

УДК 524.387-54

ИЗУЧЕНИЕ ЭВОЛЮЦИИ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ Cyg X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1, SS 433 И M33 X-7 ПРИ ПОМОЩИ “МАШИНЫ СЦЕНАРИЕВ”

© 2014 г. А. И. Богомазов*

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

Поступила в редакцию 13.05.2013 г.; принята в печать 11.06.2013 г.

При помощи “Машины сценариев” рассчитаны эволюционные треки рентгеновских двойных звезд Cyg X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1, SS 433 и M33 X-7. Компактные объекты в IC 10 X-1, NGC 300 X-1 и M33 X-7 являются наиболее массивными кандидатами в черные дыры звездных масс. Системы Cyg X-3, IC 10 X-1 и NGC 300 X-1 представляют собой все известные на сегодняшний день звезды Вольфа–Райе в паре с вырожденной компонентой. SS 433 — это единственный известный в Млечном Пути супераккректор. Следовательно, исследуемые звезды являются отличной лабораторией для тестирования сценариев эволюции двойных звезд в предельных условиях. Показано соответствие классического эволюционного сценария современным наблюдательным данным. В ходе эволюции исследуемых звезд могут происходить взрывы гиперновых с коллапсом ядер, обладающих большим моментом вращения, в результате чего могут возникать длинные гамма-всплески. В конце эволюции Cyg X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1 и SS 433 могут образовываться двойные релятивистские объекты, которые затем сливаются под действием излучения гравитационных волн. Слияния релятивистских звезд являются источниками гравитационных волн, которые могут быть обнаружены существующими и перспективными гравитационно-волновыми детекторами. В ходе дальнейшей эволюции M33 X-7 будет проходить стадию объекта Торна–Житков, в ходе образования которого также могут излучаться гравитационные волны.

DOI: 10.7868/S0004629914030013

1. ВВЕДЕНИЕ

В классической работе [1] была рассмотрена возможность образования звезд Вольфа–Райе в тесных двойных системах большой массы и приведены аргументы в пользу потери вещества и углового момента системы на стадии обмена веществом, предшествующей образованию звезды Вольфа–Райе. Одной из стадий эволюции такой системы может быть тесная двойная звезда, состоящая из звезд Вольфа–Райе и компактного вырожденного остатка [2]. В настоящее время известно три рентгеновских двойных системы в нашей и ближайших галактиках, состоящих из звезды Вольфа–Райе и кандидата в черные дыры звездных масс: Cyg X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1. Некоторые аспекты эволюции Cyg X-3, IC 10 X-1 и NGC 300 X-1 исследованы в работе [3], в которой также рассчитана эволюция тесной двойной системы SS 433 (как возможной предшественницы систем, состоящих из звезды Вольфа–Райе и компактного остатка) в предположении, что в ходе

дальнейшей эволюции эта двойная звезда избежит стадии общей оболочки (как это имеет место в текущем состоянии SS 433).

Цель данной работы — изучить эволюционные пути массивных тесных двойных звезд Cyg X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1, SS 433 и M33 X-7 при помощи “Машины сценариев”¹. Выбор этих систем не случаен. Кандидатов в черные дыры в паре со звездой Вольфа–Райе (системы Cyg X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1) известно всего три, а их эволюционный путь заведомо должен состоять из нескольких стадий. Система SS 433 может быть предшественником двойной, состоящей из черной дыры и звезды Вольфа–Райе, кроме того, это пока единственный известный в Млечном Пути супераккректор. M33 X-7 — тесная двойная звезда, состоящая из кандидата в черные дыры (один из самых массивных кандидатов) и незначительно проэволюционировавшей невырожденной звезды. Эти системы можно назвать “краеугольными камнями”

*E-mail: a78b@yandex.ru

¹ Это программа для проведения популяционного синтеза эволюции тесных двойных звезд [4, 5].

теории эволюции тесных двойных звезд. Изучение их эволюции дает возможность проверки эволюционных сценариев в предельных условиях.

В ходе эволюции тесных двойных звездных систем, подобных изучаемым в данной работе, может происходить коллапс очень массивных ядер компонент, которые, благодаря тому, что они входят в состав двойной системы, обладают большим моментом вращения. Такие события принято связывать с возникновением космических длинных гамма-всплесков². В зависимости от параметров эволюционного сценария в конце эволюции системы может остаться два релятивистских объекта, либо входящих в состав двойной системы, либо одиночные, возникшие в результате распада двойной. Если результатом эволюции будет тесная двойная релятивистская звезда, то под действием излучения гравитационных волн компоненты системы сольются. В результате слияния возникнет всплеск гравитационно-волнового излучения, который мог бы быть зарегистрирован детектором LIGO³. Если одна или обе компоненты такой системы — это нейтронные звезды, то кроме всплеска гравитационных волн также возникнет короткий гамма-всплеск.

Таким образом, изучение эволюции Cyg X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1, SS 433 и M33 X-7 актуально, поскольку оно позволяет уточнить параметры эволюционного сценария и указать возможные источники гравитационно-волнового излучения и космических гамма-всплесков (как длинных, так и коротких). Далее во введении кратко описываются изучаемые системы. Cyg X-3 и SS 433 — это объекты, принадлежащие нашей галактике, IC 10 X-1, NGC 300 X-1 и M33 X-7 находятся соответственно в галактиках IC 10, NGC 300 и M33.

Cyg X-3 — это звезда Вольфа–Райе [9] в паре с компактным объектом, предположительно черной дырой (см., например, обзор [10]). Орбитальный период системы составляет 4.8 ч. Компактный объект в этой системе было принято считать черной дырой с массой от $7 M_{\odot}$ до $40 M_{\odot}$ [11], однако более поздние исследования дали иной результат: масса релятивистской звезды не превышает $10 M_{\odot}$ [12], что допускает наличие в системе как нейтронной звезды, так и черной дыры. По современным данным наблюдений доплеровского смещения рентгеновских линий масса компактного объекта в системе Cyg X-3 не превосходит $3.6 M_{\odot}$ [13], что оставляет возможность считать эту

систему черной дырой в паре со звездой Вольфа–Райе, однако окончательного ответа на вопрос о ее природе не дает. Дополнительным аргументом в пользу того, что компактный объект в системе Cyg X-3 является черной дырой, служит тот факт, что аккрецирующих нейтронных звезд в парах со звездами Вольфа–Райе быть, по-видимому, не может, так как они должны сильно ускорить свое вращение во время второго обмена массами и стать эжекторами или пропеллерами [14]. Рентгеновская светимость системы составляет $\sim 10^{38}$ эрг с^{-1} в диапазоне 1–60 кэВ, болометрическая светимость звезды Вольфа–Райе в системе составляет $\approx 3 \times 10^{39}$ эрг с^{-1} .

IC 10 X-1 состоит из звезды Вольфа–Райе и одного из самых массивных кандидатов в черные дыры [15]. Масса звезды Вольфа–Райе составляет $32.7 \pm 2.6 M_{\odot}$, масса черной дыры, полученная на основе наблюдаемой кривой лучевых скоростей оптического спутника, составляет $23.1 \pm 2.1 M_{\odot}$ [16]. Орбитальный период системы равен 34.4 ч. IC 10 X-1 — яркий переменный рентгеновский источник в бедной металлами галактике IC 10 со вспышкой звездообразования; рентгеновская светимость системы составляет $\sim 10^{38}$ эрг с^{-1} [17, 18]. Наиболее вероятный оптический компаньон рентгеновского источника — яркая звезда Вольфа–Райе [MAC92] 17A [19]. В работах [20, 21] изучена природа синхротронной сверхоболочки в галактике IC 10 и показано, что наиболее правдоподобный механизм образования этой оболочки — взрыв гиперновой. Система IC 10 X-1 находится внутри данной сверхоболочки и, вероятно, является причиной ее возникновения после образования компактного объекта в системе.

NGC 300 X-1 стала третьей двойной звездой Вольфа–Райе с вырожденным компаньоном [22]. Орбитальный период системы равен 32.8 ± 0.4 ч. Усредненная наблюдаемая светимость системы по наблюдениям с борта орбитальной рентгеновской обсерватории XMM Newton в диапазоне энергий 0.2–10 кэВ приблизительно равна 2×10^{38} эрг с^{-1} , доходя до $\sim 10^{39}$ эрг с^{-1} с учетом поглощения излучения веществом, находящимся на луче зрения между источником и наблюдателем. Согласно результатам работы [23], полуамплитуда лучевых скоростей системы составляет 267 ± 8 км с^{-1} , откуда получено значение функции масс $2.6 \pm 0.3 M_{\odot}$, орбитальный период равен 32.3 ± 0.2 ч. Спектроскопическая масса оптического компаньона (звезды Вольфа–Райе типа WN) составляет $26_{-5}^{+7} M_{\odot}$, что дает массу черной дыры $20 \pm 4 M_{\odot}$ при наиболее предпочтительном значении угла наклона орбиты 60° – 75° . В случае, если лишь половина потока оптического излучения в континууме обеспечивается звездой Вольфа–Райе,

² См., например, работы [6, 7], в которых при помощи “Машины сценариев” изучается частота коллапсов ядер звезд Вольфа–Райе в предельно тесных двойных системах.

³ См., например, работу [8], в которой при помощи “Машины сценариев” изучается темп слияний релятивистских двойных звезд.

масса звезды Вольфа–Райе составляет $15_{-2.5}^{+4} M_{\odot}$, а черной дыры — $14.5_{-2.5}^{+3} M_{\odot}$.

SS 433 — это единственный известный сверхкритический аккректор в Млечном Пути. Эта система известна давно, ее исследованию посвящены сотни статей, однако, остается еще большое пространство для дальнейших исследований данного объекта. SS 433 — тесная затменная двойная с орбитальным периодом около 13 дней (см., например, обзор [24]), в которой звезда-донор переполняет свою полость Роша и перетекает на релятивистский компонент (кандидат в черные дыры) в тепловой шкале времени с темпом аккреции $\sim 10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$. Разброс в определении массы компактного объекта составляет от $2 M_{\odot}$ до $15 M_{\odot}$ [25–28], что не позволяет однозначно судить о природе вырожденного компонента системы.

M33 X-7 была открыта в начале 80-х гг. прошлого века [29]. Периодическая переменность рентгеновского источника была выявлена в работах [30, 31], и была выдвинута гипотеза о том, что источник входит в двойную звездную систему. Впоследствии источник M33 X-7 был отждествлен с оптической звездой спектрального класса O6 III, минимальная масса которого составляет $20 M_{\odot}$, а орбитальный период — составляет 3.45^d [32, 33]. В работе [34] был выполнен анализ наблюдаемой кривой лучевых скоростей двойной рентгеновской системы M33 X-7 в модели Роша и исследована зависимость масс компонент от степени заполнения оптической звездой полости Роша. Показано, что при наиболее вероятной массе оптической звезды $70 M_{\odot}$, масса компактного объекта заключена в пределах $15.55 \pm 3.20 M_{\odot}$, что делает его одним из самых массивных кандидатов в черные дыры.

Эволюция систем IC 10 X-1 и M33 X-7 уже изучалась при помощи “Машины сценариев” [34]; были также построены наиболее характерные эволюционные треки. В настоящей работе проводится дополнительное исследование эволюции IC 10 X-1 и M33 X-7.

2. ПОПУЛЯЦИОННЫЙ СИНТЕЗ

Изучение происхождения и дальнейшей эволюции тесных двойных систем Sng X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1, SS 433 и M33 X-7 выполнено при помощи “Машины сценариев”. Эта программа предназначена для изучения эволюции тесных двойных звезд методом популяционного синтеза, позволяя как получать индивидуальные эволюционные треки тесных двойных звезд, так и исследовать групповые свойства различных типов тесных двойных звезд. Подробное описание “Машины сценариев” содержится в работах [4, 5], а метод популяционного синтеза эволюции тесных

двойных звезд описан, например, в обзоре [35]. В настоящей работе были приняты в качестве свободных параметров задачи три величины: темп потери вещества невырожденными звездами, доля массы предсверхновой звезды, уходящей под горизонт событий в момент образования черной дыры, и эффективность стадии с общей оболочкой. Остальные параметры не изменялись, и их значения было стандартными при проведении расчетов при помощи “Машины сценариев”. Для каждого набора начальных параметров был проведен популяционный синтез 10^6 двойных систем.

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, он непосредственно влияет на само значение массы звезд. В настоящей работе используется только сценарий эволюции A из работы [5], в котором темп потери массы на стадии главной последовательности описывается классической формулой

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

где L — светимость звезды, V_{∞} — скорость ее ветра на бесконечности, c — скорость света, α — свободный параметр. Изменение массы ΔM в сценарии A 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. Потеря массы на стадии звезды Вольфа–Райе в данной работе была параметризована как $\Delta M_{WR} = \alpha M_{WR}$, 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} — это доля массы предсверхновой, уходящей под горизонт событий в процессе коллапса, которая варьировалась от 0.1 до 1.0.

В ходе стадии с общей оболочкой звезды очень эффективно отдают угловой момент окружающему их веществу и по спирали сближаются друг с другом. Эффективность потери вещества на стадии с общей оболочкой описывается параметром $\alpha_{CE} = \Delta E_b / \Delta E_{orb}$, где $\Delta E_b = E_{grav} - E_{thermal}$ — энергия связи выброшенного вещества оболочки и ΔE_{orb} — уменьшение орбитальной энергии системы в процессе сближения:

$$\alpha_{CE} \left(\frac{GM_a M_c}{2a_f} - \frac{GM_a M_d}{2a_i} \right) = \frac{GM_d (M_d - M_c)}{R_d}, \quad (3)$$

где M_c — масса ядра звезды, теряющей вещество, с начальной массой M_d и радиусом R_d (который является функцией начальной большой полуоси a_i и начального отношения масс M_a/M_d , где M_a — масса звезды-аккретора).

В качестве систем Cyg X-3, IC 10 X-1 и NGC 300 X-1 при проведении расчетов в работе принимается черная дыра в паре со звездой Вольфа–Райе. В связи с тем, что масса вырожденной звезды в системе Cyg X-3 известна слишком неточно, рассматривается два варианта масс звезд Cyg X-3: маломассивный и массивный. В случае маломассивного варианта масса черной дыры $\leq 10 M_\odot$, масса звезды Вольфа–Райе $\leq 10 M_\odot$, орбитальный период системы ≤ 0.2 дня. В случае массивного варианта масса черной дыры $\geq 10 M_\odot$, масса звезды Вольфа–Райе $\geq 10 M_\odot$, орбитальный период системы ≤ 0.2 дня, рентгеновская светимость $\geq 10^{38}$ эрг s^{-1} . Согласно существующим наблюдательным данным, параметры системы IC 10 X-1 приняты следующими: масса черной дыры 23–34 M_\odot , масса звезды Вольфа–Райе 17–35 M_\odot , орбитальный период ≤ 1.5 дня. Для системы NGC 300 X-1 соответственно приняты следующие значения основных параметров: масса черной дыры 20–25 M_\odot , масса звезды Вольфа–Райе не ограничивалась, орбитальный период ≤ 1.5 дня, рентгеновская светимость $\geq 10^{38}$ эрг s^{-1} .

SS 433 при проведении расчетов считается черной дырой со сверхкритической аккрецией в паре с невырожденной звездой, заполняющей свою полость Роша, масса оптической звезды заключена в диапазоне 5–15 M_\odot .

В качестве системы M33 X-7 в работе принимается черная дыра с массой 14–17 M_\odot в паре со звездой, находящейся в конце своей жизни на главной последовательности, с массой 65–75 M_\odot , орбитальный период системы ограничен 5 днями.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Результаты расчетов приведены на рис. 1–5 и в табл. 1–3. Первоочередная задача при изучении эволюции заданных систем при помощи “Машины сценариев” состоит в определении наиболее вероятной области параметров эволюционного сценария. Для решения этой задачи была построена зависимость (рис. 1) количества систем типа Cyg X-3 (массивный вариант) и NGC 300 X-1 в спиральной галактике с массой $10^{11} M_\odot$ и темпом звездообразования, заданным функцией Солпитера, от доли массы предсверхновой звезды k_{bh} , попадающей под горизонт событий в момент образования черной дыры. Кривые на рис. 1 рассчитаны при различном значении эффективности

Таблица 1. Эволюционный трек SS 433, наиболее близко описывающий эволюцию системы*

Название	M_1, M_\odot	M_2, M_\odot	a, R_\odot	T , млн. лет	e
I + I	66.71	38.94	31	0	0
III + I	64.43	35.65	33	2.7	0
IIIe + I	50.04	50.04	27	2.7	0
WR + I	35.80	60.34	33	3.3	0
WR + III	35.66	60.34	33	3.3	0
WR + IIIe	44.33	44.33	30	3.3	0
SN	45.03	39.70	32	3.6	0
SH + III	22.51	39.70	50	3.6	0.36
BH + WR	22.51	31.11	33	3.6	0.05
SN	22.51	21.78	40	3.9	0.05
BH + BH	22.51	10.89	62	3.9	0.37

* Обозначения см. в тексте в разд. 3.

Таблица 2. Дополнительный эволюционный трек системы типа SS 433*

Название	M_1, M_\odot	M_2, M_\odot	a, R_\odot	T , млн. лет	e
I + I	38.71	27.87	89	0	0
II + I	33.63	25.86	99	4.2	0
III + I	33.50	25.86	99	4.2	0
IIIe + I	27.06	27.06	100	4.2	0
WR + I	16.71	29.66	150	4.2	0
BB + I	11.70	29.44	170	4.6	0
SN	10.60	29.55	200	4.6	0
BH + I	5.30	29.55	230	4.6	0.15
BH + II	5.30	29.09	240	5.4	0.15
SH + IIIs	5.30	18.33	340	5.9	0
CE	5.30	16.46	220	5.9	0
BH + WR	5.30	11.51	180	5.9	0
SN	5.30	8.06	220	6.4	0
BH + BH	5.30	4.03	400	6.4	0.43

* Обозначения см. в тексте в разд. 3.

стадии с общей оболочкой α_{CE} и темпа истечения вещества α . Каждая из рассматриваемых систем в своей родительской галактике присутствует в единственном числе, поэтому основной критерий для выбора набора эволюционных параметров —

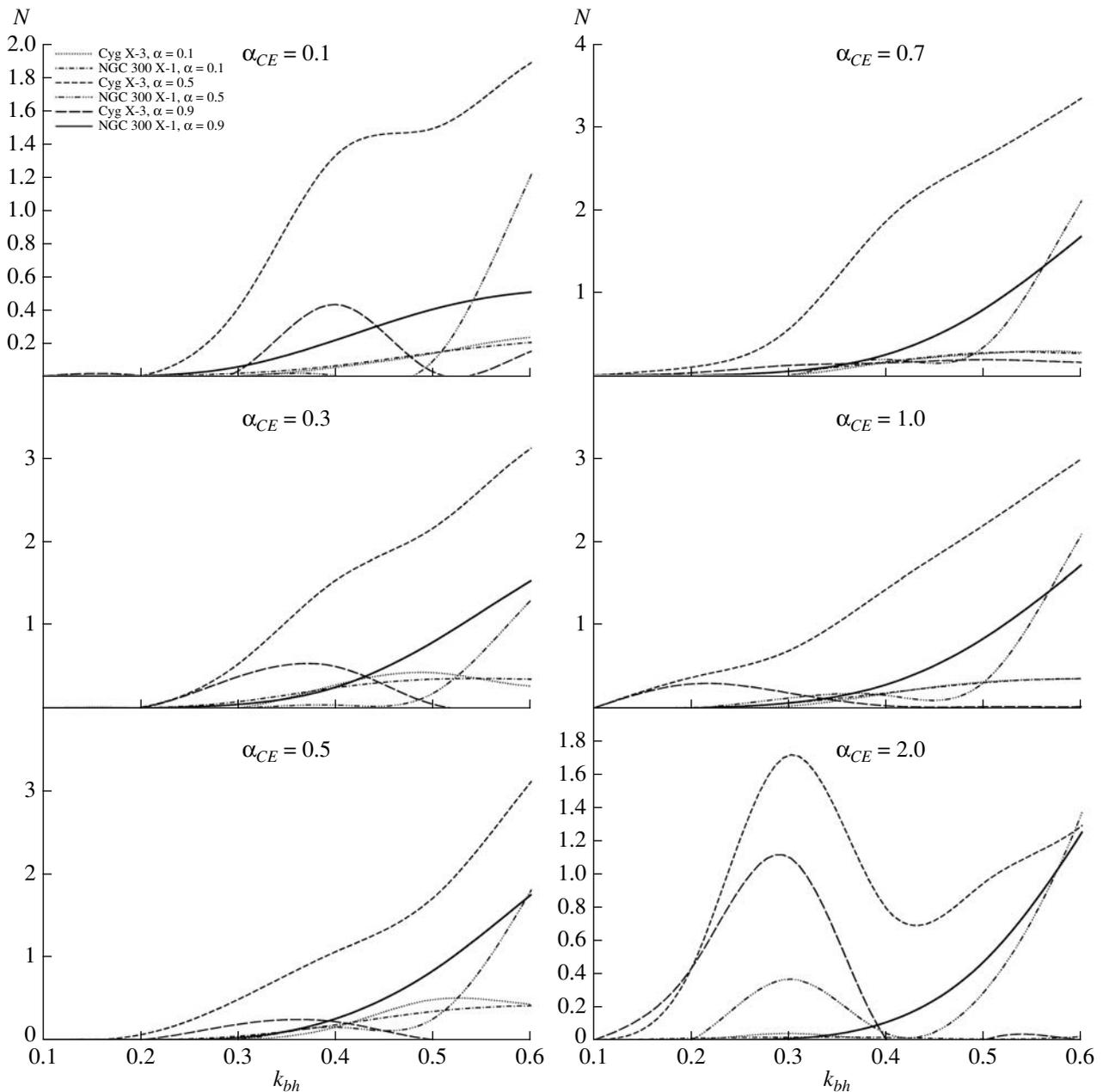


Рис. 1. Количество систем типа Cyg X-3 и NGC 300 X-1 в спиральной галактике с массой $10^{11} M_{\odot}$ и темпом звездообразования, заданным функцией Солпитера, в зависимости от доли массы предсверхновой звезды k_{bh} , попадающей под горизонт событий в момент образования черной дыры. Кривые рассчитаны при разном значении эффективности стадии с общей оболочкой α_{CE} и темпа истечения вещества α .

равенство единице количества изучаемых систем в наших модельных расчетах. При этом набор параметров выбирался таким, чтобы это условие при наличии такой возможности выполнялось сразу для всех изучаемых систем. На рис. 1 видно, что это условие для систем Cyg X-3 и NGC 300 X-1 выполняется при $\alpha_{CE} = 0.5$, $a = 0.3$, $k_{bh} = 0.5$ — этот

набор параметров и был выбран для построения эволюционных треков изучаемых систем⁴.

На рис. 2–5 и в табл. 1–3 приняты следующие обозначения эволюционных стадий [5]: I — звезда главной последовательности, II — сверхгигант, III, IIIe, IIIs — звезда, заполняющая полость

⁴ Для систем типа M33 X-7 и IC 10 X-1 подобные графики были построены в работе [34, рис. 8 и 10].

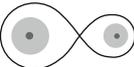
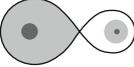
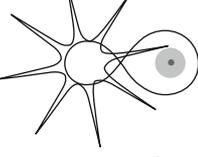
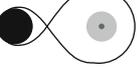
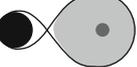
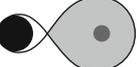
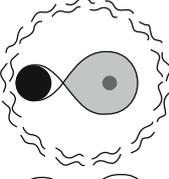
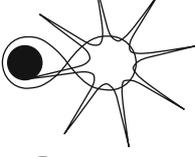
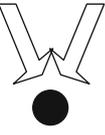
Система	M_1		M_2	a	T	e
I + I	69.23		40.73	110	0	0
III + I	66.75		37.03	120	2.6	0
IIIe + I	50.96		50.96	100	2.6	0
WR + IIIe	37.71		53.51	120	3.3	0
SN	26.40		53.39	140	3.5	0
BH + I	13.2		53.39	180	3.5	0.2
BH + II	13.2		53.13	180	4.1	0.2
SBH + IIIs	13.2		52.97	170	4.1	0.1
SBH + III, CE	13.2		47.89	100	4.1	0.1
BH + WR	13.2		26.29	3.6	4.1	0
BH + BB	13.2		18.40	4.5	4.4	0
SN	13.2		16.83	4.5	4.4	0
BH + BH	13.2		8.41	7.4	4.4	0.4
BH	13.2				93	

Рис. 2. Эволюционный сценарий, приводящий к образованию системы типа Суг X-3 (массивный вариант). Обозначения см. в тексте в разд. 3.

Роша, WR — звезда Вольфа–Райе, BB — звезда Вольфа–Райе, заполняющая полость Роша, BH — черная дыра, SBH — черная дыра со сверхкритическим темпом аккреции, Psg — радиопульсар, CE —

общая оболочка, SN — взрыв сверхновой. На этих же рисунках и в этих же таблицах приводятся следующие значения параметров изучаемых систем: M_1 и M_2 — массы первой и второй звезд в массах Солнца, a — большая полуось орбиты в

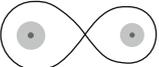
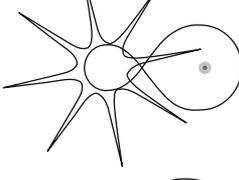
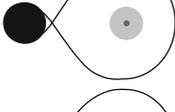
Система	M_1		M_2	a	T	e
I + I	32.32		19.73	79	0	0
II + I	28.86		18.99	86	4.7	0
III + I	21.44		18.94	100	5.2	0
WR + III	12.98		20.39	140	5.2	0
SN	9.08		20.31	160	5.6	0
BH + I	4.54		20.31	200	5.6	0.2
BH + II	4.54		19.92	200	7.9	0.2
SBH + IIIs	4.54		17.35	220	8.6	0.1
SBH + III, CE	4.54		15.64	140	8.6	0.1
BH + WR	4.54		6.81	3.1	8.6	0
SN	4.54		4.77	3.7	9.3	0
BH + Psr	4.54		1.34	9.1	9.3	0.6

Рис. 3. Эволюционный трек Cyg X-3 (маломассивный вариант). Обозначения см. в тексте в разд. 3.

радиусах Солнца, T — время, прошедшее с момента образования системы, в миллионах лет, e — эксцентриситет системы. Все значения M_1 , M_2 , a , T и e приведены на начало соответствующих

стадий, а в момент взрыва сверхновой — на момент непосредственно перед взрывом.

На рис. 2 представлен характерный эволюционный трек двойной системы, приводящий к образо-

Система	M_1		M_2	a	T	e
I + I	95.92		37.30	130	0	0
III + I	90.60		34.59	140	2.5	0
WR + I, CE	59.52		53.18	85	2.5	0
SN	41.67		53.09	100	2.7	0
BH + I	20.83		53.09	140	2.7	0.3
BH + III	20.83		52.31	140	4.3	0.3
SBH + III	20.83		47.70	110	4.3	0.2
BH + WR	20.83		26.06	4.9	4.3	0
SN	20.84		18.24	5.9	4.6	0
BH + BH	20.84		9.12	8.5	4.6	0.3
BH	29.96				90	

Рис. 4. Эволюционный трек NGC 300 X-1. Обозначения см. в тексте в разд. 3.

ванию двойной системы типа Суг X-3 (массивный вариант). В начале эволюции масса первой (более массивной) звезды находится в диапазоне $M_1 = 60-120 M_\odot$, отношение масс $q = \frac{M_2}{M_1} = 0.3-0.8$,

начальная большая полуось орбиты двойной системы находится в диапазоне $a = 70-140 R_\odot$. Следует заметить, что в процессе обмена веществом масса звезды может превзойти начальную массу, поэтому начальная масса звезды может быть меньше, чем масса этой же звезды на одной из

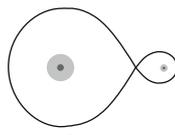
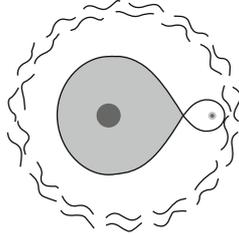
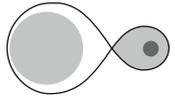
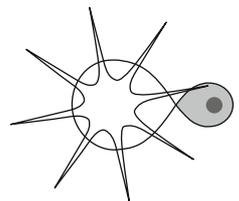
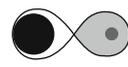
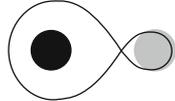
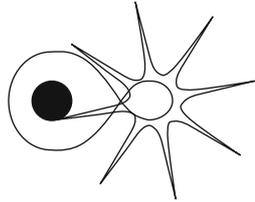
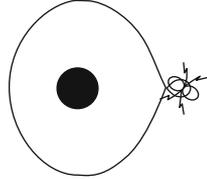
Система	M_1		M_2	a	T	e
I + I	90.31		17.27	230	0	0
III + I, CE	85.70		17.03	240	2.5	0
WR + IIIe	54.71		22.71	10	2.5	0
SN	56.88		20.53	12	2.7	0
BH + IIIe	28.44		20.53	28	2.7	0.6
BH + WR	28.44		20.53	12	3.8	0
SN	28.44		14.37	13	4.4	0
BH + Psr	28.44		1.43	24	4.4	0.4

Рис. 5. Эволюционный трек IC 10 X-1. Обозначения см. в тексте в разд. 3.

последующих эволюционных стадий. 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), завершающая стадия перетекания проходит в ядерной шкале времени (стадия IIIe). После потери оболочки первой звездой на ее месте остается звезда Вольфа–Райе, которая, взрыва-

ясь, образует черную дыру. Далее, вторая звезда заканчивает эволюцию на главной последовательности и становится сверхгигантом, а впоследствии и заполняет свою полость Роша. Темп аккреции при этом достигает сверхкритического режима. Довольно быстро формируется общая оболочка, на этой стадии звезды очень тесно сближаются, а оболочка нерелятивистского компонента теряется. Образуется пара, состоящая из черной дыры и

Таблица 3. Дополнительный эволюционный трек системы типа SS 433*

Название	M_1, M_\odot	M_2, M_\odot	a, R_\odot	T , млн. лет	ϵ
I + I	60.38	42.86	280	0.0	0.00
II + I	58.10	37.31	300	3.4	0.00
III + I	52.72	36.94	320	3.8	0.00
WR + I	31.13	46.77	380	3.8	0.00
WR + II	24.90	46.40	410	3.9	0.00
SN	22.42	40.58	470	4.0	0.00
BH + II	11.21	40.58	600	4.0	0.22
SH + IIIs	11.21	26.22	800	4.3	0.15
CE	11.21	24.30	700	4.3	0.14
BH + WR	11.21	21.78	190	4.3	0.00
SN	11.21	15.24	230	4.7	0.00
BH + BH	11.21	7.62	390	4.7	0.41

* Обозначения см. в тексте в разд. 3.

звезды Вольфа–Райе. Пара получается настолько тесной, что звезда Вольфа–Райе может заполнить свою полость Роша. В процессе коллапса звезды Вольфа–Райе в такой двойной системе может произойти длинный гамма-всплеск. Конечным результатом эволюции двойной системы⁵ в данном случае 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.

Характерный эволюционный трек, приводящий к образованию двойной системы типа Cyg X-3 в случае маломассивного варианта, представлен на рис. 3. В начале эволюции масса первой (более массивной) звезды находится в диапазоне $M_1 = 25-37 M_\odot$, отношение масс $q = \frac{M_2}{M_1} = 0.2-0.9$, начальная большая полуось орбиты двойной системы находится в диапазоне $a = 30-130 R_\odot$. После выгорания водорода в ядре первая (более массивная) звезда становится сверхгигантом и впоследствии заполняет свою полость Роша. Начинается перетекание вещества на соседнюю звезду — более быстрое, чем в ядерной шкале времени (стадия III). После потери оболочки первой звездой на ее месте остается звезда Вольфа–Райе, которая,

⁵ В данной работе принято, что черные дыры в момент своего образования не получают значительного дополнительного толчка во время своего образования.

взрываясь, образует черную дыру. Далее, вторая звезда заканчивает эволюцию на главной последовательности и становится сверхгигантом, а впоследствии заполняет свою полость Роша. Темп аккреции при этом достигает сверхкритического режима. Довольно быстро формируется общая оболочка; на этой стадии 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 также может произойти длинный гамма-всплеск. Поскольку массы компонент в данном варианте меньше, чем в массивном варианте, конечный остаток эволюции второго компонента, как правило, — это нейтронная звезда, а не черная дыра.

В зависимости от дополнительного параметра — толчка во время образования нейтронной звезды — конечным результатом эволюции системы могут быть одиночная черная дыра и одиночная нейтронная звезда (которая будет проявлять себя как радиопульсар в начале своей жизни) либо двойная система, состоящая из черной дыры и нейтронной звезды (которая будет парой “радиопульсар + черная дыра” в начале своей эволюции), причем возможно, что пара будет настолько тесной, что черная дыра и нейтронная звезда сольются под действием гравитационно-волнового излучения и в результате возникнет короткий гамма-всплеск и всплеск гравитационно-волнового излучения. Однако изучение влияния толчка во время образования нейтронной звезды не входит в цели данной работы.

На рис. 4 представлен характерный эволюционный трек двойной системы, приводящий к образованию двойной системы типа NGC 300 X-1. В начале эволюции масса первой (более массивной) звезды находится в диапазоне $M_1 = 90-120 M_\odot$, отношение масс $q = \frac{M_2}{M_1} = 0.35-0.75$, начальная большая полуось орбиты двойной системы находится в диапазоне $a = 70-160 R_\odot$. 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). 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. Довольно быстро формируется общая оболочка; на этой стадии 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 длинный гамма-всплеск. Конечным результатом эволюции двойной системы в данном случае 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.

На рис. 5 представлен один⁶ из возможных эволюционных треков двойной системы, приводящий к образованию двойной системы типа IC 10 X-1. В начале эволюции масса первой (более массивной) звезды находится в диапазоне $M_1 = 75-120 M_{\odot}$,

отношение масс $q = \frac{M_2}{M_1} = 0.15-0.6$, начальная

большая полуось орбиты двойной системы находится в диапазоне $a = 70-280 R_{\odot}$. После выгорания водорода в ядре первая (более массивная) звезда заполняет свою полость Роша, образуя общую оболочку системы из двух невырожденных звезд. На этой стадии звезды очень тесно сближаются, а оболочка первичной компоненты частично теряется, частично аккумулируется второй компонентой. После потери оболочки первой звездой на ее месте остается звезда Вольфа–Райе. Двойная система становится настолько тесной, что второй компонент переполняет свою полость Роша еще до окончания горения водорода в ядре. После того, как звезда Вольфа–Райе (первичная компонента) взрывается, а ее ядро коллапсирует в черную дыру, образуется двойная система, состоящая из черной дыры и звезды, заполняющей свою полость Роша. Аккреция вещества происходит в ядерной шкале времени (стадия IIIe). После потери оболочки вторая компонента становится звездой Вольфа–Райе, после взрыва которой образуется нейтронная звезда. Уже во время первого взрыва сверхновой система оказывается настолько тесной, что в ней при образовании черной дыры может произойти гамма-всплеск⁷.

После того, как оболочку теряет вторая звезда, она в свою очередь тоже становится звездой Вольфа–Райе. Вторая компонента, взрываясь, дает нейтронную звезду, которая в начале своей эволюции проявляет себя как радиопульсар. В случае, если дополнительный толчок при образовании нейтронной звезды окажется небольшим, образуется двойная система, состоящая из черной дыры и радиопульсара, который впоследствии затухает. В

случае отсутствия дополнительного толчка при образовании нейтронной звезды система оказывается достаточно широкой для того, чтобы компоненты не могли слиться за промежуток времени, равный возрасту Вселенной (этот вариант представлен на рис. 5). Дополнительный толчок мог бы привести как к распаду системы, так и к уменьшению большой полуоси и, соответственно, к тому, что компоненты могли бы слиться за разумный промежуток времени под действием излучения гравитационных волн. В этом случае в системе произошли бы короткий гамма-всплеск и всплеск гравитационно-волнового излучения.

Три возможных эволюционных трека системы SS 433 приведены в табл. 1–3; вероятность каждого из этих вариантов приблизительно равна. Количество систем типа SS 433 в Галактике в очень широком диапазоне параметров эволюционного сценария существенно превышает единицу и составляет 10–20. Таким образом, можно утверждать, что в Млечном Пути должны существовать и другие системы, подобные SS 433⁸. Диапазон начальных параметров предшественников систем типа SS 433 ограничен слабо. Начальные массы звезд должны быть такими, чтобы первичный компонент смог после взрыва сверхновой звезды образовать черную дыру (т.е. его масса на каком-нибудь этапе эволюции до взрыва должна превысить $25 M_{\odot}$), а начальная большая полуось должна обеспечивать заполнение полости Роша вторым компонентом. Начальное отношение масс может изменяться в очень широких пределах: 0.1–0.9.

Эволюция системы, наиболее похожей на SS 433, представлена в табл. 1. Первичная компонента этой довольно тесной двойной заполняет свою полость Роша до окончания горения водорода в ядре. Перенос вещества на вторичную компоненту происходит сначала в шкале времени, более быстрой, чем ядерная (стадия III), завершаясь в ядерной шкале времени (стадия IIIe). После потери оболочки первичная компонента становится звездой Вольфа–Райе. Далее вторичный компаньон заполняет свою полость Роша до окончания горения водорода в ядре, и начинается перенос вещества на первичную компоненту — сначала более быстрый, чем в ядерной шкале времени, а продолжение переноса происходит в ядерной

⁶ Показанный на рис. 5 эволюционный трек дополняет трек, приведенный на рис. 11 в работе [34], где расчеты проводились с несколько другим набором параметров — в частности, темп истечения вещества был ниже.

⁷ Гамма-всплеск, вероятно, может произойти в результате коллапса ядра звезды Вольфа–Райе в тесной двойной системе, орбитальный период которой $\lesssim 0.5$ дня [7].

⁸ Неопределенность масс компонент системы SS 433 не позволяет окончательно исключить нейтронную звезду в качестве компактного объекта в системе. Наблюдательные проявления замагниченной нейтронной звезды в системе со сверхкритической аккрецией были схожими со свойствами SS 433 [36], а количество систем типа “супераккрецирующая нейтронная звезда + невырожденная звезда, заполняющая свою полость Роша” в Галактике, также должно достигать двух десятков [37].

шкале времени. После взрыва первичного компонента образуется черная дыра со сверхкритическим темпом аккреции. Эта стадия в настоящей работе считается системой типа SS 433. Возраст туманности W50, которая окружает SS 433 и которая образована, по-видимому, взрывом сверхновой в SS 433, составляет не более 10^5 лет (см., например, [38] и ссылки в этой работе), что и делает трек, приведенный в табл. 1, наиболее правдоподобным описанием эволюции системы. После того, как оптическая звезда теряет оболочку в процессе сверхкритической аккреции, она становится звездой Вольфа–Райе. После второго взрыва сверхновой остается двойная черная дыра. Треки, представленные в табл. 2 и 3, имеют два главных отличия от трека, представленного в табл. 1. Во-первых, после первого взрыва сверхновой вторая компонента системы, сходя с главной последовательности, заполняет свою полость Роша через несколько сотен тысяч лет после взрыва, что противоречит возрасту туманности W50. Во-вторых, после стадии SS 433 наступает стадия с общей оболочкой, что дополняет возможные дальнейшие эволюционные пути системы типа SS 433 по сравнению с работой [3].

Изучение эволюции системы M33 X-7 при различных значениях эволюционных параметров не выявило дополнительных эволюционных возможностей по сравнению с рис. 9 в работе [34]. Это связано с тем, что параметры системы M33 X-7 установлены гораздо точнее, чем параметры остальных изучаемых в работе систем, поэтому при проведении расчетов диапазоны допустимых значений масс компонент и большой полуоси были наиболее узкими. Таким образом, M33 X-7 остается наиболее жестким ограничителем эволюционных сценариев среди рассмотренных систем. Эволюционный трек этой системы в рамках эволюционных моделей, включенных в “Машину сценариев”, имеет два значимых отличия от остальных треков: во-первых, невозможно получить систему типа M33 X-7 при значимо более сильных темпах потери вещества невырожденными звездами ($\alpha = 0.3$, $k_{WR} = 0.3$), а во-вторых, наиболее вероятное значение доли массы предсверхновой k_{bh} , уходящей под горизонт событий, оказывается меньше 0.5 и составляет приблизительно 0.3.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При помощи “Машины сценариев” в данной работе изучены возможные эволюционные треки рентгеновских двойных звезд Cyg X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1, SS 433 и M33 X-7. Показано, что каждая из этих систем может рассматриваться в качестве потенциального источника гравитационно-волнового излучения, а также быть

источником гамма-всплесков от одного до трех раз в течение своей эволюции⁹. В ходе эволюции системы SS 433 после стадии, соответствующей текущему состоянию SS 433, должна возникнуть система, состоящая из звезды Вольфа–Райе и черной дыры, свойства которой должны быть близкими к свойствам Cyg X-3, NGC 300 X-1 и IC 10 X-1. Эволюционные стадии на рис. 2–5, предшествовавшие образованию этих систем, также похожи на SS 433, но отличаются от последней большими массами. В отличие от результатов работы [3], SS 433 и предшественники Cyg X-3, NGC 300 X-1 и IC 10 X-1 могут выходить на стадию с общей оболочкой после стадии, соответствующей текущему состоянию SS 433. Одной из стадий эволюции в некоторых приводимых в работе треках может быть система “радиопульсар + черная дыра”, открытие которой стало бы окончательным подтверждением существования черных дыр звездных масс [40].

Из рис. 1–5 и табл. 1–3 следует, что можно описать происхождение систем Cyg X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1, SS 433 с использованием классического эволюционного сценария. Основное отличие классического эволюционного сценария от эволюционных сценариев, приводимых, например, в работах [41–43]¹⁰, состоит в значительно более низком темпе потери вещества массивными звездами в звездном ветре. В работе [44] показано, что звездный ветер массивных звезд может быть клочковатым. Это означает, что при проведении наблюдательных оценок темпа звездного ветра полученный результат необходимо уменьшать в 3–5 раз. Кроме того, самые массивные из рассмотренных систем (M33 X-7, IC 10 X-1 и NGC 300 X-1) находятся в галактиках, металличность которых ниже, чем в Млечном Пути (см., например, [45] для M33, [46] для IC 10 и [47] для NGC 300). Снижение металличности также означает снижение темпов истечения вещества. Таким образом, классический эволюционный сценарий с низким темпом истечения вещества, в том числе с низким темпом потери массы в звездном ветре массивных звезд, имеет достаточно веские физические основания.

⁹ До двух длинных гамма-всплесков в одной системе и одного короткого в случае системы IC 10 X-1. Согласно работе [7], во время первого взрыва сверхновой в системе с параметрами, приводимыми на рис. 5, гамма-всплеск может произойти, тогда как согласно работе [39] — нет, так как звезда Вольфа–Райе, по мнению авторов этой работы, должна находиться в двойной системе с вырожденным компаньоном. В этом случае гамма-всплеск будет формироваться только после второго взрыва сверхновой. Однако наличие сверхоболочки вокруг IC 10 X-1 говорит о потенциальной возможности формирования гамма-всплеска уже после первого взрыва сверхновой [20, 21].

¹⁰ В работе [41] изучалась эволюция M33 X-7 и IC 10 X-1, в работе [42] — эволюция M33 X-7, в работе [43] — эволюция IC 10 X-1 и NGC 300 X-1.

В работе [48] изучается эволюция системы Cyg X-3. Авторы работы приходят к выводу о том, что вырожденная компонента Cyg X-3 — это либо маломассивная черная дыра (которая может возникнуть как вследствие аккреционно-индуцированного коллапса нейтронной звезды, так и в результате коллапса ядра звезды во время взрыва сверхновой), либо нейтронная звезда. С точки зрения теории, на которой построена “Машина сценариев”, нейтронная звезда не может проявлять себя в качестве аккретора, находясь в тесной паре со звездой Вольфа–Райе [14]. Кроме того, нейтронная звезда в процессе аккреции накапливает достаточно большую массу для того, чтобы сколлапсировать в черную дыру, как правило в том случае, если она находится в паре с маломассивным долгоживущим компаньоном [49]. Эту роль не может играть предшественник звезды Вольфа–Райе.

В данной работе было рассмотрено два варианта набора основных параметров системы, которые считаются системой типа Cyg X-3: массивный и маломассивный. В работе [48] приводятся наблюдательные аргументы в пользу того, что Cyg X-3 — это маломассивная система. Однако в результате расчетов, проведенных в данной работе, был получен результат, противоречащий этим аргументам. В частности, маломассивный вариант системы предполагает, что рентгеновская светимость, согласно физическим моделям, заложенным в “Машину сценариев”, оказывается на порядок ниже, чем реальная светимость Cyg X-3. В то же время количество маломассивных систем типа Cyg X-3 в Галактике должно быть ~ 10 . Если бы рентгеновскую светимость программа рассчитывала неверно, то тогда нужно было бы предположить, что 9 из 10 очень ярких рентгеновских источников внутри нашей Галактики не были открыты, что, ввиду работы орбитальной обсерватории “Интеграл” и многих других наблюдений, представляется невероятным. Таким образом, расчеты данной работы предсказывают существование до ~ 10 систем, состоящих из звезды Вольфа–Райе и относительно маломассивной черной дыры с рентгеновской светимостью $\lesssim 10^{37}$ эрг с^{-1} . Система Cyg X-3 должна быть, по видимому, достаточно массивной (т.е. более реалистичным кажется эволюция массивного варианта системы Cyg X-3).

Работа поддержана грантом Российского фонда фундаментальных исследований 12-02-31301 мол_а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А. В. Тутуков, Л. Р. Юнгельсон, Научн. информ. Астрон. совет АН СССР **27**, 58 (1973).
2. А. В. Тутуков, Л. Р. Юнгельсон, Научн. информ. Астрон. совет АН СССР **27**, 70 (1973).
3. А. В. Тутуков, А. В. Федорова, А. М. Черепашук, Астрон. журн. **90**, 716 (2013).
4. V. M. Lipunov, K. A. Postnov, and M. E. Prokhorov, *Astrophys. and Space Phys. Revs* **9**, 1 (1996).
5. В. М. Липунов, К. А. Постнов, М. Е. Прохоров, А. И. Богомазов, Астрон. журн. **86**, 985 (2009).
6. А. И. Богомазов, В. М. Липунов, А. В. Тутуков, Астрон. журн. **84**, 345 (2007).
7. G. V. Lipunova, E. S. Gorbovskey, A. I. Bogomazov, V. M. Lipunov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **397**, 1695 (2009).
8. V. M. Lipunov, K. A. Postnov, M. E. Prokhorov, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **288**, 245 (1997).
9. M. H. van Kerkwijk, T. R. Geballe, D. L. King, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **314**, 521 (1996).
10. А. М. Черепашук, Усп. физ. наук **173**, 345 (2003).
11. W. Schmutz, T. R. Geballe, and H. Schild, *Astron. and Astrophys.* **311**, L25 (1996).
12. M. M. Hanson, M. D. Still, and R. P. Fender, *Astrophys. J.* **541**, 308 (2000).
13. M. J. Stark and M. Saia, *Astrophys. J. (Letters)* **587**, L101 (2003).
14. В. М. Липунов, Письма в Астрон. журн. **8**, 358 (1982).
15. A. H. Prestwich, R. Kilgard, P. A. Crowther, *et al.*, *Astrophys. J.* **669**, L21 (2007).
16. J. M. Silverman and A. V. Filippenko, *Astrophys. J.* **678**, L17 (2008).
17. W. N. Brandt, M. J. Ward, A. C. Fabian, and P. W. Hodge, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **291**, 709 (1997).
18. F. E. Bauer and W. N. Brandt, *Astrophys. J. (Letters)* **601**, L67 (2004).
19. P. A. Crowther, L. Drissen, J. B. Abbott, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **404**, 483 (2003).
20. T. A. Lozinskaya and A. V. Moiseev, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **381**, L26 (2007).
21. Т. А. Лозинская, А. В. Моисеев, Н. Ю. Подорваннюк, А. Н. Буренков, Письма в Астрон. журн. **34**, 243 (2008).
22. S. Carpano, A. Pollock, A. Prestwich, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **466**, L17 (2007).
23. P. Crowther, R. Barnard, S. Carpano, *et al.*, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **403**, L41 (2010).
24. S. Fabrika, *Astrophys. and Space Phys. Revs* **12**, 1 (2004).
25. S. N. Fabrika and L. V. Bychkova, *Astron. and Astrophys.* **240**, L5 (1990).
26. T. Hillwig, D. Gies, W. Huand, *et al.*, *Astrophys. J.* **615**, 422 (2004).
27. K. Blundell, M. Bowler, and L. Schmidtobreick, *Astrophys. J. (Letters)* **678**, L47 (2008).
28. K. Kubota, Y. Ueda, S. Fabrika, *et al.*, *Astrophys. J.* **709**, 1374 (2010).
29. K. S. Long, S. Dodorico, P. A. Charles, and M. A. Dopita, *Astrophys. J. (Letters)* **246**, L61 (1981).
30. G. Peres, F. Reale, A. Collura, and G. Fabbiano, *Mem. Soc. Astron. Ital.* **60**, 221 (1989).

31. G. Peres, F. Reale, A. Collura, and G. Fabbiano, *Astrophys. J.* **336**, 140 (1989).
32. W. Pietsch, B. J. Mochejska, Z. Misanovic, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **413**, 879 (2004).
33. W. Pietsch, F. Haberl, M. Sasaki, *et al.*, *Astrophys. J.* **646**, 420 (2006).
34. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. И. Богомазов, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **86**, 260 (2009).
35. С. Б. Попов, М. Е. Прохоров, *Усп. физ. наук* **177**, 1179 (2007).
36. В. М. Липунов, Н. И. Шакура, *Астрон. журн.* **59**, 631 (1982).
37. В. М. Липунов, *Астрофизика нейтронных звезд* (М.: Наука, 1987).
38. P. Goodall, F. Alouani-Bibi, and K. Blundell, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **414**, 2838 (2011).
39. E. P. J. van den Heuvel and S.-C. Yoon, *Astrophys. and Space Sci.* **311**, 177 (2007).
40. V. M. Lipunov, A. I. Bogomazov, and M. K. Abubekеров, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **359**, 1517 (2005).
41. S. E. de Mink, M. Cantiello, N. Langer, *et al.*, *Astron. and Astrophys.* **497**, 243 (2009).
42. F. Valsecchi, E. Glebbeek, W. M. Farr, *et al.*, *Nature* **468**, 77 (2010).
43. T. Bulik, K. Belczynski, and A. Prestwich, *Astrophys. J.* **730**, 140 (2011).
44. A. M. Cherepashchuk, Kh. Khaliullin, and J. A. Eaton, *Astrophys. J.* **281**, 774 (1984).
45. J. A. Orosz, J. E. McClintock, R. Narayan, *et al.*, *Nature* **449**, 872 (2007).
46. P. Massey, K. A. G. Olsen, P. W. Hodge, *et al.*, *Astron. J.* **133**, 2393 (2007).
47. F. Bresolin, W. Gieren, R.-P. Kudritzki, *et al.*, *Astrophys. J.* **700**, 309 (2009).
48. A. Zdziarski, J. Mikołajewska, and K. Belczynski, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.* **429**, L104 (2013).
49. А. И. Богомазов, М. К. Абубекеров, В. М. Липунов, А. М. Черепашук, *Астрон. журн.* **82**, 331 (2005).