

УДК 24.387-735

МАССА ЧЕРНОЙ ДЫРЫ В РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЕ М33 X-7 И ЭВОЛЮЦИОННЫЙ СТАТУС СИСТЕМ М33 X-7 И IC 10 X-1

© 2009 г. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. И. Богомазов, А. М. Черепашук

*Государственный астрономический институт им. П.К. Штернберга,
МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 24.06.2008 г.; принята в печать 02.07.2008 г.

Выполнен анализ наблюдаемой кривой лучевых скоростей двойной рентгеновской системы М33 X-7 в модели Роша. Исследована зависимость масс компонентов от степени заполнения оптической звездой полости Роша. Получена связь между массой оптической звезды и массой компактного объекта. При наиболее вероятной массе оптической звезды $m_v = 70 M_\odot$, масса компактного объекта заключена в пределах $m_x = 15.55 \pm 3.20 M_\odot$. Показана возможность формирования в двойных системах черных дыр с массой $m_x = 15 M_\odot$ и выше. Приведены характерные эволюционные треки двойных звездных систем, одной из эволюционных стадий которых является объект типа М33 X-7. Согласно результатам популяционного синтеза двойные системы типа М33 X-7 должны присутствовать в галактиках с массой $10^{11} M_\odot$ и более. В настоящий момент количество подобных систем в галактике М33 должно быть порядка единицы. Изучен также эволюционный статус рентгеновской двойной системы IC 10 X-1 с компонентом-звездой Вольфа–Райе, которая, возможно, содержит массивную черную дыру. Показано, что конечные стадии систем М33 X-7 и IC 10 X-1 должны сопровождаться излучением гравитационных волн.

PACS: 97.80.Jp, 97.80.Fk, 97.10.Nf, 97.10.Cv, 97.60.Lf

1. ВВЕДЕНИЕ

Рентгеновский источник М33 X-7 (именуемый нами далее как X-7) расположен в галактике М33 X-7 [1]. Периодическая переменность источника впервые была выявлена Пересом с соавторами в работах [2, 3], первая оценка периода переменности составила $P_{orb} = 1.7857^d$. Также в данной работе впервые выдвинута гипотеза о том, что рентгеновский источник входит в двойную звездную систему.

На основе данных рентгеновских обсерваторий Einstein, ROSAT, ASCA Ларсон и Шульман [4] уточнили значение периода рентгеновской переменности двойной системы $P_{orb} = 3.4531^d$. Данное значение периода было подтверждено Дубусом и др. [5]: $P_{orb} = 3.4535^d \pm 0.0005^d$.

В 2004 г. выполнено отождествление рентгеновского источника X-7 с оптической звездой, имеющей звездную величину 18.89^m [7]. Фотометрические наблюдения в фильтре *B* и *V*, представленные в работе [7], подтвердили гипотезу о модели двойной звездной системы для рентгеновского источника X-7. Также в этой работе показано, что спектральный класс оптического спутника

X-7 лежит в пределах V0I–O7I, масса оптической звезды составляет $m_v = 25–35 M_\odot$ [7]. Уточненное значение периода двойной системы (на основе наблюдательных данных с рентгеновских обсерваторий XMM-Newton, Chandra) составило $P_{orb} = 3.45376^d \pm 0.00021^d$ [7].

Опираясь на данные обсерваторий Einstein, ROSAT и XMM-Newton, авторы работы [6] получено новое значение периода двойной системы $P_{orb} = 3.453014^d \pm 0.000020^d$. На основе данных Космического телескопа имени Хаббла, наблюдавшего OB-ассоциацию звезд HS 13, к которой относится двойная система X-7, уточнен спектральный класс оптического спутника — O6 III, и его минимальная масса — $m_v = 20 M_\odot$ [6]. Опираясь на спектральный класс оптического спутника, скорость изменения периода двойной, отсутствие эффекта рентгеновского пульсара и анализ рентгеновского спектра и оптических кривых блеска из работы [7], Питч и др. [6] предположили, что рентгеновский источник X-7 является черной дырой (ВН).

В работе [8] проведен детальный анализ фотометрических кривых блеска двойной X-7. Значение фотометрического периода двойной системы

составило $P_{orb} = 3.4530^d \pm 0.0014^d$. Значение радиуса оптического спутника заключено в пределах $R = 15-20 R_{\odot}$, а эффективная температура $T_{eff} = 33\,000-47\,000$ K [8].

В работе [9] на основе наблюдаемой кривой лучевых скоростей впервые выполнена динамическая оценка массы компактного объекта X-7. Масса компактного объекта составляет $m_x = 15.65 \pm 1.45 M_{\odot}$. Среднее значение массы для большинства кандидатов в черные дыры в тесных двойных звездных системах близко к $m_x \sim 8 M_{\odot}$. Значение же массы компактного объекта в двойной X-7 значительно отклоняется от данной средней оценки массы черных дыр. Сразу отметим, что, во-первых, оценка массы компактного объекта в работе [9] выполнена в модели точечных масс. Во-вторых, ошибки наблюдаемой кривой лучевых скоростей достаточно велики (около 20%–30% от полуамплитуды кривой лучевых скоростей), что не может не сказаться на точности оценки массы компактного объекта. Принимая во внимание важность надежной оценки массы компактного объекта в двойной системе X-7 для эволюции звездных двойных систем, мы проанализировали наблюдательные данные работы [9] в модели Роша [10, 11]. Кроме того, мы исследовали эволюционный статус системы X-7, а также изучили эволюцию рентгеновской двойной системы IC 10 X-1, содержащей звезду Вольфа–Райе (WR) и возможную черную дыру с массой около $m_x \sim 23 M_{\odot}$.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЕ ДАННЫЕ

В качестве наблюдательных данных использовались спектральные данные из работы [9]. Спектральные данные получены с 18 августа по 16 ноября 2006 г. на 8.2-м телескопе “Gemini North Telescope”. Наблюдения выполнены в диапазоне $\lambda = 4000-5000$ Å. Кривая лучевых скоростей получена на основе 22 спектров методом кросс-корреляции относительно синтетического спектра в диапазонах $\lambda = 4150-4300$ Å и $\lambda = 4521-4578$ Å. Указанные диапазоны длин волн содержат линии HeII 4200 Å и HeII 4541 Å, не блендрованные небулярными линиями. В качестве нулевой фазы авторы работы [9] использовали момент середины рентгеновского затмения источника X-7 $T_0(\text{HJD}) = 2453967.157 \pm 0.048$ (значение момента затмения находится в полном согласии со значением, полученным ранее в работе [6], и отличается от него на 95.001 ± 0.014 орбитальных циклов). Значение орбитального периода двойной системы $P_{orb} = 3.453014^d$ [9] получено из анализа рентгеновской кривой блеска. Наблюдаемая кривая лучевых скоростей приведена на рис. 1.

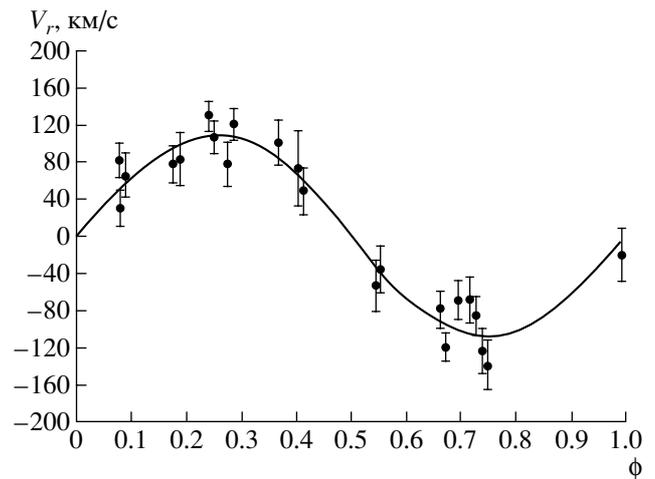


Рис. 1. Наблюдаемая и теоретическая кривая лучевых скоростей оптического спутника двойной рентгеновской системы M33 X-7. Точки — значения лучевой скорости оптической звезды из работы [9]. Сплошная линия — теоретическая кривая лучевых скоростей в модели Роша, вычисленная при массе компактного объекта $m_x = 15.55 M_{\odot}$, массе оптической звезды $m_v = 70 M_{\odot}$ и наклоне орбиты $i = 74.6^\circ$ (остальные параметры двойной системы приведены в табл. 1).

По причине отсутствия численных данных, наблюдаемая кривая лучевых скоростей из работы [9] была нами оцифрована с графика. Точность оцифровки значений лучевой скорости оптического спутника составила ~ 0.6 км/с, что намного меньше средней ошибки наблюдаемой лучевой скорости $\sim 20-25$ км/с. Поэтому точность нашей оцифровки наблюдаемой кривой лучевых скоростей из работы [9] вполне приемлема для дальнейшего анализа.

3. АНАЛИЗ НАБЛЮДАЕМОЙ КРИВОЙ ЛУЧЕВЫХ СКОРОСТЕЙ

Расстояние между компонентами в двойной системе X-7 сравнимо с радиусом оптической звезды. Значение степени заполнения полости Роша оптическим спутником в двойной системе X-7 составляет $\mu = 0.777 \pm 0.017$ [9]. Модель точечных масс, в который выполнена интерпретация кривой лучевых скоростей в работе [9], не позволяет учесть эффекты близости компонентов.

В связи с этим в данной работе выполнен анализ кривой лучевых скоростей оптического спутника двойной системы X-7 в модели Роша, которая в первом приближении позволяет учесть приливно-деформированную форму оптического спутника и неоднородное распределение температуры по его поверхности вследствие эффекта гравитационного потемнения и эффекта прогрева поверхности

Таблица 1. Численные значения параметров, используемых при моделировании кривых лучевых скоростей оптического компонента в модели Роша

P , сут	3.453014	Орбитальный период
m_v , M_\odot	варьировалась*	Масса оптической звезды
e	0.0	Эксцентриситет
i	74.6°	Наклонение орбиты
μ	0.78–1.0**	Коэффициент заполнения полости Роша оптическим компонентом
f	1.0	Коэффициент асинхронности вращения оптического компонента
$T_{\text{эфф}}$, К	35 000	Средняя эффективная температура оптического компонента
β	0.25	Коэффициент гравитационного потемнения
k_x	0.04	Отношение рентгеновской светимости релятивистского компонента к болометрической светимости оптического компонента L_x/L_v
A	1.0	Коэффициент переработки рентгеновского излучения
$x; y$	-0.186; -0.683	Коэффициенты потемнения к краю

* Масса оптической звезды менялась в ходе модельных расчетов

** Значения μ принимались равными 0.78, 0.85, 0.90, 0.95, 1.0.

звезды рентгеновским излучением релятивистского объекта. Отметим, что эффект рентгеновского прогрева в данной системе незначителен. Болометрическая светимость оптического компонента при принятой эффективной температуре поверхности $T_{\text{эфф}} = 35\,000$ К составляет $L_v = 1.3 \times$

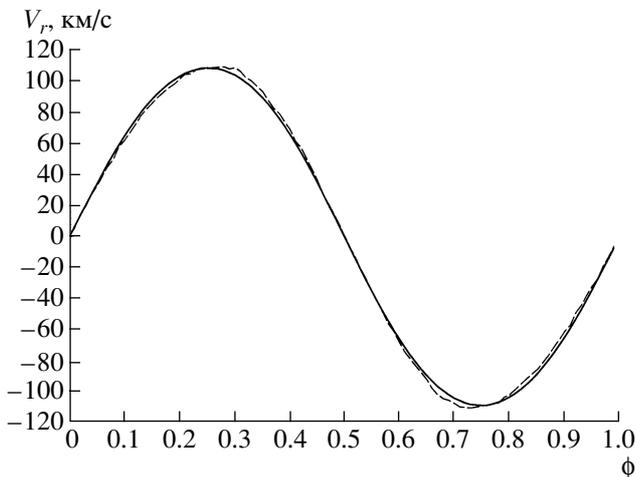


Рис. 2. Теоретические кривые лучевых скоростей оптической звезды, полученные в модели Роша при массе компактного объекта $m_x = 15.55 M_\odot$, массе оптической звезды $m_v = 70 M_\odot$ и наклонении орбиты $i = 74.6^\circ$ (остальные параметры двойной системы приведены в табл. 1). Сплошная линия — кривая лучевых скоростей, вычисленная по линии поглощения водорода $H\gamma$, штриховая линия — по линии поглощения гелия $\text{HeII } 4200 \text{ \AA}$.

$\times 10^{39}$ эрг/с. Средняя светимость рентгеновского источника вне затмения составляет $L_x = 5 \times 10^{37}$ эрг/с [6]. Таким образом, коэффициент $k_x = L_x/L_v \simeq 0.04$ (несмотря на малое значение рентгеновского прогрева поверхности оптической звезды, эффект прогрева при моделировании кривой лучевых скоростей учтен). Поэтому возмущение в кривую лучевых скоростей оптического спутника в основном вносят приливно-вращательная деформация оптической звезды и эффект гравитационного потемнения ее поверхности. Алгоритм, который использован при моделировании кривой лучевых скоростей подробно описан в работах Антохиной и Черепашука [10] и Антохиной [11]. Кратко напомним основы этого метода.

Двойная система состоит из оптической звезды, описываемой моделью Роша, и точечного рентгеновского источника. Приливно-деформированная поверхность звезды разбивалась на ~ 2600 элементарных площадок, для каждой из которой вычислялось выходящее излучение. При вычислении потока излучения от элементарной площадки учитывались эффект гравитационного потемнения, эффект прогрева поверхности звезды падающим излучением спутника (эффект “отражения”) и эффект потемнения к краю. Эффект прогрева атмосферы звезды рентгеновским излучением спутника в алгоритме [10, 11] учитывался путем сложения выходящего и падающего потоков (без учета переноса излучения в атмосфере звезды). В силу малости эффекта рентгеновского прогрева в системе X-7, такое приближение можно считать вполне удовлетворительным.

Расчет модельной кривой лучевых скоростей выполнен на основе профиля линии поглощения $H\gamma$. Профиль абсорбционной линии и его эквивалентная ширина для каждой видимой площадки с температурой T_{loc} и локальным ускорением силы тяжести g_{loc} вычислялись по таблицам Курца для бальмеровских линий [12] с применением процедуры интерполяции. Путем суммирования по видимой поверхности звезды с учетом эффекта Доплера локальных профилей, предварительно нормированных на континуум для каждой площадки, вычислялся интегральный профиль от звезды в данной фазе орбитального периода (подробнее см. [10, 11]). Вычисленный интегральный профиль линии поглощения использовался для определения лучевой скорости звезды. Лучевая скорость в данной орбитальной фазе вычислялась по средней длине волны на уровне остаточных интенсивностей $1/3$, $1/2$ и $2/3$ глубины интегрального профиля линии поглощения. При вычислении потемнения яркости диска звезды к краю использовался закон квадратного корня $I(\cos \theta) = I_0(1 - x(1 - \cos \theta) + y(1 - \sqrt{\cos \theta}))$, где θ — угол между направлением на наблюдателя и нормалью к поверхности, x и y — коэффициенты потемнения [13, 14].

Поскольку масса оптической звезды точно не известна, то за искомые параметры были приняты массы обоих компонентов двойной системы. Поэтому использовался метод перебора по параметрам и многократного решения прямой задачи. Для каждого значения массы оптического компонента m_v из дискретного набора значений 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 M_\odot при наклонении орбиты $i = 74.6^\circ$ производился перебор по массе компактного объекта m_x . Проверка адекватности модели наблюдательным данным выполнена по статистическому критерию χ^2 . Для работы был выбран уровень значимости $\alpha = 5\%$ (подробности см. в работе [15]).

В работе [9] наблюдаемые значения лучевых скоростей получены на основе фрагментов спектра, содержащих линии $HeII$ 4200 Å и $HeII$ 4541 Å. К сожалению, интерпретация кривой лучевых скоростей на основе модельной линии $HeII$ слишком многозатратна по времени. Поэтому, как упомянуто ранее, моделирование теоретической кривой лучевых скоростей выполнено на основе модельной линии поглощения $H\gamma$. Тестовый расчет показал (рис. 2), что качественная разница между модельными кривыми лучевых скоростей, полученными по линии $HeII$ 4200 Å и линии $H\gamma$, отсутствует, а количественная разница составляет в среднем 3–4 км/с, что намного меньше наблюдаемых ошибок лучевых скоростей $\Delta V_r \simeq 20\text{--}30$ км/с. Кривая лучевых скоростей по линии $HeII$ 4200 Å вычислялась на основе построения модели атмосферы

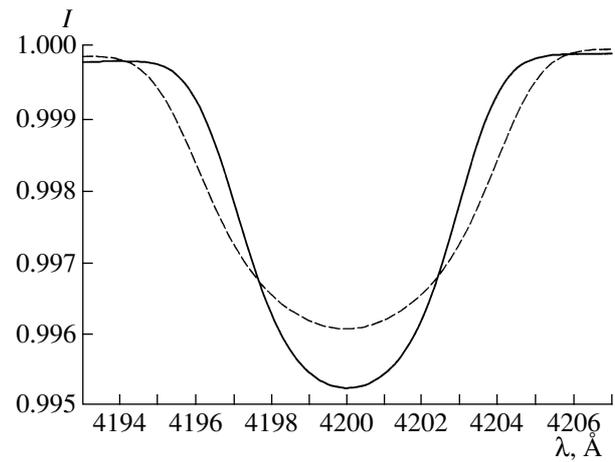


Рис. 3. Модельные интегральные профили линии поглощения $HeII$ 4200 Å оптического спутника двойной рентгеновской системы X-7 в орбитальной фазе 0.0. Профили получены в модели Роша при $m_x = 15.55 M_\odot$, $m_v = 70 M_\odot$, $i = 74.6^\circ$. Сплошная линия — профиль линии поглощения, полученный в модели Роша при значении степени заполнения полости Роша $\mu = 0.78$ (остальные параметры двойной системы приведены в табл. 1), штриховая линия — при $\mu = 1.0$. Оба модельных интегральных профиля свернуты с аппаратной функцией спектрографа с величиной $FWHM = 2 \text{ \AA}$.

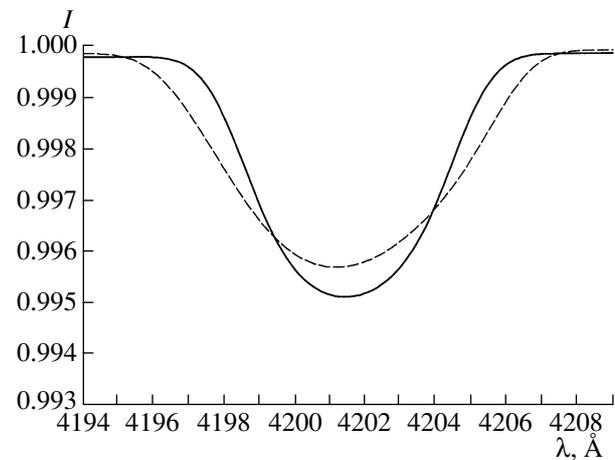


Рис. 4. То же, что на рис. 3, для орбитальной фазы 0.25.

оптической звезды [16]. На рис. 3–5 представлены модельные профили линии поглощения $HeII$ 4200 Å в двух фазах орбитального периода $\phi = 0.0, 0.25$ и профиль линии поглощения водорода $H\gamma$ при значении коэффициента заполнения полости Роша $\mu = 0.78$ и 1.0. Результат анализа наблюдаемой кривой лучевых скоростей из работы [9] в модели Роша численно представлен в табл. 2, и графически — на рис. 6.

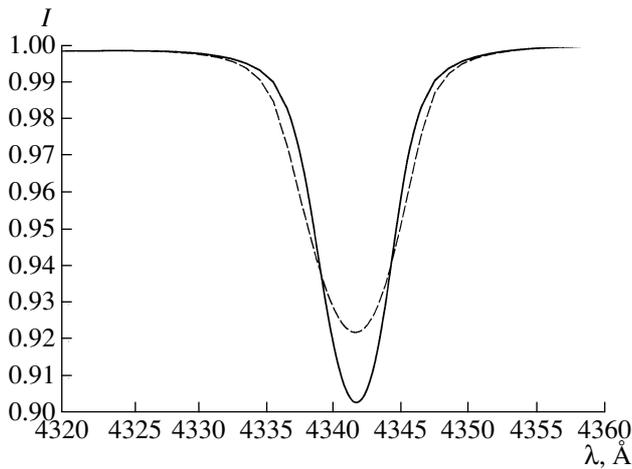


Рис. 5. То же, что на рис. 4, для линии поглощения водорода $H\gamma$.

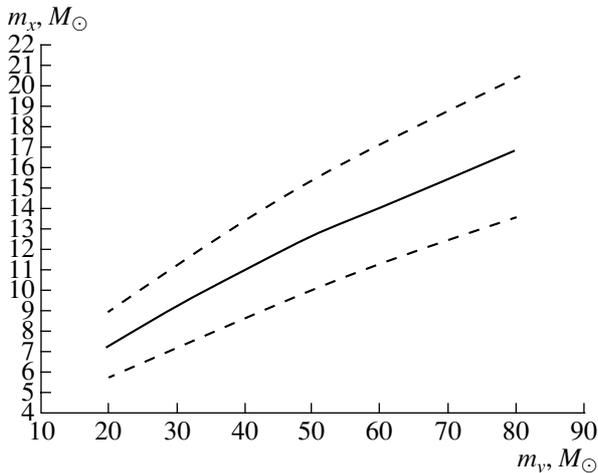


Рис. 6. Зависимость между массой компактного объекта и массой оптического спутника двойной системы X-7, полученная в результате интерпретации наблюдаемой кривой лучевых скоростей из работы [9] в модели Роша. Параметры двойной системы приведены в табл. 1. Сплошная линия — центральные значения массы черной дыры, штриховые линии соответствуют верхней и нижней границам ошибки центрального значения в рамках статистики χ^2_M при уровне доверия $\gamma = 95\%$ (M — число наблюдаемых точек на кривой лучевых скоростей).

На рис. 7 показан график невязки Δ между наблюдаемой и теоретической кривыми лучевых скоростей, по минимуму которой устанавливается соответствие между массами m_v и m_x . Видно, что модель Роша для системы X-7 не отвергается по уровню значимости $\alpha = 0.05$. Модель может быть принята, и можно оценить оптимальные значения параметров и их доверительные интервалы (ошибки) на уровне доверия $\gamma = 1 - \alpha = 0.95$.

Результат интерпретации в нашей более сложной и физически более адекватной модели подтвердил количественные выводы авторов работы [9]. Вследствие малой степени заполнения полости Роша оптической звездой значение массы черной дыры в нашей работе и в работе [9] близки: $15.55 \pm 3.20 M_\odot$ и $15.65 \pm 1.45 M_\odot$, соответственно (при наиболее вероятной массе оптической звезды $m_v = 70 M_\odot$).

Рассмотрим зависимость амплитуды теоретической кривой лучевых скоростей от степени заполнения полости Роша оптической звездой. На рис. 4 и 5 представлены модельные профили линии поглощения $HeII$ 4200 \AA и $H\gamma$, полученные при значении степени заполнения полости Роша оптической звездой $\mu = 0.78$ и 1.0 . Из рисунков видно, что “центр тяжести” линии поглощения, полученной при значении $\mu = 0.78$, более смещен в красную сторону в сравнении с “центром тяжести” линии поглощения, полученной при полном заполнении полости Роша, т.е. полуамплитуда кривой лучевых скоростей оптической звезды K_v уменьшается с ростом коэффициента заполнения полости Роша μ .

Следующий расчет, представляемый в данной работе, показывает количественную разницу полуамплитуды кривой лучевых скоростей в модели точечных масс и в модели Роша при разной степени ее заполнения μ . Для данного расчета использовались параметры системы X-7, масса компактного объекта принята равной $m_x = 15.55 M_\odot$, масса оптического спутника $m_v = 70 M_\odot$. Полуамплитуда кривой лучевых скоростей для данных значений параметров двойной системы составила $V_c = 108.65 \text{ км/с}$. Приведенная в табл. 3 разница полуамплитуды кривых лучевых скоростей практически не зависит от значения наклона орбиты двойной системы (по крайней мере для диапазона $i = 60^\circ - 90^\circ$). Видно, что с увеличением μ полуамплитуда теоретической кривой лучевых скоростей убывает и при $\mu = 1.0$ она на 6.11 км/с меньше, чем в случае модели точечных масс. Масса релятивистского объекта m_x в модели Роша возрастает с увеличением μ .

Из табл. 3 видно, что вплоть до значения параметра $\mu = 0.90$ разница полуамплитуды кривой лучевых скоростей близка к $\sim 1\%$ от самой величины полуамплитуды. В случае же более полного заполнения полости Роша $\mu = 0.95 - 1.0$ уменьшение полуамплитуды кривой лучевых скоростей составляет $\sim 3 - 6\%$ от величины полуамплитуды, полученной в модели точечных масс.

Результаты интерпретации наблюдаемой кривой лучевых скоростей X-7 в модели Роша близки к результатам интерпретации, полученным в модели точечных масс даже при полном заполнении полости Роша оптической звездой. Так, различие

между массой компактного объекта, полученного в модели Роша при $\mu = 0.78$ и в модели точечных масс, составляет 0.6%, а при $\mu = 1.0$ различие составляет 2.5%. Обратим внимание на то, что такая близость значений оценки массы компактного объекта, полученных в модели Роша и в модели точечных масс, неуниверсальна. Так, например, при использовании точечной модели двойной системы при оценке масс рентгеновских пульсаров в паре с ОВ-гигантами получается систематическое занижение массы компактного объекта до $\sim 10\%$ (см. работы Абубекерова и Абубекерова и др. [17–19]. При наличии сильного рентгеновского прогрева оптической звезды, который вносит значительные изменения в форму профиля линий поглощения, использование точечной модели дает результаты, далекие от реальности [20].

В двойной системе X-7 близость значений оценки массы компактного объекта, полученных в модели Роша и в модели точечных масс, объясняется достаточно большим значением массы компактного объекта и низким коэффициентом рентгеновского прогрева $k_x = 0.04$. Таким образом, проведенная нами интерпретация наблюдаемой кривой лучевых скоростей оптической звезды двойной системы X-7 в нашей более адекватной модели полностью подтверждает количественные выводы авторов работы [9].

Несмотря на то, что оценки массы оптического спутника колеблются от 20 до 70 M_\odot , в нашей работе за наиболее вероятное значение массы оптической звезды принято $m_v = 70 M_\odot$, так как данное значение получено по наиболее полному набору наблюдательных данных — на основе спектрального анализа, результатов интерпретации кривой блеска оптической звезды и длительности рентгеновского затмения [9].

Опираясь на оценку массы оптической звезды $m_v = 70 \pm 6.9 M_\odot$ [9], мы получаем, что масса компактного объекта лежит в пределах $m_x = 14.5\text{--}16.5 M_\odot$. Как уже отмечалось, данное значение массы черной дыры значительно отклоняется от среднего значения $m_x \simeq 8 M_\odot$ для большинства двойных систем с черной дырой. Также подчеркнем, что модель Роша для двойной системы при интерпретации наблюдаемой кривой лучевых скоростей может быть принята по критерию χ^2_M (где M — число наблюдаемых точек кривой лучевых скоростей) на уровне доверия $\gamma = 95\%$. Далее в работе исследуются эволюционные сценарии, способные привести к формированию системы, подобной X-7.

Недавно появилось сообщение [21], в котором приводится оценка минимально возможной массы компонентов двойной системы IC 10 X-1, состоящей из звезды Вольфа–Райе и компактного объекта (предполагаемая черная дыра). Масса звезды Вольфа–Райе составляет $m_v = 32.7 \pm 2.6 M_\odot$,

Таблица 2. Зависимость между массами компонентов двойной системы X-7 при наклонении орбиты $i = 74.6^\circ$ (указаны ошибки, соответствующие 95%-доверительному интервалу в рамках статистики χ^2_M , где M — число точек на кривой лучевых скоростей)

m_v, M_\odot	m_x, M_\odot
20	7.30 ± 1.60
30	9.30 ± 2.00
40	11.0 ± 2.40
50	12.65 ± 2.70
60	14.15 ± 2.90
70	15.55 ± 3.20
80	16.95 ± 3.40

Таблица 3. Разница полуамплитуды кривой лучевых скоростей, полученной в модели Роша V_{Roche} и в модели точечных масс V_c , как функция степени заполнения оптической звездой своей полости Роша μ

μ	$V_c - V_{Roche}, \text{км/с}$	m_x, M_\odot^*
0.78	0.80	15.55
0.85	1.43	15.60
0.90	2.11	15.65
0.95	3.24	15.75
1.00	6.11	15.95

* Значение массы черной дыры, полученное в модели Роша при массе оптической звезды $m_v = 70 M_\odot$. Остальные параметры модели приведены в табл. 1.

масса черной дыры, полученная на основе наблюдаемой кривой лучевых скоростей оптического спутника, $m_x = 23.1 \pm 2.1 M_\odot$. Отметим, что, поскольку до сих пор не установлено точное соответствие между моментами затмения компонентов и моментом перехода через γ -скорость кривой лучевых скоростей, построенной по эмиссионной линии HeII 4200 Å, вывод о большой массе черной дыры в этой системе не может считаться окончательным. Тем не менее мы рассмотрели возможность образования двойной системы с данными массами компонентов.

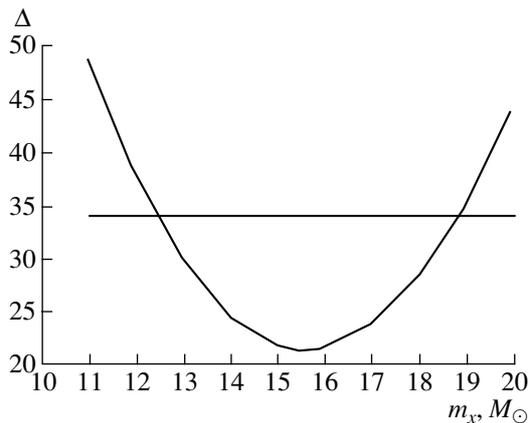


Рис. 7. Зависимость невязки Δ между наблюдаемой и теоретической кривой лучевых скоростей при $m_v = 70 M_\odot$. Горизонтальная линия соответствует критическому значению χ^2 на уровне значимости $\alpha = 0.05$.

4. ЭВОЛЮЦИОННЫЕ СЦЕНАРИИ ДЛЯ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ X-7 И IC 10 X-1

В работе [9] система X-7 обсуждается с эволюционной точки зрения. Авторы работы [9] приходят к выводу, что современные эволюционные сценарии объясняют существование систем типа X-7 с большим трудом. По представлениям, существующим в некоторых эволюционных сценариях, проблема выглядит следующим образом. Размер первоначально более массивной звезды превышает текущее расстояние между компонентами, следовательно, система должна пройти через стадию общей оболочки, во время которой компоненты системы сблизилась. Однако для формирования черной дыры с массой около $15 M_\odot$ необходимо, чтобы звезда заполнила свою полость Роша (и последовала стадия с общей оболочкой) сразу после завершения горения гелия в ядре. После завершения горения гелия в ядре радиус звезды должен быть меньше, чем в процессе горения, а значит заполнения полости Роша быть не должно.

Анализ возможных эволюционных треков систем X-7 и IC 10 X-1 выполнен на программном комплексе “Машина сценариев”. Поскольку принципы работы “Машины сценариев” многократно описаны, то в настоящей работе мы ограничились указанием значений основных параметров, использованных в расчетах. Подробное описание “Машины сценариев” содержится в [22, 23].

В работе [24] получены функции масс черных дыр в рентгеновских двойных системах, рассчитанные в различных эволюционных сценариях. Подчеркнем, что один из рассматриваемых в работе [24] эволюционных сценариев предсказывал существование черных дыр с массами до $50 M_\odot$. При этом

данный сценарий удовлетворял важнейшему критерию отбора реалистичных эволюционных сценариев, которым являлось требование наличие в Галактике систем типа Cyg X-1.

В работе [24] использованы сценарии эволюции A, B, C и W¹, которые отличаются темпом истечения вещества, зависимостью масс ядер звезд от начальной массы звезды, зависимостью “масса–радиус”. Подробное описание перечисленных сценариев содержится в работах [23, 24]. Также в работе [24] показано, что сценарий B отвергается, поскольку в его рамках невозможно объяснить наличие в Галактике системы типа Cyg X-1 (которая не является статистическим выбросом). Поэтому в данной работе эволюционный сценарий B не использовался. Отметим, что сценарий звездной эволюции B основан на эволюционных представлениях, используемых в работе [9].

Рассмотрим расчеты эволюционных треков двойной, проведенные в сценариях A, C и W. Последние два сценария эволюции отличаются более высоким темпом потери массы по сравнению со сценарием A. В первом грубом приближении их можно считать сценариями, отвечающими большей металличности звезд. Расчеты показали, что в рамках эволюционных сценариев C и W системы типа X-7 или IC 10 X-1 получить невозможно. В рамках сценария A обнаружена область значений параметров, при которых образование систем типа X-7 или IC 10 X-1 оказалось возможным.

Более подробное описание эволюционного сценария A содержится в работах [22–24]. Здесь мы опишем лишь те параметры, которые выступали в качестве свободных параметров задачи. В ходе моделирования двойной системы (предшественника двойных X-7 и IC 10 X-1) варьировалась доля и темп потери массы звезды на стадии главной последовательности и стадии звезды Вольфа–Райе, а также доля массы предсверхновой звезды, уходящей под горизонт событий. Темп потери массы звездой \dot{M} очень важен по двум причинам: во-первых, он существенно влияет на размер большой полуоси двойной системы, а во-вторых, непосредственно на само значение массы звезд. Темп потери массы \dot{M} на стадии главной последовательности описывается классической формулой

$$\dot{M} = \frac{\alpha L}{cV_\infty}, \quad (1)$$

¹ Подчеркнем, что сценарии A, B, C и W представляют собой набор различных предположений о физических параметрах звезд на разных стадиях их эволюции, а не обозначения типов обмена массами в соответствии с классической классификацией, введенной Киппенханом и Вейгертом [25].

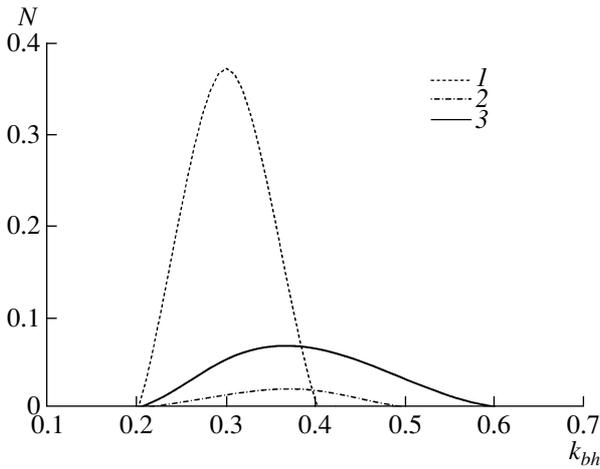


Рис. 8. Количество систем типа МЗЗ X-7 на спиральную галактику с массой $10^{11} M_{\odot}$ и темпом звездообразования, заданным функцией Солпитера. Цифрами обозначены кривые, рассчитанные при различном наборе эволюционных параметров (см. текст). По оси ординат — ожидаемое абсолютное число систем типа МЗЗ X-7 в галактике. По оси абсцисс — доля массы предсверхновой, которая попадает под горизонт событий в момент образования черной дыры. Видно, что в случае “1” ($\alpha = 0.3, k_{WR} = 0.3, k_{bh} = 0.3$) максимальное ожидаемое число систем типа МЗЗ X-7 равно 0.37, что по порядку величины близко к единице.

где L — светимость звезды, V_{∞} — скорость ее ветра на бесконечности, c — скорость света, α — свободный параметр. Изменение массы ΔM в сценарии А в течение одной эволюционной стадии не превышает величины $0.1 (M - M_{core})$, где M — масса звезды в начале стадии, M_{core} — масса ядра этой звезды. Потерю массы на стадии звезды Вольфа–Райе мы параметризовали как $\Delta M_{WR} = k_{WR} M_{WR}$, где M_{WR} — максимальная масса звезды на стадии звезды Вольфа–Райе.

Масса черной дыры M_{BH} , образовавшейся в результате взрыва предсверхновой с массой M_{preSN} , вычислялась по формуле:

$$M_{BH} = k_{bh} M_{preSN}, \quad (2)$$

в которой коэффициент k_{bh} является долей массы предсверхновой, уходящей под горизонт событий в процессе коллапса.

Коэффициенты α и k_{WR} принимали значения 0.3 (стандартное значение, используется при расчетах в сценарии А) и 0.1. Ослабленный ветер призван грубо имитировать металличность системы X-7, которая меньше солнечной [9]; галактика IC 10 также бедна металлами (см., например, [26]). Величина k_{bh} изменялась в пределах от 0.1 до 1.0.

При проведении популяционного синтеза мы принимаем в качестве системы X-7 двойную звезду, состоящую из черной дыры с массой $m_{BH} =$

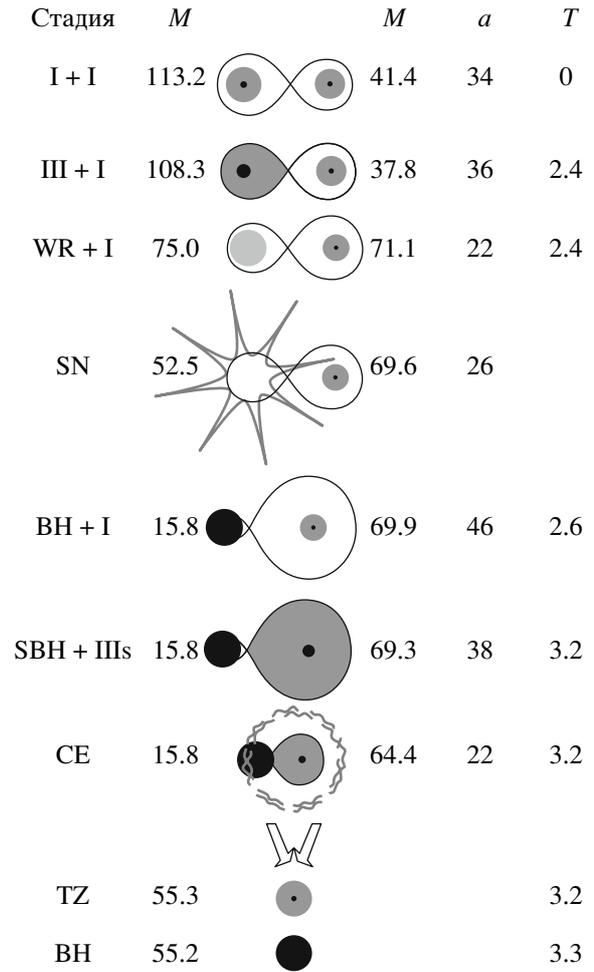


Рис. 9. Характерный эволюционный сценарий, приводящий к образованию системы типа МЗЗ X-7. Обозначения эволюционных стадий (подробнее см. [23]): I — звезда главной последовательности, III, IIIs — звезды на стадии заполнения полости Роша, WR — звезда Вольфа–Райе, BH — черная дыра, SBH — черная дыра со сверхкритическим темпом аккреции, SN — взрыв сверхновой, CE — стадия общей оболочки, TZ — объект Торна–Житков. Приведены значения масс первой и второй звезд M (в M_{\odot}), большая полуось системы a (в R_{\odot}) и возраст системы T (в млн. лет). Все эти величины приведены на начало соответствующих стадий, а в момент взрыва сверхновой — на момент непосредственно перед взрывом. Значения свободных параметров задачи: $\alpha = 0.3, k_{WR} = 0.3, k_{bh} = 0.3$.

$= 14-17 M_{\odot}$ и звезды главной последовательности, находящейся в конце своей эволюции, масса которой $m_v = 65-75 M_{\odot}$; орбитальный период системы $P_{orb} \lesssim 5^d$. В качестве системы IC 10 X-1 в процессе расчетов принимается двойная звезда, состоящая из черной дыры с массой $m_{BH} = 23-34 M_{\odot}$ и звезды Вольфа–Райе с массой $m_{WR} = 17-35 M_{\odot}$; орбитальный период такой системы $P_{orb} \lesssim 1.5^d$. Для каждого набора параметров

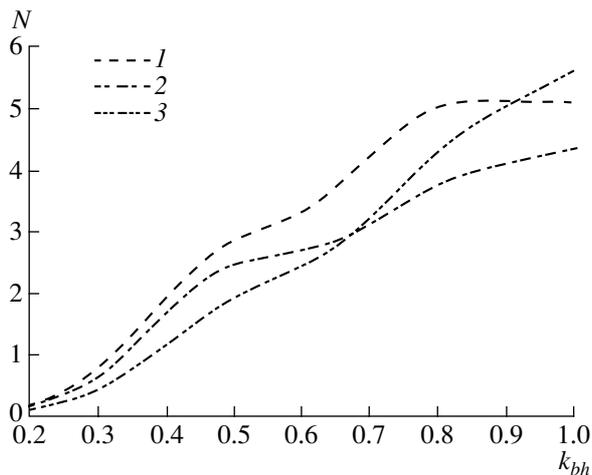


Рис. 10. То же, что на рис. 8, для систем типа IC 10 X-1.

эволюционного сценария проведен популяционный синтез 10^6 двойных систем. Согласно результатам популяционного синтеза двойные системы типа X-7 должны присутствовать в галактике с массой $10^{11} M_{\odot}$ и темпом звездообразования, заданным функцией Солпитера. Количество подобных систем должно быть в настоящий момент порядка единицы (рис. 8). Результаты расчетов приведены на рис. 8–11.

На рис. 8 и 10 показано количество систем соответственно типа X-7 и IC 10 X-1 в спиральной галактике с массой $10^{11} M_{\odot}$ и темпом звездообразования, заданным функцией Солпитера. Цифрами на рисунках обозначены кривые, рассчитанные со следующим набором параметров: 1 – $\alpha = 0.3$, $k_{WR} = 0.3$, 2 – $\alpha = 0.1$, $k_{WR} = 0.1$, 3 – $\alpha = 0.1$, $k_{WR} = 0.3$. Из рис. 8 видно, что существуют значения параметра k_{bh} при которых системы типа X-7 можно получить. Если учесть, что темп звездообразования, по крайней мере на единицу площади, в галактике M33 выше среднего среди спиральных галактик Местной группы (см., например, [27]), то происхождение системы X-7 может быть объяснено в рамках сценария А. Из рис. 10 видно, что системы типа IC 10 X-1 можно получить в широком диапазоне значений параметра k_{bh} . Учитывая, что в галактике IC 10 идет активное звездообразование, можно ожидать, что темп образования массивных звезд в IC 10 по порядку величины сравним с темпом образования массивных звезд в Млечном Пути (несмотря на то, что масса IC 10 примерно на 2 порядка меньше, чем масса Галактики). Повидимому, в галактике IC 10 продолжается начавшийся около 10 млн. лет назад всплеск звездообразования (см., например, [26, 28]).

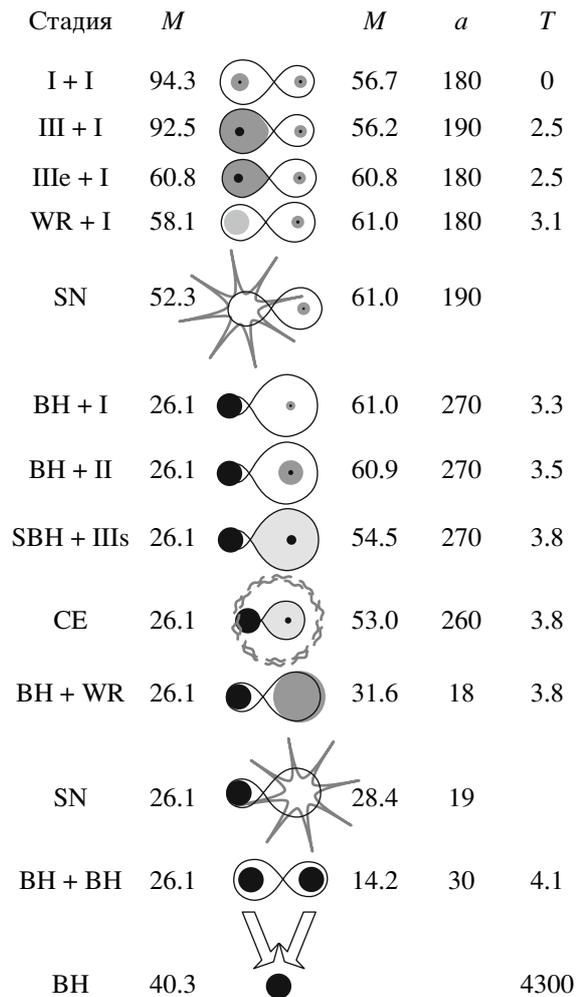


Рис. 11. Характерный эволюционный сценарий, приводящий к образованию системы типа IC 10 X-1. Обозначения эволюционных стадий (подробнее см. [23]): I – звезда главной последовательности, II – звезда, закончившая эволюцию на главной последовательности, но не заполняющая свою полость Роша, III, IIIe и IIIs – звезды на стадии заполнения полости Роша, WR – звезда Вольфа–Райе, BH – черная дыра, SBH – черная дыра со сверхкритическим темпом аккреции, SN – взрыв сверхновой, CE – стадия общей оболочки. Приведены значения масс первой и второй звезд M (в M_{\odot}), большая полуось системы a (в R_{\odot}) и возраст системы T (в млн. лет). Все эти величины приведены на начало соответствующих стадий, а в момент взрыва сверхновой – на момент непосредственно перед взрывом. Значения свободных параметров задачи: $\alpha = 0.1$, $k_{WR} = 0.1$, $k_{bh} = 0.5$.

На рис. 9 представлен характерный эволюционный сценарий, приводящий к образованию системы типа X-7. Во всех сценариях, в которых удастся получить систему типа X-7, качественная схема эволюции двойной системы очень похожа. В начале эволюции это – массивная тесная двойная система, причем масса первой звезды находится

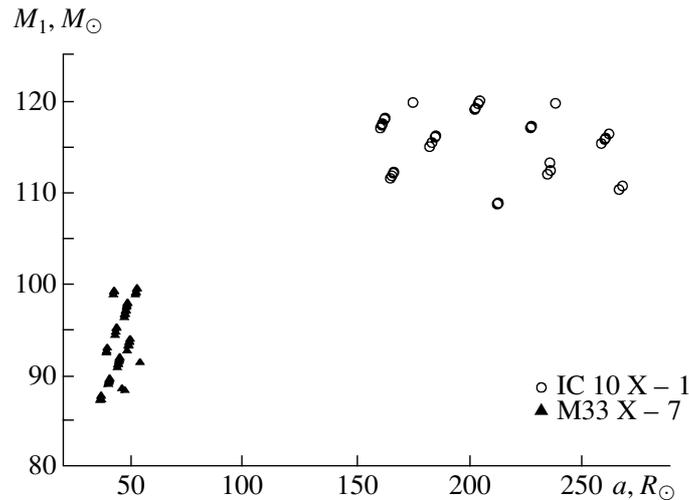


Рис. 12. Начальные параметры систем, результатом эволюции которых являются исследуемые двойные системы: по оси ординат — начальная масса первичного (изначально более массивного) компонента, по оси абсцисс — начальная большая полуось системы. Треугольниками обозначены двойные, эволюция которых приводит к образованию систем типа М33 X-7, кружками — двойные, эволюция которых приводит к образованию систем типа IC 10 X-1. Значения свободных параметров задачи: $\alpha = 0.1$, $k_{WR} = 0.1$, $k_{bh} = 0.3$.

в диапазоне $m_1 = 80-120 M_\odot$, масса второй — в диапазоне $m_2 = 40-60 M_\odot$, а начальная большая полуось орбиты $a \lesssim 100 R_\odot$. Примерный диапазон начальных параметров предшественников системы типа X-7 также показан на рис. 12 и 13. После выгорания водорода в ядре первая, более массивная звезда заполняет свою полость Роша. Начинается перетекание вещества на соседнюю звезду, как правило, быстрее, чем в ядерной шкале времени (стадия III в работе [23]); иногда заключительная часть перетекания может происходить в шкале времени, близкой к ядерной (стадия IIIe в работе [23]). После потери оболочки первой звездой на ее месте остается звезда Вольфа–Райе, которая, взрываясь, образует черную дыру. Слабый звездный ветер на стадии главной последовательности, а также “правильно подобранное” значение доли массы предсверхновой, попадающей под горизонт событий в процессе формирования черной дыры, позволяют сформировать черную дыру требуемой массы (около $15-20 M_\odot$) в достаточно тесной системе. Отметим также, что система типа X-7 до своего образования не проходит стадии общей оболочки². Качественно дальнейший ход эволюции двойной типа X-7 выглядит следующим образом.

² Подробнее см. работу [23]. В “Машине сценариев” принято, что системы типа В по классификации Киппенхана и Вейгерта [25] образуют общую оболочку, если выполнено условие $q \leq q_{cr} = 0.3$. Здесь $q = M_{accretor}/M_{donor}$ — отношение масс первичной звезды-аккретора и звезды-донора. В случае приведенного на рис. 9 трека величина $q \approx 0.35$ в начале стадии заполнения полости Роша первой, первоначально более массивной звездой.

Вторая (первоначально менее массивная) звезда заполняет свою полость Роша, вследствие чего начинается сверхкритическая аккреция на черную дыру, затем происходит образование общей оболочки, и двойная система заканчивает существование в результате слияния компонентов с образованием объекта Торна–Житков. Конечным результатом эволюции системы типа X-7 является одиночная массивная черная дыра. Отметим, что во время движения черной дыры по спирали в центр невырожденной звезды (стадия объекта Торна–Житков), система может быть источником гравитационных волн [29].

Теперь рассмотрим характерный эволюционный трек двойной системы, приводящий к образованию двойной системы типа IC 10 X-1 (рис. 11). В начале эволюции масса первой звезды находится в диапазоне $m_1 = 80-120 M_\odot$, масса второй звезды — в диапазоне $m_2 = 15-60 M_\odot$, начальная большая полуось орбиты двойной системы находится в диапазоне $a \simeq 170-200 R_\odot$. Примерный диапазон начальных параметров предшественников системы типа IC 10 X-1 также показан на рис. 12 и 13. Отметим, что в процессе обмена веществом масса звезды может превзойти начальную массу, поэтому минимальная начальная масса второй звезды может быть меньше, чем оценка массы звезды Вольфа–Райе в системе IC 10 X-1. После выгорания водорода в ядре первая, более массивная звезда заполняет свою полость Роша. Начинается перетекание вещества на соседнюю звезду, как правило, быстрее, чем в ядерной шкале времени (стадия III в работе [23]), а заключительная часть

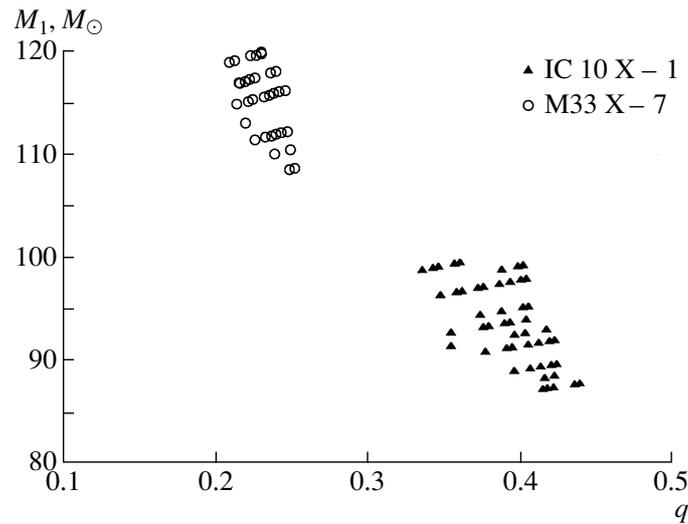


Рис. 13. Начальные параметры систем, результатом эволюции которых являются исследуемые двойные системы: по оси ординат — начальная масса первичного (изначально более массивного) компонента, по оси абсцисс — отношение масс компонентов системы $q = M_2/M_1 < 1$ в начале эволюции. Обозначения как на рис. 12. Значения свободных параметров задачи: $\alpha = 0.1$, $k_{WR} = 0.1$, $k_{bh} = 0.3$.

перетекания происходит в шкале времени, близкой к ядерной (стадия IIIe в работе [23]). После потери оболочки первой звездой на ее месте остается звезда Вольфа–Райе, которая, взрываясь, образует черную дыру. Далее, закончив эволюцию на главной последовательности, свою полость Роша заполняет вторая звезда. После фазы сверхкритической аккреции на черную дыру на стадии заполнения полости Роша наступает стадия общей оболочки системы, во время которой звезды очень тесно сближаются, а оболочка нерелятивистского компонента теряется. Образуется пара, состоящая из черной дыры и звезды Вольфа–Райе. В процессе коллапса звезды Вольфа–Райе в такой двойной системе может произойти гамма-всплеск. Конечным результатом эволюции двойной системы типа IC 10 X-1 является слияние вследствие гравитационного излучения двух черных дыр (остатков эволюции компонентов системы) с образованием одиночной массивной черной дыры. При слиянии двух черных дыр формируется всплеск гравитационно-волнового излучения.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Используя кривую лучевых скоростей оптической звезды в системе M33 X-7 [9] и принимая параметры этой системы, найденные из анализа кривой блеска [9] ($\mu = 0.78$, $i = 74^\circ.6$), мы построили зависимость между массой черной дыры m_x и массой оптической звезды m_v (табл. 2, рис. 6) в рамках модели Роша для оптической звезды. Мы также исследовали влияние приливной деформации и гравитационного потемнения оптической

звезды на значение массы черной дыры m_x при различных значениях степени заполнения полости Роша оптической звездой μ (табл. 3). Оказалось, что при $\mu = 0.78$ влияние эффектов взаимной близости компонентов на кривую лучевых скоростей оптической звезды сравнительно невелико, что обосновывает корректность определения массы черной дыры в этой системе $m_x = 15.65 \pm 1.45 M_\odot$ (при $m_v = 70 M_\odot$), выполненного в работе Ороша и др. [9]. Наше определение массы черной дыры при $m_v = 70 M_\odot$ в пределах ошибок совпадает с этим значением: $m_x = 15.55 \pm 3.20 M_\odot$, где ошибка соответствует 95%-доверительному интервалу в рамках статистики χ^2_M , где M — число наблюдательных точек на кривой лучевых скоростей. Подчеркнем, что если бы степень заполнения полости Роша оптической звездой μ была близка к единице, масса черной дыры при прочих равных условиях составила бы $m_x = 15.95 \pm 3.2 M_\odot$, что на $\sim 3\%$ выше, чем в случае $\mu = 0.78$. Это демонстрирует важность использования для интерпретации кривой лучевых скоростей не модели двух точечных масс, а более реалистичной модели Роша, учитывающей приливно-вращательную деформацию оптической звезды и ее гравитационное потемнение.

В работе также исследован эволюционный статус рентгеновских двойных систем M33 X-7 и IC 10 X-1. Показано, что существование таких систем, содержащих вероятные черные дыры больших масс, вполне реально в галактиках M33 и IC 10 при разумных физических предположениях о начальных параметрах этих систем и процессах массообмена в них. В процессе эволюции система IC 10 X-1 должна будет пройти стадию, в течение

которой она будет состоять из черной дыры и звезды Вольфа–Райе. В момент коллапса звезды Вольфа–Райе в этой двойной может произойти гамма-всплеск. Показано, что в конце эволюции системы IC 10 X-1 должно происходить слияние двух массивных черных дыр, что может приводить к всплеску гравитационно-волнового излучения. В случае системы X-7 на стадии образования объекта Торна–Житков также должен наблюдаться всплеск гравитационно-волнового излучения [29]. Эти выводы важны для постановки наблюдательных программ на современных лазерных гравитационно-волновых антеннах, таких как LIGO, VIRGO и др.

Следует подчеркнуть, что с открытием черной дыры в системе M33 X-7 [9] наступила эра поиска черных дыр в других галактиках Местной группы. Это стало возможным в связи с пуском в строй крупных 8–10-м телескопов нового поколения. Замечательно то, что первые открытия новых черных дыр звездной массы в других галактиках не противоречат гипотезе о бимодальном распределении масс релятивистских объектов [30–32]. Первый вывод о бимодальном распределении масс релятивистских объектов и провале в распределении масс нейтронных звезд и черных дыр в интервале $m_x = 2 - 4 M_\odot$ [30] был сделан на основе данных о массах примерно 40 объектов (~20 нейтронных звезд и ~20 черных дыр). Открытие новых черных дыр в других галактиках позволит существенно нарастить число определений масс релятивистских объектов и тем самым увеличить значимость соответствующих статистических выводов. Важно отметить, что увеличение числа обнаруженных черных дыр в рентгеновских двойных системах открывает перспективы для проверки новых теорий гравитации [32, 33].

Авторы благодарят В.В. Шиманского за помощь в вычислениях и полезные обсуждения, а также А.В. Тутукова за ценные замечания.

Выражаем благодарность за финансовую поддержку работы грантом РФФИ 08-02-01220, грантом Программы государственной поддержки ведущих научных школ РФ НШ-1685.2008.2, грантом Президента РФ для государственной поддержки молодых российских ученых-кандидатов наук МК-2059.2007.2 и грантом аналитической ведомственной целевой программы “Развитие научного потенциала высшей школы” РНП-2.1.1.5940.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. S. Long, S. Dodorico, P. A. Charles, and M. A. Dopita, *Astrophys. J. (Letters)* **246**, L61 (1981).
2. G. Peres, F. Reale, A. Collura, and G. Fabbiano, *Mem. Soc. Astron. Ital.* **60**, 221 (1989).
3. G. Peres, F. Reale, A. Collura, and G. Fabbiano, *Astrophys. J.* **336**, 140 (1989).
4. D. T. Larson and E. Schulman, *Astron. J.* **113**, 618 (1997).
5. G. Dubus, P. A. Charles, K. S. Long, *et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **302**, 731 (1999).
6. W. Pietsch, F. Haberl, M. Sasaki, *et al.*, *Astrophys. J.* **646**, 420 (2006).
7. W. Pietsch, B. J. Mochejska, Z. Misanovic, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **413**, 879 (2004).
8. A. Shporer, J. Hartman, T. Mazeh, W. Pietsch, *Astron. and Astrophys.* **462**, 1091 (2007).
9. J. A. Orosz, J. E. McClintock, R. Narayan, *et al.*, *Nature* **449**, 872 (2007).
10. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **71**, 420 (1994).
11. Э. А. Антохина, *Астрон. журн.*, **73**, 532 (1996).
12. R. L. Kurucz, *Kurucz CD-Roms* (Cambridge, MA, USA: Smithsonian Astrophys. Observ., 1993).
13. J. Diaz-Cordoves and A. Gimenez, *Astron. and Astrophys.* **227**, 259 (1992).
14. W. Van Hamme, *Astron. J.* **106**, 2096 (1995).
15. А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **70**, 1157 (1993).
16. Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, В. В. Шиманский, *Астрон. журн.* **82**, 131 (2005).
17. М. К. Абубекеров, *Астрон. журн.* **81**, 714 (2004).
18. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **81**, 108 (2004).
19. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **81**, 606 (2004).
20. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. М. Черепашук, В. В. Шиманский *Астрон. журн.* **83**, 609 (2006).
21. J. M. Silverman and A. V. Filippenko, e-Print arXiv:0802.2716v [astro-ph] (2008).
22. V. M. Lipunov, K. A. Postnov, and M. E. Prokhorov, *Astrophys. and Space Phys. Revs* **9**, 1 (1996).
23. V. M. Lipunov, K. A. Postnov, M. E. Prokhorov, *et al.*, e-Print arXiv:0704.1387v2 [astro-ph] (2007).
24. А. И. Богомазов, М. К. Абубекеров, В. М. Липунов, *Астрон. журн.* **82**, 722 (2005).
25. R. Kippenhahn and A. Weigert, *Z. Astrophys.* **65**, 251 (1967).
26. P. Massey, K. A. G. Olsen, P. W. Hodge, *et al.*, *Astron. J.* **133**, 2393 (2007).
27. E. Gardan, J. Braine, K. F. Schuster, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **473**, 91 (2007).
28. W. D. Vacca, C. D. Sheehy, and J. R. Graham, *Astrophys. J.* **662**, 272 (2007).

29. S. N. Nazin and K. A. Postnov, *Astron. and Astrophys.* **303**, 789 (1995). 32. К. А. Постнов, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **80**, 1075 (2003).
30. А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **78**, 145 (2001). 33. T. Johannsen, D. Psaltis, and J. E. McClintock, e-Print arXiv:08031835v1 [astro-ph] (2008).
31. А. М. Черепашук, *Усп. физ. наук* **173**, 345 (2003).

The Mass of the Black Hole in the X-ray Binary M33 X-7 and the Evolutionary Status of M33 X-7 and IC 10 X-1

M. K. Abubekеров, E. A. Antokhina, A. I. Bogomazov, and A. M. Cherepashchiuk

We have analyzed the observed radial-velocity curve for the X-ray binary M33 X-7 in a Roche model. We have analyzed the dependence between the component masses and the degree of filling of the optical star's Roche lobe to obtain the ratio of the masses of the optical star and compact object. For the most probable mass of the optical star, $m_v = 70 M_\odot$, the mass of the compact object is $m_x = 15.55 \pm 3.20 M_\odot$. It has been shown that black holes with masses of $m_x = 15 M_\odot$ and even higher can form in binaries. We present characteristic evolutionary tracks for binary systems passing through an evolutionary stage with properties similar to M33 X-7-type objects. According to population-synthesis analyses, such binaries should be present in galaxies with masses of at least $10^{11} M_\odot$. The present number of such systems in M33 should be of the order of unity. We have also studied the evolutionary status of the X-ray binary IC 10 X-1 with a Wolf-Rayet component, which may contain a massive black hole. The final stages of the evolution of the M33 X-7 and IC 10 X-1 systems should be accompanied by the radiation of gravitational waves.