

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В.ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи

Богомазов Алексей Иванович

**Эволюция тесных двойных звезд
в рамках сценарного подхода**

Специальность 01.03.02 — Астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в отделе звездной астрофизики Государственного астрономического института имени П. К. Штернберга МГУ имени М.В.Ломоносова

**Официальные
оппоненты**

Блинников Сергей Иванович, доктор физико-математических наук, НИЦ «Курчатовский институт»— ИТЭФ, лаборатория физики плазмы и астрофизики, г. н. с., ФГУП «ВНИИА», центр фундаментальных и прикладных исследований, г. н. с., ИПМ им. М.В.Келдыша РАН, временная научно-исследовательская лаборатория «Суперкомпьютерные сеточные технологии», н. с., МГУ ГАИШ, отдел Внегалактической астрономии, в. н. с.

Иванов Павел Борисович, доктор физико-математических наук, АКЦ ФИАН, отдел теоретической астрофизики, г. н. с.

Тарасов Анатолий Евгеньевич, доктор физико-математических наук, КраО РАН, отдел физики звезд, в. н. с.

Защита диссертации состоится 23 сентября 2021 года в 14 часов на заседании диссертационного совета МГУ.01.02 Московского государственного университета имени М.В.Ломоносова по адресу: 119234, г. Москва, Университетский проспект, дом 13, конференц-зал.

E-mail: a78b@yandex.ru

Диссертация находится на хранении в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В.Ломоносова (Ломоносовский проспект, д. 27). С информацией о регистрации участия в защите и с диссертацией в электронном виде можно ознакомиться на сайте ИАС «ИСТИНА»:

<https://istina.msu.ru/dissertations/381070649/>

Автореферат разослан 16 июля 2021 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета,

кандидат физико-математических наук

М. В. Пружинская

Актуальность, история и степень разработанности темы исследования

Двойные и кратные звезды находятся в центре внимания исследователей в течение более двух веков. Интерес к этим объектам не ослабевает в связи со сложной физикой, эволюцией и многообразными наблюдательными проявлениями обычных и вырожденных звезд, входящих в состав двойных и кратных систем, а также с возможностью существования около двойных звезд внесолнечных планет.

Теоретическая база изучения двойных звезд была заложена, когда был предложен затменный механизм в качестве объяснения изменения блеска Алголя (Goodricke, 1783). Вскоре после открытия природы энерговыделения обычных звезд (Gamov, 1938a,b; Gamov & Teller, 1938; Öpik, 1938; Bethe & Critchfield, 1938; Critchfield & Gamow, 1939) Алголь снова послужил в качестве краеугольного камня науки о двойных звездах, когда был обнаружен так называемый парадокс Алголя: менее массивная звезда в системе оказалась более эволюционно продвинутой, чем более массивная (Паренаго и Масевич, 1950). Выходом из парадокса стало предположение о том, что в процессе эволюции звезды могут обмениваться веществом (Crawford, 1955).

Черные дыры были предсказаны с использованием классической физики (Michell, 1784; Laplace, 1796). Современное описание таких объектов, как черные дыры, и таких явлений, как гравитационные волны, дается общей теорией относительности (Einstein, 1916a,b, 1918). В зависимости от своего осевого вращения черные дыры могут быть представлены разными метриками (Schwarzschild, 1916; Kerr, 1963).

История открытия белых карликов началась, когда звезда 40 Эридана В (в тройной системе 40 Эридана) была внесена в каталог двойных звезд (Herschel, 1785). Астрометрические наблюдения, проводившиеся несколько десятилетий, позволили обнаружить невидимые спутники Сириуса и Прокциона (Bessel, 1844). Согласно наблюдениям второй половины XIX — первой четверти XX веков белые карлики заняли отдельную область на диаграмме Герцшпрунга-Рассела, являясь достаточно массивными (с массами, сопоставимыми с мас-

сой Солнца), нередко горячими, но слабыми источниками оптического излучения малого размера (сопоставимыми с размерами Земли) и чрезвычайно высокой плотности. Теория внутреннего строения белых карликов развивалась в тесной связи с развитием квантовой механики (Fowler, 1926; Frenkel, 1928; Stoner, 1930; Chandrasekhar, 1931a,b).

Нейтронные звезды были предсказаны в качестве патологических областей в недрах звезд еще до открытия нейтрона (Landau, 1932), а после его открытия были предложены в качестве остатков взрывов сверхновых (Baade & Zwicky, 1934a,b). Первыми открытыми (и отождествленными в этом качестве) нейтронными звездами стали радиопульсары (Hewish et al., 1968). Механизм их излучения (высвобождение запасенной в ходе коллапса вращательной энергии при помощи мощных магнитных полей) был предложен в качестве объяснения радиоизлучения ядер галактик (Hoyle & Fowler, 1963), также был рассмотрен в том числе для объектов звездной массы (Кардашев, 1964), и применен для объяснения феномена радиопульсаров (Pacini, 1968). Также было уделено внимание возможному наличию радиопульсаров в тесных двойных системах с теоретической точки зрения (Бисноватый-Коган и Комберг, 1974). При наблюдениях радиопульсара В1913+16, входящего в тесную двойную систему с нейтронной звездой, косвенным методом были открыты гравитационные волны: в этой системе происходит уменьшение орбитального периода вследствие уноса орбитального углового момента при излучении гравитационных волн (Hulse & Taylor, 1975).

Появление теории аккреции (Hoyle & Lyttleton, 1941; Bondi, 1952), которая была расширена для случая несферического падения вещества на компактные объекты с большим энерговыделением (Зельдович, 1964; Salpeter, 1964), в том числе в дисковой форме (Шакура, 1972; Shakura & Sunyaev, 1973), показало возможность наблюдения нейтронных звезд и черных дыр как источников рентгеновского излучения.

Открытие рентгеновских источников Sco X-1 (Giacconi et al., 1962) и Cyg X-1 (Bowyer et al., 1965), связанное с началом эры внеатмосферной астрономии, последующее уточнение их координат (Tanan-

baum et al., 1971; Giacconi et al., 1972), а также отождествление большим количеством исследователей этих (и многих других) источников с аккрецирующими нейтронной звездой и кандидатом в черную дыру в тесных двойных системах соответственно (при помощи как космических, так и наземных наблюдений) соединило разрозненные детали мозаики, которые наука разрабатывала около двух веков, в большую картину физики (а впоследствии и эволюции) тесных взаимодействующих двойных звезд.

Развитие теории получило важное продолжение вместе с предсказанием стадии звезды Вольфа-Райе в паре с вырожденным остатком эволюции компаньона (Тутуков и Юнгельсон, 1973a,b). Источник рентгеновского излучения Cen X-3 был рассмотрен в качестве наблюдательного примера объекта, находящегося в процессе второго обмена веществом, который предшествует формированию системы «звезда Вольфа-Райе + вырожденный компаньон» (van den Heuvel & Heise, 1972; van den Heuvel & De Loore, 1973).

Открытие космических гамма-всплесков (Klebesadel et al., 1973; Мазец и др., 1974) продемонстрировало еще один феномен, непосредственно связанный с эволюцией тесных двойных звезд (то есть, таких звезд, на некотором этапе эволюции которых компоненты системы могут обмениваться веществом). Гамма-всплески статистически были разделены на две основные группы (короткие, более жесткие, и длинные, более мягкие), направления на их источники оказались равномерно распределены по небесной сфере, а наклон кривой $\log N - \log S$ оказался не равным $-3/2$ (Mazets et al., 1981; Meegan et al., 1992), что дало основание считать, что предшественники гамма-всплесков удалены на космологические расстояния (Усов и Чибисов, 1975). Прямое отождествление источника гамма-всплеска и вычисление расстояния до него полностью подтвердило эти косвенные предположения (van Paradijs et al., 1997).

Была предложена модель слияния нейтронных звезд под действием излучения гравитационных волн (Блинников и др., 1984) в качестве источника коротких гамма-всплесков (Eichler et al., 1989; Блинников и др., 1990). Для объяснения длинных гамма-всплесков была задействована модель излучения диска (эволюционирующего

в шкале времени нескольких секунд) вокруг только что сформировавшейся (в результате коллапса звезды Вольфа-Райе) керровской черной дыры (Woosley, 1993), высокий темп вращения которой обуславливается приливным взаимодействием в тесной двойной системе до коллапса ядра (Тутуков и Черепашук, 2003); используется идея о магниторотационном коллапсе ядра звезды как механизме возникновения сверхновой (Бисноватый-Коган, 1970).

Сверхновые звезды были разделены на два основных типа: I и II (Minkowski, 1941), без спектральных линий водорода и с ними соответственно. Возможные подклассы сверхновых типа II в работе не рассматриваются. Для типа I было заподозрено, что он представляет собой неоднородную группу (Bertola, 1964), и было показано, что она состоит как минимум из двух подмножеств, демонстрируя присутствие (тип Ia) или отсутствие (тип Ib) линии поглощения SiII 6150 Å (Porter & Filippenko, 1987). В качестве модели, описывающей сверхновые первого типа, был предложен термоядерный взрыв углеродно-кислородного белого карлика в полуразделенной двойной системе при превышении его массой предела Чандрасекара в процессе аккреции вещества с компаньона (Whelan & Iben, 1973). Эта модель была расширена на слияния углеродно-кислородных белых карликов (с суммарной массой, превышающей предел Чандрасекара) под действием излучения гравитационных волн (Тутуков и Юнгельсон, 1981; Iben & Tutukov, 1984a; Webbink, 1984). В настоящее время такие события принято связывать со сверхновыми типа Ia. Также была предложена модель взрыва карлика с гелиевым донором, в которой белый карлик при определенных условиях может иметь массу ниже предела Чандрасекара (Livne, 1990).

Сверхновые типа Ia могут возникать в тройных системах, в которых эволюция центральной пары идет при сильном воздействии третьего тела (Iben & Tutukov, 1999; Hamers et al., 2013). Углеродно-кислородные белые карлики могут столкнуться друг с другом в тройной звездной системе в результате динамического взаимодействия компонент, производя термоядерный взрыв (Kushnir et al., 2013).

По результатам наблюдений далеких сверхновых типа Ia было открыто ускоренное расширение Вселенной (Riess et al., 1998; Perlmutter

et al., 1999). Это открытие базируется на том факте, что звездная величина сверхновой Ia в максимуме может быть определена по наклону кривой блеска (Псковский, 1984; Phillips, 1993). Поскольку возможное ускоренное расширение Вселенной — это одно из важнейших открытий в астрономии, изучение различных аспектов, связанных со сверхновыми звездами типа Ia (а также с их потенциально возможной эволюцией) имеет исключительно высокое значение.

Прямая регистрация гравитационных волн (GW 150914, Abbott et al., 2016a), возникших в результате слияния двух черных дыр, стала началом эры многоканальной астрономии. Совпадение гравитационно-волнового события GW 170817 (Abbott et al., 2017a) и короткого гамма-всплеска GRB 170817A (Abbott et al., 2017b) дало аргумент в пользу справедливости теории эволюции двойных звезд, а также доказало, что: (1) гравитационные волны действительно открыты, (2) модель слияния двух нейтронных звезд в качестве описания коротких гамма-всплесков верна.

Оценки частот слияний вырожденных объектов послужили астрофизической основой для создания гравитационно-волновых детекторов, частоты были рассчитаны в рамках теории эволюции тесных двойных звезд (Lipunov et al., 1987; Tutukov & Yungelson, 1993) и феноменологически выведены исходя из наличия трех известных в тот момент двойных радиопульсаров (один в шаровом скоплении и два в галактической плоскости), которые могли бы слиться под действием гравитационных волн за время, не превышающее возраст Вселенной (Phinney, 1991). Эти расчеты в целом соответствуют гравитационно-волновым наблюдениям (Lipunov et al., 2017, 2018). Тем не менее, многоканальная астрономия открыла широкий простор для развития теоретической мысли и наблюдательной проверки выдвигаемых гипотез. В частности, для события GW 150914 предложены слияния реликтовых черных дыр (Blinnikov et al., 2016), динамическая эволюция тройных систем (Antonini et al., 2016), химически однородная эволюция¹ тесных двойных (de Mink & Mandel, 2016), динамические

¹Одним из вариантов эволюционного сценария является так называемый M-сценарий эволюции (Тутуков и Черепашук, 2020), используемый, например, в работах (de Mink et al., 2010, 2013) и в целом не учитывавшийся в «Машине сценариев» (основном инструменте, использу-

процессы в звездных скоплениях (Rodrigues et al., 2016b), аккреция газа и пыли (которые сближают компоненты двойной черной дыры) в молекулярном облаке, через которое пролетает относительно широкая двойная черная дыра (Тутуков и Черепашук, 2017).

Внесолнечные планетные системы в качестве абстрактной идеи были предложены древнегреческими философами, однако большую часть исторического времени оставались гипотетическими объектами. К началу 50-х годов XX века стало ясно, что по прямой аналогии с двойными звездами их можно открыть при помощи двух основных методов (измерение лучевых скоростей звезд, транзиты планет по дискам звезд), а также было понято, что первой открытой внесолнечной планетой станет горячий юпитер (Struve, 1952). Технологические трудности данной задачи оказались довольно большими, поэтому путь от предсказания до открытия 51 Peg b (Mayor & Queloz, 1995) занял продолжительное время.

С тех пор при помощи различных методов было открыто $\sim 10^4$ кандидатов во внесолнечные планеты, существование большого количества экзопланет имеет надежное подтверждение². Большинство из них обращается вокруг одиночных звезд, либо вокруг отдельных компонент широких кратных систем. Внесолнечная планета «Кеплер-16b» стала первой открытой экзопланетой (Doyle et al., 2011), обращающейся вокруг двойной звезды (обе компоненты которой — звезды главной последовательности), окончательно размывая грань между фантастикой и научной реальностью.

Планеты в системах радиопульсаров (Бисноватый-Коган, 1989, 1990; Wolszczan & Frail, 1992; Thorsett et al., 1993) представляют собой отдельное направление, которое в целом не рассматривается в рамках данной диссертации, хотя в отдельных случаях эволюционные треки, рассчитанные ниже при помощи «Машины сценариев»,

емом в диссертации). Этот сценарий имеет сильные отличия от классического при описании короткопериодических массивных двойных с высоким осевым вращением компонент и меридиональной циркуляцией, обеспечивающей химическую однородность более массивной звезды и менее эффективной для менее массивной звезды пары из-за ее меньшего размера, вследствие чего менее массивная звезда заполняет свою полость Роша до окончания эволюции более массивной, а более массивная не заполняет полость Роша в ходе своей эволюции.

²Энциклопедия внесолнечных планет: exoplanet.eu

производят тела планетной массы (изначально — звезды), возникающие различными путями (испарение компаньона нейтронной звездой, аккреция маломассивного спутника на черную дыру).

Наряду с возможным влиянием дополнительных тел в системе на феномен сверхновых типа Ia и на слияния релятивистских объектов наличие внесолнечных планет около двойных звезд делает важными поиски дополнительных тел в системах двойных звезд любых масс на любых эволюционных стадиях. В момент написания данных строк по научным направлениям, полностью или частично связанным с темой диссертации, активно работают гравитационно-волновые детекторы LIGO, VIRGO, KAGRA и GEO, космические рентгеновские и гамма обсерватории SWIFT, INTEGRAL, CHANDRA, XMM-NEWTON, FERMI, HXMT, СПЕКТР-РГ, система оптических телескопов-роботов МАСТЕР, космический аппарат для фотометрического поиска внесолнечных планет TESS. Готовится вступить в работу наземный синоптический телескоп LSST. Находятся в стадии разработки космические проекты WFIRST, ATHENA, PLATO.

Таким образом, в настоящее время актуальность исследований физики, эволюции и кратности двойных звезд исключительно высока, так как они непосредственно связаны с важнейшими явлениями и объектами, которые находятся в центре внимания современной физики и астрофизики (Тутуков и Черепашук, 2020). Развитие наземных и космических обсерваторий (исследующих электромагнитное излучение в различных диапазонах) и недавний старт гравитационно-волновой астрономии, благодаря которому (наряду с нейтринными наблюдениями) астрономия из всеволновой превратилась в многоканальную, стимулируют дальнейшее развитие теории.

Центральное место в диссертации занимает популяционный синтез эволюции тесных двойных звезд при помощи «Машины сценариев», которая описывается далее во Введении. Уделено внимание определенным наблюдательным и теоретическим аспектам тесной двойной системы, состоящей из оптической звезды и радиопульсара, а также поиску дополнительных тел в затменных двойных системах при помощи фотометрических наблюдений.

Цели и задачи исследования

В диссертационной работе были поставлены следующие цели:

- Изучить параметры ветра Ве-звезды SS 2883 в двухкомпонентной модели (сферический ветер над полюсами и дисковый ветер в экваториальной области) по поглощению радиоизлучения пульсара B1259-63, который при орбитальном движении служит в качестве зонда окружающей среды.
- Изучить возможность использования радиопулсара в качестве «термометра» для Ве-звезды благодаря обратному комптоновскому рассеянию мягкого излучения Ве-звезды (поле которого анизотропно) на релятивистских частицах пульсара.
- Рассчитать суммарную массу сливающихся под действием гравитационно-волнового излучения белых карликов с тем, чтобы указать возможный канал происхождения массивных магнитных белых карликов, а также, в частности, рассчитать разброс масс и эволюцию средней массы углеродно-кислородных белых карликов для того, чтобы изучить потенциально возможную эволюцию сверхновых типа Ia.
- Построить функцию масс радиопулсаров в двойных системах с нейтронными звездами и белыми карликами и изучить роль аккреции, супераккреции и гипераккреции в наборе ими вещества. Построить функцию масс черных дыр в рентгеновских двойных системах, проверить соответствие различных эволюционных сценариев наблюдениям. Рассчитать возможную долю радиопулсаров в парах с черными дырами среди всех радиопулсаров в двойных системах и найти вероятность открыть подобную систему.
- Изучить возможную эволюцию рентгеновских новых с тем, чтобы указать на потенциально возможные причины ускоренного уменьшения орбитальных периодов систем KV UMa, A0620-00, Nova Muscae 1991.

- Рассчитать частоту коллапсов звезд Вольфа-Райе в предельно тесных двойных системах и сравнить эти частоты с наблюдаемыми частотами гамма-всплесков (в случае рождения керровских черных дыр) и частотами рождения магнитаров (в случае рождения нейтронных звезд) для того, чтобы проверить соответствие наблюдательным данным модели возникновения экстремально большой скорости осевого вращения предсверхновых в двойных системах.
- Изучить возможную эволюцию массивных тесных двойных систем, включающих в свой состав наиболее массивные и/или наиболее важные с эволюционной точки зрения кандидаты в черные дыры: Cyg X-3, M33 X-7, IC 10 X-1, NGC 300 X-1, SS 443. Оценить сценарные параметры и эволюционные сценарии, необходимые для описания эволюции указанных систем, а также дать прогноз финального результата их эволюции. Изучить возможное происхождение гравитационно-волновых событий GW150914 и GW151226 в результате эволюции массивных тесных двойных звезд.
- Изучить возможную кратность выбранных затменных двойных звезд: FL Lyr, CV Boo, AR CrB, AB And, V0873 Per, AS Cam.

Для достижения этих целей были решены следующие задачи:

- Создана программа для численного расчета поглощения радиоизлучения пульсара и изменения меры дисперсии этого излучения в ветре Ве-звезды, позволяющая менять параметры ветра, орбиты пульсара, взаимной ориентации оптической звезды, пульсара и наблюдателя. Создана программа для численного расчета жесткого излучения, образующегося благодаря обратному комптоновскому рассеянию мягкого излучения Ве-звезды на релятивистских частицах пульсара, в зависимости от угла наклона орбиты пульсара по отношению к картинной плоскости и к экватору Ве-звезды. Проведены расчеты при помощи этих программ. Проведен популяционный синтез систем, состоящих из радиопулсара и Ве-звезды.

- Проведена модернизация основного инструмента, использовавшегося в работе («Машина сценариев»).
- Проведен популяционный синтез белых карликов различных химических составов, рассчитана эволюция их характеристик. Оценена частота слияний звезд главной последовательности с конвективными оболочками под действием магнитного звездного ветра.
- Построены функции масс радиопульсаров в двойных системах с нейтронными звездами и белыми карликами, функции масс черных дыр в рентгеновских двойных системах. Оценена доля радиопульсаров в парах с черными дырами среди всех радиопульсаров.
- Проведен популяционный синтез эволюции рентгеновских novae.
- Рассчитана частота коллапсов звезд Вольфа-Райе в предельно тесных двойных системах с учетом различных предположений о приливной синхронизации вращения эволюционирующего ядра и характеристик концентрации вещества ядра к центру.
- Построены эволюционные треки систем Cyg X-3, M33 X-7, IC 10 X-1, NGC 300 X-1, SS 443, гравитационно-волнового события GW 150914 от начала жизни двойной системы до финальных стадий. Эволюция системы CG X-1 и гравитационно-волнового события GW 151226 оказалась описанной этими расчетами до открытия CG X-1 и регистрации GW 151226.
- Проведены фотометрические наблюдения систем CV Boo, AR CrB, AB And, V0873 Per, AS Cam, а также обработка и интерпретация полученных данных. Для системы FL Lyr данные были взяты из базы данных телескопа имени Кеплера, проводилась только интерпретация данных.

Объект и предмет исследования

Объектом исследования являются двойные звезды, их эволюция, а также явления, связанные с двойными звездами и их эволюцией.

Предметом исследования являются: (1) тесная двойная система, состоящая из радиопульсара и Ве-звезды (примером которой может служить радиопульсар В1259-63 в паре с Ве-звездой SS 2883), (2) эволюция тесных двойных систем на поздних стадиях (и качественный состав этих систем на разных стадиях их эволюции), включающих в свой состав один или два вырожденных объекта, массы этих объектов и их слияния под действием гравитационных волн (и, соответственно, сверхновые типа Ia в модели слияний углеродно-кислородных белых карликов, а также гравитационно-волновые события), (3) длинные гамма-всплески и магнитары как результат эволюции массивных предельно тесных двойных систем, (4) возможная кратность выбранных затменных двойных звезд.

Методология исследования

Численное моделирование при помощи самостоятельно созданного программного обеспечения, работа с наблюдательными данными из литературы (для исследования системы «радиопульсар + Ве-звезда»).

Популяционный синтез эволюции тесных двойных звезд при помощи компьютерного кода «Машина сценариев» (Корнилов и Липунов, 1983а,б). Работа с наблюдательными данными из литературы.

Фотометрические наблюдения при помощи телескопов с диаметром зеркала 0.5-0.6 м, обработка данных и численное решение кривых блеска. Использование общедоступных данных космического телескопа имени Кеплера. Работа с данными о моментах минимумов кривых блеска изучаемых систем из литературы и из базы данных V.R.N.O.

Положения, выносимые на защиту

1. Радиопульсар, находящийся в паре с невырожденной звездой (представлена в работе системой B1259-63 + SS 2883), можно использовать в качестве зонда для определения плотности ветра оптической звезды и ориентации структур ветра по наблюдению поглощения и изменения меры дисперсии радиоизлучения в ветре. Радиопульсар можно использовать в качестве индикатора распределения температуры неравномерно нагретой оптической звезды (в случае, если плоскость орбиты пульсара близка к картинной плоскости) по наблюдениям жесткого излучения, образующегося в результате обратного комптоновского рассеяния мягкого излучения оптической звезды на релятивистских частицах, испускаемых пульсаром.
2. Суммарная масса углеродно-кислородных двойных белых карликов, превышающая предел Чандрасекара, в процессе эволюции в среднем падает на 10% за время 1-2 миллиарда лет после пика звездообразования; разница между максимальной и минимальной суммарной массой составляет не менее 1.5 раз в течение большей части времени жизни Вселенной. Большинство наиболее массивных (преимущественно магнитных) белых карликов образуются в результате слияний карликов меньших масс.
3. Унос углового момента магнитным звездным ветром в наиболее тесных парах звезд главной последовательности с конвективными оболочками приводит к слиянию компонент и является причиной образования существенной части магнитных Ap- и Bp-звезд.
4. В тесных двойных системах нейтронные звезды могут аккумулировать вещество вплоть до возможного достижения их массы предела Оппенгеймера-Волкова и последующего аккреционно-индуцированного коллапса с образованием маломассивных черных дыр.

5. Усиленный унос углового момента магнитным звездным ветром невырожденных компонент, возникающий после предшествующей эволюционной стадии с общей оболочкой, объясняет ускоренное уменьшение орбитального периода в рентгеновских новых с черными дырами KV UMa, A0620-00 и Nova Muscae 1991.
6. Частота коллапсов ядер звезд Вольфа-Райе в тесных двойных системах (с орбитальным периодом $\lesssim 1$ сут в момент коллапса) для галактик с параметрами Млечного пути составляет: с образованием керровской черной дыры и, соответственно, длинного гамма-всплеска \sim несколько единиц 10^{-5} событий в год, с образованием нейтронной звезды, являющейся магнитаром, \sim несколько единиц 10^{-3} событий в год.
7. Система M33 X-7 в ходе последующей эволюции перейдет к заполнению полости Роша невырожденным компаньоном с последующим образованием общей оболочки, в ходе которой черная дыра проникнет в центр оптической звезды.
8. Эволюционный трек системы Cyg X-3 в массивной модели описывает возникновение двойной системы ВН+ВВ (черная дыра в паре со звездой Вольфа-Райе, заполняющей свою полость Роша, в данное время представлена наиболее близко соответствующей этой стадии системой CG X-1) и второе гравитационно-волновое событие GW151226. Эволюция систем IC 10 X-1 и NGC 300 X-1 приведет к образованию двойных черных дыр, сливающихся за время, меньшее возраста Вселенной. Эволюционный трек массивных сливающихся черных дыр, возникающих в результате эволюции тесных двойных звезд, описывает гравитационно-волновое событие GW150914.

Научная новизна

В работе впервые:

- * Рассчитан эффект переменности рентгеновского излучения, возникающего в результате обратного комптоновского рассеяния анизотропного излучения Ве-звезды на релятивистских частицах радиопульсара и показана возможность его наблюдения в будущем.
- * Построена функция масс нейтронных звезд с учетом набора массы нейтронной звездой на стадиях аккреции, супераккреции и гипераккреции при разных значениях времени затухания магнитного поля и указан тип двойных систем, в которых существует вероятность найти нейтронную звезду, набравшую массу.
- * Построена функция масс черных дыр в рентгеновских системах с учетом времени жизни двойных звезд на соответствующей стадии, а также с учетом возможности аккреционно-индуцированного коллапса нейтронных звезд.
- * Построена зависимость средней массы сливающихся углеродно-кислородных белых карликов от времени, показана возможность эволюции светимости сверхновых типа Ia.
- * Проведена оценка частоты коллапсов звезд Вольфа-Райе в предельно тесных двойных системах методом популяционного синтеза и показано, что наблюдаемая встречаемость гамма-всплесков преимущественно в карликовых галактиках объясняется более слабым звездным ветром в них.
- * Методом популяционного синтеза оценена частота рождения магнитаров в предельно тесных двойных системах.
- * Исследованы возможные эволюционные пути систем М33 X-7 и IC 10 X-1.

- * Найдены кандидаты в дополнительные тела в системах FL Lyr, AR CrB, а также по одному из двух дополнительных тел в каждой из систем V0873 Per, AC Boo, V1097 Her.
- * В системе AS Cam найдено изменение эксцентриситета в результате гравитационного воздействия третьего тела на центральную пару.

Теоретическая и практическая значимость работы

Полученные в работе результаты показывают, что радиопульсар в двойной системе «радиопульсар + Ве-звезда» может быть использован как для зондирования звездного ветра второй компоненты, так и для исследования зависимости эффективной температуры на поверхности оптического компаньона от широты.

Исследования функций масс нейтронных звезд и черных дыр важны для определения многих параметров звездной эволюции, начиная от ядер коллапсирующих звезд до величины звездных ветров, поскольку конечные стадии жизни звезд чувствительны к изменению эволюционного сценария.

Подтверждение возможности открытия двойных радиопульсаров с черными дырами имеет большое значение для проверки в будущем положений теории относительности и дополнительного доказательства существования черных дыр.

Построенная функция масс сливающихся белых карликов и эволюция их средней массы со временем должны учитываться при оценке космологических параметров, в том числе при рассмотрении вопроса о характеристиках ускоренного расширения Вселенной.

Частоты коллапсов звезд в предельно тесных двойных системах и их совпадение с частотами гамма-всплесков (в случае рождения черных дыр в таких системах) и магнитаров (в случае рождения

нейтронных звезд) дают ценную информацию о применимости соответствующих физических моделей к указанным природным феноменам.

Успешное описание эволюции открытых наиболее массивных тесных двойных систем вплоть до сливающихся черных дыр подтверждает достоверность существующего сценария эволюции тесных двойных звезд.

Публикации по теме диссертации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 33 печатных изданиях, 27 из которых опубликованы в рецензируемых научных изданиях, индексируемых в базе данных Web of Science/Scopus, рекомендованных для защиты в диссертационном совете МГУ по специальности.

Публикации в журналах Web of Science/Scopus:

1. А. И. Богомазов, В. М. Липунов, «Обратный комптон-эффект в двойной системе „Пульсар-Ве-звезда“», *Астрономический журнал*, т. 80, с. 891 (2003). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
2. А. И. Богомазов, М. К. Абубекеров, В. М. Липунов, А. М. Черепашук, «Эволюция масс нейтронных звезд в двойных системах», *Астрономический журнал*, т. 82, с. 331 (2005). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
3. V. M. Lipunov, A. I. Bogomazov, M. K. Abubekеров, “How abundant is the population of binary radio pulsars with black holes?”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 359, p. 1517 (2005). (*Web of Science IF2019=5.537*)
4. А. И. Богомазов, М. К. Абубекеров, В. М. Липунов, «Распределение черных дыр в двойных системах по массам», *Астрономи-*

- ческий журнал, т. 82, с. 722 (2005). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
5. А. И. Богомазов, «Моделирование ветра Ве-звезды SS 2883», *Астрономический журнал*, т. 82, с. 797 (2005). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
 6. А. И. Богомазов, В. М. Липунов, А. В. Тутуков, «Эволюция тесных двойных систем и гамма-всплески», *Астрономический журнал*, т. 84, с. 345 (2007). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
 7. А. И. Богомазов, В. М. Липунов, А. В. Тутуков, «Длинные гамма-всплески и морфология родительских галактик», *Астрономический журнал*, т. 85, с. 520 (2008). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
 8. А. И. Богомазов, А. М. Черепащук, «Популяционный синтез массивных тесных двойных типа WR20a», *Астрономический журнал*, т. 85, с. 1122 (2008). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
 9. А. И. Богомазов, А. В. Тутуков, «Слияния компонент тесных двойных систем: сверхновые типа Ia, массивные белые карлики и Ар-звезды», *Астрономический журнал*, т. 86, с. 240 (2009). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
 10. М. К. Абубекеров, Э. А. Антохина, А. И. Богомазов, А. М. Черепащук, «Масса черной дыры в рентгеновской двойной системе М33 X-7 и эволюционный статус систем X-7 и IC 10 X-1», *Астрономический журнал*, т. 86, с. 260 (2009). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
 11. G. V. Lipunova, E. S. Gorbovskey, A. I. Bogomazov, V. M. Lipunov, “Population synthesis of gamma-ray bursts with precursor activity and the spinar paradigm”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 397, p. 1695 (2009). (*Web of Science IF2019=5.537*)

12. А. И. Богомазов, С. Б. Попов, «Магнитары, гамма-всплески и предельно тесные двойные звезды», *Астрономический журнал*, т. 86, с. 361 (2009). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
13. В. М. Липунов, К. А. Постнов, М. Е. Прохоров, А. И. Богомазов, «Описание „Машины сценариев“», *Астрономический журнал*, т. 86, с. 985 (2009). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
14. А. И. Богомазов, А. В. Тутуков, «Сверхновые типа Ia — нестандартные свечи Вселенной», *Астрономический журнал*, т. 88, с. 541 (2011). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
15. А. В. Тутуков, А. И. Богомазов, «Поиск планет затменных двойных звезд», *Астрономический журнал*, т. 89, с. 857 (2012). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
16. А. М. Cherepashchuk, R. A. Sunyaev, S. V. Molkov, E. A. Antokhina, К. А. Postnov, А. I. Bogomazov, “INTEGRAL observations of SS433: system’s parameters and nutation of supercritical accretion disc”, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, v. 436, p. 2004 (2013). (*Web of Science IF2019=5.537*)
17. А. И. Богомазов, «Изучение эволюции тесных двойных систем Cyg X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1, SS433 и M33 X-7 при помощи „Машины сценариев“», *Астрономический журнал*, т. 91, с. 180 (2014). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
18. В. С. Козырева, А. И. Богомазов, Б. П. Демков, Л. В. Зотов, А. В. Тутуков, «Кандидат в экзопитеры в затменной двойной FL Lyr», *Астрономический журнал*, т. 92, с. 925 (2015). См. также Erratum to: «Кандидат в экзопитеры в затменной двойной FL Lyr», *Астрономический журнал*, т. 93, с. 512, (2016). (*Astronomy Reports, Web of Science IF2019=1.164*)
19. А. I. Bogomazov, М. А. Ibrahimov, В. L. Satovskii, V. S. Kozyreva, T. R. Irsambetova, V. N. Krushevskaya, Y. G. Kuznyetsova, E. R. Gaynullina, R. G. Karimov, S. A. Ehgamberdiev, А. V. Tutukov, “Timing

- of eclipsing binary V0873 Per: a third body candidate”, *Astrophysics and Space Science*, v. 361, id. 4 (2016). (*Web of Science IF2019=1.43*)
20. A. I. Bogomazov, V. S. Kozyreva, B. L. Satovskii, V. N. Krushevskaya, Y. G. Kuznyetsova, S. A. Ehgamberdiev, R. G. Karimov, A. V. Khalikova, M. A. Ibrahimov, T. R. Irsambetova, A. V. Tutukov, “Light equation in eclipsing binary CV Boo: third body candidate in elliptical orbit”, *Astrophysics and Space Science*, v. 361, id. 390 (2016). (*Web of Science IF2019=1.43*)
 21. V. S. Kozyreva, M. A. Ibrahimov, E. R. Gaynullina, R. G. Karimov, B. M. Hafizov, B. L. Satovskii, V. N. Krushevskaya, Yu. G. Kuznyetsova, A. I. Bogomazov, T. R. Irsambetova, A. V. Tutukov, “Timing of AB And eclipses”, *New Astronomy*, v. 58, p. 29 (2018). (*Web of Science IF2019=1.058*)
 22. A. I. Bogomazov, A. M. Cherepashchuk, V. M. Lipunov, A. V. Tutukov, “Wolf-Rayet stars, black holes and the first detected gravitational wave source”, *New Astronomy*, v. 58, p. 33 (2018). (*Web of Science IF2019=1.058*)
 23. Valentina Kozyreva, Anatoly Kusakin, Alexey Bogomazov, “The evolution of eccentricity in the eclipsing binary system AS Camelopardalis”, *Research in Astronomy and Astrophysics*, v. 18, id. 010 (2018). (*Web of Science IF2019=1.512*)
 24. V. S. Kozyreva, T. R. Irsambetova, M. A. Ibrahimov, V. N. Krushevskaya, Yu. G. Kuznyetsova, A. V. Khalikova, O. U. Parmonov, R. G. Karimov, A. I. Bogomazov, B. L. Satovskii, A. V. Tutukov, “Timing of AR CrB eclipses”, *Information bulletin on variable stars*, 6235 (2018). (*Scopus SJR2020=0.182*)
 25. Yanli Qiu, Roberto Soria, Song Wang, Grzegorz Wiktorowicz, Jifeng Liu, Yu Bai, Alexey Bogomazov, Rosanne Di Stefano, Dominic J. Walton, Xiaojie Xu, “CG X-1: An Eclipsing Wolf-Rayet ULX in the Circinus Galaxy”, *The Astrophysical Journal*, v. 877, id. 57 (2019). (*Web of Science IF2019=5.746*)

26. A. I. Bogomazov, M. A. Ibrahimov, V. S. Kozyreva, B. L. Satovskii, V. N. Krushevska, Y. G. Kuznyetsova, S. A. Ehgamberdiev, B. M. Hafizov, R. G. Karimov, E. R. Gaynullina, A. V. Khalikova, O. U. Parmonov, T. R. Irsambetova, A. V. Tutukov, “A search for additional bodies in short period eclipsing binary stars”, Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso, v. 49, p. 384 (2019). (*Web of Science IF2019=0.636*)
27. A. M. Cherepashchuk, N. A. Katysheva, T. S. Khruzina, S. Yu. Shugarov, A. M. Tatarnikov, A. I. Bogomazov, “Optical, J and K light curves of XTE J1118+480 = KV UMa: the mass of the black hole and the spectrum of the non-stellar component”, Monthly Notices Royal Astronomical Society, v. 490, p. 3287 (2019). (*Web of Science IF2019=5.537*)

Иные публикации:

28. Alexey I. Bogomazov, “Binary orbital orientation modelling”, Astronomical and Astrophysical Transactions, v. 23, p. 71 (2004).
29. А. И. Богомазов, “Расчет эволюции и наблюдательных проявлений нейтронных звезд и черных дыр в двойных системах”, диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук (Москва, 2005).
30. A. I. Bogomazov, A. V. Tutukov, “Supernovae type Ia: non-standard candles of the Universe”, Proceedings of Science, 25th Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, id. 83 (2010).
31. А. И. Богомазов, А. В. Тутуков, “AP-звезды — возможный результат слияний компонент тесных двойных звезд”, Ученые записки Казанского университета, т. 153, кн. 2, с. 132 (2011).
32. A. Cherepashchuk, R. Sunyaev, S. Molkov, E. Antokhina, K. Postnov, A. Bogomazov, “Peculiarities in the orbital and precessional variability of SS433 from INTEGRAL observations”, Proceedings of Science, Integral 2012, id. 40 (2012).

33. А. И. Богомазов, В. С. Козырева, Б. Л. Сатовский, В. Н. Крушевская, Ю. Г. Кузнецова, Ш. А. Эгамбердиев, Р. Г. Каримов, А. В. Халикова, М. А. Ибрагимов, Т. Р. Ирсмамбетова, А. В. Тутуков, Труды 47-й Международной студенческой научной конференции “Физика космоса”, совмещенный семинар “Современные исследования переменных звезд”, “Световое уравнение в затменной двойной CV Boo”, с. 284 (2018).

Также имеется 12 тезисов в сборниках конференций.

Степень достоверности и апробация результатов

При помощи программного обеспечения, созданного автором, получены результаты, согласующиеся с результатами, полученными другими авторами с использованием иных методов.

Популяционный синтез при помощи «Машины сценариев» стал одной из астрофизических опор современной гравитационно-волновой астрономии. Предсказания, сделанные при помощи этой программы предшественниками автора диссертации и автором диссертации, получили наблюдательное подтверждение.

Обработка и интерпретация данных наблюдений затменных двойных проводилась при помощи стандартных методов и стандартного программного обеспечения.

Результаты данной диссертационной работы докладывались автором на следующих мероприятиях:

1. Международная конференция студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2001», ГАИШ МГУ, 20 апреля 2001 года. (*Устный доклад*)
2. Международная конференции студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2004», ГАИШ МГУ, 13 апреля 2004 года. (*Устный доклад*)

3. Международная конференция «Космология и Астрофизика Высоких Энергий (Зельдович-90)», ИКИ РАН, 20-24 декабря 2004 года. *(Стендовый доклад)*
4. International School of Space Science “Gamma-Ray Bursts: from Astrophysics to Cosmology”, Scuola Superiore “Guglielmo Reiss Romoli”, L’Aquila, Italy, 12-16 September 2005. *(Устный доклад)*
5. Школа-конференция «Физика галактик», Нижний Архыз, САО РАН, 3-10 сентября 2007 года. *(Устный доклад)*
6. Всероссийская астрофизическая конференция «Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра», ИКИ РАН, 24-28 декабря 2008 года. *(Стендовый доклад)*
7. VI конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования», ИКИ РАН, 09-10 апреля 2009 года. *(Устный доклад)*
8. XVI Международная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов», ГАИШ МГУ, 13-18 апреля 2009 года. *(Устный доклад)*
9. Workshop «Stellar Mergers», Lorentz Center, Leiden, Netherlands, 21 September — 02 October 2009. *(Устный доклад)*
10. VII конференция молодых ученых «Фундаментальные и прикладные исследования», ИКИ РАН, 12-13 апреля 2010 года. *(Устный доклад)*
11. Всероссийская астрономическая конференция ВАК-2010, САО РАН, 13-18 сентября 2010 года. *(Стендовый доклад)*
12. Международная астрофизическая конференция «Новейшие методы исследования космических объектов», Казанский государственный университет, 07-10 октября 2010 года. *(Стендовый доклад)*

13. 25th Symposium on Relativistic Astrophysics «Texas 2010», Heidelberg, Germany, 06-10 December 2010. (*Стендовый доклад*)
14. Всероссийская молодежная астрономическая конференция «Наблюдаемые проявления эволюции звезд», САО РАН, 15-19 октября 2012 года. (*Устный доклад*)
15. Семинар «Исследование экзопланет», ИКИ РАН, 3-4 июня 2014 года. (*Устный доклад*)
16. XII съезд Астрономического общества и конференция «Астрономия от ближнего космоса до космических далей», ГАИШ МГУ, 25-30 мая 2015 года. (*Устный доклад*)
17. Международная конференция «Взрывающаяся Вселенная глазами роботов», ГАИШ МГУ, 14-18 августа 2017 года. (*Устный доклад*)
18. Научный семинар «Современные исследования переменных звезд», присоединенный к 47-й Международной студенческой научной конференции «Физика космоса», УрФУ, Коуровская астрономическая обсерватория, Свердловская область, 29 января — 2 февраля 2018 года. (*Устный доклад*)
19. Научная конференция «Ломоносовские чтения», ГАИШ МГУ, 19 апреля 2018 года. (*Устный доклад*)

Личный вклад автора диссертации

В работах из списка публикаций по теме диссертации автор сделал следующий вклад:

- В работе 1 создана программа расчета и проведен расчет зависимости обратного комптоновского рентгеновского излучения системы, состоящей из радиопульсара и Ве-звезды.

- В работах 2-4, 6-11, 14, 22, 27, 30, 31 выполнен популяционный синтез при помощи «Машины сценариев».
- В работах 9 и 14 создана и использована программа, позволяющая связать результаты расчетов «Машины сценариев» и различные истории темпа образования звезд в галактиках на космологических временах.
- Работы 5, 17 и 28 выполнены без соавторов. В работе 22 проведена постановка задачи.
- В работе 13 обновлено описание «Машины сценариев», а также включено описание изменений в коде программы, сделанных автором диссертации.
- В работе 15 построен список объектов для последующего наблюдения с целью поиска дополнительных тел в системах двойных звезд.
- В работах 16 и 32 проведена обработка рентгеновских наблюдений системы SS 433 на спутнике INTEGRAL при помощи программы OSA 10.
- В работах 18-21, 24, 26 и 33 выполнены: постановка задачи, организация и координация работы коллектива при поисках дополнительных тел в системах двойных звезд.
- В работе 23 проведена интерпретация полученных наблюдательных данных об эволюции элементов орбиты AS Cam с точки зрения теоретических моделей такой эволюции.
- В работе 25 проведены эволюционные оценки при помощи «Машины сценариев», позволившие выбрать основную модель системы, а также проведены оценки необходимости заполнения полости Роша звездой Вольфа-Райе для обеспечения текущей рентгеновской светимости системы CG X-1.

Краткое содержание, структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения, благодарностей, списка литературы на русском языке, списка литературы на иностранных языках. Общее количество страниц в диссертации 421, общее количество ссылок на литературу 702 (93 на русском языке, 609 на иностранных языках; статьи с участием автора диссертации в списке литературы не приводятся, они собраны во введении в разделе о публикациях, в которых опубликованы результаты диссертации). В работе содержится 133 рисунка и 41 таблица, а также 7 приложений (главы 1, 3, 4 и 6 имеют по одному приложению, глава 7 имеет три приложения).

Во **Введении** рассмотрены актуальность, история и степень разработанности темы диссертации, цели и задачи работы, объект, предмет и методология исследования, кратко описываются содержание работы и программа для проведения популяционного синтеза эволюции тесных двойных звезд — «Машина сценариев» — основной используемый в работе инструмент. Также **Введение** содержит список тезисов, выносимых на защиту, список работ, в которых автором диссертации опубликованы защищаемые положения, список конференций, на которых автор представил устные или стендовые доклады по теме диссертации, а также описывает научную новизну, практическую ценность полученных результатов и личный вклад автора в работу по получению этих результатов.

Глава 1 посвящена всестороннему изучению двойной системы, состоящей из радиопульсара и Ве-звезды. Рассмотрен главный на сегодняшний день пример такого объекта: B1259-63 + SS 2883. В этой системе радиопульсар выступает в качестве зонда, позволяющего изучать характеристики ветра невырожденного компаньона. Получены характеристики ветра (электронная плотность и темп падения плотности в диске) в двухкомпонентной модели (дисковый ветер + сферический ветер). Рассмотрена возможная орбитальная модуляция обратного комптоновского рентгеновского излучения, воз-

никающего в подобной системе, вызванная неоднородностью поля излучения быстро вращающейся неравномерно нагретой оптической звезды. Рассчитана вероятность наблюдения такой модуляции.

В **Главе 2** изучаются слияния двойных белых карликов вследствие уноса орбитального углового момента при излучении гравитационных волн, а также слияния двойных звезд главной последовательности, причиной уноса момента в которых является магнитный звездный ветер. Показано, что: (1) наиболее массивные магнитные белые карлики могут образовываться в результате слияний белых карликов меньших масс, (2) средняя масса сливающихся углеродно-кислородных белых карликов с суммарной массой, превышающей предел Чандрасекара, убывает со временем, а это означает, что сверхновые типа Ia (которые считаются результатом таких слияний) должны эволюционировать, (3) частота слияний наиболее тесных звезд главной последовательности, в составе которых есть хотя бы одна звезда с конвективной оболочкой (и, соответственно, с магнитным звездным ветром), достаточна для объяснения феномена магнитных Ар и Вр звезд.

В **Главе 3** рассматривается возможная история набора вещества нейтронной звездой в системах, состоящих из радиопульсара в паре с нейтронной звездой или белым карликом. Показано, что нейтронная звезда в процессе аккреции (а также супераккреции и гипераккреции) может набрать значительное количество вещества компаньона, при этом массивную нейтронную звезду вероятнее найти в паре с белым карликом.

Глава 4 посвящена построению теоретической функции масс черных дыр в двойных системах. Показано, что: (1) учет времени жизни системы очень важен для понимания имеющейся формы наблюдательного распределения черных дыр в рентгеновских двойных по массам, (2) должны существовать черные дыры, образованные в результате аккреционно-индуцированного коллапса нейтронных звезд, (3) количество систем «радиопульсар + черная дыра» должно быть достаточным для их обнаружения в будущем, (4) ускоренное (по сравнению с обычными гравитационно-волновыми потерями) сближение компонент в некоторых маломассивных рентгеновских двой-

ных может объясняться магнитным звездным ветром, а достаточное для этого поле могло генерироваться на предшествующей стадии с общей оболочкой.

В **Главе 5** изучается частота коллапсов ядер звезд Вольфа-Райе в наиболее тесных двойных системах с сохранением высокого углового момента этих ядер. Такие события принято связывать с длинными гамма-всплесками в том случае, если образуется керровская черная дыра. Если в результате коллапса должна образоваться нейтронная звезда, то она должна стать магнитаром. Показано, что частоты коллапсов звезд Вольфа-Райе с образованием керровской черной дыры и с образованием нейтронной звезды в предельно тесных двойных системах оказываются сопоставимыми с наблюдательными ограничениями частот длинных гамма-всплесков и частот образования магнитаров соответственно.

Глава 6 посвящена эволюции наиболее массивных известных двойных систем с кандидатами в черные дыры (Cygnus X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1, M33 X-7), а также первому в истории зафиксированному всплеску гравитационно-волнового излучения GW150914 — слияния двух массивных черных дыр — как результату эволюции тесных двойных звезд. Показано, что изучаемые системы, состоящие из звезд Вольфа-Райе в паре с кандидатами в черные дыры (Cygnus X-3, IC 10 X-1, NGC 300 X-1), могут быть предшественниками как длинных гамма-всплесков, так и последующих слияний черных дыр с образованием гравитационно-волновых всплесков. Массивные черные дыры могут образоваться как результат эволюции тесной двойной, в которой в ходе общей оболочки формировался объект Торна-Житков, что является наиболее вероятной судьбой системы M33 X-7.

Глава 7 посвящена поиску дополнительных тел в системах шести затменных двойных звезд по результатам фотометрических наблюдений. Найдены: кандидат в экзопитеры, несколько кандидатов в красные и коричневые карлики. Также наблюдательно показано, что третье тело может оказывать существенное влияние на орбиту центральной двойной системы, менять наблюдательные проявления этой системы, а также, возможно, влиять на ее эволюцию и конечный результат этой эволюции.

Заключение посвящено краткому обзору итогов проведенной работы и выводов для будущих исследований.

Список литературы

- Бисноватый-Коган, Г. С., 1970, АЖ, 47, 813
- Бисноватый-Коган, Г. С., 1989, Астрофизика, 31, 567
- Бисноватый-Коган, Г. С., 1990, Астрофизика, 32, 313
- Бисноватый-Коган, Г. С., Комберг, Б. В., 1974, АЖ, 51, 373
- Блинников, С. И., и др., 1984, ПАЖ, 10, 422
- Блинников, С. И., и др., 1990, АЖ, 67, 1181
- Зельдович, Я. Б., 1964, Доклады академии наук СССР, 155, 67
- Кардашев, Н. С., 1964, АЖ, 41, 807
- Корнилов, В. Г., Липунов, В. М., 1983а, АЖ, 60, 284
- Корнилов, В. Г., Липунов, В. М., 1983б, АЖ, 60, 574
- Мазец, Е. П., Голенецкий, С. В., Ильинский, В. Н., 1974, Письма в журнал экспериментальной и теоретической физики, 19, 126
- Паренаго, П. П., Масевич, А. Г., 1950, Труды ГАИШ, 21, 81
- Псковский, Ю. П., 1984, АЖ, 61, 1125
- Тутуков, А. В., Черепащук, А. М., 2003, АЖ, 80, 419
- Тутуков, А. В., Черепащук, А. М., 2017, АЖ, 94, 821
- Тутуков, А. В., Черепащук А. М., 2020, УФН, 190, 225
- Тутуков, А. В., Юнгельсон, Л. Р., 1973а, Научные информации, 27, 58
- Тутуков, А. В., Юнгельсон, Л. Р., 1973б, Научные информации, 27, 70

Тутуков, А. В., Юнгельсон, Л. Р., 1981, Научные информации, 49, 3
Усов, В. В., Чибисов, Г. В., 1975, АЖ, 52, 192
Шакура, Н. И., 1972, АЖ, 49, 921
Abbott, B. P., et al., 2016a, Physical Review Letters, 116, id. 061102
Abbott, B. P., et al., 2017a, Physical Review Letters, 119, id. 161101
Abbott, B. P., et al., 2017b, ApJL, 848, L12
Antonini, F., et al., 2016, ApJ, 816, id. 65
Baade, W., Zwicky, F., 1934, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 20, 254
Baade, W., Zwicky, F., 1934, Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 20, 259
Bertola, F., 1964, Annales d'Astrophysique, 27, 319
Bessel, F. W., 1844, MNRAS, 6, 136
Bethe, H. A., Critchfield, C. L., 1938, Physical Review, 54, 248
Blinnikov, S., et al., 2016, Journal of Cosmology and Astroparticle Physics, 11, id. 036
Bondi, H., 1952, MNRAS, 112, 195
Bowyer, S., et al., 1965, Science, 147, 394
Chandrasekhar, S., 1931a, MNRAS, 91, 456
Chandrasekhar, S., 1931b, ApJ, 74, 81
Crawford, J. A., 1955, ApJ, 121, 71
Critchfield, C. L., Gamow, G., 1939, ApJ, 89, 244
de Mink, S. E., Mandel, I., 2016, MNRAS, 460, 3545
de Mink, S. E., et al., 2010, Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 435, 179

de Mink, S. E., et al., 2013, ApJ, 764, id. 166

Doyle, L. R., et al., 2011, Science, 333, Issue 6049, pp. 1602

Eichler, D., et al., 1989, Nature, 340, 126

Einstein, A., 1916, Annalen der Physik, 354, 769

Einstein, A., 1916, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), 688

Einstein, A., 1918, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), 154

Fowler, R. H., 1926, MNRAS, 87, 114

Frenkel, J., 1928, Zeitschrift für Physik, 50, 234

Gamow, G., 1938a, ApJ, 87, 206

Gamow, G., 1938b, Physical Review, 53, 595

Gamow, G., Teller, E., 1938, Physical Review, 53, 608

Giacconi, R., et al., 1962, Physical Review Letters, 9, 439

Giacconi, R., et al., 1972, ApJ, 178, 281

Goodricke, J., 1783, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 73, 474

Hamers, A. S., et al., 2013, MNRAS, 430, 2262

Herschel, W., 1785, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 75, 40

Hewish, A., et al., 1968, Nature, 217, 709

Hoyle, F., Fowler, W. A., 1963, MNRAS, 125, 169

Hoyle, F., Lyttleton, R. A., 1941, MNRAS, 101, 227

Hulse, R. A., Taylor, J. H., 1975, ApJ, 195, L51

Iben, I. Jr., Tutukov, A. V., 1984, ApJS, 54, 335

Iben, I. Jr., Tutukov, A. V., 1999, ApJ, 511, 324

Kerr, R. P., 1963, Physical Review Letters, 11, 237

Klebesadel, R. W., Strong, I. B., Olson, R. A., 1973, ApJL, 182, L85

Kushnir, D., et al., 2013, ApJL, 778, L37

Landau, L. D., 1932, Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion, 1, 285

Laplace, P.-S., 1796, Exposition du système du monde, Cercle-Social, Paris

Lipunov, V. M., Postnov, K. A., Prokhorov, M. E., 1987, A&A, 176, L1

Lipunov, V. M., et al., 2017, New Astronomy, 51, 122

Lipunov, V., et al., 2018, New Astronomy, 63, 48

Livne, E., 1990, ApJL, 354, L53

Mayor, M., Queloz, D., 1995, Nature, 378, 355

Mazets, E. P., et al., 1981, Ap&SS, 80, 3

Meegan, C. A., et al., 1992, Nature, 355, 143

Michell, J., 1784, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 74, 35

Minkowski, R., 1941, PASP, 53, 224

Öpik, E., 1938, Publications of the Tartu Astrofizica Observatory, 30, C1

Pacini, F., 1968, Nature, 219, 145

Perlmutter, S., et al., 1999, ApJ, 517, 565

Phillips, M. M., 1993, ApJL, 413, L105

Phinney, E. S., 1991, ApJL, 380, L17

Porter, A. C., Filippenko, A. V., 1987, AJ, 93, 1372

Riess, A. G., et al., 1998, AJ, 116, 1009

- Rodriguez, C. L., Chatterjee, S., Rasio, F. A., 2016, *Physical Review D*, 93, id. 084029
- Salpeter, E. E., 1964, *ApJ*, 140, 796
- Schwarzschild, K., 1916, *Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin)*, 189
- Shakura, N. I., Sunyaev, R. A., 1973, *A&A*, 24, 337
- Stoner, E., 1930, *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science*, 7, 944
- Struve, O., 1952, *The Observatory*, 72, 199
- Tananbaum, H., et al., 1971, *Bulletin of the American Astronomical Society*, 3, 236
- Thorsett, S. E., Arzoumanian, Z., Taylor, J. H., 1993, *ApJL*, 412, L33
- Tutukov, A. V., Yungelson, L. R., 1993, *MNRAS*, 260, 675
- van den Heuvel, E. P. J., De Loore, C., 1973, *A&A*, 25, 387
- van den Heuvel, E. P. J., Heise, J., 1972, *Nature Physical Science*, 239, 67
- van Paradijs, J., et al., 1997, *Nature*, 386, 686
- Webbink, R. F., 1984, *ApJ*, 277, 355
- Whelan, J., Iben, I. J., 1973, *ApJ*, 186, 1007
- Wolszczan, A., Frail, D. A., 1992, *Nature*, 355, 145
- Woosley, S. E., 1993, *ApJ*, 405, 273