

На правах рукописи

УДК 524.3

Юнгельсон Лев Рафаилович

**ЭВОЛЮЦИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВУЮЩИХ
ДВОЙНЫХ ЗВЕЗД
МАЛЫХ И УМЕРЕННЫХ МАСС**

Специальность 01.03.02 - астрофизика и звездная астрономия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора физико-математических наук

Москва — 2011

Работа выполнена в Институте астрономии РАН.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор, академик РАН
Черепашук Анатолий Михайлович
(ГАИШ МГУ, МОСКВА)

доктор физико-математических наук,
профессор
Гнедин Юрий Николаевич
(ГАО РАН, С.-Петербург)

доктор физико-математических наук
Утробин Виктор Павлович
(ИТЭФ, Москва)

Ведущая организация: Казанский (Приволжский) Федеральный Уни-
верситет

Защита состоится 19 мая 2011 г. в 11 час. на заседании Диссертационного со-
вета Д 002.113.02 в конференц-зале Института космических исследований РАН
по адресу:

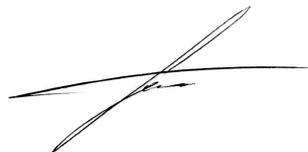
117997, Москва, ул. Профсоюзная, д. 84/32, ИКИ РАН, подъезд 2.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИКИ РАН.

Автореферат разослан 18 апреля 2011 г.

Ученый секретарь

Диссертационного совета Д 002.113.02
кандидат физико-математических наук



А.Ю. Ткаченко

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Значительная (возможно, подавляющая) часть всех звезд является компонентами двойных систем (см., напр., [1, 2, 3, 4]). Взаимодействием компонентов двойных систем обусловлены формирование и эволюция катаклизмических переменных звезд, источников рентгеновского излучения, потенциальных предшественников сверхновых типа Ia (СН Ia) и части источников гамма-вспышек, двойных (и части одиночных) радиопульсаров, симбиотических звезд, звезд Вольфа-Райе с релятивистскими спутниками и ряда других объектов. В свою очередь, например, исследование предшественников СН Ia и возможности использования СН Ia как стандартных источников излучения связано с решением задач космологии, в частности, проблемы ускорения расширения Вселенной. В ОТО предсказывается, что двойные звезды являются источниками излучения гравитационных волн. Их детектирование представляется одной из важнейших задач астрофизики ближайшего десятилетия.

Порядка 90% двойных звезд относятся к системам малых и умеренных масс, в которых эволюция хотя бы одного из компонентов оканчивается формированием белого карлика (БК).

Для эволюции двойных звезд наиболее существенным фактором является подразделение их на “тесные” и “широкие” системы (примерно 40% и 60%). В широких системах компоненты эволюционируют независимо, подобно одиночным звездам, за исключением нескольких процентов их полного числа, для которых определенную роль может играть аккреция одним из компонентов вещества, потерянного спутником (симбиотические звезды). В тесных двойных системах (ТДС) возможна потеря вещества компонентами при заполнении полости Роша. Перетекание вещества между компонентами может быть как устойчивым, так и неустойчивым, сопровождаться потерей массы и углового момента из системы. Если после первой стадии обмена веществом остаток компонента-донора или аккрецировавший компонент сохраняют ядерные источники энергии и радиусы звезд способны увеличиваться, возможен повторный обмен веществом в системе (например, на

стадиях горения водорода и (или) гелия в слоевых источниках обоих компонентов). В некоторых случаях происходит до 4 стадий обмена массой.

Когда аккрецирующий компонент неспособен присоединить все выпадающее на него вещество, образуются т. н. “общие оболочки”, охватывающие оба компонента системы. Процессы, происходящие в общих оболочках, до конца не ясны, но из общих соображений следует, что эволюция должна приводить к рассеянию оболочки и формированию двойной системы из ядер компонентов или к их слиянию. Если после рассеяния общей оболочки образуется пара БК с расстоянием между компонентами $\simeq 1 R_{\odot}$, звезды могут прийти в контакт в результате потери системой момента при излучении гравитационных волн. После контакта, в зависимости от отношения масс компонентов и их химического состава, возможно слияние компонентов, приводящее к взрыву без остатка (таков один из гипотетических механизмов СН Ia) или к аккреционно-индуцированному коллапсу с образованием нейтронной звезды, образованию одиночного карлика, или формирование полуразделенной системы. Последний вариант заведомо осуществляется: полуразделенные двойные БК наблюдаются как звезды типа AM CVn.

К наблюдаемым эффектам приводит аккреция компактным компонентом системы звездного ветра спутника, например, в рентгеновских системах, симбиотических звездах, у звезд Вольфа-Райе с релятивистскими спутниками. Звезды, в которых один из компонентов заполняет полость Роша, разделенные системы, эволюционирующие в результате потери углового момента, широкие системы, в эволюции или наблюдательных проявлениях которых существенную роль играет аккреция, могут быть объединены понятием “взаимодействующих двойных звезд”.

Учитывая возможность повторного заполнения полости Роша, в зависимости от масс компонентов и расстояния между ними на начальной главной последовательности, ТДС может пройти более 10 стадий с различными комбинациями компонентов, прежде чем система прекратит существование как двойная звезда (например, превратится в одиночную звезду или распадется) или придет в состояние, в котором за хаббловское время в ней не будут происходить дальнейшие эволюционные изменения. Последовательность трансформаций двойной системы, которую она может пройти, полу-

чила название эволюционного сценария [5]. Предполагается, что на каждом из этапов эволюции двойная звезда может быть отождествлена с определенным классом наблюдаемых объектов.

Анализ эволюционных сценариев стал фундаментом метода популяционного синтеза, примененного в данной работе для исследования двойных звезд. Сущность метода, кратко, состоит в следующем. Рассматривается конечный ансамбль двойных систем, распределенных определенным образом на начальной главной последовательности по массам первичных компонентов, отношениям масс компонентов и расстояниям между ними. Эти данные получаются путем статистических исследований звезд. Задаются история звездообразования и ее нормализация (например, на современную частоту относительно хорошо исследованных событий). Для каждой пары звезд прослеживается сценарий на протяжении хаббловского времени и определяются параметры системы и время жизни на каждой эволюционной стадии. Затем, исходя из начальных распределений систем по параметрам и истории звездообразования, определяется “вес” системы в полном ансамбле звезд. Таким путем можно построить модель совокупности двойных звезд Галактики или другой звездной системы, проследить ее эволюцию. С учетом эффектов селекции, характерных для различных звезд, далее можно построить модель “наблюдаемой” совокупности объектов. В итоге удастся получить представление о численности и характеристиках звезд, подавляющая часть которых (например, двойных белых карликов или субкарликов) недоступна наблюдениям современными методами, проследить взаимосвязи между отдельными группами звезд. Анализ эволюции звезд методом популяционного синтеза может указать на существование объектов, которые пока не наблюдаются, их характеристики и служить руководством к их поиску. Сценарный подход используется для исследования происхождения и эволюции уникальных двойных систем. Анализ сценариев может также продемонстрировать пробелы в теории эволюции звезд.

Суммируя, важное место, которое занимают взаимодействующие двойные звезды среди астрофизических объектов, и возможность их исследования методом популяционного синтеза определяют актуальность диссертационной работы.

Цель работы

1. Анализ основных сценариев эволюции взаимодействующих звезд малых и умеренных масс, построение модели совокупности двойных звезд в диске Галактики и исследование зависимости модели от скорости звездообразования и параметра эффективности рассеяния общей оболочки.

2. Исследование галактической популяции разделенных двойных БК. Определение частоты слияния пар БК с полной массой, превосходящей чандрасекаровскую, кандидатов в предшественники СН Ia. Наблюдательный поиск потенциальных предшественников СН Ia (осуществление проекта “The ESO Supernovae type Ia Progenitors survey”=SPY).

3. Построение детальной модели галактической популяции полуразделенных двойных БК (звезд AM CVn). Проведение первых систематических расчетов эволюции ТДС с маломассивными $[(0.35-0.65) M_{\odot}]$ гелиевыми донорами и БК-аккреторами и разработка с учетом результатов расчетов системы диагностики сценариев формирования звезд AM CVn и ультракомпактных источников рентгеновского излучения по химическому составу вещества аккреционных дисков. Определение численности систем AM CVn, которые могут наблюдаться одновременно в оптическом и рентгеновском диапазонах спектра и в гравитационных волнах.

4. Расчет гравитационно-волнового фона, создаваемого двойными звездами Галактики в полосе чувствительности детектора *LISA*. Уточнение предела частот, выше которого будут различимы сигналы от отдельных звезд, численности разрешаемых систем.

5. Построение модели галактической популяции горячих гелиевых субкарликов (sdB/O) и определение параметров составляющих ее одиночных звезд и двойных систем.

6. Самосогласованный анализ эволюции частоты СН Ia с различными потенциальными предшественниками и численности аккрецирующих белых карликов с ядерным горением на поверхности для модели звездообразования с постоянной скоростью на протяжении 10^{10} лет и модели, в которой такая же масса звезд формируется за 10^9 лет.

7. Исследование формирования и характеристик популяции двойных систем из гелиевых звезд с компактными спутниками — черными дырами

и нейтронными звездами. Оценка возможной численности и параметров галактических систем, подобных уникальной рентгеновской системе Cyg X-3.

8. Исследование сценариев формирования и эволюции симбиотических звезд с учетом новейших данных о звездном ветре гигантов и условиях ядерного горения на поверхности аккрецирующих белых карликов. Определение численности и характеристик галактических симбиотических звезд и частоты симбиотических Новых.

9. Интерпретация наблюдений уникальной планетарной туманности TS 01, объяснение ионизационной структуры которой требует наличия невидимого в оптике горячего спутника у “обычного” ядра туманности.

Научная новизна диссертации

Проведено наиболее полное к настоящему времени исследование эволюционных сценариев для тесных и широких двойных систем и проанализирована зависимость современной частоты образования и численности двойных звезд с различными сочетаниями компонентов в диске Галактики от скорости звездообразования и параметра рассеяния общих оболочек.

Впервые рассчитана модель галактической популяции тесных двойных БК, в которой адекватно описывается изменение расстояния между компонентами при неустойчивом обмене веществом между гигантами и звездами главной последовательности сравнимой массы. Впервые построены модели совокупности наблюдаемых тесных двойных БК с учетом эффектов селекции, связанных с зависимостью скорости охлаждения карликов от массы и химического состава и с орбитальными периодами звезд. Обоснован и осуществлен обзор ~ 1000 БК, в результате которого обнаружены около 100 ранее неизвестных тесных двойных БК, в том числе две системы с полными массами, близкими к M_{Ch} .

Впервые численно исследовано формирование популяции звезд типа AM CVn с донорами — БК и гелиевыми звездами. Проанализированы характеристики популяции в зависимости от эффективности приливного взаимодействия и возможности разрушения систем в результате детонации слоя He на поверхности аккретора. Проведены первые систематические расчеты эволюции ТДС с донорами — маломассивными гелиевыми звездами и ак-

креторами — БК. Предложена система диагностики каналов формирования звезд AM CVn и ультракомпактных источников рентгеновского излучения по отношениям содержаний H, He, N, C, O в аккреционных дисках.

Впервые рассчитан гравитационно-волновой фон, создаваемый в полосе приема космического детектора *LISA* совместно разделенными и полуразделенными БК. Уточнен предел частот, выше которого возможна регистрация отдельных разделенных двойных БК и оценена численность последних ($\simeq 12000$). Впервые показано, что $\simeq 10000$ систем типа AM CVn с $V \leq 20^m 0$ и $P_{\text{orb}} \leq 1500$ с могут одновременно наблюдаться в электромагнитном спектре и в гравитационных волнах.

Построена модель галактической популяции горячих гелиевых субкарликов (sdB/O), полной и ограниченной не учитывавшимися ранее эффектами наблюдательной селекции. Воспроизведены степень двойственности и пространственная плотность объектов в согласии с наблюдениями. Найдены распределения по параметрам компонентов и соотношения между ними.

Для двух моделей звездообразования — непрерывного и вспышки — проведен самосогласованный расчет эволюции частоты формирования потенциальных предшественников SN Ia — полуразделенных систем (SD) и сливающихся карликов (DD). В расчетах использованы найденные в диссертации параметры популяционного синтеза, наилучшим образом объясняющие наблюдения БК. Подтвержден ранний результат автора — доминирование сценария DD. Отслежена эволюция численности БК с ядерным горением на поверхности и показано, что с учетом эффектов селекции численность источников сверхмягкого рентгеновского излучения, наблюдаемых в ближайших галактиках, согласуется с наблюдениями.

Построена модель галактической популяции гелиевых звезд со спутниками — нейтронными звездами и черными дырами. Впервые одновременно рассмотрены звезды-доноры умеренных и больших масс. Исследованы соотношения между параметрами компонентов в подобных системах и их орбитальными периодами. Оценена численность систем с аккреционными дисками и показано, что в Галактике в настоящее время действительно может существовать лишь ~ 1 звезды, близкой по параметрам к Cyg X-3. Результаты расчетов использованы для успешного определения орбитального

периода системы NGC300 X-1, внегалактического аналога Cyg X-3.

Проведен анализ характеристик симбиотических звезд с учетом новейших данных о звездном ветре гигантов и условиях ядерного горения на поверхности аккрецирующих БК. Оценены возможная численность симбиотических звезд и частота симбиотических Новых в Галактике. Проведен анализ распределений симбиотических звезд по наблюдаемым параметрам.

Исследована планетарная туманность TS 01 — уникальный объект в гало Галактики с очень низкой металличностью. Показано, что для объяснения ионизационной структуры туманности требуется привлечение двух источников излучения: “обычного” ядра планетарной туманности с $M_c = (0.54 \pm 0.02) M_\odot$, $T_c = (58000 \pm 3000) \text{K}$ и “горячего” спутника с $M_h \approx 0.85 M_\odot$, $T_h = (160000 - 180000) \text{K}$, $L \sim 10^4 L_\odot$, наблюдаемого лишь в сверхмягком рентгеновском диапазоне спектра. Предложен сценарий формирования и эволюции системы.

Научная и практическая ценность работы

Программы популяционного синтеза, разработанные при участии автора, применяются для исследования подсистем различных двойных звезд и анализа формирования и эволюции наблюдаемых систем.

Распределения звезд по параметрам, найденные в моделях популяций двойных БК, горячих субкарликов, симбиотических звезд, звезд Вольфа-Райе с релятивистскими спутниками используются для уточнения моделей эволюции двойных звезд.

Модель популяции звезд AM CVn служит ориентиром для наблюдательного поиска данных объектов и их отождествления в каталогах (SDSS).

Спектральный материал, накопленный при выполнении проекта SPY, используется для дальнейших поисков тесных двойных БК и субкарликов, исследований их масс, химического состава атмосфер и кинематики.

Модель гравитационно-волнового фона, создаваемого галактическими белыми карликами, используется при подготовке к тестированию космического интерферометра *LISA* и обработке результатов его наблюдений.

Результаты расчетов эволюции гелиевых звезд применяются для анализа каналов происхождения ультракомпактных звезд и расчетов взрывных

явлений, связанных с детонацией He на поверхности аккрецирующих БК.

Модели эволюции частоты СН Ia и аккрецирующих БК с ядерным горением могут быть использованы для анализа потенциальных предшественников СН Ia и источников сверхмягкого рентгеновского излучения.

Модель популяции гелиевых звезд со спутниками, черными дырами и нейтронными звездами — была успешно использована как ориентир для определения орбитального периода уникальной внегалактической системы из звезды WR и черной дыры NGC300 X-1, второй из известных внегалактических систем данного типа.

Результаты работы могут быть использованы широким кругом научных коллективов при исследованиях двойных звезд Млечного Пути и других галактик, в особенности, для решения проблем, связанных с эволюцией звезд с компактными компонентами.

Апробация работы

Результаты работы представлялись на конференциях “Астрофизика высоких энергий сегодня и завтра” (Москва, 2006, 2008), 1-й и 2-й международных конференциях по звездам AM CVn (Наймехен, Нидерланды, 2006 и Кейптаун, ЮАР, 2008), 13-й, 14-й и 15-й Европейских конференциях по белым карликам (Каподимонде, Италия, 2002, Киль, Германия, 2004, Лестер, Великобритания, 2006), Международной школе SNOVAE (Калифорнийский университет в Санта-Барбаре, США, 2007), конференциях “ASTROPHYSICS OF COMPACT OBJECTS: International Conference on Astrophysics of Compact Objects” (Хуангшан, Китай, 2007), “A POPULATION EXPLOSION: The Nature & Evolution of X-ray Binaries in Diverse Environments” (Санкт-Петербург Бич, США, 2007), “Asymmetrical Planetary Nebulae IV” (Ла-Пальма, Испания, 2007), “A Life with Stars” (Амстердам, Нидерланды, 2005), “INTERACTING BINARIES: Accretion, Evolution, and Outcomes” (Чефалу, Италия, 2004), “Compact Binaries in the Galaxy and Beyond”, IAU Coll. 194 (Ла Пац, Мексика, 2004), XXV Генеральной ассамблее МАС (Сидней, Австралия, 2003), конференциях “Spectroscopically and Spatially Resolving the Components of the Close Binary Stars” (Дубровник, Хорватия, 2003), “From Twilight to Highlight: The Physics

of Supernovae” (Гархинг, Германия, 2002), “The influence of binaries on stellar population studies” (Брюссель, Бельгия, 2000), “Modern Problems in Stellar Evolution, International Conference in honour of Professor A.G. Masevitch’s 80th birthday” (Звенигород, Россия, 1998).

Результаты работы докладывались и обсуждались на семинарах ИНАСАН, ИТЭФ, астрофизическом семинаре теоретического отдела ФИАН, семинарах Института астрономии Амстердамского университета (Нидерланды), Института математики, астрофизики и ядерной физики университета св. Радбоуда (Наймехен, Нидерланды), Физического департамента Брюссельского свободного университета (Бельгия), Европейской Южной Обсерватории (Гархинг, Германия), Бамбергской обсерватории (Германия), Научного института космического телескопа (Балтимор, США), департамента астрономии университета Аризоны (Тюсон, США), департамента физики и астрономии университета Оклахомы (Оклахома-сити, США), Института теоретической астрофизики университета Осло (Норвегия).

По теме диссертации опубликованы 24 работы в рецензируемых журналах.

Содержание работы

Диссертация состоит из 11 глав и Заключения.

Глава 1 имеет вводный характер. В ней определяются понятия тесных и взаимодействующих двойных звезд, сформулирована цель диссертации, обоснована актуальность работы, сформулированы предложения, выносимые на защиту. Кратко описаны основные этапы исследований тесных двойных систем (ТДС) и расчетов их эволюции, начиная от открытия “парадокса алголей” до написания первых программ популяционного синтеза. Подчеркнута важнейшая роль, которую сыграли в развитии исследований двойных звезд открытие внегалактических источников рентгеновского излучения, двойного радиопульсара, тесного двойного белого карлика.

В Главе 2 описан метод популяционного синтеза (ПС), которым проведена большая часть исследований в работе.

Изложены основные данные об эволюции звезд, заложенные в программу ПС, реализованную в Институте астрономии РАН. Отмечено, что

основной неопределенностью ПС является эффективность рассеяния общих оболочек α_{ce} . В грубом приближении, расстояние между компонентами в общих оболочках изменяется как $a_f \propto \alpha_{ce} a_0$. Поэтому, например, для двойных систем, эволюционирующих в результате потери момента при излучении гравитационных волн, с временем слияния $t \propto a^4$, значение α_{ce} может иметь решающее значение для исхода эволюции, главным образом, для возможности слияния пар белых карликов.

В Главе 3 представлен обзор основных сценариев эволюции взаимодействующих звезд малых и умеренных масс, а также широких систем. Цель главы — дать представление о многообразии конфигураций компонентов двойных звезд и о взаимосвязях между различными группами звезд.

Полная картина возможных эволюционных сценариев звезд достигается при использовании в ПС нескольких миллионов исходных систем (в нашем случае — примерно 6×10^6). В одном расчете по программе ПС генерируются 500-600 различных сценариев. Численность звезд, проходящих через них, варьируется от нескольких десятков до нескольких сот тысяч. В сценариях представлены около 250 различных комбинаций компонентов и “событий” (таких как взрывы СН различных типов). Большинство сценариев различается лишь деталями и оканчивается формированием сходных конфигураций, главным образом, пар БК различного химического состава. В Главе 3 эти сценарии сгруппированы в $\simeq 30$ основных ветвей эволюции, которые детально обсуждаются.

Далее в Гл. 3 построены пять моделей популяций двойных звезд: две модели для ТДС в предположении о постоянной на протяжении 10^{10} лет скорости звездообразования (СЗО) с значениями параметра $\alpha_{ce}=1$ и 0.5 ; модель с $\alpha_{ce} = 1$, в которой такая же масса звезд, как в предыдущих моделях, формируется в результате вспышки звездообразования, длящейся 10^9 лет; две модели популяции широких систем — с непрерывным звездообразованием и с вспышкой СЗО. Выделены $\simeq 40$ типов систем, наиболее многочисленных или важных с эволюционной точки зрения. Проанализированы их место в сценариях, частота формирования и численность в настоящее время в зависимости от СЗО и α_{ce} . Показано, что изменение α_{ce} влияет на численность большинства систем в пределах фактора 2-3, но в некоторых случаях раз-

личия достигают 5-6 раз. В популяции со вспышкой звездообразования, в частности, низка частота СН Ia.

Глава 4 посвящена разделенным двойным БК. Значение корректной модели популяции этих объектов определяется тем, что они являются главным источником галактического гравитационно-волнового фона, а слияние двойных БК с $M_t = (M_1 + M_2) \gtrsim M_{Ch}$ рассматривается как один из основных гипотетических сценариев СН Ia. В первой части главы проанализированы полученные к 2000 г. наблюдательные данные о тесных двойных гелиевых карликах и реконструирована их эволюция, что возможно благодаря существованию для звезд с вырожденными гелиевыми ядрами соотношения “радиус – масса ядра”, не зависящего от полной массы звезды. Показано, что первый этап обмена веществом в системах со сравнимыми массами компонентов не может быть адекватно описан как консервативный обмен массой при заполнении полости Роша или как общая оболочка, описываемая общепринятым для последних уравнением Веббинка [6]. Корректно воспроизвести изменение расстояния между компонентами позволяет учет баланса углового момента: $\frac{\Delta J}{\Delta M_t} = \gamma \frac{J}{M_t}$, где J – исходный угловой момент системы, $\gamma \approx 1.5$. Это утверждение справедливо и для других маломассивных ТДС, в которых первый обмен веществом неустойчив [7].

Во второй части Гл. 4 построена модель населения БК в Галактике (с использованием уравнения для баланса момента). При сравнении с наблюдениями впервые учтены эффекты селекции, связанные с различными скоростями охлаждения БК в зависимости от массы и химического состава и орбитальными периодами двойных БК. Построена модель “наблюдаемой” выборки двойных БК, ограниченной $V = 15^m 0$ и селекцией по орбитальным периодам. Найдено, что согласование моделей с наблюдениями требует более быстрого охлаждения БК с массой $\lesssim 0.3 M_\odot$, чем предсказывалось существовавшими к моменту расчетов моделями [8]. Детально проанализированы соотношения между периодами систем, массами их компонентов, отношениями масс последних.

В третьей части Гл. 4 описан обзор “The ESO Supernovae type Ia Progenitors survey”=SPY. К началу 2002г. с целью поиска возможных предшественников СН Ia были исследованы около 200 БК, обнаружены 18 двой-

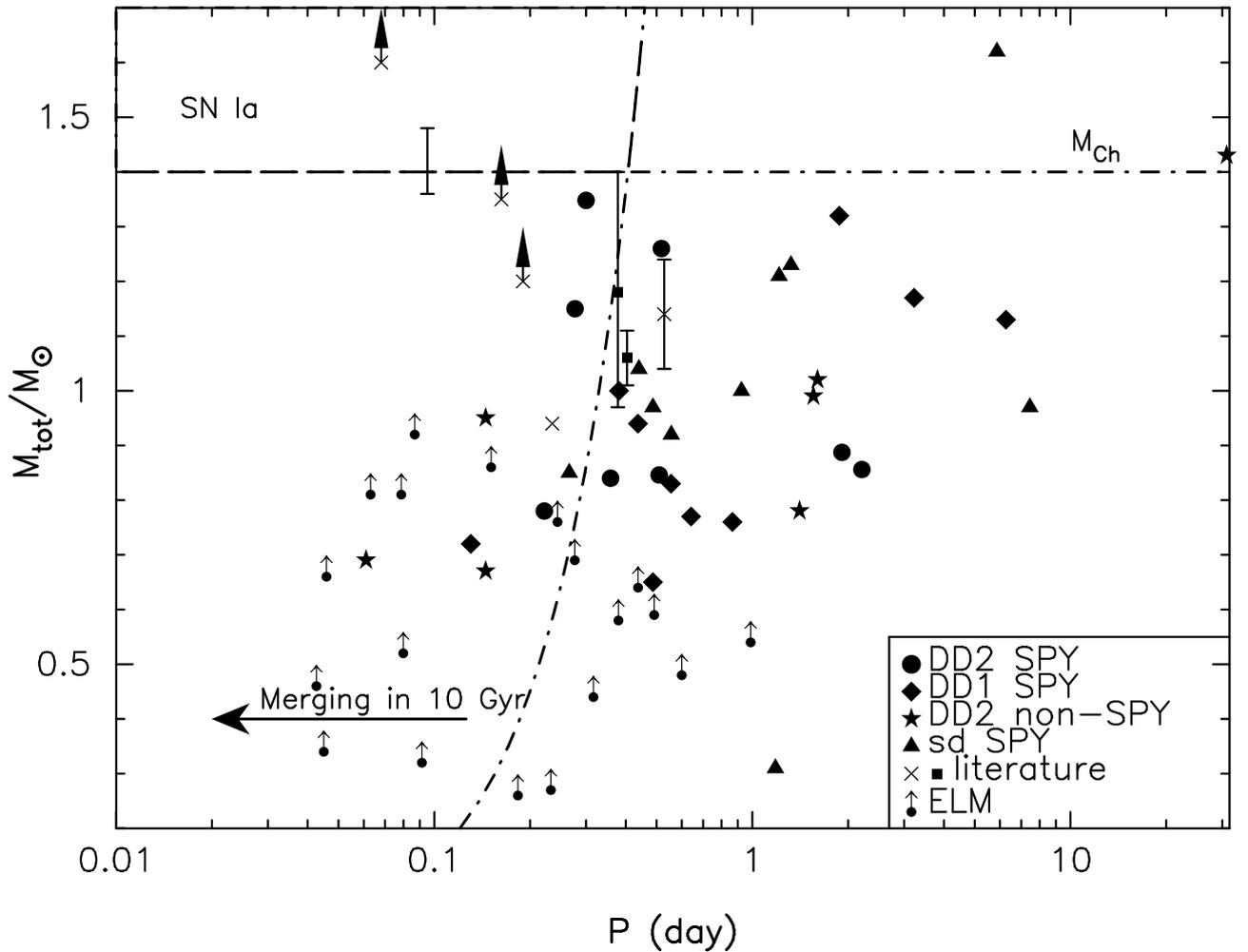


Рис. 1: Полные массы известных двойных БК и горячих субкарликов со спутниками–БК. DD2 — системы с двумя видимыми спектрами. Для систем с одним видимым спектром (DD1) показаны нижние пределы M_{tot} . Кружки со стрелками — нижние пределы M_{tot} для БК экстремально малых масс, отождествленных в SDSS (ELM). Отмечены M_{Ch} и предел периодов, при котором слияние происходит за время, меньшее 10^{10} лет. Возможные предшественники СН Ia (SN Ia) расположены в верхнем левом углу рисунка. Выделены системы, найденные в проекте SPY.

ных систем с $P_{orb} \leq 6.3$ сут., но ни один из них не удовлетворял условиям для предсверхновой. Моделирование, проведенное в предшествующей части Гл. 4, показало, что, с учетом эффектов селекции, для обнаружения одной потенциальной предсверхновой необходимо исследовать ~ 1000 БК со зв. величиной $B \lesssim 16^m.0$. Проект SPY по поиску потенциальных предшественников СН Ia был реализован на спектрографе UVES 8.2-м телескопа UT2 ESO в сервисной моде. Точность измерения лучевых скоростей составила примерно 2 км/с. Были исследованы 1024 БК, обработка наблюдений

продолжается. Пока обнаружены около 100 новых двойных БК, из них 16 с двумя видимыми спектрами (ранее были известны 6). Найдены 3 системы с M_t в пределах 10% от M_{Ch} , что указывает на принципиальную возможность существования пар бóльших масс. Соотношения между орбитальными периодами и полными массами известных пар БК, а также субкарликов со спутниками-БК, которые также могут быть предшественниками СН Ia или звезд AM CVn, показаны на рис. 1.

В **Главе 5** рассматриваются звезды AM CVn — полуразделенные двойные БК. Ожидается, что, благодаря очень коротким орбитальным периодам ($\gtrsim 3$ мин.), они, наряду с короткопериодическими разделенными двойными БК и ультракомпактными источниками рентгеновского излучения, будут среди первых источников гравитационных волн, которые сможет зарегистрировать космический интерферометр *LISA* (см., напр., [9]). Поскольку удовлетворительно известны расстояния до ближайших звезд AM CVn, они, в случае обнаружения в ГВ, могут быть использованы для тестирования и калибровки детектора [10]. Звезды AM CVn также рассматриваются как потенциальные (но редкие) предшественники СН Ia и как объекты, в которых могут происходить взрывы аккрецированного He.

В первой части Главы 5 построена модель галактической популяции звезд AM CVn. К настоящему времени предложены три сценария формирования звезд AM CVn. Они проиллюстрированы на рис. 2.

В первом из них (“семейство белых карликов”, левая ветвь на рис. 2) донорами являются гелиевые БК, которые устойчиво теряют вещество после сближения компонентов и заполнения полости Роша благодаря излучению гравитационных волн [11]. Во втором сценарии (“семейство гелиевых звезд”, правая ветвь на рис. 2) место гелиевого карлика занимает маломассивная гелиевая звезда ($M_{He} \approx (0.32 - 0.6) M_{\odot}$), если она успевает заполнить полость Роша до начала общего сжатия перед истощением He в ядре [12]. В третьем сценарии [13] (на рис. 2 не показан) предполагается, что донор — остаток маломассивной ($\simeq 1 M_{\odot}$) звезды главной последовательности, которая заполнила полость Роша после выгорания значительной части водорода в ядре ($X_c \lesssim 0.4$). В этом случае минимальный период катаклизмической двойной системы может быть ~ 10 мин. вместо обычных $\simeq 80$ мин. Послед-

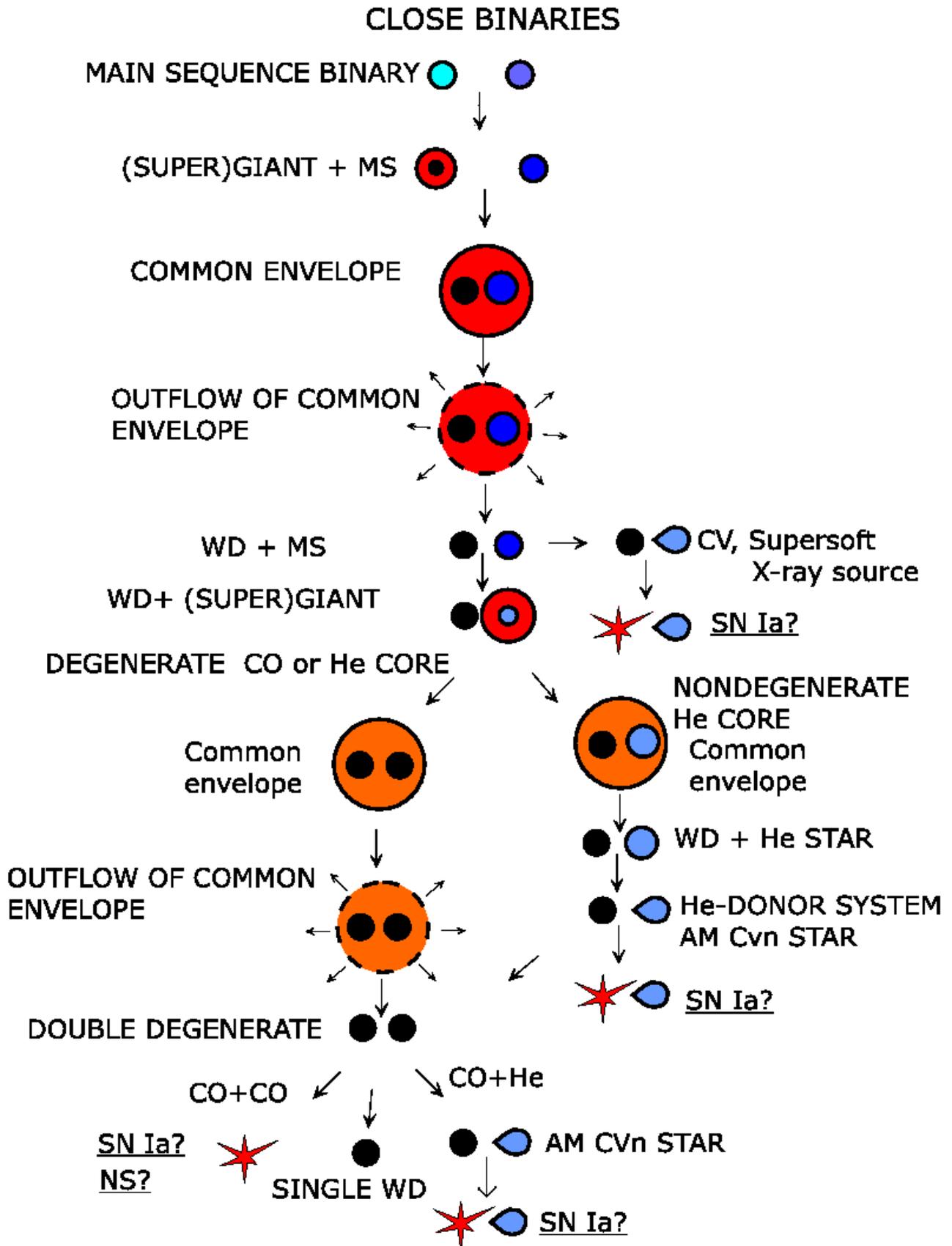


Рис. 2: Диаграмма каналов формирования предшественников SN Ia и звезд AM CVn

ний сценарий, вероятно, менее значим, чем первые два: известна лишь одна звезда типа AM CVn со следами Н в спектре, хотя порог обнаружения водорода всего $N(\text{H})/N(\text{He}) \sim 10^{-5}$ [14]. В работе рассмотрены два первых сценария.

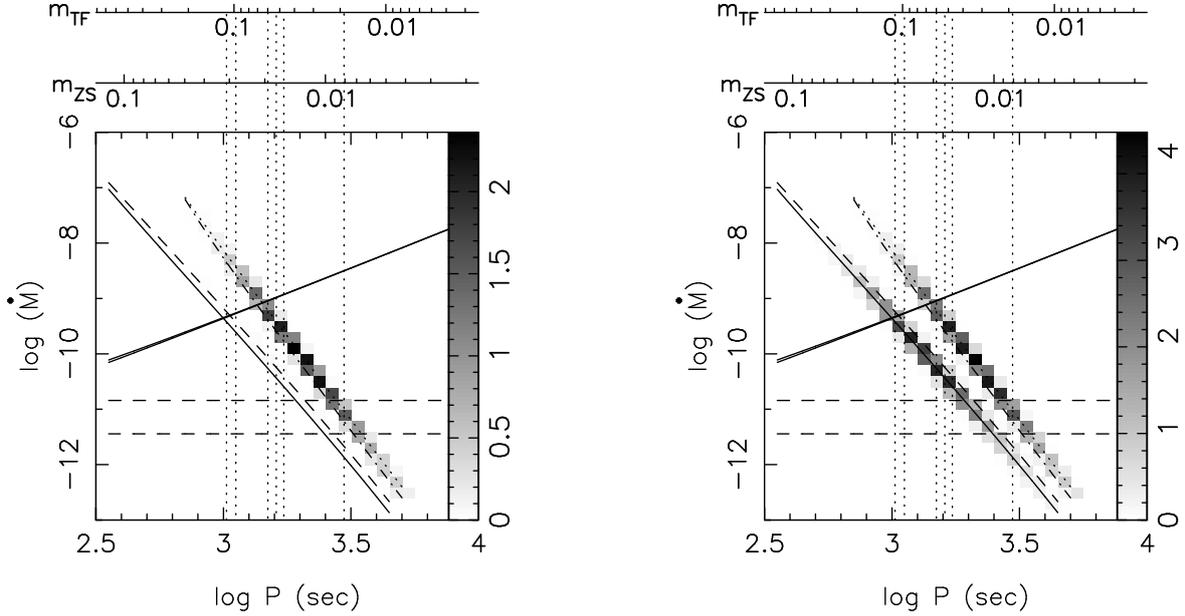


Рис. 3: Выборка звезд AM CVn, ограниченная 15^m0 . Левый рисунок — “неэффективная модель”, правый рисунок — “эффективная модель”. На обоих рис. левая ветвь — системы с донорами-БК, правая — с донорами-гелиевыми звездами. Вертикальными линиями показано положение некоторых из наблюдаемых звезд AM CVn. Полный интервал периодов известных звезд $2.8 \lesssim \lg P(s) \lesssim 3.6$. Между поперечными линиями находятся системы с неустойчивыми аккреционными дисками (с разными массами аккреторов). Две верхние шкалы показывают массы звезд-доноров, если они являются БК (ZS) или гелиевыми звездами (TF).

Нами показано, что для семейства БК возможность устойчивого обмена веществом определяется эффективностью приливного взаимодействия. В зависимости от характерного времени синхронизации вращения аккретора и орбитального обращения частота формирования и численность систем AM CVn могут варьироваться в пределах фактора ~ 100 . В семействе БК обмен веществом всегда начинается в режиме прямого соударения, который через $\approx 10^7$ лет сменяется дисковой аккрецией. Формированию звезд AM CVn с донорами — гелиевыми звездами — может воспрепятствовать детонация

углеродно-кислородного карлика-аккретора, инициированная детонацией в слое He на поверхности после накопления $\sim 0.1 M_{\odot}$ вещества [15]. Взрывное разрушение аккреторов может изменить численность систем, эволюционирующих по каналу гелиевых звезд, вдвое. Комбинируя самые неблагоприятные условия для формирования звезд AM CVn (“неэффективная модель”) и самые благоприятные условия (“эффективная модель”), получаем, что полная численность звезд типа AM CVn в Галактике может варьироваться от 1.6×10^7 до 9.4×10^7 . Наблюдательная оценка, также очень неопределенная, заключена между этими пределами [16].

Наблюдаемое излучение звезд AM CVn определяется преимущественно светимостью диска, т. е. скоростью аккреции \dot{M} . На рис. 3 показано соотношение $P_{\text{orb}} - \dot{M}$ в выборке, ограниченной $V_{\text{lim}} = 15^m 0$.

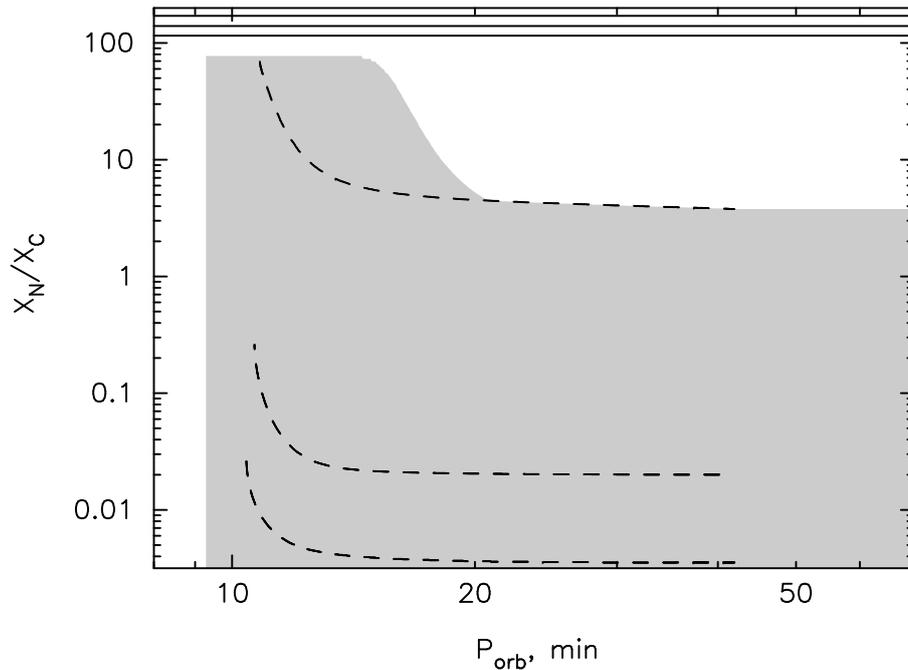


Рис. 4: Отношение содержаний N и C в аккреционных дисках звезд AM CVn при различных значениях P_{orb} . Прямые линии соответствуют донорам-карликам с массами предшественников 1, 1.5, $2 M_{\odot}$ (сверху вниз). Если донор — гелиевая звезда, X_N/X_C может иметь значения, соответствующие затененной области, вплоть до 0. Штриховые линии — примеры эволюции X_N/X_C .

Далее в Гл. 5 описаны результаты систематических расчетов эволюции полуразделенных гелиевых звезд малых масс с аккреторами-БК. Рас-

смотрены типичные для предшественников звезд AM CVn системы ($M_{\text{He}} + M_{\text{wd}} = (0.35+0.5) M_{\odot}, (0.4+0.6) M_{\odot}, (0.65+0.8) M_{\odot}$, в которых заполнение полости Роша происходит, когда He в ядрах доноров выгорел до различной степени. Основное внимание уделено химическому составу вещества, теряемого донором при различных значениях P_{orb} . Также проведены расчеты образования гелиевых карликов с различными массами предшественников. Поскольку в различных сценариях звезды-доноры отличаются по химическому составу, на основе проведенных расчетов предложена система диагностики каналов формирования звезд AM CVn и родственных им ультракомпактных источников рентгеновского излучения по отношениям содержаний H, He, N, C, O в перетекающем веществе. На рис. 4 в качестве примера показана зависимость отношения содержаний N/C (по массе) от P_{orb} , которая позволяет различать звезды с различными донорами. Для нескольких систем с известными содержаниями элементов в аккреционных дисках нами проведен анализ возможных предшественников.

В **Главе 6** на основе моделей популяций двойных БК, описанных выше, а также рассчитанных ранее моделей популяций пар БК и нейтронных звезд, двойных нейтронных звезд и черных дыр с эллиптическими орбитами, построена численная модель гравитационно-волнового фона, создаваемого ТДС Галактики в полосе приема космического интерферометра *LISA*. Доминирующий вклад в сигнал дают двойные БК. Уточнен предел частот, выше которого будут различимы сигналы от отдельных разделенных систем (confusion limit, CL). Показано, что детектор *LISA*, если будет запущен и будет иметь заданную чувствительность, сможет разрешить около 12000 разделенных БК выше CL и около 6000 карликов ниже CL, но с сигналом, значительно более сильным, чем усредненный фон. На рис. 5 показаны гравитационно-волновой фон, создаваемый двойными БК, и численность систем в единичных полосах пропускания *LISA*.

Нами найдено, что до ≈ 12000 систем AM CVn с $P_{\text{orb}} \sim 10$ мин. могут быть разрешены в ГВ на частотах выше CL, благодаря резкому уменьшению скорости эволюции в этом интервале периодов. Одновременно часть из них должна излучать в оптике и рентгене. Таким образом, возможны дополняющие друг друга наблюдения. Оценки показывают, что для КА CPT

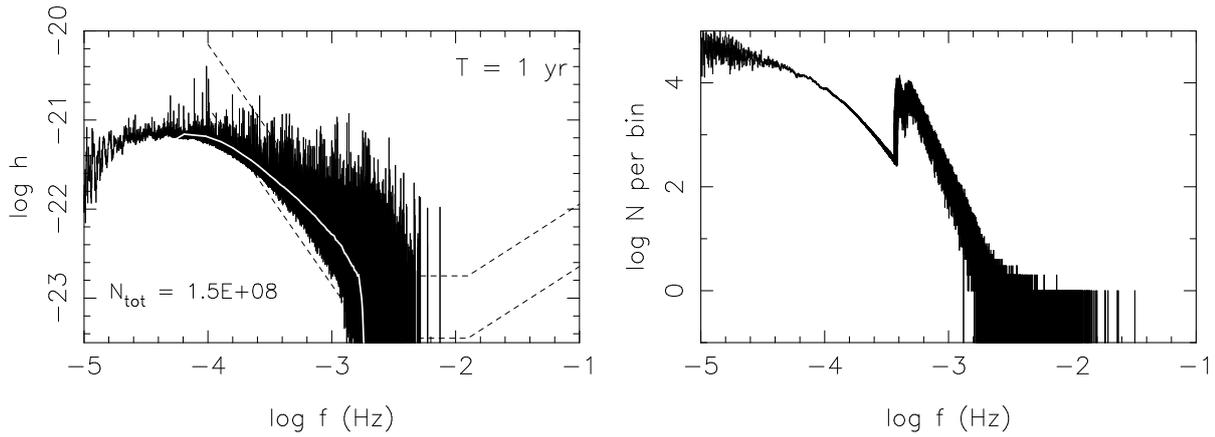


Рис. 5: Слева — гравитационно-волновой фон, создаваемый БК, справа — численность систем в единичных полосах пропускания детектора. Белая линия — усредненный фон, штриховые линии — пределы чувствительности детектора для периодов наблюдений 1 год и 5 лет.

и *LISA* общими могут быть $\simeq 100$ систем. Благодаря известным расстояниям и массам компонентов, ближайшие звезды AM CVn можно использовать для тестирования детектора *LISA*.

В **Главе 7** рассмотрены горячие гелиевые субкарлики sdB/sdO. Интерес к ним в контексте диссертации определяется тем, что часть из них имеет спутники БК, т. е. может быть предшественниками СН Ia или звезд AM CVn (такие системы известны). Основные каналы формирования гелиевых субкарликов — потеря вещества при заполнении полости Роша звездами $(2.5 - 5.0) M_{\odot}$ и слияние гелиевых БК. Высокая степень двойственности субкарликов sdB — (40-70)% в различных выборках — указывает на потерю вещества как основной канал их формирования, а низкая степень двойственности звезд sdO — на образование в результате слияний. Построена модель этой популяции, полной и ограниченной наблюдательной селекцией, воспроизведены степень двойственности и пространственная плотность звезд. Найдены распределения по параметрам компонентов и соотношения между ними. Модель удовлетворительно согласуется с наблюдениями, если учесть, что большинство не отождествленных спутников, скорее всего, является БК, т. к. нет признаков эффекта отражения.

В **Главе 8** анализируются предшественники СН Ia и их связь с источ-

никами сверхмягкого рентгеновского излучения. Существуют два основных сценария СН Ia — накопление M_{Ch} БК в полуразделенной системе (SD) и слияние компонентов двойных БК с полной массой, большей M_{Ch} (DD), см. рис. 2. В обеих моделях часть аккрецирующих БК с горением водорода на поверхности идентифицируется с источниками сверхмягкого рентгеновского излучения (SSS). В сценарии SD рентгеновским источником является непосредственно БК — потенциальная предсверхновая, в сценарии DD — это БК, сформировавшийся первым и аккрецирующий вещество из звездного ветра спутника-(сверх)гиганта, предшественника второго БК.

Нами рассчитаны эволюция частоты сверхновых в сценариях SD и DD и эволюция численности аккрецирующих белых карликов и численности SSS для двух моделей звездообразования — непрерывного на протяжении 10^{10} лет (А) и вспышки длительностью 10^9 лет (В). В обеих моделях формируется одинаковая масса звезд. Модель А может рассматриваться как подобие спиральной галактики, модель В — эллиптической. Используются те же параметры популяционного синтеза, которые позволили воспроизвести население двойных БК Галактики.

При $T = 10^{10}$ лет частота реализации сценария DD в модели А составляет 3.2×10^{-3} год $^{-1}$, в хорошем согласии с наблюдениями для галактик Sb/c, к которым относится Млечный Путь: $(4 \pm 2) \times 10^{-3}$ год $^{-1}$ [17]. Частота реализации сценария SD в модели А на 2 порядка величины ниже, чем сценария DD. Сценарий SD не реализуется в модели В при $T = 10^{10}$ лет.

Найдено, что в моделях А и В численности аккрецирующих белых карликов с ядерным горением сравнимы. В модели В полуразделенные системы с БК-предсверхновыми уже завершили эволюцию. В существующих разделенных системах массы БК малы ($\lesssim 1 M_{\odot}$), эффективность аккреции также низка (см. ниже рис. 7) и они не могут накопить M_{Ch} . Соответственно, SSS в эллиптических галактиках предшественниками СН Ia, скорее всего, не являются. Оценки численности SSS в моделях согласуются с их численностью в хорошо изученных ближайших галактиках, если учитываются эффекты селекции по поглощению. С наблюдениями удовлетворительно согласуется только модель распределений времен задержки СН Ia по отношению к звездообразованию (DTD) для сценария DD. Наблюдаемую

частоту СН Ia и DTD не может объяснить и сценарий двойной детонации БК субчандрасекаровской массы после накопления $\simeq 0.1$ при $\dot{M} \lesssim 3 \times 10^{-8} M_{\odot} \text{год}^{-1}$ [15]. Этот механизм в наших моделях реализуется лишь в системах с донорами-гелиевыми звездами и имеет время задержки $\Delta T \lesssim 10^9$ лет. В моделях с донорами-гелиевыми БК взрывы не происходят, т. к. при принятой эффективности аккумуляции He большая часть вещества, перетекающего на карлик, теряется в режиме неустойчивого горения. К моменту, когда $\dot{M} \lesssim 3 \times 10^{-8} M_{\odot} \text{год}^{-1}$, масса донора составляет всего несколько сотых M_{\odot} и накопление критического для взрыва слоя He невозможно.

В **Главе 9** рассмотрены звезды Вольфа-Райе (WR) с релятивистскими спутниками – аналоги уникальной галактической системы Cyg X-3. Для оценки времен жизни гелиевых звезд промежуточных масс проведены эволюционные расчеты. Построена модель галактической популяции гелиевых звезд со спутниками – нейтронными звездами (НЗ) и черными дырами (ЧД). Исследованы соотношения между параметрами компонентов в подобных системах и их орбитальными периодами. Оценена численность систем с аккреционными дисками и показано, что в Галактике в настоящее время возможно существование ~ 1 системы, подобной Cyg X-3, с массой гелиевой звезды $\gtrsim 7M_{\odot}$ (порога масс звезд WR) и $P_{\text{orb}} = 4.8 \pm 1.2$ час. и нескольких систем с периодами до ≈ 30 час. Соотношение между массами гелиевых звезд и орбитальными периодами систем с компонентами-ЧД показано на рис. 6.

С учетом предсказанных параметров систем типа Cyg X-3 с КА *SWIFT* были проведены наблюдения внегалактической рентгеновской системы NGC300 X-1, физически связанной с звездой WR41, и обнаружена орбитальная периодичность 32.8 час. В дальнейшем эта периодичность была независимо подтверждена по оптическим наблюдениям с VLT. NGC300 X-1 является второй известной внегалактической звездой, подобной Cyg X-3.

В **Главе 10** проанализированы каналы формирования галактической популяции симбиотических звезд (СЗ) и ее характеристики в зависимости от различных параметров моделей. Показано, что симбиотические звезды формируются преимущественно из широких систем, в которых компоненты не заполняли полости Роша. Найдено, в согласии с наблюдениями и оценками, полученными по другим программам популяционного синтеза, что числен-

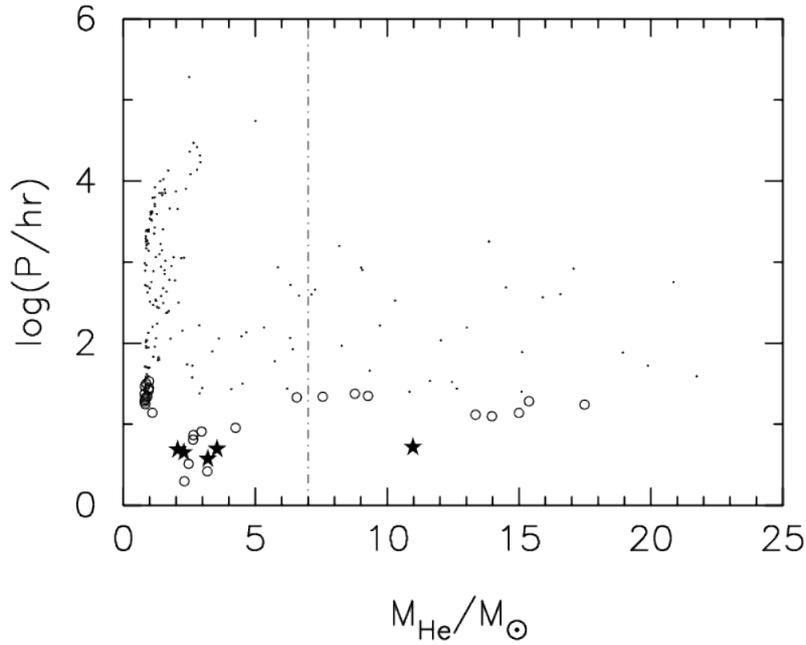


Рис. 6: Соотношение между массами гелиевых звезд M_{He} и орбитальными периодами систем из гелиевых звезд и черных дыр. Кружками отмечены системы с дисками. Звездочки – системы с $P_{\text{orb}} = 4.8 \pm 1.2$, т. е. близкие к Cyg X-3. Вертикальная линия — нижний предел масс звезд WR.

ность (СЗ) в Галактике – от 1200 до 15000, а частота симбиотических Новых звезд — (0.5-6) в год. Два основных параметра, от которых зависит частота образования и численность симбиотических звезд, — эффективность аккреции звездного ветра и критическая масса водородного слоя, необходимая для начала термоядерного горения. Найдены соотношения между параметрами симбиотических звезд в различных моделях. Показано, что из-за низкой эффективности аккреции накопление M_{Ch} углеродно-кислородными БК и взрывы СН Ia в симбиотических системах маловероятны (рис. 7), но могут происходить аккреционно-индуцированные коллапсы ONeMg БК.

В **Главе 11** рассмотрена уникальная планетарная туманность TS 01, расположенная в гало Галактики и отличающаяся рекордно низкой металличностью. Ионизационная структура туманности объясняется наличием у “обычного” ядра планетарной туманности горячего (160000 К-180000 К) массивного спутника, наблюдаемого только в сверхмягком рентгеновском диапазоне. Построен эволюционный сценарий для TS 01, от звезды начальной главной последовательности с массами компонентов $(2.50+0.89) M_{\odot}$ и $P_{\text{orb}} \approx 1330$ сут. до современного состояния, когда массы компонентов со-

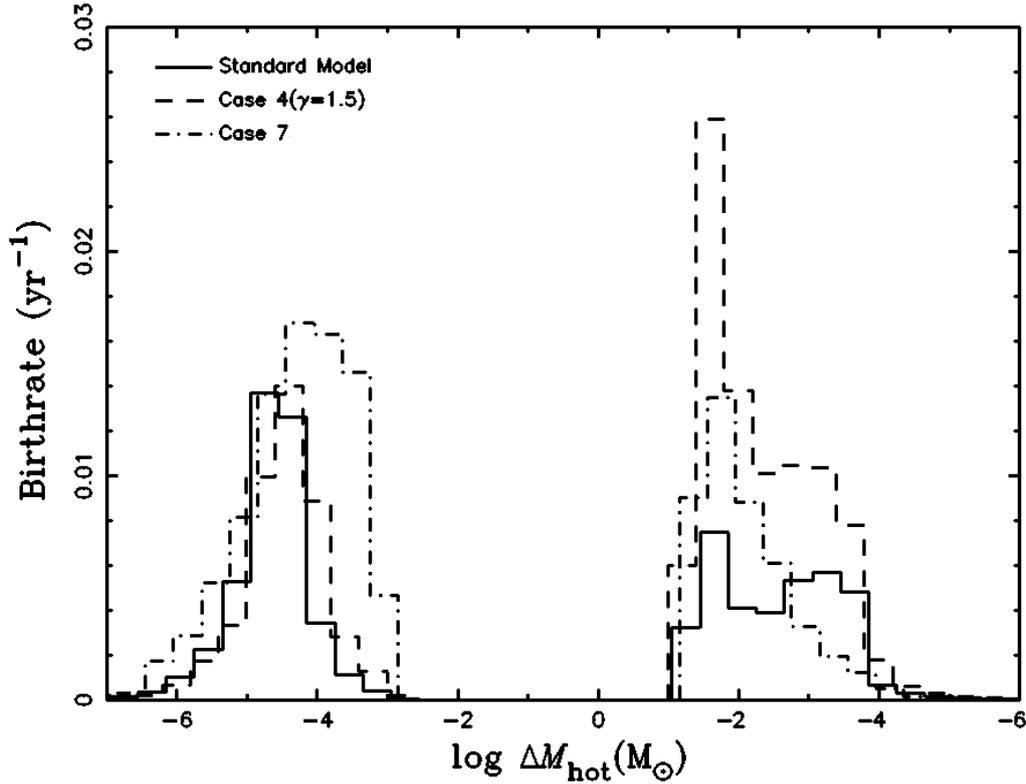


Рис. 7: Распределение симбиотических звезд по эффективности аккреции (справа от 0.0) или эрозии (слева от 0.0). Модели соответствуют различным значениям параметра общих оболочек α_{ce} и γ , скорости звездного ветра, эффективности аккумуляции вещества.

ставляют $0.86 M_{\odot}$ и $0.54 M_{\odot}$, а $P_{orb}=3.92$ час. Компоненты ядра TS 01 должны слиться из-за излучения ГВ за $\approx 6.6 \times 10^8$ лет. Если полная масса ядра TS 01 действительно не меньше M_{Ch} , оно является одним из наиболее вероятных предшественников СН Ia в сценарии двойных карликов. Исследование сценария формирования ядра TS 01 показывает, что эффективность рассеяния общих оболочек, возникающих при заполнении полости Роша звездами АВГ в системах со спутниками-БК, очень низка: $\alpha_{ce} \sim 10^{-3}$.

В **Заключении** суммируются основные результаты работы.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработаны и поддерживаются программы популяционного синтеза, используемые в Институте астрономии РАН и университетах Лейдена и Наймехена (Нидерланды).

2. Рассчитаны модели популяции двойных звезд малых и умеренных масс в звездной системе с массой, близкой к массе диска Галактики, при различных предположениях относительно скорости звездообразования и параметра общих оболочек α_{ce} , проанализированы зависимость моделей от параметров и взаимосвязь различных групп звезд.
3. Проанализированы полученные к 2000г. первые наблюдательные данные о тесных двойных гелиевых карликах и реконструирована их эволюция. Предложен алгоритм, позволяющий адекватно оценить изменение расстояния при обмене веществом между гигантами и звездами ГП. Рассчитана модель совокупности БК в Галактике. Построена “наблюдаемая” выборка двойных БК с учетом эффектов селекции, обусловленных различиями в скорости охлаждения БК в зависимости от массы и химического состава и орбитальными периодами звезд. Обоснован и осуществлен проект “The ESO Supernovae Type Ia Progenitors survey” (SPY), в результате которого открыты около 100 двойных БК, в том числе объекты с общей массой M_t в пределах 10% от M_{Ch} , что указывает на возможность существования БК с $M_t \gtrsim M_{Ch}$ и свидетельствует в пользу слияния двойных БК как сценария СН Ia.
4. Рассчитана модель популяции звезд типа AM CVn. Впервые исследованы характеристики модели в зависимости от предположений относительно эффективности приливного взаимодействия и возможной потери части потенциальных предшественников звезд AM CVn в результате разрушения БК при детонации в слое аккрецированного He.
5. Проведен первый систематический расчет сетки эволюционных треков для ТДС с маломассивными гелиевыми донорами и белыми карликами-аккреторами. На основе результатов расчетов предложена система диагностики каналов формирования звезд AM CVn и ультракомпактных источников рентгеновского излучения по отношениям содержаний H, He, N, C, O в аккреционных дисках.
6. Рассчитан гравитационно-волновой сигнал, генерируемый двойными звездами Галактики в диапазоне чувствительности космического ин-

терферометра *LISA*. Уточнен предел частот, выше которого различимы сигналы от отдельных разделенных систем (confusion limit, CL). Найдено, что *LISA* сможет разрешить $\simeq 10000$ разделенных БК на частотах выше CL и $\simeq 6000$ ниже CL, но с сигналом, значительно более сильным, чем усредненный фон.

7. Звезды AM CVn впервые отождествлены как источники, которые могут одновременно наблюдаться в ГВ, рентгене и оптике. *LISA* сможет разрешить до $\simeq 12000$ систем. Для КА СРГ и *LISA* возможны взаимодополняющие наблюдения в оптике, рентгене и ГВ ~ 100 звезд.
8. Исследованы горячие гелиевые субкарлики (sdB/sdO). Проанализированы каналы формирования, построена модель популяции, которая воспроизводит наблюдаемую степень двойственности (40% – 70% в зависимости от выборки) и пространственную плотность (2.2×10^{-6} пк $^{-3}$) звезд. Проанализированы распределения по параметрам компонентов и соотношения между ними.
9. Проведен анализ эволюции частоты СН Ia для сценариев сливающихся карликов и полуразделенных систем и численности аккрецирующих БК с ядерным горением на поверхности для моделей звездообразования, имитирующих спиральную и эллиптическую галактики. Подтвержден сделанный ранее автором вывод о том, что слияние БК является наиболее вероятным сценарием для предшественников СН Ia. Показано, что источники сверхмягкого рентгеновского излучения (SSS), наблюдаемые в эллиптических галактиках, не являются предшественниками СН Ia. Оценки численности SSS в моделях согласуются с их численностью в хорошо изученных ближайших галактиках, если учитываются эффекты селекции по поглощению.
10. Рассчитана модель галактической популяции гелиевых звезд с компактными спутниками – нейтронными звездами и черными дырами. Исследованы соотношения между параметрами компонентов в подобных системах и их орбитальными периодами. Обосновано существование в Галактике в настоящее время лишь одной системы, подобной

Суг X-3. На основе предсказаний о периодах звезд Вольфа-Райе со спутниками — черными дырами — найден орбитальный период системы NGC300 X-1, второго известного внегалактического аналога Суг X-3.

11. Проанализированы формирование и эволюция симбиотических звезд, определена их численность и частота симбиотических Новых в Галактике. Найдено, что СО-карлики в симбиотических звездах не могут накопить M_{Ch} и не взрываются как СН Ia.
12. Проанализированы наблюдения уникальной планетарной туманности TS 01, двойное ядро которой имеет компонент, наблюдаемый лишь в сверхмягком рентгеновском диапазоне, и построен эволюционный сценарий формирования ядра туманности.

Публикации по теме диссертации

1. Portegies Zwart, S. F.; Yungelson, L. R., Formation and evolution of binary neutron stars, *Astron.Astrophys.*, 332, 173 (1998).
2. Ergma, E.; Yungelson, L. R., CYG X-3: can the compact object be a black hole? *Astron.Astrophys.*, 333, 151 (1998).
3. Nelemans, G.; Verbunt, F.; Yungelson, L. R.; Portegies Zwart, Simon F. Reconstructing the evolution of double helium white dwarfs: envelope loss without spiral-in, *Astron.Astrophys.*, 360, 1011 (2000).
4. Nelemans, G.; Yungelson, L. R.; Portegies Zwart, S. F.; Verbunt, F., Population synthesis for double white dwarfs. I. Close detached systems, *Astron.Astrophys.*, 365, 491 (2001).
5. Nelemans, G.; Portegies Zwart, S. F.; Verbunt, F.; Yungelson, L. R., Population synthesis for double white dwarfs. II. Semi-detached systems: AM CVn stars, *Astron.Astrophys.*, 368, 939 (2001).
6. Nelemans, G.; Yungelson, L. R.; Portegies Zwart, S. F., The gravitational wave signal from the Galactic disk population of binaries containing two compact objects, *Astron.Astrophys.*, 375, 890 (2001).

7. Ergma, E.; Fedorova, A. V.; Yungelson, L. R., Is KPD 1930+2752 a good candidate type Ia supernova progenitor? *Astron.Astrophys.*, 376, L9 (2001).
8. Koester, D.; Napiwotzki, R.; Christlieb, N.; Drechsel, H.; Hagen, H.-J.; Heber, U.; Homeier, D.; Karl, C.; Leibundgut, B.; Moehler, S.; Nelemans, G.; Pauli, E.-M.; Reimers, D.; Renzini, A.; Yungelson, L., High-resolution UVES/VLT spectra of white dwarfs observed for the ESO SN Ia progenitor survey (SPY). I., *Astron.Astrophys.*, 378, 556 (2001).
9. Napiwotzki, R.; Christlieb, N.; Drechsel, H.; Hagen, H.-J.; Heber, U.; Homeier, D.; Karl, C.; Koester, D.; Leibundgut, B.; Marsh, T. R.; Moehler, S.; Nelemans, G.; Pauli, E.-M.; Reimers, D.; Renzini, A.; Yungelson, L., Search for progenitors of supernovae type Ia with SPY, *Astron. Nachrichten*, 322, no. 5/6, 411 (2001).
10. Napiwotzki, R.; Koester, D.; Nelemans, G.; Yungelson, L.; Christlieb, N.; Renzini, A.; Reimers, D.; Drechsel, H.; Leibundgut, B., Binaries discovered by the SPY project. II. HE 1414-0848: A double degenerate with a mass close to the Chandrasekhar limit, *Astron.Astrophys.*, 386, 957 (2002).
11. Yungelson, L. R.; Nelemans, G.; van den Heuvel, E. P. J., On the formation of neon-enriched donor stars in ultracompact X-ray binaries, *Astron.Astrophys.*, 388, 546 (2002).
12. Тутуков, А.В.; Юнгельсон Л.Р., Модель популяции двойных звезд в Галактике, *АЖ*, 79, 738 (2002).
13. Napiwotzki, R.; Christlieb, N.; Drechsel, H.; Hagen, H.-J.; Heber, U.; Homeier, D.; Karl, C.; Koester, D.; Leibundgut, B.; Marsh, T. R.; Moehler, S.; Nelemans, G.; Pauli, E.-M.; Reimers, D.; Renzini, A.; Yungelson, L., SPY - the ESO Supernovae type Ia Progenitor survey, *The Messenger*, 112, 25 (2003).
14. Nelemans, G.; Yungelson, L. R.; Portegies Zwart, S. F., Short-period AM CVn systems as optical, X-ray and gravitational-wave sources, *MNRAS*, 349, 181 (2004).

15. Lommen, D.; Yungelson, L.; van den Heuvel, E.; Nelemans, G.; Portegies Zwart, S., Cygnus X-3 and the problem of the missing Wolf-Rayet X-ray binaries, *Astron.Astrophys.*, 443, 231, (2005).
16. Юнгельсон Л.Р.; Тутуков, А.В., Модель популяции гелиевых звезд в Галактике. *Звезды малых масс, АЖ*, 82, 976 (2005).
17. Lü, Guoliang; Yungelson, L.; Han, Z., Population synthesis for symbiotic stars with white dwarf accretors, *MNRAS*, 372, 1389 (2006).
18. Postnov, K. A.; Yungelson, L. R., The Evolution of Compact Binary Star Systems, *Living Reviews in Relativity*, 9, no. 6 (2006).
19. Carpano, S.; Pollock, A. M. T.; Prestwich, A.; Crowther, P.; Wilms, J.; Yungelson, L.; Ehle, M., A 33 hour period for the Wolf-Rayet/black hole X-ray binary candidate NGC 300 X-1, *Astron.Astrophys.*, 466, L17, (2007).
20. Юнгельсон Л.Р., Эволюция гелиевых звезд малых масс в полуразделенных двойных системах, *ПАЖ*, 34, 620-634 (2008).
21. Nelemans, G.; Yungelson, L. R.; van der Sluys, M. V.; Tout, C. A., The chemical composition of donors in AM CVn stars and ultracompact X-ray binaries: observational tests of their formation, *MNRAS*, 401, 1347 (2010).
22. Stasińska, G.; Morisset, C.; Tovmassian, G.; Rauch, T.; Richer, M. G.; Peña, M.; Szczerba, R.; Decressin, T.; Charbonnel, C.; Yungelson, L.; Napiwotzki, R.; Simón-Díaz, S.; Jamet, L., The chemical composition of TS 01, the most oxygen-deficient planetary nebula. AGB nucleosynthesis in a metal-poor binary star, *Astron.Astrophys.*, 511, id.A44 (2010).
23. Tovmassian, G.; Yungelson, L.; Rauch, Th.; Suleimanov, V.; Napiwotzki, R.; Stasińska, G.; Tomsick, J.; Wilms, J.; Morisset, C.; Peña, M.; Richer, M. G., The Double-degenerate Nucleus of the Planetary Nebula TS 01: A Close Binary Evolution Showcase, *ApJ*, 714, 178 (2010).
24. Юнгельсон Л.Р., Эволюция численности аккрецирующих белых карликов с слоевым ядерным горением и частоты СН Ia, *ПАЖ*, 36, 780 (2010).

Литература:

- [1] E. I. Popova, A. V. Tutukov, L. R. Yungelson. *Astrophys. Space Sci.* 88, 55 (1982)
- [2] S. Vereshchagin, A. Tutukov, L. Yungelson, Z. Kraicheva, E. Popova. *Astrophys. Space Sci.* 142, 245 (1988)
- [3] M. B. N. Kouwenhoven, A. G. A. Brown, S. F. Portegies Zwart, L. Kaper. *A&A* 474, 77 (2007)
- [4] P. P. Eggleton, A. A. Tokovinin. *MNRAS* 389, 869 (2008)
- [5] B. P. Flannery, E. P. J. van den Heuvel. *A&A* 39, 61 (1975)
- [6] R. F. Webbink. *ApJ* 277, 355 (1984)
- [7] G. Nelemans, C. A. Tout. *MNRAS* 356, 753 (2005)
- [8] T. Driebe, D. Schönberner, T. Blöcker, F. Herwig. *A&A* 339, 123 (1998)
- [9] D. Hils, P. L. Bender, R. F. Webbink. *ApJ* 360, 75 (1990)
- [10] A. Stroeer, A. Vecchio. *Classical and Quantum Gravity* 23, 809 (2006)
- [11] B. Paczyński. *Acta Astron.* 17, 287 (1967)
- [12] G. J. Savonije, M. de Kool, E. P. J. van den Heuvel. *A&A* 155, 51 (1986)
- [13] А. В. Тутуков , А. В. Федорова , Э. В. Эргма, Л. Р. Юнгельсон. *ПАЖ* 11, 52 (1985)
- [14] R. E. Williams, D. H. Ferguson. *ApJ* 257, 672 (1982)
- [15] E. Livne. *ApJ* 354, L53 (1990)
- [16] J. Solheim. *PASP* 122, 1133 (2010)
- [17] E. Cappellaro. *Memorie della Societa Astronomica Italiana* 72, 863 (2001)

055(02)2

Ротапринт ИКИ РАН
Москва, 117997, Профсоюзная, 84/32

Подписано к печати 05.04.2011 г.

Заказ N

Формат 70x108/32.

Тираж 100 экз.

1.5 усл. печ.

л.