

импульса системы, то есть с уменьшением размеров самой полости Роша. Важнейшими примерами таких систем являются маломассивные ТДС: взрывные (катаклизмические) переменные, где полость Роша заполняет звезда главной последовательности с массой порядка массы Солнца или меньше, вторым компонентом которой является белый карлик, а также маломассивные рентгеновские двойные системы — аналог катаклизмических переменных, но в паре с нейтронной звездой или черной дырой. Орбитальные периоды этих систем, как правило, составляют несколько часов. Достоверно известный минимальный орбитальный период у маломассивной рентгеновской двойной в шаровом скоплении NGC 6624 составляет около 10 мин.

### 7.3. Стадии эволюции двойных звезд

В зависимости от степени заполнения полостей Роша компонентами различают следующие типы двойных звезд:

1. Разделенные двойные системы. Обе звезды не заполняют полость Роша. Этот класс включает все визуально-двойные звезды и широкие спектроскопические двойные пары (например, предкатаклизмические переменные), двойные радиопульсары, двойные белые карлики.

2. Полуразделенные двойные системы. Одна из звезд заполняет полость Роша. Сюда входят затменные переменные типа Алголя (орбитальный период несколько дней), катаклизмические переменные (орбитальный период несколько часов), рентгеновские двойные (массивные и маломассивные, за исключением пар Ве-звезда + нейтронная звезда), некоторые симбиотические звезды (орбитальный период порядка нескольких лет). Из-за переноса масс на второй компонент полуразделенные двойные системы обладают наибольшим наблюдаемым разнообразием.

3. Контактные двойные системы. Обе звезды заполняют свои полости Роша. К этому классу принадлежат звезды типа W Большой Медведицы (маломассивные двойные из звезд главной последовательности, орбитальный период меньше суток).

Физически более обоснованной является классификация взаимодействующих двойных по эволюционным стадиям компонентов, так как в процессе эволюции первоначально разделенная система из двух звезд главной последовательности проходит различные фа-

зы. Тем самым эволюция двойной системы определяется сочетанием эволюционных фаз каждого компонента и орбитальными параметрами (большой полуосью  $a$  или периодом  $P$  и эксцентриситетом  $e$  орбиты). Зная параметры орбиты и массы компонентов в момент образования системы, теоретически рассчитывают эволюцию системы во времени (употребляют термин «эволюционный трек» системы) и проводят сравнение с наблюдаемыми свойствами ТДС.

В качестве примера приведем результаты расчета эволюции двух массивных ОВ-звезд на круговой орбите (А. В. Тутуков, Л. Р. Юнгельсон, 1973). Для того, чтобы на поздних стадиях эволюции возник обмен массами между звездами, радиус относительной орбиты системы  $a = a_1 + a_2$  должен быть менее  $\sim 1000$  а. е. Будем считать, что массы звезд достаточно велики, чтобы в конце эволюции их ядра сколлапсировали и образовали нейтронные звезды, а также что сначала  $M_1 > M_2$ . Удобно разделить эволюционный трек системы на несколько основных стадий (рис. 7.3).

1. Обе ОВ-звезды находятся внутри своих полостей Роша. Продолжительность этой стадии определяется временем жизни первичного (более массивного) компонента на главной последовательности и составляет несколько млн. лет. За это время в нем формируется невырожденное гелиевое ядро с массой около  $0.1(M_1/M_\odot)^{1.4}M_\odot$ . Число  $N$  таких массивных двойных ОВ+ОВ звезд в Галактике оценивается в несколько десятков тысяч.

2. После исчерпания запасов водорода в ядре радиус первичного компонента начинает быстро возрастать и звезда перемещается с главной последовательности в область красных сверхгигантов. Однако как только её радиус станет соизмерим с полостью Роша, начнется перетекание вещества через окрестность внутренней точки Лагранжа на вторичный компонент, который все еще находится на главной последовательности. Темп перетекания определяется тепловой шкалой сверхгиганта (7.7), поэтому длительность стадии первого обмена масс в таких системах оценивается всего в несколько десятков тысяч лет. Обмен масс завершается, когда большая часть водородной оболочки звезды  $M_1$  перетечет на звезду  $M_2$ . Лишенный водородной оболочки первичный компонент превращается в невырожденную гелиевую звезду с С–О ядром, и если ее масса больше  $7-8 M_\odot$ , она наблюдается как горячая звезда Вольфа–Райе с мощным звездным ветром. Если обмен массами происходил консервативно (с сохранением полной массы системы), то масса второй звез-

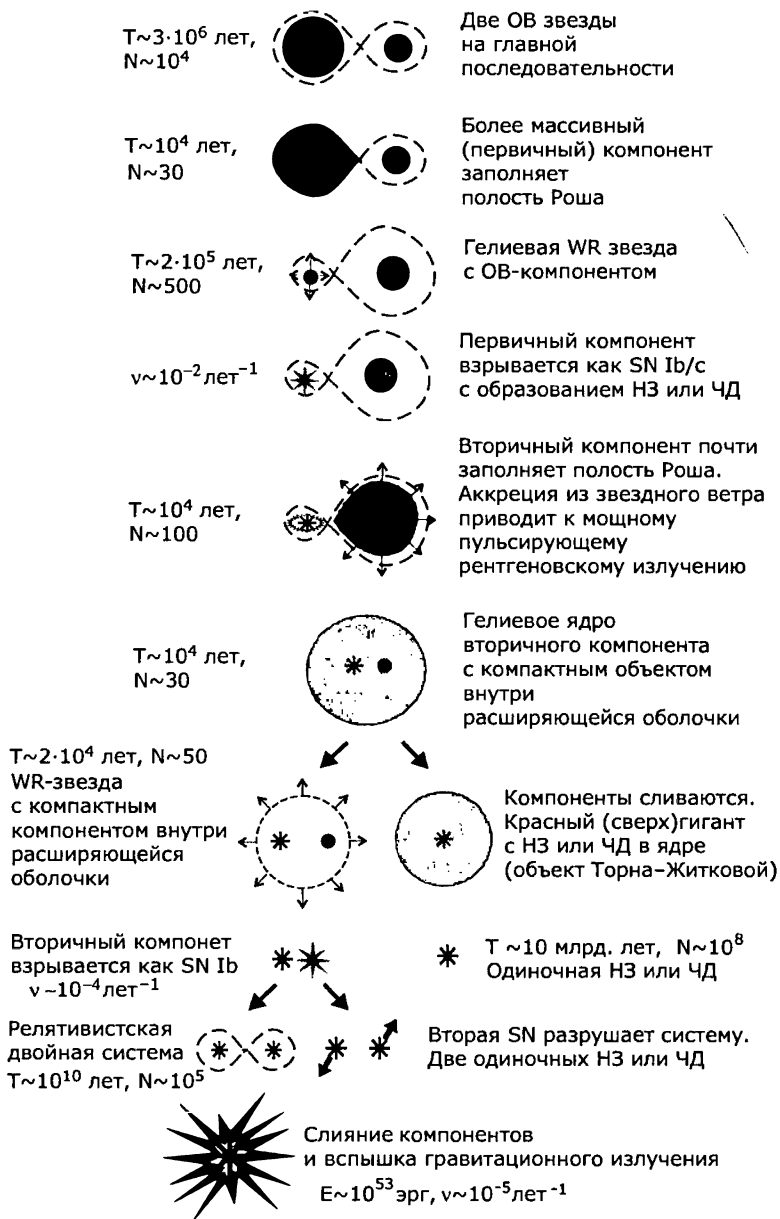


Рис. 7.3. Сценарий эволюции двух массивных звезд с образованием нейтронных звезд и черных дыр в ТДС (А. В. Тутуков и Л. Р. Юнгельсон, 1973). Указана характерная длительность стадии ( $T$ ) и оценка числа таких двойных в Галактике ( $N$ ) или частота катастрофических событий ( $\nu$ ).

ды возрастает так, что может превысить массу гелиевого остатка от первичного компонента (то есть может произойти т. н. «смена ролей» компонентов — теперь вторичный компонент более массивен и, значит, должен эволюционировать быстрее, чем раньше).

3. Длительность стадии WR+OB определяется временем эволюции звезды Вольфа–Райе (фактически, временем превращения гелия в углерод в ее ядре), которое составляет порядка  $10^5$  лет. Число таких ТДС в Галактике оценивается в несколько сотен.

4. В конце термоядерной эволюции C–O ядро звезды Вольфа–Райе коллапсирует с образованием нейтронной звезды. Коллапс ядра сопровождается взрывом сверхновой типа Ib (или Ic, если в оболочке осталось мало гелия). Частота таких сверхновых в нашей Галактике оценивается как  $\sim 1/100$  лет. При взрыве сверхновой возможен распад двойной системы на отдельные компоненты, если сброшенная при взрыве масса превышает половину полной массы двойной системы на момент взрыва или даже меньше, или если взрыв происходил несимметрично, и образовавшаяся нейтронная звезда получила в результате значительный импульс отдачи (англ. *kick*). Если же распада двойной системы и не произошло, то ее компоненты после взрыва должны двигаться по очень вытянутым орбитам. По закону сохранения импульса покоящийся до взрыва центр масс системы также начнет двигаться со скоростью, которая может достигать сотни км/с.

5. Уцелевшая при взрыве сверхновой двойная система состоит из быстровращающейся звезды класса Ве в паре с нейтронной звездой на эллиптической орбите. Быстрое вращение Ве-звезды может быть обусловлено аккрецией значительного количества вещества с большим моментом импульса на стадии обмена массами. Молодые нейтронные звезды, как правило, имеют сильные магнитные поля, и могут наблюдаться как радиопульсары (см. главу 10). При прохождении нейтронной звездой периастра орбиты создаются наиболее благоприятные условия для гравитационного захвата нейтронной звездой вещества, истекающего от Ве-звезды в виде звездного ветра. Темпы аккреции захваченного вещества на поверхность нейтронной звезды могут быть значительны, и если магнитное поле вблизи поверхности нейтронной звезды достаточно сильное, будет наблюдаться феномен рентгеновского пульсара (см. главу 10). Большинство наблюдаемых рентгеновских пульсаров в Галактике (несколько десятков) входит в состав таких ТДС с Ве-звездами.

Длительность этой стадии определяется оставшейся эволюцией Везвезды, и составляет несколько десятков тысяч лет.

6. Вторичный компонент постепенно расширяется, и нейтронная звезда оказывается внутри внешних слоев красного сверхгиганта. Вокруг ядра сверхгиганта и нейтронной звезды возникает общая оболочка, внутри которой нейтронная звезда быстро (за время порядка тысячи лет) движется по спирали по направлению к ядру. Орбитальный момент импульса при этом передается оболочке, что может привести к ее динамическому сбросу. В результате, после сброса общей оболочки в её центре остается горячее гелиевое ядро (может наблюдаться как звезда Вольфа–Райе) в паре с нейтронной звездой на очень тесной круговой орбите; расчеты не исключают и такого сценария, когда нейтронная звезда проникает внутрь ядра, а оболочка не успевает сброситься. В последнем случае образуется гипотетический объект Торна–Житковой — нейтронная звезда, окруженная плотной протяженной оболочкой. Эволюция таких объектов плохо изучена; по-видимому, конечный продукт их эволюции — массивная одиночная нейтронная звезда или черная дыра.

7. Вторая звезда Вольфа–Райе в конце своей термоядерной эволюции взрывается как SN Ib/c. В большинстве случаев двойная система после взрыва разрушается с образованием двух нейтронных звезд, быстро движущихся в пространстве в противоположных направлениях. Разрывом ТДС после второго взрыва SN можно объяснить высокие пространственные скорости радиопульсаров в Галактике (до нескольких сотен км/с). Уцелевшие же после второго взрыва SN пары нейтронных звезд наблюдаются как двойные радиопульсары. Их орбитальная эволюция целиком связана с излучением гравитационных волн (см. Приложение). Конечный продукт такой эволюции — слияние двух нейтронных звезд. Выделяемая при этом колоссальная энергия (порядка  $10^{53}$  эрг) почти вся переходит в импульс гравитационных волн. Расчеты показывают, что  $\sim 0.1\%$  от этой энергии при слиянии может перерабатываться в жесткое электромагнитное излучение. Возможно, этим объясняются короткие космические гамма-всплески, зарегистрированные как в галактиках со звездообразованием, так и в старых эллиптических галактиках. Частота слияний двойных нейтронных звезд в нашей Галактике оценивается как  $\sim 10^{-4}$ – $10^{-5}$  событий в год, т. е. примерно в тысячу раз реже, чем вспышки сверхновых. Ожидается, что сливающиеся двойные нейтронные звезды (и черные дыры, которые могут

образоваться из самых массивных звезд) — главные астрофизические источники гравитационных волн, регистрация которых наземными детекторами ожидается в ближайшем будущем.

Приведенный сценарий эволюции двойных звезд иллюстрирует их исключительную важность для объяснения происхождения и поведения многих классов астрофизических источников — от катаклизмических переменных и новых звезд до рентгеновских двойных систем и релятивистских пар с нейтронными звездами и черными дырами. Их изучение методами астрофизики позволяет получать информацию об экстремальном состоянии вещества, которое невозможно изучить в лаборатории.