Подчеркнем, что Гудрайк также открыл периодическую переменность блеска звезды β Lyr в сентябре 1784 г. Это была вторая открытая затменная двойная система.

В дальнейшем шло накопление визуальных и фотографических наблюдений ТДС разных типов. В 1948 г. Рассел [5] развил метод интерпретации кривых блеска затменных двойных систем, который позволил определять параметры для многих систем. Началось накопление данных о массах, радиусах и температурах звезд разных типов, что важно для понимания их внутреннего строения и эволюции.

2.2. Эпоха фотоэлектрических наблюдений ТДС (1950–1970 гг.)

Использование фотоэлектрических методов наблюдений ТДС многократно увеличило точность их кривых блеска, что позволило значительно улучшить качество определения параметров звезд. Развились статистические исследования ТДС и их компонентов [6–8]. На базе накопленных сведений о массах, радиусах и температурах звезд-компонентов ТДС осуществлялась проверка теории внутреннего строения звезд, которая начала развиваться в 1950-х годах (см., например, [8] и ссылки там). Был открыт парадокс Алголей [9] и дана его эволюционная

интерпретация [10–14]. Были опубликованы основополагающие работы по несферической аккреции вещества на черные дыры [15, 16]. Предсказание рентгеновского излучения при аккреции вещества нормальной звезды на релятивистский объект в двойной системе было сделано в работе [17]. Был открыт рентгеновский источник Sco X-1 [1], природа которого длительное время была непонятна. Из-за сильной нерегулярной оптической переменности Sco X-1 долго (в течение 13 лет) не удавалось выявить следы периодичности в изменениях его блеска, которые являются признаком двойственности объекта [18, 19].

2.3. Эра систематических рентгеновских наблюдений (1970–2015 гг.)

В 1971 г. был запущен на орбиту вокруг Земли первый специализированный американский рентгеновский спутник UNURU, который открыл свыше 300 рентгеновских источников, большинство из которых оказались рентгеновскими двойными системами, содержащими аккрецирующие нейтронные звезды и черные дыры. Началась эра систематических рентгеновских исследований Вселенной. Одновременно с началом этих исследований развивалась теория дисковой аккреции вещества на релятивистские объекты в двойных системах [20–23], а также теория эволюции ТДС с обменом масс вплоть до самых поздних стадий [24, 25]. Теория дисковой аккреции позволила быстро понять природу компактных рентгеновских источников как аккрецирующих НЗ и ЧД в двойных системах, а теория эволюции ТДС с обменом масс вплоть до самых поздних стадий двойной системы из двух релятивистских объектов показала, что стадия рентгеновской двойной системы является естественной ступенью эволюции массивной ТДС. Осуществлялось развитие методов синтеза кривых блеска ТДС [26], а также методов интерпретации кривых блеска затменных систем звезд с протяженными атмосферами [27]. Родилась новая наука — релятивистская астрофизика. Были выполнены первые оптические отождествления рентгеновских двойных систем и исследования их оптических проявлений [28–30]. Была получена первая оценка функции масс Cyg X-1 $f_{\nu}(m) = 0.2 M_{\odot}$ на основе спектроскопических наблюдений этой системы [31]. Была сделана одна из первых оценок массы черной дыры в системе Cyg X-1 [30] на базе фотометрических наблюдений этой системы. Установление природы источника Sco X-1 как рентгеновской двойной системы [18, 19]. Установление природы звезд WR в тесных двойных системах как гелиевых остатков первоначально массивных звезд — производителей релятивистских объектов [27, 32]. Развитие методов определения масс чер-

ных дыр и нейтронных звезд в рентгеновских двойных системах (см. монографию [33] и ссылки там). Накопление сведений о массах нейтронных звезд и черных дыр, статистические исследования (см., например, [33–35]). Исследования рентгеновских двойных систем с бортов многих рентгеновских обсерваторий (Эйнштейн, Мир-Квант, Гранат, Росат, Чандра, Нустар и др., в последние годы — Спектр РГ и ISPE). Открытие объекта SS433 — первого примера сверхкритической аккреции на релятивистский объект [36, 37]. Развитие методов трехмерных газодинамических расчетов течения газа во взаимодействующих двойных системах (см. [38] и ссылки там). Развитие методов популяционного синтеза для изучения эволюции ТДС вплоть до самых поздних стадий [39]. Предсказание, что первыми в американском эксперименте LIGO будут открыты гравитационные волны от слияния черных дыр в двойных системах [40].

2.4. Эра гравитационно-волновой астрономии (2015 г. по н. в.)

4 сентября 2015 г. улучшенная версия двух лазерных интерферометров американской гравитационно-волновой обсерватории LIGO впервые открыла гравитационно-волновой сигнал, возникший в результате слияния двух черных дыр в двойной системе, удаленной от Земли на расстояние более миллиарда световых лет [41]. Началась эра гравитационно-волновой астрономии. Замечательно то, что сигналы, регистрируемые гравитационно-волновыми детекторами, идут от тесных двойных систем, состоящих из черных дыр и нейтронных звезд, которые сливаются за время меньше возраста Вселенной из-за потери энергии их орбитального движения в виде гравитационных волн. Наступила качественно новая эра исследований ТДС с релятивистскими компонентами (см., например, [42, 43]). Если ранее, во время эры рентгеновской астрономии, ученые лишь пассивно наблюдали рентгеновские ореолы вокруг аккрецирующих релятивистских объектов в ТДС, то с открытием гравитационных волн у ученых появилась возможность как бы экспериментировать с двойными черными дырами и нейтронными звездами — непосредственно наблюдать их слияние, формирование общего горизонта событий у черных дыр и исследовать квазинормальные моды колебаний этого горизонта. Замечательно то, что накопленный большой объем наблюдательных данных по гравитационно-волновым сигналам от слияния черных дыр во многих ТДС прекрасно согласуется с предсказаниями ОТО Эйнштейна. Это дает основание утверждать, что черные дыры звездных масс открыты и реально существуют во Вселен-

ной. Таким образом, ТДС сослужили принципиально важную службу фундаментальной физике.

Эра рентгеновской астрономии позволила ученым совершить первый прорыв в поисках и исследованиях черных дыр в ТДС. А эра гравитационно-волновой астрономии дала возможность ученым окончательно доказать существование черных дыр во Вселенной.

Не менее выдающиеся результаты были получены при изучении гравитационно-волновых всплесков от слияния нейтронных звезд в ТДС [44]. Слияние нейтронных звезд, в отличие от слияния черных дыр, сопровождается как гравитационно-волновым всплеском, так и всплеском электромагнитного излучения [45]. Из сопоставления времен прихода гравитационно-волнового и электромагнитного всплесков ученым удалось провести измерение скорости распространения гравитационных волн в пространстве, которая оказалась с точностью $\sim 10^{-15}$ совпадающей со скоростью света (!). Этот замечательный результат очень важен для проверки ряда теорий гравитации, альтернативных ОТО. В спектре оптического излучения были обнаружены линии тяжелых химических элементов с большими атомными весами вплоть до элементов группы Урана 238. Эти тяжелые химические элементы (включая золото) сформировались в ядерных реакциях, сопровождающих процесс слияния нейтронных звезд. На основе этих результатов удалось сделать вывод о том, что основным источником поступления золота во Вселенную являются, наряду со вспышками сверхновых, процессы слияния нейтронных звезд в ТДС.

3. ИССЛЕДОВАНИЯ РЕНТГЕНОВСКИХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрим более подробно исследования рентгеновских двойных систем. Эра рентгеновской астрономии позволила ученым открыть первых кандидатов в черные дыры, изучить газодинамику ТДС и их эволюцию и исследовать процессы аккреции вещества на нейтронные звезды и черные дыры в ТДС. Были измерены массы десятков нейтронных звезд и кандидатов в черные дыры в рентгеновских двойных системах, что составило надежный наблюдательный базис для релятивистской астрофизики.

3.1. Первые открытия рентгеновских двойных систем во время “золотой эры” исследований ТДС

В начале 1970-х годов с борта спутника UHURU были открыты первые затменные рентгеновские двойные системы с рентгеновским пульсаром — быстро вращающимися сильно намагниченными аккрецирующими нейтронными звездами. Cen X-3 (V779Cen),

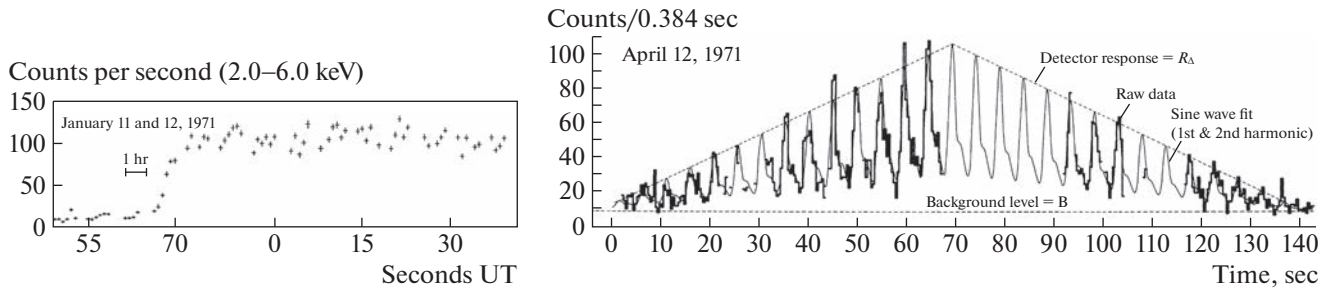


Рис. 1. Кривая рентгеновского затмения (слева) и кривая рентгеновских пульсаций (справа) для системы Cen X-3 (из статьи [46]).

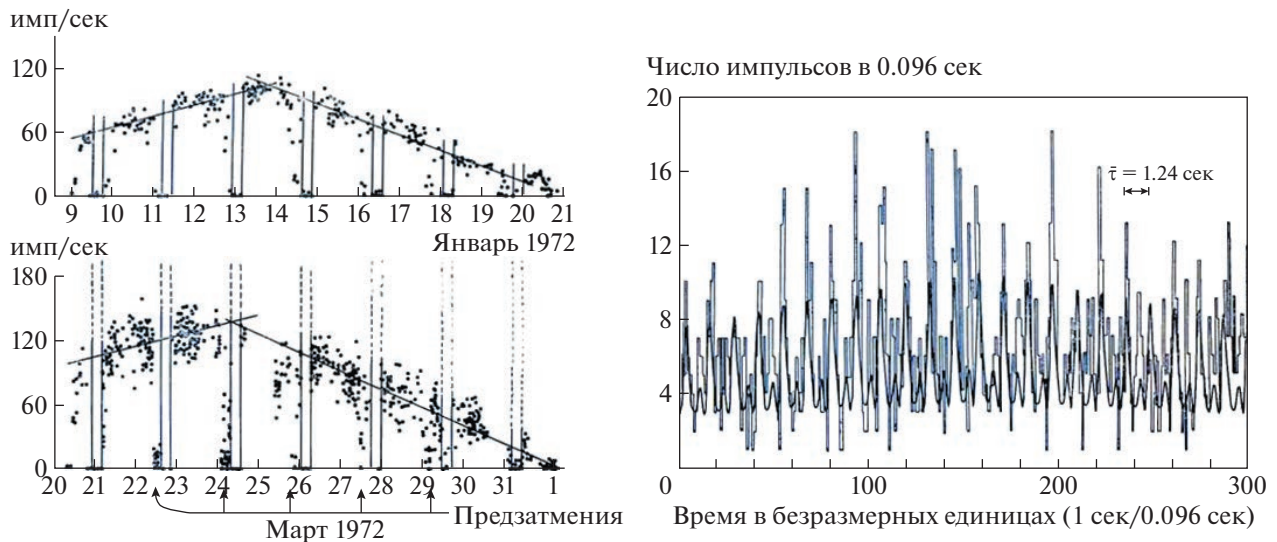


Рис. 2. Кривые рентгеновских затмений (слева) и кривая рентгеновских пульсаций (справа) для системы Her X-1. Помимо затменной переменности с периодом $\sim 1^d 7$ видна также прецессионная переменность с периодом $\sim 35^d$, вызванная прецессией аккреционного диска вокруг нейтронной звезды (из статьи [47]).

$P_{\text{orb}} \cong 2^d 1$, $P_{\text{puls}} \cong 4.8$ сек, O8III + NS (здесь NS — нейтронная звезда), $V \cong 13^m 4$ [46]. См. рис. 1. Her X-1 (HZHer), $P_{\text{orb}} \cong 1^d 7$, $P_{\text{puls}} \cong 1.2$ сек, BO—F5V + NS, $B \cong 12^m 8 - 15^m 2$ [47]. См. рис. 2.

Был открыт первый кандидат в черные дыры в рентгеновской двойной системе Cyg X-1 (V1357 Cyg), $P_{\text{orb}} \cong 5^d 6$, O9.7Iab + BH (здесь BH — черная дыра), $B \cong 9^m 3$. Объект был открыт с ракет и подтвержден наблюдениями на спутнике UHURU [48]. Рентгеновские затмения в системе отсутствуют, признаков рентгеновского пульсара не найдено, наблюдается быстрая иррегулярная рентгеновская переменность на временах вплоть до 10^{-3} сек. Для определения масс релятивистских объектов в рентгеновских двойных системах необходимо было выполнить их оптические

отождествления и исследовать различные типы оптических проявлений.

Первое оптическое отождествление было выполнено для системы Her X-1 [49]. Оптическим компонентом этой системы оказалась сильно переменная звезда HZHer. В работе [29] эта переменность была интерпретирована как эффект рентгеновского прогрева оптической звезды мощным рентгеновским излучением ($L_x \cong 10^{37}$ эрг/с) аккрецирующей нейтронной звезды (“эффект отражения”). См. рис. 3.

Оптическая переменность кандидата № 1 в черные дыры Cyg X-1 была интерпретирована в работе [30] как проявление эффекта эллипсоидальности оптической звезды (см. рис. 4). В этой же работе была дана одна из первых оценок массы черной дыры в системе Cyg X-1 $m_{\text{BH}} > 5.6 M_{\odot}$.

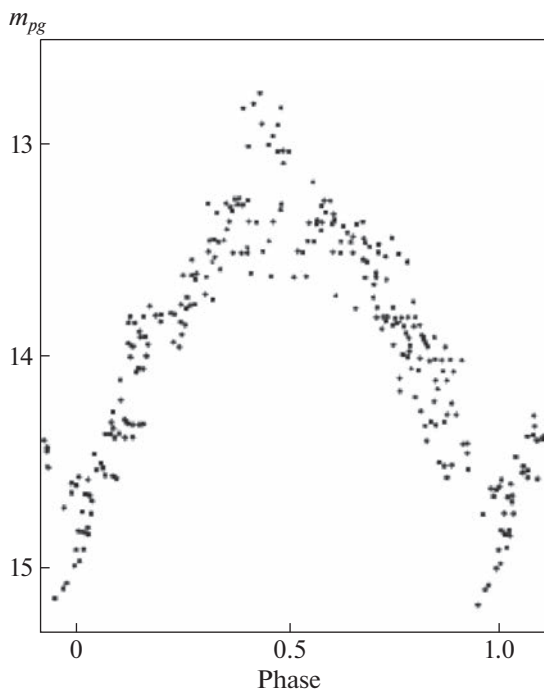


Рис. 3. Оптическая кривая блеска рентгеновской двойной системы Her X-1, обусловленная эффектом рентгенового прогрева оптической звезды (из статьи [28]).

Наблюдения оптической переменности блеска рентгеновских двойных систем, обусловленной эффектами “отражения” и эллипсоидальности, позволяют идентифицировать рентгеновский источник с оптической звездой и определять наклонение орбиты системы и массу релятивистского объекта.

К настоящему времени открыты тысячи рентгеновских двойных систем разных типов (включая сверхкритический микроквазар SS433 и ультраяркие рентгеновские источники в разных галактиках). Измерены массы многих десятков нейтронных звезд и звездных черных дыр (см., например, [34, 35]).

Исследования рентгеновских двойных систем стали отдельной очень важной областью релятивистской астрофизики.

3.2. Типы рентгеновских двойных систем

Рентгеновские двойные принадлежат к классу ТДС на поздних стадиях эволюции, т.е. систем, в которых завершился первичный обмен масс. Они делятся на два больших класса: массивные рентгеновские двойные со спутниками — массивными звездами ранних спектральных классов F-A-O-B и WR, а также маломассивные рентгеновские двойные со спутниками — маломассивными звез-

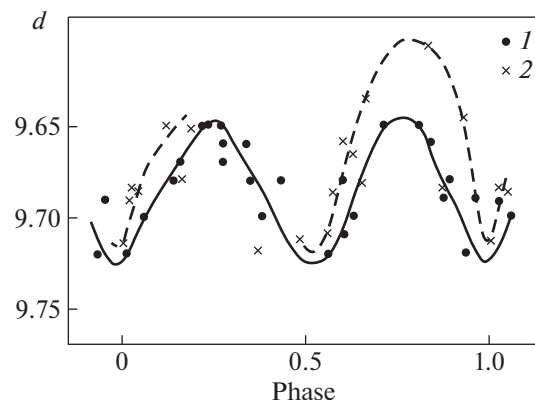


Рис. 4. Оптическая кривая блеска рентгеновской двойной системы Cyg X-1, обусловленная эффектом эллипсоидальности оптической звезды (из статьи [30]).

дами поздних спектральных классов K-M. Различия в массах звезд-доноров вещества обуславливают различия в эволюционных путях этих ТДС.

Массивные рентгеновские двойные

а) Массивные транзитные рентгеновские двойные с Be-звездами. $P_{\text{orb}} = 10^d - 1000^d$, $e = 0.2 - 0.8$, релятивистские компоненты — нейтронные звезды и черные дыры. В этих системах оптическая звезда не заполняет свою полость Роша и быстро вращается. Рентгеновское излучение в виде вспышки ($L_x = 10^{38}$ эрг/с) генерируется при прохождении релятивистского объекта через периастр эллиптической орбиты, когда релятивистский объект погружается в экваториальный ветер Be-звезды.

б) Квазистационарные массивные рентгеновские двойные. Оптическая звезда близка к заполнению своей полости Роша. Аккреция из аккреционного диска вокруг релятивистского объекта. О-В сверхгигант плюс нейтронная звезда или черная дыра. $P_{\text{orb}} = 1^d.4 - 9^d$, $e = 0$, $L_x = 10^{36} - 10^{39}$ эрг/с. Примеры систем с ЧД: Cyg X-1, LMC X-3, LMC X-1, M33X-7 и др.

в) Объект SS433 (A7I + c, c — релятивистский объект, $L_x \approx 10^{36}$ эрг/с, $L_{\text{opt}} \approx 10^{39}$ эрг/с) и ультраяркие рентгеновские источники (ULX, $L_x = 10^{39} - 10^{42}$ эрг/с). Стадия вторичного обмена масс. Оптическая звезда переполняет свою полость Роша. Сверхкритическая аккреция на черную дыру (SS433) или на сильно намагниченную нейтронную звезду. Рентгеновские пульсары при $L_x \approx 10^{39}$ эрг/с.

г) Рентгеновские двойные WR + c системы (c — релятивистский объект, аккрецирующий из звездного ветра звезды WR). Это стадия после завершения вторичного обмена масс, когда оптиче-

ская звезда потеряла свою водородную оболочку. Cyg X-3 (WN4–8 + c, $P_{\text{orb}} = 4.8$ ч), IC10 X-1 (WNE + c, $P_{\text{orb}} = 1^{\text{d}}.5$), NGC300 X-1 (WN5 + c, $P_{\text{orb}} = 1^{\text{d}}.3$). Звезда WR в паре с нейтронной звездой или черной дырой, $L_x = 10^{38} - 10^{39}$ эрг/с.

Маломассивные рентгеновские двойные

д) Рентгеновские новые. Маломассивная К-М звезда ($M = 0.1 - 1 M_{\odot}$) заполняет свою полость Роша. Релятивистские компоненты – нейтронные звезды или черные дыры. $P_{\text{orb}} = 0^{\text{d}}.2 - 33^{\text{d}}.5$, $e = 0$, $L_x^{\text{max}} = 10^{38}$ эрг/с, $L_x^{\text{min}} \cong 10^{31} - 10^{32}$ эрг/с. Рентгеновские вспышки – из-за неустойчивости в адвекционно-доминированном диске вокруг релятивистского объекта.

е) Яркие квазистационарные рентгеновские двойные галактического балджа. G-М звезды заполняют свою полость Роша. Релятивистские компоненты – нейтронные звезды. $P_{\text{orb}} < 10^{\text{d}}$, $e = 0$, $L_x = 10^{36} - 10^{38}$ эрг/с. Пример – система Sco X-1. Квазипериодические осцилляции рентгеновского излучения (QPO), частоты $\nu = 5.9 - 6.4$ Гц. Наблюдаются также высокочастотные QPO с $\nu \sim 1$ кГц.

ж) Рентгеновские барстеры. Звезды поздних спектральных классов в паре с нейтронными звездами. Рентгеновские вспышки, длительность вспышек 1–40 сек, во время вспышки $L_x = 10^{37}$ эрг/с. Рентгеновские вспышки 1-го и 2-го типа: первый тип – термоядерный взрыв накопленного на поверхности нейтронной звезды вещества; второй тип – неустойчивость в аккреционном диске.

з) Ультрамягкие рентгеновские источники. Маломассивная звезда в паре с белым карликом. Огромная рентгеновская светимость ($L_x = 10^{37} - 10^{38}$ эрг/с) и очень мягкий спектр ($kT = 20 - 50$ эВ). Стационарное термоядерное горение вещества, накопленного на поверхности белого карлика.

Существуют также симбиотические рентгеновские двойные, в которых идет квазисферическая аккреция на релятивистский объект (НЗ) из медленного ветра красного гиганта. В полярах с сильно намагниченными белыми карликами аккреция идет на магнитные полюса белых карликов без образования аккреционных дисков.

3.3. Некоторые новые результаты по исследованиям рентгеновских двойных систем

Рассмотрим вначале три случая массивных рентгеновских двойных систем, которые располагаются в виде эволюционной последовательности.

а) Система Cyg X-1 – первый кандидат в черные дыры. Оптическая звезда близка к заполнению полости Роша. В работе [50] из одной высо-

коточной кривой лучевых скоростей оптической приливно деформированной звезды дана оценка наклона орбиты системы $i < 44^\circ$ и на этой основе дана независимая оценка массы черной дыры $M_x > 8.5 M_{\odot}$. В классических ТДС, описываемых моделью двух точечных масс, как известно, оценить наклон орбиты системы i из кривой лучевых скоростей не представляется возможным. Однако поскольку в системе Cyg X-1 оптическая звезда имеет значительные размеры и грушевидную форму, форма кривой лучевых скоростей в данном случае зависит от i , что позволяет оценить i по кривой лучевых скоростей.

В недавней работе [51] с помощью данных VLBA интерферометрии с угловым разрешением $\sim 10^{-3}$ сек уточнены параллакс, собственное движение и параметры орбиты рентгеновского источника, а также дана надежная оценка расстояния до системы Cyg X-1 $d = 2.22_{-0.17}^{+0.18}$ кпк. С использованием спектроскопических данных получены новые оценки параметров системы: $I = 27^\circ 51'$, $M_{\text{opt}} = 40 M_{\odot}$, $M_{\text{BH}} = 21.2 \pm 2.2 M_{\odot}$. Столь большая масса черной дыры при высокой (солнечной) металличности вещества исходной звезды – ее предшественника требует эволюционного объяснения.

б) Система SS433 (A7I + c, $P_{\text{orb}} \cong 13^{\text{d}}.1$, $P_{\text{prec}} \cong 162^{\text{d}}.3$, $V \cong 14^{\text{m}}$). Оптическая звезда переполняет свою полость Роша. В работе [52] проведено моделирование рентгеновских кривых блеска SS433 в жестком диапазоне ($kT = 20 - 60$ кэВ) в случае, когда оптическая звезда переполняет свою полость Роша. Анализ затменной и прецессионной переменности SS433 показал, что отношение масс компонентов в этой системе $q = M_x/M_{\text{opt}} > 0.4 - 0.8$, а релятивистский объект является черной дырой, рис. 5.

В работе [53] открыто вековое удлинение орбитального периода SS433 с темпом $\dot{P} = (1.0 \pm 0.3) \times 10^{-7}$ сек. за сек.; на этой основе дана независимая оценка отношения масс компонентов $q > 0.8$ и массы черной дыры $M_{\text{BH}} > 8 M_{\odot}$. Нейтронная звезда отвергается, поскольку в этом случае орбитальный период SS433 должен не возрастать, а укорачиваться, что противоречит наблюдениям. Также в этой работе из анализа многолетних фотометрических наблюдений SS433 сделан вывод о том, что орбита SS433 является эллиптической с эксцентриситетом $e \cong 0.05 \pm 0.01$. Это является сильной поддержкой модели “плавающего” сверхкритического аккреционного диска, отслеживающего прецессию оси вращения оптической A7I звезды. Неперпендикулярность оси вращения оптической звезды к плоскости орбиты могла возникнуть при асимметричном

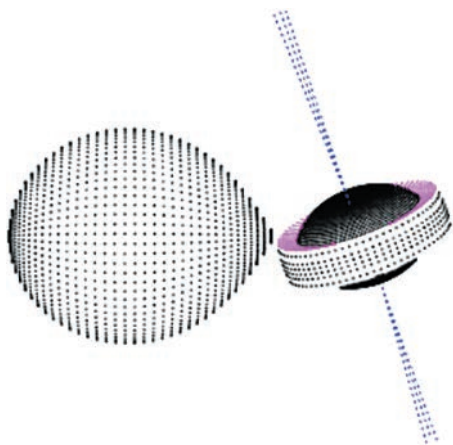


Рис. 5. Компьютерная модель системы SS433 с прецессирующим сверхкритическим аккреционным диском и релятивистскими джетами (из статьи [52]).

взрыве сверхновой, который повернул плоскость орбиты двойной системы относительно оси вращения оптической звезды [54, 55].

в) Система Cyg X-3 (WN4-8 + c, $P_{\text{orb}} = 4.8$ ч, $V > 23^{\text{m}}$, $K = 12^{\text{m}}$). Оптическая звезда потеряла свою водородную оболочку после завершения вторичного обмена масс.

В работе [56] впервые получены детальные ИК кривые блеска (фильтры J, H, K) системы Cyg X-3 (см. рис. 6) на 2.5-метровом телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ. Анализ ИК и архивных рентгеновских наблюдений Cyg X-3 в модели релятивистского объекта, аккрецирующего из звездного ветра звезды WR (см. рис. 7) позволил определить параметры этой системы: $I = 29.5 \pm 1.2$, $M_c \cong 7.2 M_{\odot}$, что соответствует черной дыре. Учет клочковатости звездного ветра звезды WR может понизить эту оценку до значения $2-3 M_{\odot}$. В недавней работе [57] для Cyg X-3 открыта 25-процентная линейная поляризация рентгеновского излучения.

Рассмотрим две маломассивные рентгеновские двойные системы – квазистационарную и транзиентную.

г) Система Sco X-1 (M2 + NS, $P_{\text{orb}} \cong 0.479$, $V \cong 12.7$). Это маломассивная рентгеновская двойная система, принадлежащая галактическому балджу. Как уже упоминалось, долгое время не удавалось установить двойственность этого первого открытого рентгеновского источника, расположенного за пределами Солнечной системы.

В работах [2, 3] проведено моделирование оптических кривых блеска Sco X-1, полученных с борта орбитальной обсерватории Kepler во время миссии K2.

Удалось непротиворечиво описать наблюдаемые кривые блеска в рамках двух моделей, когда оптическая M2 звезда заполняет свою полость Роша и в модели с оптической звездой лишь частично заполняющей свою полость Роша (см. рис. 8). Найдены фундаментальные параметры системы: $I \cong 30^{\circ}$, $M_v = 0.4 M_{\odot}$, $M_x = 1.4 M_{\odot}$. В модели с полным заполнением полости Роша оптическая звезда имеет избыток радиуса $R_v \cong 1.4 R_{\odot}$, т.е. звезда отклонилась от теплового равновесия.

д) Система A0620-00 (K5V + BH, $P_{\text{orb}} = 0.32$, $V \cong 18^{\text{m}}$). Это рентгеновская новая с черной дырой. Оптическая звезда K5V заполняет свою полость Роша и истекает на черную дыру. В спокойном состоянии (между вспышками) в спектре системы видны линии оптической звезды, что позволяет определить функцию масс оптической звезды [58]

$$f_v(m) = \frac{m_x^3 \sin^3 i}{(m_x + m_v)^2} \cong 3.2 M_{\odot},$$

т.е. релятивистский объект здесь является черной дырой. Кривая блеска системы в спокойном состоянии обнаруживает эффект эллипсоидальности оптической звезды и вклад адвекционно-доминированного диска вокруг черной дыры с областью взаимодействия газовой струи и диска.

В работе [59] на 2.5-метровом телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ получены орбитальные кривые блеска системы A0620-00 в оптическом и ИК (фильтры J, H, K) диапазонах (см. рис. 9). Обнаружены переходы системы из пассивной в активную стадию. В активной стадии наблюдался сильный фликеринг на кривых блеска, с амплитудой порядка амплитуды орбитальной переменности ($\Delta I \cong 0.25$). Проведено моделирование кривых блеска в рамках модели, учитывающей результаты трехмерных гидродинамических расчетов течения газа во взаимодействующих ТДС (см. рис. 10) [38]. Определены параметры системы, а также получен спектр адвекционно-доминированного диска вокруг черной дыры: $F_{\lambda} \sim \lambda^{\alpha}$, где $\alpha = -(2.13 \pm 0.1)$ в пассивной стадии системы и $\alpha = -(1.85 \pm 0.1)$ в активной стадии.

Рассмотрим также недавно появившуюся новую возможность поиска релятивистских объектов в двойных системах.

е) “Спящие” рентгеновские двойные системы с релятивистскими спутниками. Рентгеновское излучение от таких систем не наблюдается ввиду того, что оптические звезды здесь далеки от заполнения своих полостей Роша и не являются быстровращающимися Be-звездами. В последнее время, изучая астрометрическое движение опти-

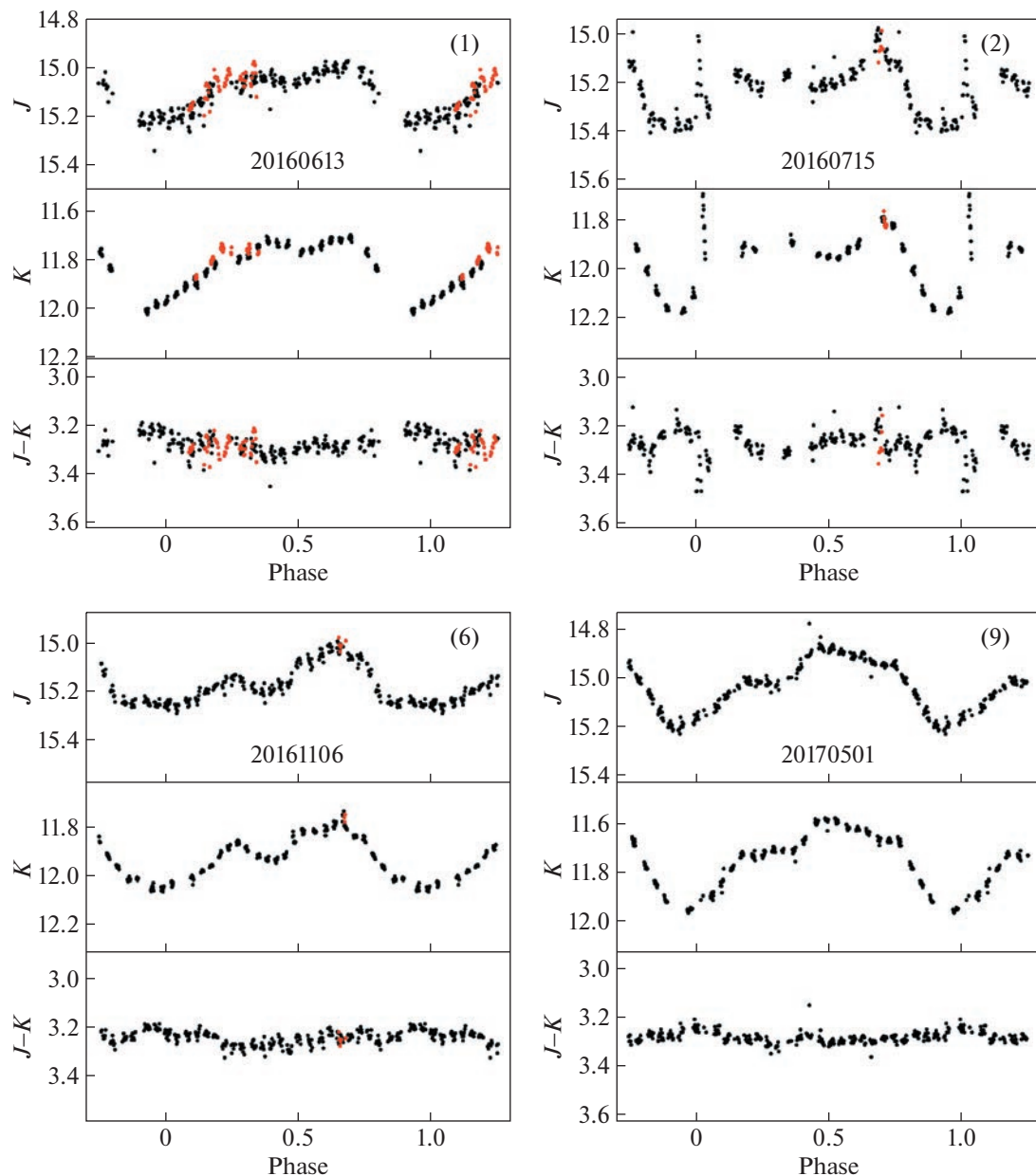


Рис. 6. Инфракрасные орбитальные кривые блеска микроквара Cyg X-3, полученные на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (из статьи [56]). Кривые получены для разных эпох.

ческой звезды на небе с высоким угловым разрешением ($\sim 10^{-5}$ сек) с помощью космической обсерватории ГАИЯ удастся построить астрометрическую орбиту звезды, вращающейся вокруг темного спутника и, привлекая данные спектральных наблюдений звезды, оценить массу темного спутника. Например, недавно в работе [60] таким методом открыта черная дыра с массой $M_{\text{ВН}} = 9.8 \pm 0.2 M_{\odot}$, которая обращается вокруг звезды G-карлика с $T_{\text{эф}} = 5850$ К по эллиптической орбите ($e = 0.45$) с орбитальным периодом

185^d. Расстояние до системы 480 пс, звездная величина $G = 13^{\text{m}}.8$. Результаты получены из совместного использования данных высокоточной астрометрии и спектроскопии. В перспективе таким методом, используя данные астрометрического каталога ГАИЯ, можно надеяться открыть десятки и сотни “спящих” релятивистских объектов в двойных системах. Такие исследования включены в программу наблюдений на 2.5-метровом телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ.

4. ВАЖНЕЙШИЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПО РЕНТГЕНОВСКИМ ДВОЙНЫМ СИСТЕМАМ

1) Открыто несколько тяжелых нейтронных звезд с массами, близкими или превосходящими $2 M_{\odot}$. Это важно для уточнения уравнения состояния нейтронного вещества.

2) Средняя масса ~ 80 измеренных нейтронных звезд (рентгеновских пульсаров, рентгеновских барстеров 1-го типа и радиопулсаров) составляет $1.45 M_{\odot}$.

3) Миллисекундные пульсары с периодами вращения НЗ порядка миллисекунд в среднем на $0.13 M_{\odot}$ более массивны, чем секундные (в основном по радиоданным). Это отражает эффект накопления вещества на нейтронной звезде при “раскрутке” пульсара во время обмена масс [61].

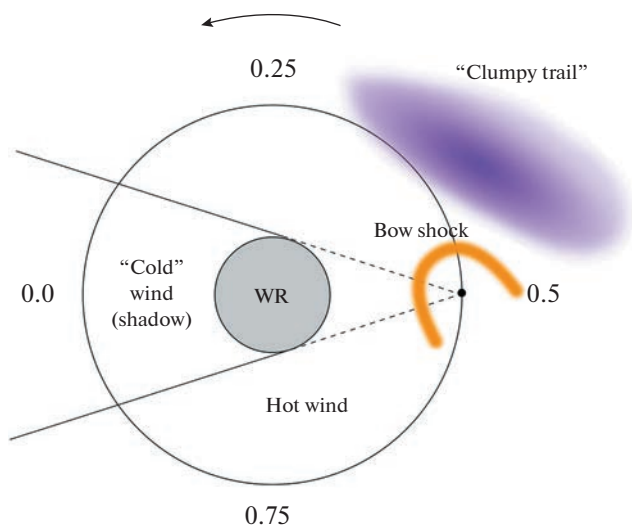


Рис. 7. Схематичная модель системы Cyg X-3, используемая для интерпретации ее орбитальных ИК и рентгеновских кривых блеска (из статьи [56]).

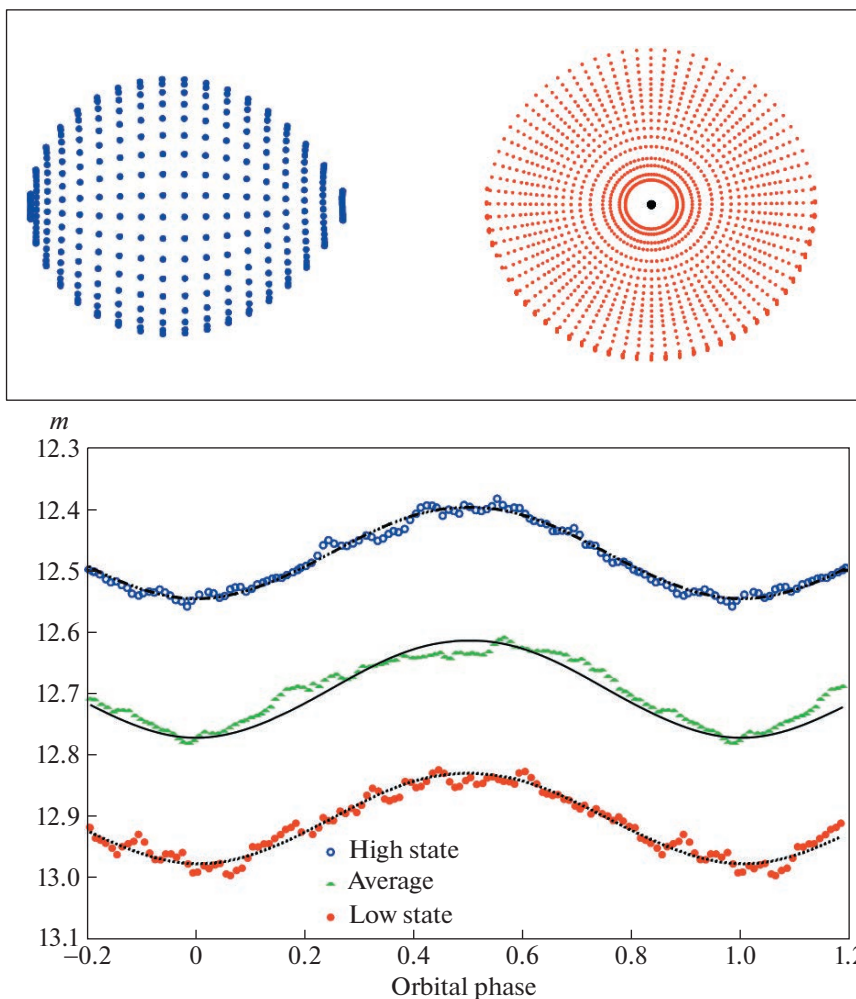


Рис. 8. Компьютерная модель рентгеновской двойной системы Sco X-1 (из статьи [2]). Модель с полным заполнением оптической звездой своей полости Роша. Внизу приведены орбитальные кривые блеска Sco X-1 в разных стадиях активности с наложенными на них теоретическими кривыми.

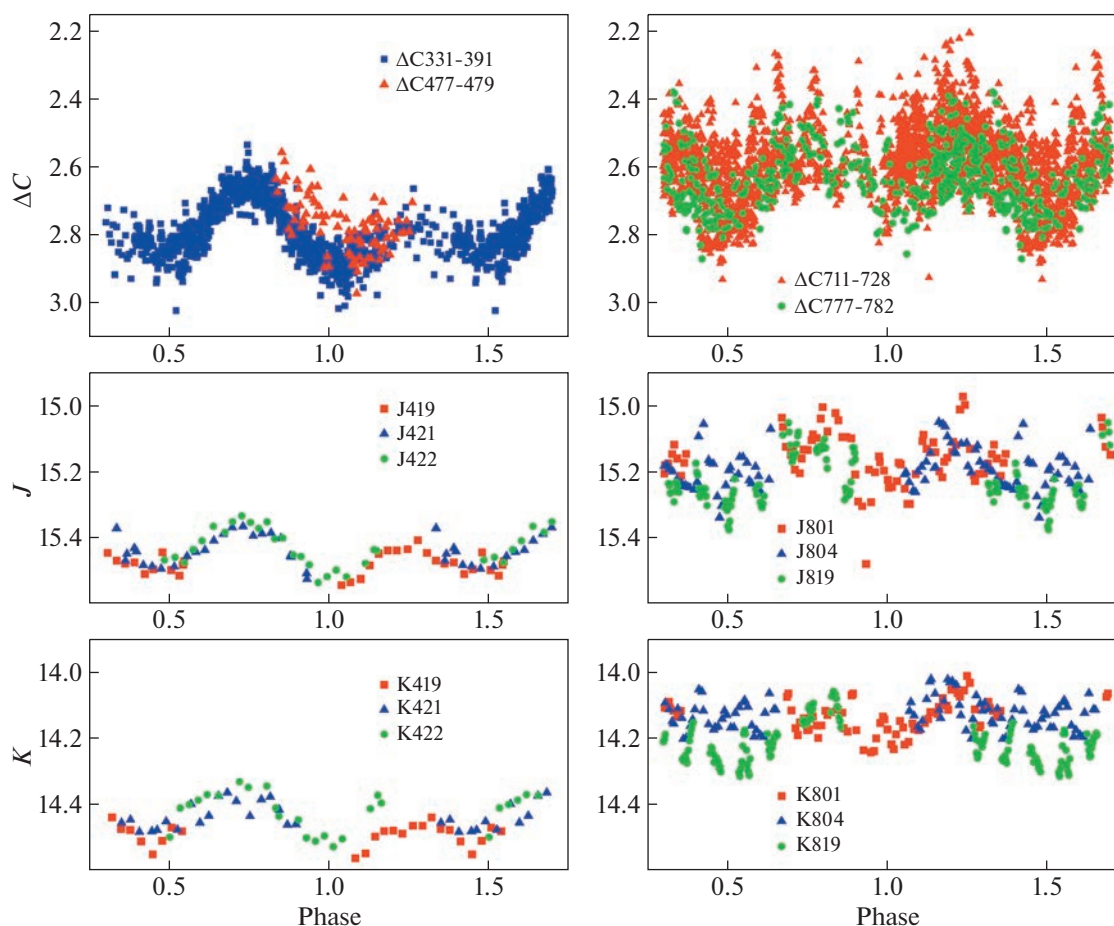


Рис. 9. Оптическая (вверху) и ИК (внизу) орбитальные кривые блеска рентгеновской новой A0620-00, полученные на 2.5-м телескопе Кавказской горной обсерватории ГАИШ МГУ (из статьи [59]). Показаны пассивное (слева) и активное (справа) состояния системы.

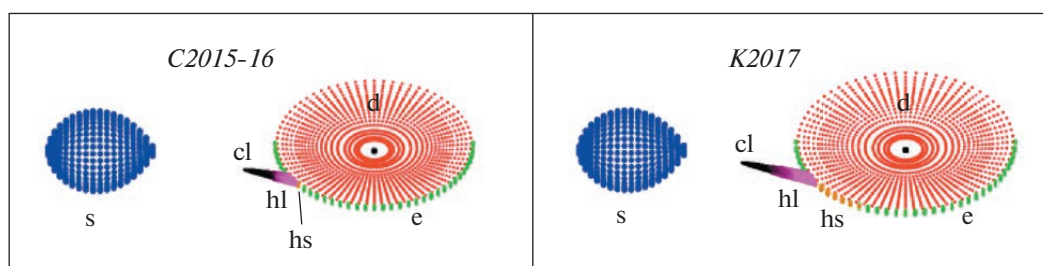


Рис. 10. Компьютерная модель рентгеновской новой A0620-00, используемая для интерпретации ее орбитальных оптических и ИК кривых блеска (из статьи [59]). Слева — модель в оптическом диапазоне, справа — модель для ИК диапазона (фильтр K). Здесь s — звезда, d — диск, hs — горячее пятно, hl — горячая линия, cl — холодная часть газовой струи, e — внешняя граница диска.

4) Не обнаружено корреляции между массами черных дыр и массами оптических звезд в рентгеновских двойных системах.

5) Количество открытых черных дыр в рентгеновских двойных системах не возрастает при

уменьшении массы черной дыры. Это удивительно, поскольку наличное число звезд в Галактике очень сильно возрастает с уменьшением массы звезды. Скорее всего, масса черной дыры определяется не только массой родительской массивной звезды, но и другими факторами (магнитное поле

ядра звезды, его вращение, различные неустойчивости, возникающие при коллапсе ядра и т.п.).

6) Распределение масс черных дыр в массивных и маломассивных рентгеновских двойных различаются. В маломассивных рентгеновских двойных массы черных дыр концентрируются к среднему значению $M_{\text{BH}} \cong 8 M_{\odot}$, в то время как в массивных рентгеновских двойных это распределение имеет широкий диапазон $M_{\text{BH}} = 4\text{--}20 M_{\odot}$. Это различие отражает различие эволюционных путей массивных и маломассивных рентгеновских двойных (стадия полуразделенной двойной системы и стадия эволюции с общей оболочкой). Кроме того, намечается провал в распределении масс релятивистских объектов. В интервале масс $2\text{--}4 M_{\odot}$ в рентгеновских двойных системах не наблюдается ни нейтронных звезд, ни черных дыр. Этот наблюдательный факт накладывает ограничения на механизмы образования черных дыр в конце эволюции массивных звезд [62–64].

7) Черные дыры и нейтронные звезды в рентгеновских двойных различаются не только по массам, но и по наблюдательным проявлениям в полном согласии с предсказаниями ОТО.

Во всех 80 случаях, когда компактный объект показывает признаки наблюдаемой поверхности (рентгеновский пульсар, рентгеновский барстер 1-го типа, радиопулсар), его масса не превышает $3 M_{\odot}$ — абсолютного верхнего предела массы нейтронной звезды, предсказываемого ОТО.

В то же время ни один из более чем 30 “взвешенных” массивных ($M > 3 M_{\odot}$) рентгеновских источников — кандидатов в черные дыры — не показывает признаков наблюдаемой поверхности (не является ни рентгеновским пульсаром, ни рентгеновским барстером 1-го типа, ни радиопулсаром).

Это фундаментальный и очень красивый результат, полученный в результате многолетних исследований рентгеновских двойных систем. Он является косвенным свидетельством отсутствия наблюдаемых поверхностей у кандидатов в звездные черные дыры и аргументом в пользу наличия у них горизонтов событий, предсказываемых ОТО.

К сожалению, этот замечательный результат не может служить окончательным доказательством существования черных дыр, поскольку и некоторые нейтронные звезды могут не показывать признаков наблюдаемой поверхности. Кроме того, очевидно, что нельзя окончательно судить о природе объекта по отсутствию у него каких-либо признаков.

Как уже упоминалось выше, окончательные доказательства существования звездных черных дыр пришли из гравитационно-волновых исследований. Недавнее построение теней от сверх-

массивных черных дыр в ядрах нашей Галактики и галактики М87 окончательно доказало существование сверхмассивных черных дыр во Вселенной.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. ТРИУМФ ЧЕРНЫХ ДЫР

Эра рентгеновской астрономии обеспечила первый прорыв в исследованиях черных дыр. Были накоплены данные о наблюдательных проявлениях большого числа аккрецирующих черных дыр и нейтронных звезд, которые оказались прекрасно согласующимися с предсказаниями ОТО. Развилась новая наука — релятивистская астрофизика, которая обогатила наши знания о высокоэнергичных процессах во Вселенной.

В дальнейшем последующая эра гравитационно-волновой астрономии путем наблюдения процессов слияния черных дыр и нейтронных звезд в двойных системах, которые прекрасно описываются с помощью ОТО, позволила получить окончательные доказательства существования черных дыр звездных масс во Вселенной и изучить процессы нуклеосинтеза при слиянии нейтронных звезд. Получение изображения теней от сверхмассивных черных дыр с помощью VLBA-наблюдений (программа Event Horizon Telescope) с угловым разрешением $\sim 10^{-5}$ сек окончательно решило проблему существования сверхмассивных черных дыр во Вселенной. Можно с удовлетворением заключить, что 60 лет рентгеновских исследований обеспечили “золотую эру” тесных двойных систем и привели к получению фундаментальных научных результатов первостепенного значения.

Работа поддержана грантом РНФ 23-12-00092, а также грантом научной и образовательной школы МГУ им. М.В. Ломоносова “Фундаментальные и прикладные космические исследования” и Программой развития МГУ имени М.В. Ломоносова.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *R. Giacconi, H. Gursky, F. R. Paolini, and B. B. Rossi*, Phys. Rev. Lett. **9**, 439 (1962).
2. *A. M. Cherepashchuk, T. S. Khruzina, and A. I. Bogomazov*, Monthly Not. Roy. Astron. Soc. **508**, 1389 (2021).
3. *A. M. Cherepashchuk, T. S. Khruzina, and A. I. Bogomazov*, Astron. Rep. **66**, 348 (2022).
4. *A. V. Tutukov and A. M. Cherepashchuk*, Phys. Usp. **63**, 209 (2020).
5. *H. N. Russell*, Astrophys. J. **108**, 388R (1948).

6. М. А. Свечников, Каталог орбитальных элементов, масс и светимостей затменных двойных звезд, Свердловск, из-во УрГУ. Сер. Астрономия, вып. 5, № 88 (1969).
7. Г. Н. Дремова, М. А. Свечников, *Астрофизика* **50**, 299 (2007).
8. А. Г. Масевич, А. В. Тутуков *Эволюция звезд: теория и наблюдения* (М., Наука, 1988).
9. П. П. Паренаго, А. Г. Масевич, *Труды ГАИШ* **20**, 81 (1950).
10. J. A. Crawford, *Astrophys. J.* **121**, 71 (1955).
11. D. C. Morton, *Astrophys. J.* **132**, 146 (1960).
12. B. Paczyński, *Acta Astron.* **16**, 231 (1966).
13. Л. И. Снежко, *Перем. звезды* **16**, 253 (1967).
14. R. Kippenhahn and A. Weigert, *Zeitschrift für Astrophysik* **65**, 251 (1967).
15. Я. Б. Зельдович, *ДАН СССР* **155**, 67 (1964).
16. E. E. Salpeter, *Astrophys. J.* **140**, 796 (1964).
17. I. D. Novikov and Ya. B. Zel'dovich, *Nuovo Cimento Suppl* **4**, 810 (1966).
18. E. W. Gottlieb, E. L. Wright, and W. Liller, *Astrophys. J.* **195L**, 33 (1975).
19. A. P. Cowley and D. Crampton, *Astrophys. J.* **201L**, 65 (1975).
20. Н. И. Шакура, *Астрон. журн.* **49**, 921 (1972).
21. N. I. Shakura and R. A. Sunyaev, *Astron. and Astrophys.* **24**, 337 (1973).
22. J. E. Pringle and M. J. Rees, *Astron. and Astrophys.* **21**, 1 (1972).
23. I. D. Novikov and K. S. Thorne, in *Black Holes* (New York, Gordon and Breach, Eds C. De Witt, B. S. De Witt, p. 343, 1973).
24. А. В. Тутуков, Л. Р. Юнгельсон, *Научные информ. Астросовета АН СССР* **27**, 58, 70 (1973).
25. Van den Heuvel, In: *Structure and Evolution of Close Binary System* (Dordrecht, Reidel Publ. Comp., eds P. P. Eggleton, B. Motton, J. Whelan, 35, 1976).
26. R. E. Wilson and E. J. Devinney, *Astrophys. J.* **166**, 605 (1971).
27. А. М. Черепашчук, *Астрон. журн.* **52**, 81 (1975).
28. А. М. Черепашчук, Yu. N. Efremov, N. E. Kurochkin, N. I. Shakura, and R. A. Sunyaev, *Info. Bull. Var. Stars* № 720 (1972).
29. J. N. Bahcall and N. A. Bahcall, *Astrophys. J.* **178L**, 1 (1972).
30. В. М. Лютый, Р. А. Сюняев, А. М. Черепашчук, *Астрон. журн.* **50**, 3 (1973).
31. B. L. Webster and P. Murdin, *Nature* **235**, 37 (1972).
32. B. Paczynski, *Acta Astron.* **17**, 355 (1967).
33. А. М. Черепашчук, *Тесные двойные звезды* (Физматлит, часть I и II, 2013).
34. А. М. Черепашчук, N. A. Katysheva, T. S. Khruzina, and S. Yu. Shugarov, *Highly evolved close binary stars: Catalog* (Brussels, Gordon and Breach, 1996).
35. B. E. Tetarenko, G. R. Sivakoff, C. O. Heinke, and J. C. Gladstone, *Astrophys. J. Supp.* **222**, 15 (2016).
36. А. М. Черепашчук, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **194**, 761 (1981).
37. B. Margon, *Ann. Rev. Astron. and Astrophys.* **22**, 507 (1984).
38. Д. В. Бисикало, А. Г. Жилкин, А. А. Боярчук, *Газодинамика тесных двойных звезд* (М., Физматлит, 2013).
39. В. Г. Корнилов, В. М. Липунов, *Астрон. журн.* **60**, 284 (1987).
40. V. M. Lipunov, K. A. Postnov, and M. E. Prokhorov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **288**, 245 (1997).
41. B. Abbott, et al., *Phys. Rev. Lett.* **116**, №6, id:061102 (2016).
42. А. М. Черепашчук, *Phys. Usp.* **59**, 910 (2016).
43. А. В. Тутуков, А. М. Черепашчук, *Астрон. журн.* **94**, 821 (2017).
44. B. Abbott, et al., *Astrophys. J.* **848L**, 12A (2017).
45. С. И. Блинников, И. Д. Новиков, Т. В. Переводчикова, А. Г. Полнарев, *Письма в Астрон. журн.* **10**, 422 (1984).
46. R. Giacconi, H. Gursky, E. Kellogg, E. Schreier, and H. Tananbaum, *Astrophys. J.* **167L**, 67 (1971).
47. H. Tananbaum, H. Gursky, E. M. Kellogg, R. Levinson, E. Schreier, and R. Giacconi, *Astrophys. J.* **174L**, 143 (1972).
48. H. Tananbaum, E. Kellogg, H. Gursky, S. Murray, E. Schreier, and R. Giacconi, *Astrophys. J.* **165L**, 37 (1971).
49. Н. Е. Курочкин, *Переменные звезды* **18**, 425 (1972).
50. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. М. Черепашчук, *Астрон. журн.* **81**, 606 (2014).
51. J. C. A. Miller-Jones, *Sci.* **371**, 1046 (2021).
52. А. Черепашчук, К. Postnov, S. Molokov, E. Antokhina, and A. Belinski, *New Astron. Rev.* **89**, id: 101542 (2020).
53. А. М. Черепашчук, А. А. Belinski, A. V. Dodin, and K. A. Postnov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **507L**, 19 (2021).
54. W. J. Roberts, *Astrophys. J.* **187**, 575 (1974).
55. А. М. Черепашчук, *Письма в Астрон. журн.* **7**, 726 (1981).
56. I. I. Antokhin, A. M. Cherepashchuk, E. A. Antokhina, and A. M. Tatarnikov, *Astrophys. J.* **926**, issue 2, id 123, 21 (2022).
57. A. Velezhina, F. Muleri, J. Poutanen, et al., *arXiv:2303.01174* (2023).
58. J. E. McClintock and R. A. Remillard, *Astrophys. J.* **308**, 110 (1986).
59. А. М. Черепашчук, N. A. Katysheva, T. S. Khruzina, S. Yu. Shugarov, A. M. Tatarnikov, M. A. Burlak, and N. I. Shatsky, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **483**, 1067 (2019).
60. K. El-Badry, et al., *arXiv: 2209.06833* (2022).
61. Г. С. Бисноватый-Коган, Б. В. Комберг, *Астрон. журн.* **51**, 373 (1974).
62. C. L. Fryer and V. Kalogera, *Astrophys. J.* **554**, 548 (2001).
63. K. Belczynski, G. Wiktorowicz, C. L. Fryer, et al., *Astrophys. J.* **757**, 91 (2012).
64. S. E. Woosley, T. Sukhbold, and H.-T. Janka, *Astrophys. J.* **896**, 56 (2020).

X-RAY ASTRONOMY AND CLOSE BINARY SYSTEMS**A. M. Cherepashchuk^a***^aSternberg Astronomical Institute, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

The discovery in 1962 of the compact source Sco X-1, the first X-ray source located outside the Solar System, marked a new (“golden”) era in the study of close binary systems (CBS). Accreting neutron stars and first black hole candidates in close binary systems were discovered. The ability to “weigh” neutron stars and black holes in close binary systems made it possible to distinguish accreting black holes from neutron stars. The theory of accretion onto relativistic objects in close binary systems has been developed, as well as the theory of the evolution of close binary systems with mass exchange up to the latest stages, including binary black holes and neutron stars. Close binary systems have become the cutting edge of astrophysics. Subsequent observations of gravitation waves and observations on the EHT intercontinental radio interferometer with an angular resolution of $\sim 10^{-5}$ arcsec made it possible to finally prove the existence of black holes in the Universe. Thus, the modern triumph of black holes has largely been due to the development of the science of close binary systems. 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: X-ray emission, binary stars, neutron stars, black holes, evolution, mass exchange