

слоевом источнике сопровождается сжатием и частичным вырождением нижележащих слоев гелия, что приводит к ускорению термоядерного горения в гелиевом слоевом источнике на границе с вырожденным C–O-ядром. При этом слоевые источники расширяются, температура и плотность в них падает, и темп генерации энергии уменьшается. Как следствие, слои начинают сжиматься, и процесс повторяется. Такое неустойчивое горение приводит к периодической подкачке энергии во внешнюю оболочку и, в конечном счете, к ее интенсивному истечению с темпом потери массы, достигающим до $10^{-4} M_{\odot}/\text{год}$. Яркие представители звезд на асимптотической ветви гигантов — долгопериодические неправильные переменные типа Миры Кита. На этой стадии фактически происходит формирование планетарной туманности вокруг горячего вырожденного ядра звезды — будущего белого карлика.

6.6. Эволюция одиночных звезд после главной последовательности: краткий итог

Приведем краткую сводку результатов расчетов эволюции одиночных звезд солнечного химсостава, имеющих различные массы на главной последовательности. Следует иметь в виду некоторую условность приводимых интервалов масс, зависящих от выбранных параметров, и неопределенностей в расчетах звездной эволюции (аккуратный учет конвекции в звездных недрах, вращение и т. д.).

I. $M < 0.08 M_{\odot}$. Эта масса слишком мала для начала термоядерного горения водорода. В центре такой «звезды» (иногда применяют термин «коричневый карлик») существенны эффекты вырождения электронов и кулоновские взаимодействия, и объект представляет собой промежуточный случай между планетами и звездами.

II. $0.08 M_{\odot} < M < 0.5 M_{\odot}$. Звезды с массой $< 0.5 M_{\odot}$ на главной последовательности полностью конвективны, что предотвращает загорание слоевого источника после выгорания водорода в ядре. Такие звезды не становятся красными гигантами, и от главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга–Рессела они перемещаются налево, сжимаясь и нагреваясь. Температура в гелиевом ядре остается ниже температуры снятия электронного вырождения, поэтому в конечном счете из таких звезд должны были бы образовываться вырожденные гелиевые белые карлики с массой $\sim 0.5 M_{\odot}$. В реальности время горения водорода у одиночных звезд с массой $> 0.9 M_{\odot}$

превышает возраст Вселенной, поэтому из одиночных звезд гелиевые белые карлики образоваться не успевают. Однако если мало-массивная звезда является компонентом двойной системы, возможно уменьшение ее массы, и обнаженное вырожденное гелиевое ядро с массой около половины солнечной при остывании превращается в гелиевый белый карлик.

III. $0.5 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 2.5 M_{\odot}$. После горения водорода образуется вырожденное гелиевое ядро с массой около $0.5 M_{\odot}$. На стадии красного гиганта горит водородный слоевой источник. Начало горения гелия и его превращение в углерод происходит в вырожденных условиях и поэтому сопровождается кратковременным энерговыделением (гелиевая вспышка). После гелиевой вспышки звезда на диаграмме ГР перемещается влево примерно с постоянной светимостью (т. н. горизонтальная ветвь). Оболочка звезды сбрасывается и постепенно рассеивается, и конечным продуктом эволюции является остывающий углеродно-кислородный белый карлик с массой около $0.5 M_{\odot}$.

IV. $2.5 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 8 M_{\odot}$. После горения водорода гелиевое ядро невырождено, и после стадии красного гиганта (водородный слоевой источник) происходит невырожденное горение гелия с образованием углерода и кислорода. В результате, внутри красного гиганта образуется вырожденное (C–O)-ядро с массой $< 1.2 M_{\odot}$. Из-за тепловых неустойчивостей оболочка сбрасывается на стадии асимптотической ветви гигантов с образованием планетарной туманности, светящейся за счет УФ излучения горячего ($T \approx 10^5$ K) ядра, которое постепенно остывает и превращается в сравнительно холодный (C–O)-белый карлик. Средняя масса таких белых карликов $0.6–0.7 M_{\odot}$.

V. $8 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 10–12 M_{\odot}$. В этом узком диапазоне масс термоядерное горение доходит до смеси кислорода, неона и магния. Дальнейшие термоядерные реакции не происходят, так как оболочка звезды рассеивается в виде планетарной туманности. Результат эволюции после сброса оболочки – (O–Ne–Mg) белый карлик с массой вблизи чандрасекаровского предела ($\sim 1.2 M_{\odot}$).

VI. $10–12 M_{\odot} \lesssim M \lesssim 30–40 M_{\odot}$. Термоядерная эволюция в ядре происходит при невырожденных условиях вплоть до образования элементов железного пика (Fe, Co, Ni). Ядро звезды из этих элементов с массой $1.5–2 M_{\odot}$ подвержено ряду неустойчивостей (см. ниже) и коллапсирует с образованием нейтронной звезды. Процесс

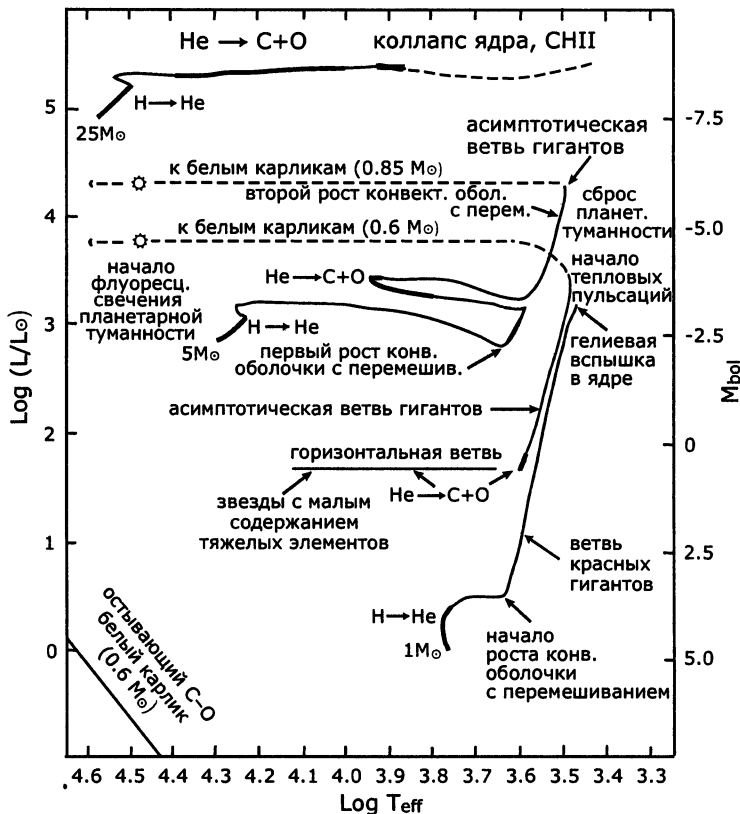


Рис. 6.4. Эволюционные треки звезд различных масс на диаграмме Герцшпрунга–Рессела. По расчетам I. Iben.

сопровождается вспышкой сверхновой типа II (если сохранилась протяженная водородная оболочка) или Ib/c (коллапс ядра звезды Вольфа-Райе). Сбрасываемая оболочка взаимодействует с межзвездной средой и в течение нескольких десятков тысяч лет существует в виде светящейся туманности — остатка сверхновой.

VII. $M \gtrsim 30\text{--}40 M_{\odot}$. Возможно, звезды с такими массами коллапсируют с образованием черной дыры с массой около $10 M_{\odot}$. Пока нет надежных теоретических расчетов этого процесса, хотя данные астрономических наблюдений о существовании черных дыр звездных масс выглядят убедительными.

Эволюционные треки на диаграмме ГР приведены на рис. 6.4.