

Таблица 1.1

ХАРАКТЕРНЫЕ ЧЕРТЫ КОМПАКТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Объект	Масса, M	Радиус, R	Средняя плотность, г/см^3	Поверхностный потенциал, GM/Rc^2
Солнце ¹⁾	M_{\odot}	R_{\odot}	1	10^{-6}
Белый карлик	$\leq M_{\odot}$	$\sim 10^{-2} R_{\odot}$	$\leq 10^7$	$\sim 10^{-4}$
Нейтронная звезда	$\sim (1 \div 3) M_{\odot}$	$\sim 10^{-5} R_{\odot}$	$\leq 10^{15}$	$\sim 10^{-1}$
Черная дыра	Произвольна	$2GM/c^2$	$\sim M/R^3$	~ 1

¹⁾ $M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{33}$ г, $R_{\odot} = 6,9599 \cdot 10^{10}$ см.

Черную дыру вообще никакой свет (и ничто другое) покинуть не может. Поэтому изолированная черная дыра будет выглядеть «черной» для любого наблюдателя. (Это утверждение нуждается в некоторых оговорках, если принимать во внимание квантовомеханические эффекты, которые мы обсудим в гл. 12.)

Нейтронные звезды получили свое название из-за того что они состоят в основном из нейтронов, образовавшихся вследствие взаимного уничтожения электронов и протонов в процессе обратного бета-распада. Так как плотность нейтронных звезд сравнима с ядерной, то фактически они представляют собой «гигантские ядра» (10^{57} барионов), удерживаемые собственным тяготением.

Белые карлики можно наблюдать непосредственно в оптические телескопы в течение длительного периода их охлаждения. Нейтронные звезды можно наблюдать как импульсные радиоисточники (пульсары) и косвенно как периодические источники рентгеновского излучения, возникающего в результате аккреции газа на нейтронную звезду (рентгеновские пульсары). Черные дыры можно наблюдать только косвенно, благодаря тому влиянию, которое они оказывают на свое окружение. Например, в некоторых условиях они могут проявлять себя как аperiодические источники рентгеновского излучения, возникающего вследствие аккреции газа. В последующих главах мы обсудим как эти, так и другие наблюдаемые явления, связанные с компактными звездами.

1.2. ОБРАЗОВАНИЕ КОМПАКТНЫХ ОБЪЕКТОВ

Компактные объекты представляют собой конечные продукты звездной эволюции. Считается, что основным фактором, определяющим, закончит ли звезда свою жизнь как белый карлик, нейтронная звезда или черная дыра, является ее масса.

Полагают, что белые карлики образуются из легких звезд с массами $M \leq 4M_{\odot}$. Как мы увидим в гл. 3, для белых карликов существует максимальное значение массы, которое составляет около $1,4M_{\odot}$. Звезды — предшественники белых карликов, — по всей видимости, выбрасывают некоторую часть своей массы в конце эволюции, образуя при этом планетарные туманности.

Нейтронные звезды и черные дыры, как полагают, происходят от более массивных звезд. Однако линия раздела между звездами, которые превращаются в нейтронные звезды и черные дыры, весьма неопределенна, так как конечные стадии эволюции массивных звезд мы понимаем довольно плохо. Для нейтронных звезд также существует максимальное значение массы (в диапазоне $1,4-3M_{\odot}$), но численные расчеты, в которых делаются попытки описать медленную стационарную потерю массы звездой или катастрофический выброс массы со взрывом сверхновой, находятся на весьма примитивном уровне. Таким образом, судьба звезды с массой $M \geq 4M_{\odot}$ в настоящее время нам неясна.

Табл. 1.2 отражает современный уровень нашего неведения относительно судьбы звезд в конце их эволюции. Некоторая дополнительная неопределенность вносится тем, что при вычислениях, лежащих в основе табл. 1.2, обычно предполагают, что для судьбы звезды другие факторы (например, магнитные поля, вращение, эффекты в двойных звездах) менее существенны, чем масса.

Полный гравитационный коллапс, ведущий к черной дыре, в принципе может произойти иначе, чем прямой коллапс далеко проэволюционировавшей массивной звезды. Например, поскольку существует определенное максимальное значение массы, выше которого белый карлик или нейтронная

Таблица 1.2

РЕЗУЛЬТАТ ЗВЕЗДНОЙ ЭВОЛЮЦИИ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МАССЫ [19]

Диапазон масс	Ожидаемый результат
$\leq M_{\odot}$	Время жизни превышает возраст Вселенной
$1 \leq M/M_{\odot} \leq (3+6)$	Белый карлик + планетарная туманность. Потеря массы
$(3+6) \leq M/M_{\odot} \leq (5+8)$	а) Возгорание углерода $^{12}\text{C} + ^{12}\text{C}$ 1) «кипение» — сжатие ядра, либо 2) взрыв и распыление ядра, либо 3) быстрое ядерное горение и (??) б) Пульсационная потеря массы и переход к белому карлику
$(5+8) \leq M/M_{\odot} \leq (60+100)$	Сжатие ядра + сверхновая — нейтронная звезда, иногда — черная дыра (?)
$(60+100) \leq M/M_{\odot}$	Неустойчивость

звезда не могут противостоять коллапсу, аккреция газа на любой из этих объектов (например, в двойной системе) может привести к образованию черной дыры.

По крайней мере еще два процесса образования черных дыр были предложены теоретиками (хотя и не подтверждены пока наблюдателями!). Первый представляет собой коллапс «сверхмассивной звезды», который приводит к образованию «сверхмассивной черной дыры». Мы более подробно обсудим этот процесс в гл. 17, а пока просто отметим, что такие сверхмассивные звезды оказываются неустойчивыми, когда их плотность достигает определенного критического значения, зависящего от величины массы. Соответственно когда сверхмассивная звезда в своем развитии доходит до этой плотности, испытывая лучистое охлаждение и сжатие, она может катастрофическим путем перейти в черную дыру. Таким может быть происхождение сверхмассивных черных дыр с массами $M/M_{\odot} \sim 10^6 - 10^9$, которые предлагаются для объяснения сильнейшей активности, наблюдаемой в квазарах и активных галактических ядрах.

Второй механизм представляет собой образование первичных черных дыр в ранней Вселенной вследствие возмущений в однородном поле фоновой плотности [265, 635]. Так как все черные «мини-дыры» с $M \leq 10^{15}$ г должны были излучить свою массу вследствие процесса Хокинга (см. разд. 12.8) за время меньшее, чем возраст Вселенной, то в настоящее время могут существовать только черные дыры с $M \geq 10^{15}$ г.

В принципе астрономические наблюдения могли бы подтвердить идею, что компактные объекты являются конечными продуктами эволюции звезд. Подсчитав число «погибших» звезд в нашей Галактике с момента начала звездообразования, мы можем оценить с той или иной степенью достоверности количество (и плотность) компактных объектов, имеющих в Галактике в настоящее время. Затем мы можем сравнить это число с наблюдениями.

Такие вычисления наиболее надежны в случае белых карликов. По белым карликам и планетарным туманностям имеются богатые данные наблюдений, поэтому могут быть проверены любые оценки их пространственной плотности, основанные на скорости гибели звезд.

Подобные же оценки для нейтронных звезд или черных дыр являются гораздо менее уверенными. Помимо большей неопределенности в диапазоне масс звезд — предшественников, имеется дополнительная сложность, связанная с тем, что нейтронные звезды и черные дыры можно наблюдать лишь в течение весьма короткого по астрономическим масштабам «активного» периода их существования, когда они проявляются в виде пульсаров или компактных рентгеновских источников.

Несмотря на эти неопределенности, имеющиеся данные уже позволяют сделать некоторые интересные заключения. Как мы увидим, компактные объекты так же широко распространены в Галактике, как и другие звезды. Наблюдаемая доля распределенной плотности общей массы, приходящаяся на белые карлики, составляет заметную часть плотности массы, заключенной в обычных звездах. Множество белых карликов и нейтронных звезд

(т.е. пульсаров) уже обнаружено, и имеется по крайней мере один хороший кандидат на роль черной дыры (Лебедь X-1)¹⁾.

В оставшейся части этой главы мы обсудим, как можно оценить частоту встречаемости компактных объектов в окрестности Солнца на основании статистики рождения и гибели звезд. Значения, которые мы приводим, неточны, однако при лучшем понимании поздних стадий звездной эволюции можно будет получить более надежные оценки. К счастью, большинство свойств компактных объектов не зависит от плохо известной истории их предшественников. В следующей главе мы приступим к изучению физических процессов, определяющих эти свойства²⁾.

1.3. СТАТИСТИКА РОЖДЕНИЯ И ГИБЕЛИ ЗВЕЗД

Количественное определение скорости рождения и гибели звезд выполняется следующим образом [26, 39, 408, 435].

Определим

$$\phi(M_v) \equiv \text{функция светимости звезд поля,} \quad (1.3.1)$$

т.е. число звезд *всех* типов (не только звезд главной последовательности) с данной абсолютной визуальной звездной величиной, содержащихся в кубическом парсеке галактического диска исключая звезды скоплений. [См. приложение А, в котором определены применяемые в астрономии единицы «абсолютная звездная величина» (мощность) и «парсек» (длина), а также кратко обсуждается эволюция звезд и описана главная последовательность.]

Далее определим

$$\phi_{MS}(\lg M) \equiv \text{современная функция масс (СФМ) звезд} \\ \text{главной последовательности в окрестности Солнца,} \quad (1.3.2)$$

т.е. число звезд главной последовательности в единичном логарифмическом интервале массы на квадратный парсек. Заметим, что все массы в этом разделе [такие, как M в равенстве (1.3.2)] выражаются в единицах солнечных масс и что все логарифмы — десятичные. Величины ϕ_{MS} и $\phi(M_v)$ связаны соотношением:

$$\phi_{MS}(\lg M) = \phi(M_v) \left| \frac{dM_v}{d \lg M} \right| 2H(M_v) f_{MS}(M_v). \quad (1.3.3)$$

¹⁾ Другой объект — кандидат в черные дыры — открыт в Большом Магеллановом облаке. — *Прим. ред.*

²⁾ Возможно, при первом чтении многие читатели захотят пропустить относящиеся к астрономии технические детали в оставшейся части этой главы. Тем не менее, прежде чем двигаться дальше, им следует взглянуть на табл. 1.4, имея, однако, в виду, что приведенные там данные содержат большие неопределенности.