

## HIGHLY EVOLVED CLOSE BINARY STARS

A. M. CHEREPASHCHUK

*The progress in observation and theoretical investigations of close binary stars allows for better understanding of origin and evolution of such peculiar objects as Wolf-Rayet stars, white dwarfs, neutron stars, and black holes. Close binary systems can be viewed as natural laboratories where the components are moving and interacting. Investigation of these interactions allows astronomers to study the main physical characteristics of stars.*

**Прогресс в наблюдательных и теоретических исследованиях тесных двойных звезд позволил понять происхождение и эволюцию таких необычных объектов, как звезды Вольфа–Райе, белые карлики, нейтронные звезды и черные дыры. Тесные двойные системы – естественные лаборатории, в которых происходит движение и взаимодействие компонент. Изучая эти взаимодействия, астрономы могут исследовать основные физические характеристики звезд.**

© Черепашук А.М., 1996

## ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ ЗВЕЗДЫ НА ПОЗДНИХ СТАДИЯХ ЭВОЛЮЦИИ

А. М. ЧЕРЕПАЩУК

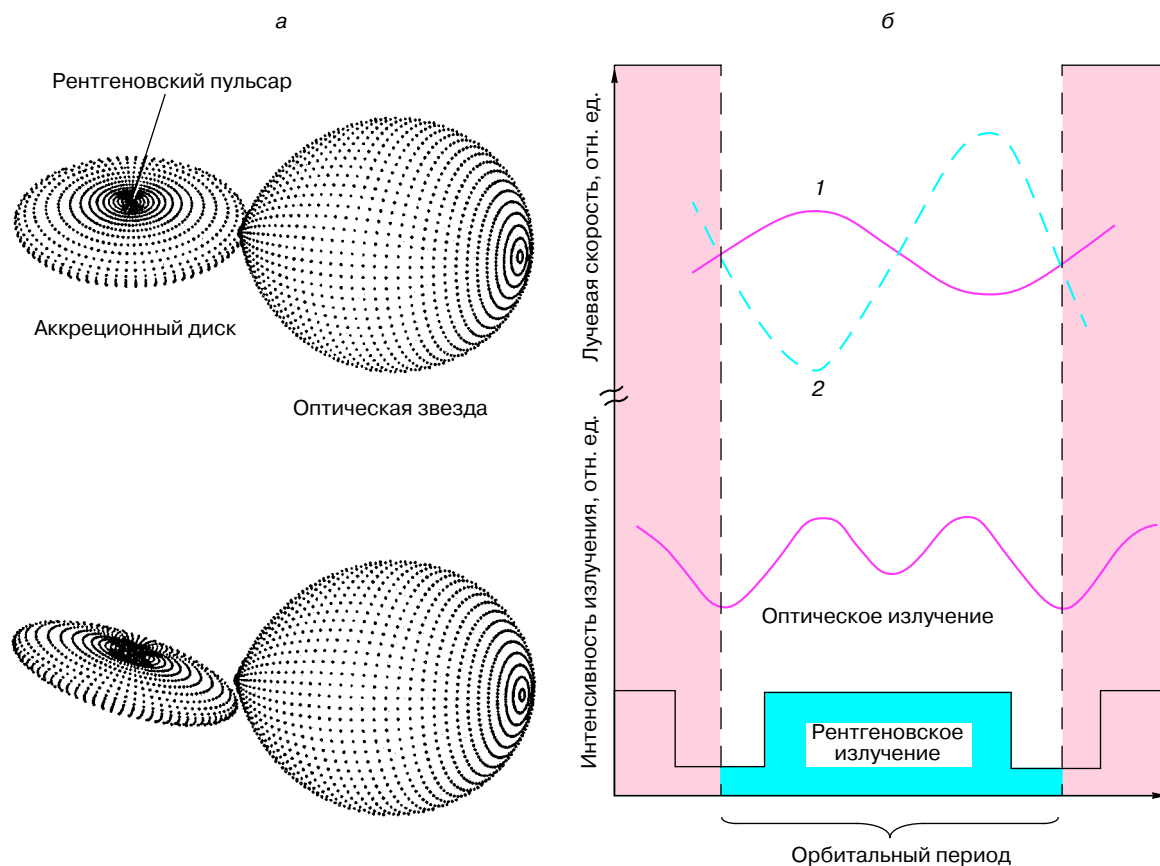
Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова

### ВВЕДЕНИЕ

Доля двойных и кратных звезд в нашей Галактике составляет около 50%. В составе двойных систем встречаются любые комбинации звезд. Астрономы считают большой удачей, когда интересующий их объект входит в состав двойной системы, поскольку в этом случае оказывается возможным определить важнейшие характеристики объекта: его массу, радиус, температуру, светимость и т.п. Это можно сделать, изучая движение и взаимодействие звезд – компонент двойной системы. Среди двойных звезд выделяют так называемые тесные двойные системы (ТДС): системы из двух звезд, в которых на некотором этапе эволюции происходит обмен веществом между компонентами. Наиболее яркие наблюдаемые проявления отмечаются у ТДС, находящихся на поздних стадиях эволюции, то есть на стадиях эволюции, следующих после завершения первичного обмена веществом между компонентами. Вместе с тем именно характеристики поздних стадий эволюции ТДС являются наиболее сильным критерием для проверки правильности наших представлений об эволюции звезд, поскольку поздние стадии эволюции связаны с образованием таких особенных (пекулярных) объектов, как белые карлики, звезды Вольфа–Райе (WR), нейтронные звезды и черные дыры.

Достижения рентгеновской астрономии привели к открытию новых типов ТДС, в частности рентгеновских двойных систем, состоящих из нормальной оптической звезды типа Солнца, которая является донором и поставляет вещество на соседний объект, и релятивистского объекта (нейтронная звезда, черная дыра), находящегося в режиме непрерывающегося захвата (аккреции) вещества. Наблюдательные проявления релятивистских объектов в ТДС (для которых существенны эффекты общей теории относительности А. Эйнштейна) были впервые теоретически описаны в работах Я.Б. Зельдовича и его учеников в 1966 – 1972 годах. Предсказание мощного рентгеновского излучения от аккрецирующих нейтронных звезд и черных дыр (когда на них падает вещество) было сделано одновременно в 1964 году Я.Б. Зельдовичем и Е.Е. Салпитером (США).

Прорыв в понимании природы и эволюции релятивистских объектов в ТДС произошел после



**Рис. 1.** а – Модель рентгеновской двойной системы с прецессирующим аккреционным диском вокруг релятивистского объекта; показаны разные фазы прецессии диска. б – Определяемые из наблюдений рентгеновские и оптические кривые блеска системы и кривые лучевых скоростей (1 – для оптической звезды, 2 – для рентгеновского пульсара). По этим кривым находят массы оптической и релятивистской звезд и параметры орбиты двойной системы.

открытия с борта специализированного американского спутника “Ухуру” в 1972 – 1976 годах сотен компактных рентгеновских источников, которые, как оказалось, представляют собой в большинстве случаев рентгеновские двойные системы разных типов.

В данной обзорной статье мы рассмотрим современные представления об эволюции ТДС на поздних стадиях эволюции.

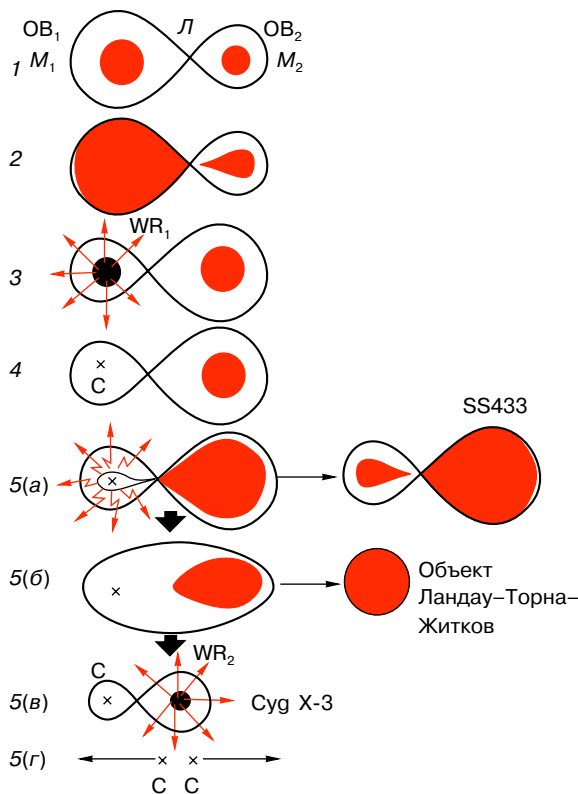
### ОБ ЭВОЛЮЦИИ МАССИВНЫХ ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМ

Рассмотрим современный сценарий эволюции массивных ТДС (суммарная масса  $M_1 + M_2 > 30M_C$ ,  $M_C$  – масса Солнца), развитый в 1967 – 1983 годах в работах поляка Б. Пачинского, живущего сейчас в США, немцев Р. Киппенхана и А. Вайгерта, русских А.В. Тутукова и Л.Р. Юнгельсона, голландца Э. Ван ден Хейвела, русских В.Г. Корнилова и В.М. Липунова.

Схему эволюции звезд в массивной ТДС, изначально состоящей из двух звезд спектральных классов O–B, можно представить в следующем виде:

$OB_1 + OB_2 \rightarrow WR_1 + OB'_2 \rightarrow$  взрыв как сверхновой звезды  $WR_1 + OB'_2 \rightarrow$  релятивистский объект (C) +  $OB'_2 \rightarrow C + WR_2$  (или одиночный объект Ландау–Торна–Житков)  $\rightarrow$  взрыв звезды  $WR_2$  как сверхновой  $\rightarrow$  два релятивистских объекта.

На начальной стадии система состоит из двух массивных горячих O–B звезд главной последовательности и однородного химического состава. Пусть масса более массивной звезды  $OB_1$  не сильно превосходит массу менее массивной  $OB_2$ . Время ядерной эволюции звезды на стадии выгорания водорода в ядре для звезды с массой  $30M_C$  составляет  $3 \cdot 10^6$  лет. Более массивная звезда  $OB_1$  эволюционирует быстрее, увеличивает свой радиус и первой заполняет свою полость Роша (см. словарь терминов в конце статьи). Будем считать, что это заполнение произошло на стадии, когда у звезды  $OB_1$  имеется



**Рис. 2.** Сценарий эволюции массивной тесной двойной системы. 1 – Разделенная ТДС из двух массивных горячих ОВ звезд ( $M_1 > M_2$ ); указаны критические полости Роша каждой из компонент и внутренняя точка Лагранжа  $L$  (в области их соприкосновения). 2 – Первичный обмен масс в системе через внутреннюю точку Лагранжа. 3 – Система  $WR_1 + OB_2$ . 4 – стадия двойной системы  $C + OB_2$ , содержащей релятивистский объект ( $C$ ), но без аккреции и мощного рентгеновского излучения. 5(a) – Рентгеновская двойная система с аккреционным диском вокруг релятивистского объекта; 5(б) – Эволюция с общей оболочкой, приводящая либо к формированию объекта Ландау–Торна–Житков, либо 5(в) к двойной системе  $C + WR_2$  типа Суг Х-3. Стадия 5(a) может привести также к формированию объекта типа SS433 со сверхкритическим аккреционным диском вокруг релятивистского объекта, но без общей оболочки. 5(г) – Стадия двух релятивистских объектов.

инертное гелиевое ядро, где ядерные реакции еще не идут, а водород выгорает в слоевом источнике. Звезда  $OB_1$  теряет вещество через внутреннюю точку Лагранжа. Это вещество перетекает на звезду  $OB_2$  и присоединяется к ней. Процесс первоначального обмена масс является самоподдерживающимся и очень быстрым (соответствующая шкала времени тепловая, а не ядерная), в частности, ввиду того, что расстояние  $a$  между компонентами двойной системы в консервативном случае меняется по закону

$$a = \frac{\text{const}}{M_1^2 M_2^2} \quad (1)$$

При условии  $M_1 + M_2 = \text{const}$  эта функция имеет минимум, когда  $M_1 = M_2$ . Поэтому при перетекании вещества от более массивной звезды  $OB_1$  к менее массивной  $OB_2$  расстояние между компонентами  $a$  уменьшается, что, в свою очередь, усиливает обмен масс. Подчеркнем, что в случае массивной ТДС первой заполняет свою полость Роша и начинает перетекать на вторую звезду всегда более массивная компонента. Поэтому в массивных ТДС расстояние  $a$  между компонентами системы всегда уменьшается в начале первичного обмена масс, что делает обмен масс самоподдерживающимся и неизбежным. После завершения первичного обмена масс масса первоначально менее массивной звезды  $OB_2$  увеличивается почти вдвое (поэтому далее эта звезда обозначается как  $OB'_2$ ), и в системе реализуется так называемый процесс перемены ролей компонент, когда первоначально более массивная звезда становится менее массивной компонентой двойной системы.

Все ТДС после первичного обмена масс, содержащие сильно проэволюционировавшие объекты (белые карлики, звезды WR, нейтронные звезды, черные дыры), принято называть ТДС на поздних стадиях эволюции.

Рассмотрим основные наблюдательные проявления всех последующих стадий эволюции ТДС. Ограничимся случаем массивных ТДС, которые в теоретическом плане изучены лучше всего.

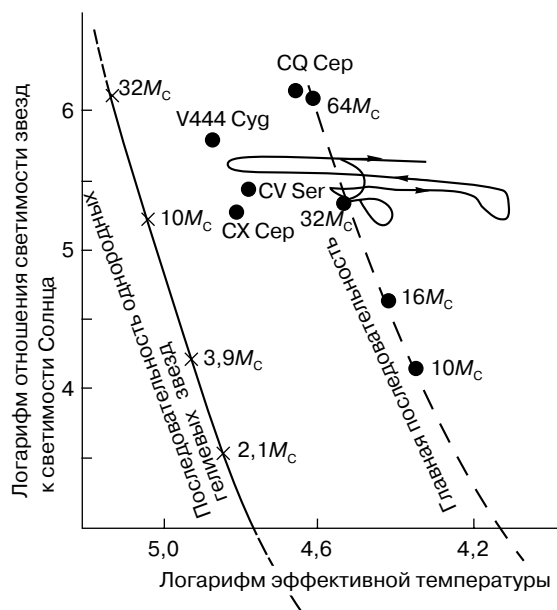
### ЗВЕЗДЫ ВОЛЬФА–РАЙЕ (WR) В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ С ОВ КОМПОНЕНТАМИ

После завершения первичного обмена масс в массивной ТДС на месте первоначально более массивной звезды  $OB_1$  образуется гелиевый остаток, масса которого существенно меньше массы второй компоненты  $OB'_2$ .

Как показывают расчеты, масса гелиевых остатков  $M_R$  (с небольшими водородными оболочками) удовлетворительно описывается соотношением

$$\frac{M_R}{M_C} \approx 0,1 \left( \frac{M_1}{M_C} \right)^{1,4} \quad (2)$$

Образовавшаяся на месте звезды  $OB_1$  гелиевая звезда с тонкой водородной оболочкой имеет эффективную температуру, достигающую  $\sim 10^5$  К. Длительность этой стадии эволюции  $\sim 3 \cdot 10^5$  лет. Гелиевые остатки с тонкими водородными оболочками обычно рассматриваются как модели звезд WR. В настоящее время известно 170 звезд WR в нашей Галактике и примерно столько же в других ближайших галактиках. Их характерная особенность – наличие мощных и широких линий излучения, которые формируются в протяженной атмосфере, расширяющейся со скоростями в тысячи километров в секунду, по видимому, под действием давления излучения (эта атмосфера также называется звездным ветром). Около половины известных звезд WR ярче 10 звездной



**Рис. 3.** Положение четырех звезд Вольфа–Райе, являющихся компонентами затменных двойных систем, на диаграмме Герцшпрунга–Рессела спектр–светимость (по результатам нашей интерпретации кривых блеска этих систем). Для примера показан один из эволюционных треков звезды OB в массивной ТДС (по А.В. Тутукову и Л.Р.Юнгельсону), обусловленный первичным обменом масс.

величины обнаружены как компоненты WR<sub>1</sub> + OB<sub>2</sub> систем. Орбитальные периоды этих систем  $p$  лежат в пределах от 1,6 до 2900 дней. Эксцентриситеты орбит  $e \approx 0$  для  $p < 14$  суток и  $e = 0,3 - 0,8$  для  $p > 70$  дней. Отношение масс компонент  $q = \frac{M_{WR}}{M_{OB}}$  лежит в пределах 0,17 – 2,78.

Модель звезды WR как обнаженного гелиевого ядра первоначально массивной OB звезды подтверждается нашими определениями радиусов и температур звезд WR из анализа кривых затмений двойных затменных WR+OB систем. Особенно сильное подтверждение модели звезды WR как гелиевого остатка было получено недавно в связи с открытием Ван Керквиком с соавторами звезды WR в составе сильно проэволюционировавшей рентгеновской двойной системы Cyg X-3, содержащей нейтронную звезду или черную дыру.

Сильное рентгеновское излучение двойных систем WR<sub>1</sub>+OB<sub>2</sub> было предсказано в 1967 – 1976 годах в работах автора статьи и в работах О.Ф. Прилуцкого и В.В. Усова. Наблюдения с борта внеатмосферной американской обсерватории “Эйнштейн” подтвердили наше предсказание: было обнаружено значительное (порядка  $10^{33} - 10^{34}$  эрг/с) рентгеновское излучение от WR+OB двойных систем. Это излуче-

ние формируется в ударной волне, образованной в результате столкновения звездных ветров WR и OB компонент. Эффекты столкновения звездных ветров компонент в массивных ТДС приводят к неконсервативности процесса обмена веществом между компонентами, что должно учитываться теорией эволюции ТДС.

### ВЗРЫВ ЗВЕЗДЫ WR, КАК СВЕРХНОВОЙ

Эволюция гелиевой звезды зависит от массы образующегося у нее углеродно-кислородного ядра. Для достаточно массивных первичных звезд OB с массой более  $12M_{\odot}$  масса CO-ядра превышает верхний предел для соответствующих белых карликов ( $1,4M_{\odot}$ ), и такие OB-звезды в двойных системах могут породить нейтронные звезды или черные дыры. После истощения гелия в ядре звезды WR последовательно и во все ускоряющемся темпе выгорают углерод, кислород, неон и кремний с последующим образованием железного ядра, коллапс которого приводит к образованию релятивистского объекта, сопровождаемого, по всей вероятности, взрывом сверхновой. Поскольку масса взрывающейся звезды велика, это должна быть сверхновая II типа (по классификации И.С. Шкловского) с той лишь разницей, что из-за отсутствия протяженной водородной оболочки (характерной для массивных сверхгигантов, но не для звезд WR) коэффициент переработки энергии взрыва в излучение очень мал (порядка 0,001, согласно оценкам Имшенника и Надежина).

В последнее время выявлен новый класс сверхновых, возникновение которых связывают со взрывами звезд WR. В частности, аномально слабая сверхновая, сопровождавшая образование остатка сверхновой Кассиопея А, могла быть вызвана взрывом звезды WR.

### СТАДИЯ “НЕРЕНТГЕНОВСКОЙ” ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ С РЕЛЯТИВИСТСКИМ ОБЪЕКТОМ

Рассмотрим теперь эволюцию второй звезды – OB<sub>2</sub>. После первичного обмена масс в двойной системе звезда OB<sub>2</sub> захватила (аккрецировала) вещество звезды OB<sub>1</sub> (ее водородную оболочку, то есть более 60% массы звезды OB<sub>1</sub>) и масса звезды OB<sub>2</sub> возросла, но она остается звездой главной последовательности нормального химического состава с характерным временем ядерной эволюции около  $10^6$  лет. После взрыва звезды WR<sub>1</sub> и образования релятивистского объекта формируется система S+OB<sub>2</sub> с релятивистским объектом. При этом двойная система не распадается под действием взрыва сверхновой, поскольку взрывается менее массивная звезда WR<sub>1</sub>, а удар оболочки сверхновой о звезду OB<sub>2</sub> не приводит к распаду системы. Скорость центра масс системы после взрыва сверхновой может превышать 100 км/с, и за время жизни звезды OB<sub>2</sub> двойная система может удалиться от



плоскости Галактики на расстояние до нескольких сотен парсек.

После взрыва сверхновой и образования на месте звезды  $WR_1$  релятивистского объекта последний не является мощным источником рентгеновского излучения, и в этом смысле он “невидим”. Это связано с тем обстоятельством, что звезда  $OB_2$  является звездой главной последовательности и далека от заполнения своей полости Роша, а захват вещества из звездного ветра этой звезды на релятивистский объект, по-видимому, недостаточен для образования мощного рентгеновского источника. Заметим, однако, что если  $OB_2$  звезда быстро вращается, в области экватора этой звезды образуется мощный звездный ветер, стимулированный вращением. Это может обеспечивать достаточно интенсивный темп аккреции вещества из экваториального звездного ветра на релятивистский объект и формирование мощного рентгеновского источника даже в том случае, если звезда  $OB_2$  далека от заполнения своей полости Роша. Такая ситуация наблюдается у рентгеновских двойных систем умеренных масс с оптическими компонентами (то есть наблюдаемыми в оптическом диапазоне длин волн) — звездами Ве. Активность молодой нейтронной звезды (быстрое вращение с сильным магнитным полем, выброс ею релятивистских частиц и т.п.) может также препятствовать аккреции вещества звезды  $OB_2$ . Таких массивных ТДС с невидимыми релятивистскими объектами может существовать несколько тысяч в нашей Галактике. Отличительные особенности таких систем — большие пространственные скорости (до сотен км/с) и значительные (до 1 килопарсека) высоты  $z$  над галактической плоскостью, которые двойные системы приобретают в результате произошедших в них взрывов сверхновых.

В Галактике наблюдается значительное число таких “убегающих”  $OB$  звезд с большими пространственными скоростями. По современным представлениям, по крайней мере некоторые из них могут быть ТДС, содержащими релятивистские спутники в неактивной, нерентгеновской стадии. В таких системах релятивистские спутники могут быть обнаружены косвенно, по периодическим изменениям лучевых скоростей оптической  $OB$  звезды. Поиск релятивистских спутников у “убегающих”  $OB$  звезд проводился в последние годы рядом групп. Примерно у десятка “убегающих”  $OB$  звезд были обнаружены квазипериодические изменения лучевых скоростей с амплитудой 10 — 30 км/с и периодами 1 — 100 суток. Во всех случаях строгая периодичность изменений лучевых скоростей пока не доказана и для этого требуются дальнейшие наблюдения.

В последнее время открыты два радиопульсара в двойных системах с  $OB$  компонентами: PSR 1259-63 ( $p = 7,8$  лет,  $e = 0,97$ ) и пульсар в Малом Магеллановом облаке ( $p = 52$  дня,  $e = 0,80$ ). Очень большие значения эксцентриситетов этих двойных систем

свидетельствуют о произошедших в них взрывах сверхновых, а наличие активных испускающих (эжектирующих) радиоволны и частицы, но не аккрецирующих вещество радиопульсаров позволяет со всей определенностью отнести эти двойные системы к классу “нерентгеновских” двойных систем, описанному выше.

## СТАДИЯ РЕНТГЕНОВСКОЙ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ

По прошествии порядка миллиона лет после взрыва звезды  $WR_1$  как сверхновой звезда  $OB_2$  увеличит свой радиус, приблизит свою поверхность к границам полости Роша. Стимулированный приливными гравитационными силами звездный ветер, особенно интенсивно истекающий через внутреннюю точку Лагранжа, приведет к формированию вокруг релятивистского объекта аккреционного диска. В системе возникает мощный рентгеновский источник со светимостью порядка  $10^{36} - 10^{38}$  эрг/с. Многие десятки таких рентгеновских двойных систем с массивными  $OB$  компонентами открыты в Галактике, а также в Большом и Малом Магеллановом облаках (ближайших к нам галактиках). Рентгеновские двойные системы с  $OB$  сверхгигантами состоят из оптической  $OB$  звезды, близкой к заполнению своей полости Роша, и релятивистского объекта, находящегося в режиме аккреции вещества, поставляемого  $OB$  звездой. Большинство таких систем было открыто в 70-х годах с помощью специализированных американских спутников “Ухуру” и “Эйнштейн”. отождествление этих рентгеновских источников с оптическими звездами, активно проводившееся рядом групп, в том числе в Государственном астрономическом институте им. П.К. Штернберга (ГАИШ) МГУ, позволило детально исследовать основные характеристики рентгеновских двойных систем и определить массы нейтронных звезд и черных дыр.

Известно более десятка массивных рентгеновских двойных с  $OB$  сверхгигантами, близкими к заполнению своих полостей Роша. Рентгеновское излучение от таких систем квазистационарно. Орбитальные периоды сравнительно короткие:  $p = 1,4 - 9$  суток, эксцентриситеты орбит близки к нулю:  $e = 0 - 0,1$ . Помимо переменности, связанной с орбитальным движением компонент (рентгеновские и оптические затмения, эффекты эллипсоидальности и “отражения” в оптическом диапазоне), в таких “стационарных” массивных рентгеновских двойных системах наблюдается долгопериодическая рентгеновская и оптическая переменность, по-видимому, связанная с эффектами прецессии оси вращения оптической звезды или аккреционного диска. Рентгеновские источники в таких системах — аккрецирующие нейтронные звезды и черные дыры. Нейтронные звезды проявляются как рентгеновские пульсары с периодами пульсаций 0,7 — 600 с. Это связано с тем, что нейтронная звезда быстро

вращается и имеет сильное (порядка  $10^{12}$  Гс) магнитное поле, которое канализирует плазму из внутренних частей аккреционного диска на магнитные полюсы нейтронной звезды. В местах столкновения плазмы с поверхностью нейтронной звезды образуются два горячих рентгеновских пятна. Поскольку ось вращения нейтронной звезды не совпадает с осью магнитного поля, наблюдатель видит эффект маяка: горячие пятна то видны наблюдателю, то экранируются от него телом нейтронной звезды, что и приводит к явлению рентгеновского пульсара. Три массивные рентгеновские двойные системы с ОВ сверхгигантами содержат массивные (масса более трех солнечных) рентгеновские источники (Суг X-1, LMC X-3 и LMC X-1).

Существует класс рентгеновских двойных систем, содержащих в качестве оптических компонент быстро вращающиеся звезды Ве умеренных масс ( $6 - 20 M_{\odot}$ ) главной последовательности. Это так называемые массивные рентгеновские транзитные источники. Оптические звезды здесь не заполняют свои полости Роша. Орбитальные периоды велики:  $p = 10 - 1000$  суток, эксцентриситеты орбит значительны:  $e = 0,2 - 0,8$ . Рентгеновские источники — аккрецирующие нейтронные звезды, в большинстве случаев — рентгеновские пульсары с периодами  $0,07 - 6000$  с. Характерная особенность этих систем — вспышки рентгеновского излучения длительностью порядка месяца (светимость в максимуме порядка  $10^{38} - 10^{39}$  эрг/с). Рентгеновские вспышки преимущественно происходят вблизи момента прохождения аккрецирующей нейтронной звезды через периастр орбиты, где плотность экваториального звездного ветра Ве звезды максимальна. Рентгеновская светимость в спокойном состоянии у таких систем порядка  $10^{33} - 10^{34}$  эрг/с.

## ВТОРИЧНЫЙ ОБМЕН МАСС В СИСТЕМЕ

Стадия рентгеновской двойной системы продолжается очень недолго: порядка  $10^3 - 10^4$  лет. Когда звезда ОВ<sub>2</sub> окончательно заполнит свою полость Роша, истечение вещества через внутреннюю точку Лагранжа будет происходить в темпе, соответствующем времени тепловой релаксации звезды и достигающем для массивных звезд  $0,0001 - 0,001$  солнечных масс в год. В этом случае рентгеновское излучение полностью поглощается в оптически толстом аккреционном диске и реализуется сверхкритический режим аккреции, когда сила давления радиации превосходит силу гравитационного притяжения в диске. На месте рентгеновского источника наблюдается оптически яркий аккреционный диск, из которого под действием давления радиации происходит мощное истечение вещества. Рентгеновская двойная система в этом случае по своим наблюдательным проявлениям чрезвычайно похожа на знаменитый объект SS433, который обладает столь

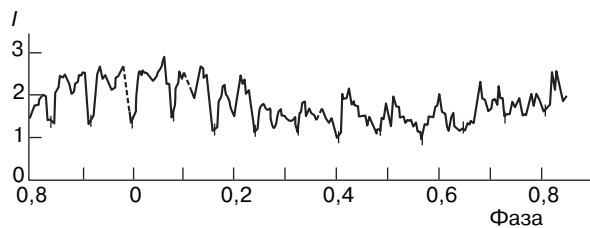
удивительными свойствами, что его по праву называют загадкой века.

Свое название объект SS433 получил по порядковому номеру в каталоге Стефенсона и Сандулика, содержащем звезды с сильными эмиссионными линиями водорода. Объект ассоциирован с радио- и рентгеновскими источниками и локализован в центре пекулярного остатка вспышки сверхновой W50. В 1979 году появилось сенсационное сообщение группы американских астрофизиков, руководимой Брюсом Маргоном, которые открыли в оптическом спектре SS433 три системы линий излучения водорода и нейтрального гелия, две из которых были смещены относительно своего нормального положения на громадную величину, достигающую  $\pm 900 \text{ \AA}$ , причем положение этих смещенных линий не остается постоянным: они перемещаются по спектру в синюю и красную части с периодом около 164 суток. Эта уникальная особенность SS433 совместима с представлением о том, что движущиеся эмиссионные линии в его спектре формируются в двух противоположно направленных коллимированных (угол расходимости меньше  $1^\circ$ ) выбросах газа (джетах), которые вырываются из внутренних частей аккреционного диска с релятивистскими скоростями примерно  $80000 \text{ км/с}$  ( $0,27$  от скорости света). Аккреционный диск и коллимированные выбросы (которые ему перпендикулярны) прецессируют с периодом около 164 суток, причем угол между выбросами и осью прецессии составляет приблизительно  $20^\circ$ , а ось прецессии перпендикулярна плоскости орбиты двойной системы и наклонена по отношению к лучу зрения на угол примерно  $79^\circ$ .

В настоящее время установлено, что объект SS433 представляет собой массивную рентгеновскую двойную систему с периодом 13,1 суток, состоящую из нормальной оптической ОВ звезды, переполняющей свою полость Роша, и релятивистского



**Рис. 4.** Модель объекта SS433 как массивной рентгеновской двойной системы с прецессирующим аккреционным диском вокруг релятивистского объекта. Показаны релятивистские джеты, перпендикулярные плоскости аккреционного диска.



**Рис. 5.** Оптическая кривая блеска SS433, охватывающая один прецессионный 164-дневный цикл. Видны затмения аккреционного диска оптической звездой с периодом 13,1 суток. Глубина затмений и внезатменный блеск меняются в связи с прецессией аккреционного диска.

объекта, окруженного толстым аккреционным диском, прецессирующим с периодом приблизительно 164 суток. Таким образом, объект SS433 подобен рентгеновской двойной системе Cyg X-1 или Cen X-3 с той лишь разницей, что оптическая звезда в системе SS433 находится на более продвинутой стадии ядерной эволюции, переполняет свою полость Роша и истекает на релятивистский объект в тепловой шкале времени релаксации. Это приводит к явлению сверхкритической аккреции на релятивистский объект. Появление релятивистских сильно коллимированных выбросов вещества, вырывающихся из центральных частей толстого аккреционного диска, является новой и неожиданной особенностью сверхкритического режима аккреции. Поскольку стадия эволюции объекта SS433 очень кратковременна, таких объектов должно быть очень мало в Галактике — порядка единиц.

В системе SS433 реализуется неожиданный для теории эволюции массивных ТДС режим вторичного обмена масс, когда переполнение звездой  $OB'_2$  своей полости Роша ведет к формированию сверхкритического аккреционного диска вокруг релятивистского объекта, из которого и осуществляется интенсивный унос массы и углового момента за пределы двойной системы.

Классическая теория эволюции массивных ТДС предсказывает иной режим вторичного обмена масс — через формирование общей оболочки. При скорости потери массы звездой  $OB'_2$  через точку Лагранжа  $\sim 0,0001 - 0,001$  солнечных масс в год релятивистский объект из-за наличия так называемого эддингтоновского предела не может аккрецировать все вещество, поступающее в аккреционный диск, поэтому подавляющая часть вещества (свыше 99%) должна уходить за пределы двойной системы, унося массу и угловой момент. В этом случае должна сформироваться общая оболочка, в которой релятивистский объект интенсивно тормозится. Угловой орбитальный момент релятивистского объекта при этом передается общей оболочке, которая быстро теряется. В итоге на месте звезды  $OB'_2$  образуется вторая звезда WR ( $WR_2$ ) в паре с релятивистским

объектом (система  $C+WR_2$ ). Выброшенная за пределы двойной системы общая оболочка “нагревает” межзвездный газ и образует кольцевую туманность вокруг системы  $C+WR_2$ . Подобные кольцевые туманности размером около 1 парсека наблюдаются примерно у двух десятков звезд WR.

То, что стадия вторичного обмена масс в режиме с общей оболочкой действительно реализуется в природе, доказывается недавним открытием звезды WR в очень короткопериодической рентгеновской двойной системе Cyg X-3. Очень короткий орбитальный период (4,8 часа) этой системы свидетельствует об интенсивной потере массы и углового момента, который мог реализоваться на стадии двойной системы с общей оболочкой.

### СТАДИЯ ВТОРОЙ ЗВЕЗДЫ WR В СИСТЕМЕ

Образовавшиеся в результате вторичного обмена масс в ТДС звезды  $WR_2$  “второго поколения” должны обладать большими пространственными скоростями и иметь в среднем большие высоты  $z$  над галактической плоскостью в силу импульса, полученного двойной системой в результате взрыва сверхновой. Кроме того,  $C+WR_2$  системы могут быть окружены кольцевыми туманностями.

А.В. Тутуков и Л.Р. Юнгельсон, а также Э. Ван ден Хейвел в 1973 — 1976 годах высказали идею о том, что звезды WR, окруженные кольцевыми туманностями, могут быть двойными  $C+WR_2$  системами, то есть  $C+OB'_2$  системами на стадии после вторичного обмена масс.

Интенсивный поиск проявлений двойственности (периодическая переменность блеска и лучевых скоростей) у ряда одиночных звезд WR, имеющих большие  $z$  и окруженных кольцевыми туманностями, привел к выделению около десятка звезд WR, у которых можно подозревать наличие релятивистских спутников. Среди таких звезд WR две с уверенностью могут быть отнесены к классу двойных с “невидимыми” спутниками: HD 50896 ( $WN_5$ ,  $p = 3,763$  суток,  $z = -279$  парсек, расположена в центре кольцевой туманности RCW11) и HD 197406 ( $WN_7$ ,  $p = 4,327$  суток,  $z = 1032$  парсека).

Решающим в пользу присутствия релятивистского спутника было бы обнаружение мощного (порядка  $10^{38}$  эрг/с) рентгеновского излучения от таких звезд WR. Однако недавние наблюдения с борта обсерватории “Эйнштейн” показали, что рентгеновское излучение от таких звезд WR (в том числе и от упомянутых выше HD 50896 и HD 197406) не превышает  $10^{33}$  эрг/с, что слишком мало для аккрецирующих нейтронных звезд или черных дыр. Поэтому вопрос о природе невидимых спутников в данном случае пока остается открытым.

Недавнее открытие звезды WR в пекулярной короткопериодической рентгеновской двойной системе Cyg X-3 доказало реальное существование двойных систем  $C+WR_2$ , образовавшихся в результате

вторичного обмена масс в массивных ТДС на стадии с общей оболочкой.

### СТАДИЯ ОДИНОЧНОЙ ЗВЕЗДЫ С РЕЛЯТИВИСТСКИМ ОБЪЕКТОМ В ЦЕНТРЕ

Существует еще один путь эволюции массивной ТДС на стадии после завершения вторичного обмена масс. Наиболее тесные двойные  $S+OV_2$  системы с нейтронными звездами или черными дырами на стадии с общей оболочкой могут из-за сильного торможения релятивистского объекта в оболочке образовать одиночные объекты с ядрами, состоящими из нейтронной звезды или черной дыры (релятивистский объект в этом случае “падает” в центр нормальной  $OV_2$  звезды). Подобные объекты (называемые объектами Ландау–Торна–Житков<sup>1</sup>) также должны обладать большими пространственными скоростями и иметь большие высоты  $z$  над галактической плоскостью, поскольку они образовались в двойной системе, испытавшей взрыв сверхновой.

Согласно теории, объекты Ландау–Торна–Житков должны сильно отличаться по наблюдательным проявлениям от звезд WR, например быть полностью конвективными красными сверхгигантами. Однако для окончательного отождествления объектов Ландау–Торна–Житков с наблюдаемыми объектами требуются дальнейшие усилия как теоретиков, так и наблюдателей.

### ВЗРЫВ ЗВЕЗДЫ WR, КАК СВЕРХНОВОЙ И СТАДИЯ ДВУХ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ОБЪЕКТОВ

Взрыв второй звезды WR ( $WR_2$ ) в двойной системе  $S+WR_2$  с релятивистским объектом в большинстве случаев приводит к распаду двойной системы, поскольку в этом случае взрывается компонента большей массы. Распад системы приводит к образованию двух быстролетающих релятивистских объектов. При специфической асимметрии взрыва сверхновой система может не распасться, и в этом случае может образоваться двойная система, состоящая из двух релятивистских объектов с пространственной скоростью центра масс в сотни километров в секунду и большим эксцентриситетом орбиты. Пример такой системы: двойной радиопульсар PSR 1913+16, который демонстрирует укорочение орбитального периода за счет уноса энергии и углового момента излучением гравитационных волн в строгом количественном соответствии с предсказаниями общей теории относительности А. Эйнштейна.

В последние годы число открытых двойных радиопульсаров достигло 42 (полное число известных радиопульсаров около 700). Известно, что радиопульсар представляет собой сильно намагниченную (магнитное поле порядка  $10^{12}$  Гс) нейтронную звезду

<sup>1</sup> По имени Л.Д. Ландау, К. Торна из Калифорнийского технологического института и польки Анны Житков.

с быстрым осевым вращением. Строго периодически повторяющиеся импульсы радиоизлучения пульсара обусловлены переработкой энергии вращения нейтронной звезды в направленное радиоизлучение через посредство сильного магнитного поля. Известные радиопульсары в двойных системах содержат в качестве спутников нейтронную звезду, белый карлик, массивную  $OV$  звезду и даже планеты. Периоды вращения пульсаров в двойных системах лежат в пределах 0,0016 – 1 секунда и в среднем значительно короче, чем периоды одиночных пульсаров. Это связано с тем, что во время вторичного обмена масс в массивной ТДС нейтронная звезда сильно раскручивается, аккумулируя значительную долю орбитального углового момента двойной системы. Орбитальные периоды двойных радиопульсаров лежат в пределах 0,2 – 1300 суток, эксцентриситеты орбит  $e = 0 - 0,97$ .

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сравнение современных представлений об эволюции ТДС разных типов с данными наблюдений и их интерпретации приводит к выводу о том, что теория в целом правильно описывает эволюцию ТДС. Теория ставит новые наблюдательные задачи по исследованию ТДС на разных стадиях эволюции. В то же время современные наблюдения ТДС и их интерпретация в ряде случаев ставят перед теорией новые задачи, стимулирующие ее дальнейшее развитие. Это обеспечивает прогресс наших знаний об эволюции ТДС и их связи с образованием таких экстремальных объектов, как нейтронные звезды и черные дыры.

Отметим два достижения в области исследования ТДС на поздних стадиях эволюции, которые принципиально важны для фундаментальной физики.

1. Надежное свидетельство существования гравитационных волн в природе, полученное по данным о вековом укорочении орбитального периода двойного радиопульсара PSR 1913+16. Эта работа удостоена Нобелевской премии.

2. Надежные определения масс десяти кандидатов в черные дыры в рентгеновских двойных системах Cyg X-1, LMC X-1, LMC X-3, A0620-00, V404 Cyg, XN Mus 1991, QZ Vul, XN Sco 1994, XN Oph 1977, XN Per 1992. Во всех этих случаях масса рентгеновского источника превышает 3 солнечных массы, а его радиус меньше радиуса Земли. Замечательно то, что ни один из этих массивных рентгеновских источников не является рентгеновским пульсаром.

Таким образом, современные наблюдательные данные по релятивистским объектам в тесных двойных системах согласуются с предсказаниями общей теории относительности.



## ДОПОЛНЕНИЕ: ПОЯСНЕНИЯ СПЕЦИАЛЬНЫХ ТЕРМИНОВ

**Белый карлик** — звезда, состоящая из вещества, свойства которого определяются законами не классической, а квантовой механики (вырожденный электронный газ). Это конечная стадия эволюции звезды с массой порядка солнечной. Радиус белого карлика порядка радиуса Земли. Плотность вещества — около 1 тонны в кубическом сантиметре.

**Нейтронная звезда** состоит в основном из вырожденных нейтронов, упакованных до плотности атомного ядра. Это конечная стадия эволюции звезды с массой порядка нескольких солнечных. Радиус нейтронной звезды порядка десяти километров. Плотность вещества достигает миллиарда тонн в кубическом сантиметре.

**Черная дыра** — объект, предсказываемый общей теорией относительности А.Эйнштейна. Это объект, у которого вторая космическая скорость равна скорости света (300 000 км/с), то есть даже свет не может вырваться из ее гравитационного поля. Черная дыра образуется на конечной стадии эволюции массивной звезды. Радиус черной дыры при массе десять солнечных составляет 30 км.

**Общая теория относительности (ОТО) А. Эйнштейна** — теория, описывающая свойства сильных гравитационных полей. В случае слабых гравитационных полей ОТО переходит в теорию тяготения Ньютона.

**Рентгеновское излучение** — электромагнитное излучение с очень короткой длиной волны, порядка

нескольких ангстрем и меньше. Оно возникает при нагреве вещества до очень высоких температур — более миллиона кельвинов.

**Полость Роша** — полость около звезды в тесной двойной системе, где притяжение звезды преобладает. Полости Роша вокруг первой и второй звезд в двойной системе соприкасаются друг с другом в **точке Лагранжа**.

**Гравитационные волны** — переменное гравитационное поле, излучающееся в пространстве со скоростью света ускоренно движущимися телами. Их существование предсказывается ОТО А. Эйнштейна.

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. *Асланов А.А., Колосов Д.Е., Липунова Н.А., Хрузина Т.С., Черепашук А.М.* Каталог тесных двойных звезд на поздних стадиях эволюции. М.: Изд-во МГУ, 1989.
2. *Черепашук А.М.* Двойные звезды и релятивистская астрофизика // *Природа*. 1987. № 3. С. 3 — 14.
3. *Черепашук А.М.* Звезды Вольфа—Райе и рентгеновские двойные // *Земля и Вселенная*. 1994. № 2. С. 3 — 11.

\* \* \*

Анатолий Михайлович Черепашук, доктор физико-математических наук, профессор, директор Государственного астрономического института им. П.К. Штернберга Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, зав. кафедрой астрофизики и звездной астрономии физического факультета МГУ. Научные интересы: физика тесных двойных звезд, обратные задачи астрофизики.