

Эволюция и эволюционные изменения внутреннего строения звезд

Приложение: Основные сведения о теории внутреннего строения и эволюции звезд.

Оглавление:

1. Что такое эволюция звезд
2. Звезды на начальной главной последовательности
3. Звезды на главной последовательности (горение водорода в ядре)
4. Звезды на горизонтальной ветви субгигантов (горение слоевого водородного источника)
5. Звезды на ветвях гигантов и сверхгигантов
Красные гиганты (горение слоевого водородного, источника)
Горизонтальная ветвь (горение гелия в ядре)
Сверхгиганты (горение углерода в ядре)
6. Конец звезд

Предметный указатель

Литература к разделу “Эволюция и эволюционные изменения внутреннего строения звезд”

Основные сведения о теории внутреннего строения и эволюции звезд

Что такое эволюция звезд

Эволюция звезды это изменение со временем ее физических характеристик (размеров, температуры, светимости) и внутреннего строения, вызванное изменениями химического состава из-за протекания ядерных реакций в звезде. Обычно эволюцию звезд иллюстрируют путем построения зависимости светимости звезды L от эффективной температуры T_{eff} в координатах $\lg L, \lg T_{eff}$. Кривая в этих координатах называется эволюционным треком звезды на диаграмме Гецшпрунга-Рессела (в дальнейшем диаграмма Г-Р).

Эволюционное поведение звезды зависит от массы и в меньшей степени от начального химического состава звезды. Разные сценарии эволюционных изменений реализуются для звезд разных масс.

Согласно современным представлениям звезды формируются в течение нескольких миллионов лет из межзвездных облаков. В процессе формирования звезды полностью перемешиваются конвекцией, и следовательно являются однородными по химическому составу (в представленном комплексе программ STEV задача расчета протозвезд не запрограммирована).

Началом эволюции считается начало ядерных реакций в ядре звезды. В результате начала ядерных реакций превращения водорода в гелий меняется внутренне распределение хим. состава звезды, т.е. при модельных расчетах учитывается изменение химического состава из-за ядерных реакций на каждом временном шаге.

Из-за изменения хим. состава меняется молекулярный вес, плотность, и следовательно уравнение состояния, пересчитывая которое мы меняем всю внутреннюю структуру звезды. Двигаясь малыми шагами в этом направлении, возможно рассчитать поведение звезды по мере изменения химического состава, обусловленного ядерными реакциями.

Будем иллюстрировать поведение звезд малых и средних масс треками звезд на диаграмме Г-Р, это соответственно рисунки 1 и 2.

Звезды на начальной главной последовательности

Определим звезды в начале нулевой главной последовательности (НГП), как звезды, в которых начались ядерные реакции, а именно горение водорода и переработка его в гелий. Момент загорания водорода считается нулевым возрастом звезды на главной последовательности. Звезды разных масс образуют нулевую главную последовательность НГП (или ZAMS что расшифровывается как Zero Age Main Sequence), а модели звезд нулевого возраста называются ZAMS модели. Из-за предыдущего конвективного перемешивания на стадии протозвезды (до начала ядерных реакций в ядре) звезда считается химически однородной (на рис. 1-2 это точки 1).

Звезды НГП сильно отличаются друг от друга по внутреннему строению, в основном в зависимости от массы, но также и от начального химического состава. В самых общих чертах звезды малых масс и средних масс примерно до $1M_{\odot}$ имеют лучистое ядро и конвективную оболочку. В их ядрах превалирует энерговыделение в р-р цепочке. Звезды

больших масс имеют только конвективное ядро. В ядре превалирует энерговыделение в CNO цепочке. Очень малая часть звезд по массе имеет две конвективные зоны: конвективное ядро, и конвективную оболочку, это звезды примерно от $1M_{\odot}$ до $1.25M_{\odot}$, (наличие двух конвективных зон в звезде также зависит и от химического состава). На рис.3 приведена зависимость радиуса звезд НГП от массы, виден перелом, где происходит изменение лучистого ядра на конвективное.

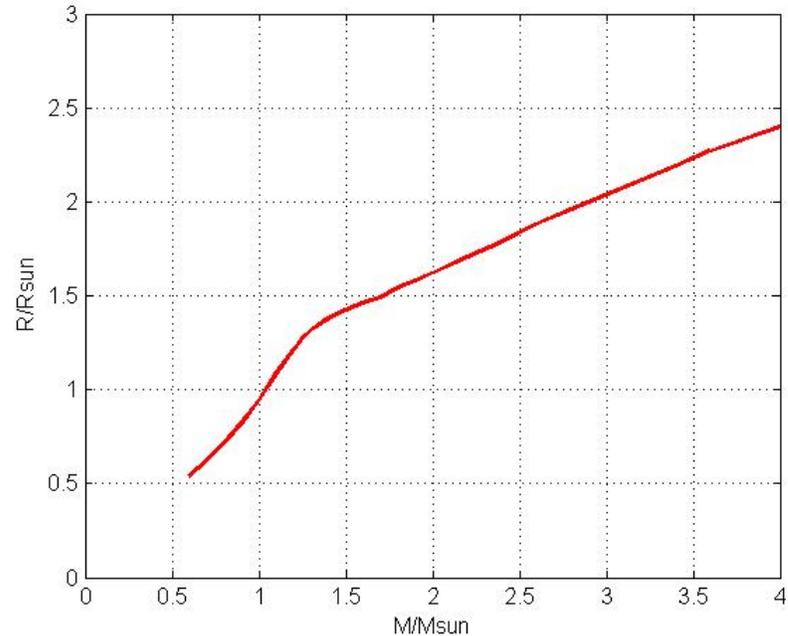


Рис.3. Зависимость масса-радиус для звезд НГП, рассчитанных в задаче STEV.

Звезды на главной последовательности

Звезда считается живущей на главной последовательности (ГП) пока у нее выгорает водород в ядре. На рис.1-2 это точки **1-4**. На врезках (а) обоих рис. показано изменение содержания водорода в звезде в зависимости от массовой координаты для точек **1-4**. Основное различие для этих звезд состоит в разных ядерных циклах: в звезде $5M_{\odot}$ основную роль играет CNO цикл, а для звезды $1M_{\odot}$ - p-p цепочка. Цикл CNO более энерговыделяющий и дает большую температуру в ядре, из-за чего в этих звездах и развивается конвективное ядро. По мере переработки водорода в гелий вещество ядра становится более прозрачным и размеры конвективного ядра уменьшаются.

Существование на ГП очень стабильная фаза жизни звезды. За время жизни на ГП очень медленно звезда становится ярче, и больше, при этом поверхностная температура звезды меняется очень незначительно в сторону уменьшения, эти изменения занимают миллиарды лет.

Звезды на ГП обладают рядом общих свойств в зависимости от массы. Для звезд главной последовательности существует аппроксимационное соотношение, известное как зависимость **масса-светимость**. Это соотношение было выведено из наблюдательного определения масс и светимостей звезд главной последовательности, но оно также подтверждается расчетами звездных моделей для звезд ГП. Светимость звезды грубо пропорциональна ее массе в степени 3.5 или 4:

$$L \sim M^{3.5-4}$$

Для наиболее массивных звезд $L \sim M$

На рисунке 4 приведена зависимость **масса-светимость** для звезд, рассчитанных в задаче STEV.

Для звезд ГП, существует также эмпирическая зависимость радиуса от массы **масса-радиус**, которая также приведена на рис.4.

$$R \sim M^k \text{ где } 0 < k < 1$$

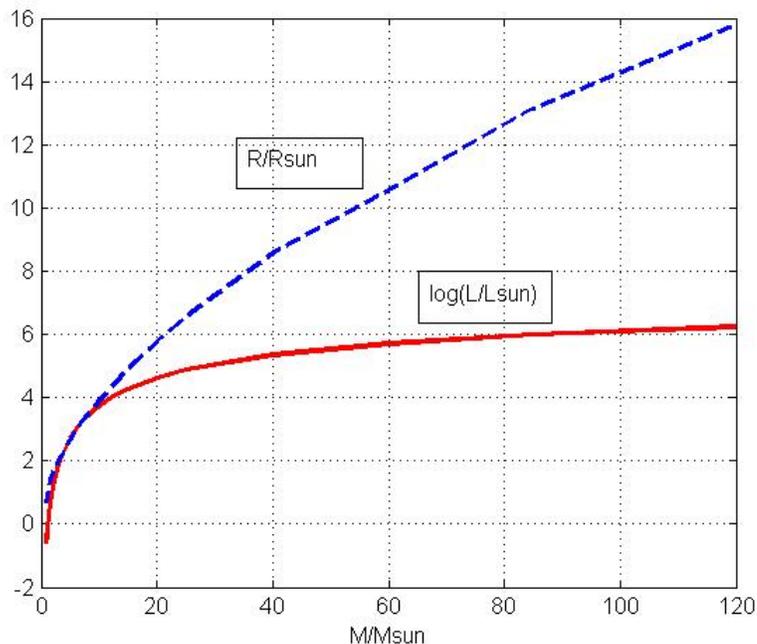


Рис. 4. Зависимость масса-светимость и масса-радиус для звезд НГП, рассчитанных в STEV.

Для общей ориентации во внутреннем строении звезд на рис.5 приведено внутреннее строение звезд разных масс на НГП согласно работе Kippenhahn & Weigert 1990.

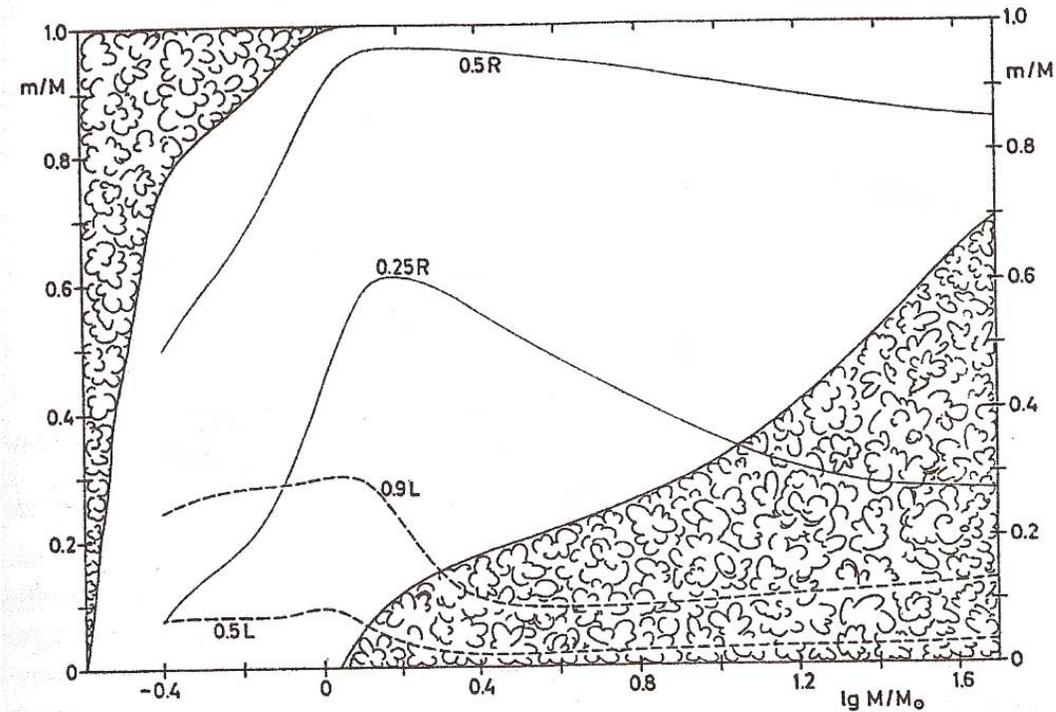


Рис.5. Внутреннее строение звезд на НГП. Массовая координата от центра звезды до поверхности в зависимости от массы звезд. “Облачные” места обозначают наличие конвекции внутри моделей. Две сплошные линии показывают массовую координату, где текущий радиус r составляет $\frac{1}{2}$ и $\frac{1}{4}$ от полного радиуса звезды R . Пунктирные кривые показывают массовую координату внутри которой, производится 50 процентов и 90 процентов от общей светимости звезды L . (Kippenhahn & Weigert 1990).

Время жизни звезды на ГП зависит от массы - чем больше звезда, тем быстрее она живет, быстрее сжигает свое ядерное топливо. Временем жизни звезд на главной последовательности будем считать время, пока не выгорит практически весь водород в центре ядра.

Время жизни звезд на ГП определяется запасами водорода, который превращается в гелий. Примерно 10% всего водорода звезды, перерабатывается в гелий (ядерные реакции могут идти только в ядре звезды). Учитывая дефицит масс, превращающийся в энергию и выход энергии на один грамм ядерного горения (из 4 протонов образуется одно ядро гелия $\Delta E = (4p - m_{He})c^2 = 28.3 \text{ МэВ}$), а также то, что за время жизни звезды излученная энергия, равна произведению светимости на время $E = Lt$, получаем формулу:

$$t \approx 0.1 \times 0.7 \times 6 \cdot 10^{18} \left(\frac{M}{L} \right) \text{сек}$$

Коэффициент 0.7 учитывает массовую долю водорода в звезде.

В солнечных единицах и после преобразования в годы получаем:

$$t \approx 10^{10} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right) \cdot \left(\frac{L}{L_{\odot}} \right)^{-1} \text{ годы}$$

С учетом закона масса-светимость

$$t \approx 10^{10} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-2.5} \text{ годы}$$

Таким образом, звезда массивней Солнца в 10 раз будет жить на ГП в 300 раз меньше.

Звезды на горизонтальной ветви субгигантов

Когда практически весь водород в ядре оказывается выгоревшим звезды сходят с главной последовательности. Для звезд имеющих лучистое ядро ($M_* \leq 1.2M_{\odot}$) этот сход происходит плавно (точки **4-5** рис. 1), а для звезд с конвективным ядром ($M_* \geq 1.2M_{\odot}$), сначала происходит общее гравитационное сжатие звезды, а потом попадание на ветвь субгигантов (точки **4-5** рис. 2). Ядро звезды в это время состоит почти полностью из гелия с небольшой примесью тяжелых элементов. Физическое состояние ядра также различается для звезд разных масс, если в звездах с $M_* \leq 3M_{\odot}$ ядро состоит из вырожденного газа, то для звезд с $M_* \geq 3M_{\odot}$ ядро невырождено (см. раздел уравнение состояния).

$\log(L)$

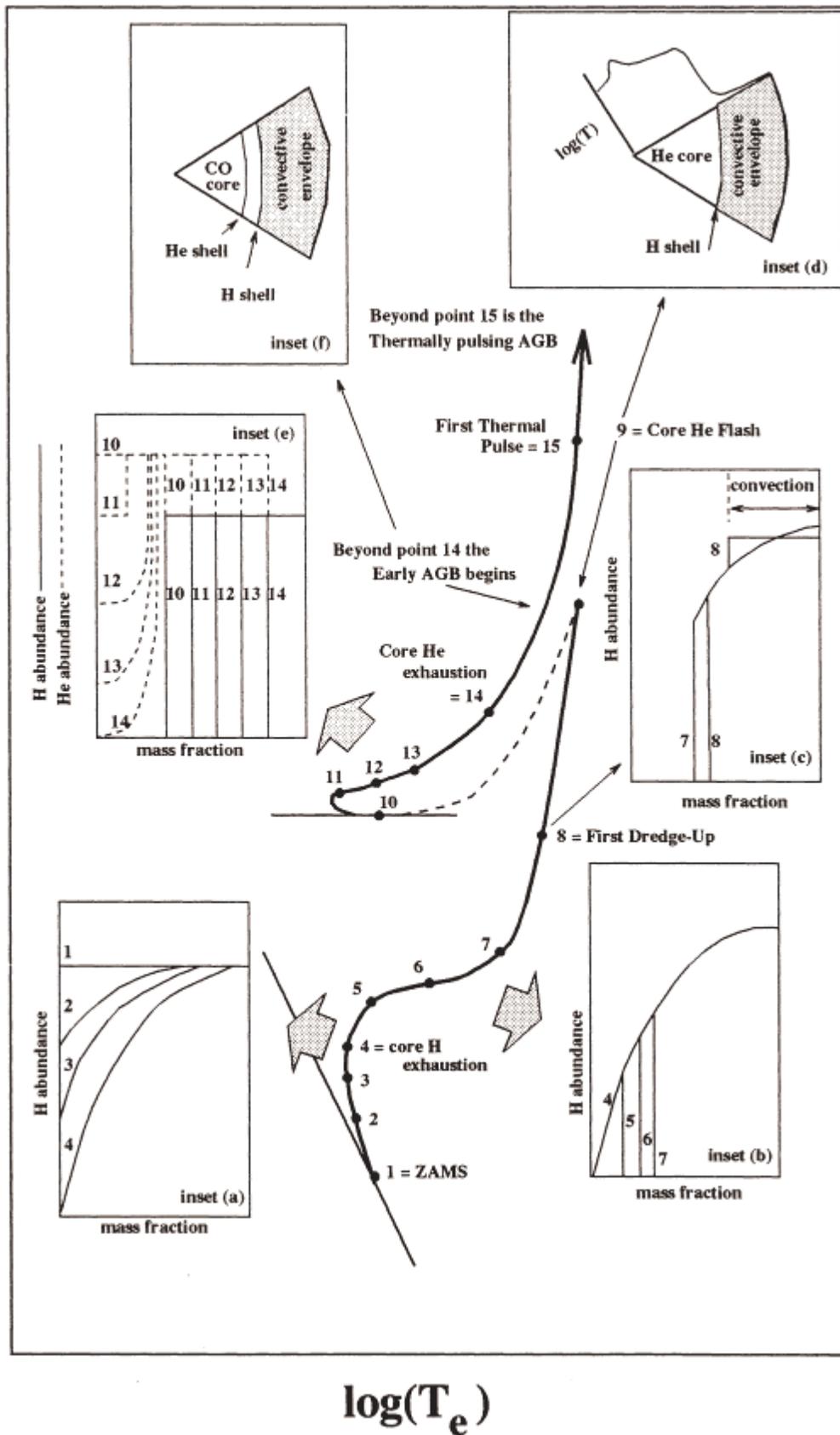


Рис.1. Базовый эволюционный трек звезды с $1M_{\odot}$.

- (1) - ZAMS (Zero Age Main Sequence) модель нулевого возраста на ГП
- (1-4) - горение водорода в ядре (главная последовательность)
- (5-7) - горение водорода в слоевом источнике (провал Герцшпрунга)
- (8-9) - образование красного гиганта (ветвь красных гигантов)
- (8) - расширение внешней конвективной оболочки (до слоев, где идут ядерные реакции, перемешивание, изменение поверхностного хим. состава ("first dredge-up")).
- (9) - гелиевая вспышка (загорается гелий в вырожденном ядре)
- (9-10) - исчезновение конвективной оболочки
- (10) - горизонтальная ветвь
- (10 - 13) - спокойное горение гелия в ядре и водорода в слоевом источнике
- (14) - истощение гелия в ядре
- (14-15) - вторичное расширение внешней конвективной оболочки ("second dredge-up"), красный сверхгигант, ранняя асимптотическая ветвь сверхгигантов (early-AGB)
- (15) - начало тепловой неустойчивости сверхгиганта (тепловые вспышки в слоевом гелиевом источнике), пульсации
- далее постепенная потеря массы, и в конце концов сброс оболочки, возникновение планетарной туманности и образование вырожденного углеродно-кислородного белого карлика из обнажившегося ядра с массой $0.6M_{\odot}$.

В любом случае температура ядра слишком низкая, для немедленного загорания в нем гелия (требуется температура примерно 10^8 К). Однако температура вокруг ядра все еще достаточна, для загорания водорода в окружающем ядро тонком слое водорода. Для звезд с массами $M_* \leq 1.2M_{\odot}$ слоевой источник загорается сразу, тогда как для $M_* \geq 1.2M_{\odot}$ происходит сначала гравитационное сжатие всей звезды (4-5 на рис. 2), после чего температура, как и в первом случае, оказывается достаточной для поджигания слоевого водородного источника. При этом масса инертного гелиевого ядра начинает возрастать за счет продуктов горения водорода. Эта стадия жизни звезды называется стадией горения водородного слоевого источника. Слоевой источник постепенно расширяется, захватывая все более внешние слои и приближается к поверхности звезды. На диаграмме Г-Р звезды уходят вправо с ГП, в красную сторону, образуя ветвь субгигантов. Эта стадия занимает ничтожно мало времени по сравнению с жизнью на ГП, и поэтому звезд на диаграмме Г-Р здесь очень мало, это место называют провалом Герцшпрунга (для звезды с массой Солнца время жизни на ГП примерно 10^{10} лет, а время прохождения провала Герцшпрунга примерно 10^8 лет). На рис. 1-2 это точки 5-7. На врезках (b) рис. 1 и 2 показано поведение содержания водорода на этих стадиях.

Между тем поверхностная температура звезды также продолжает падать и в какой-то момент внешние слои звезды перестают быть прозрачными для излучения, и в них развивается конвекция. Конвективная зона постоянно расширяется и захватывает все более глубокие слои звезды (в массовых координатах). В какой-то мере звезда становится похожа на протозвезду и ее дальнейший трек напоминает трек Хаяши, только она движется в обратном направлении, поэтому точку 7 называют предел Хаяши. После предела Хаяши звезда начинает бурно раздуваться, с одновременным возрастанием светимости. Звезда оказывается на ветви гигантов.

Примером звезды солнечного типа, находящейся на ветви субгигантов считается η Волопаса (η Boo) Муфрид.

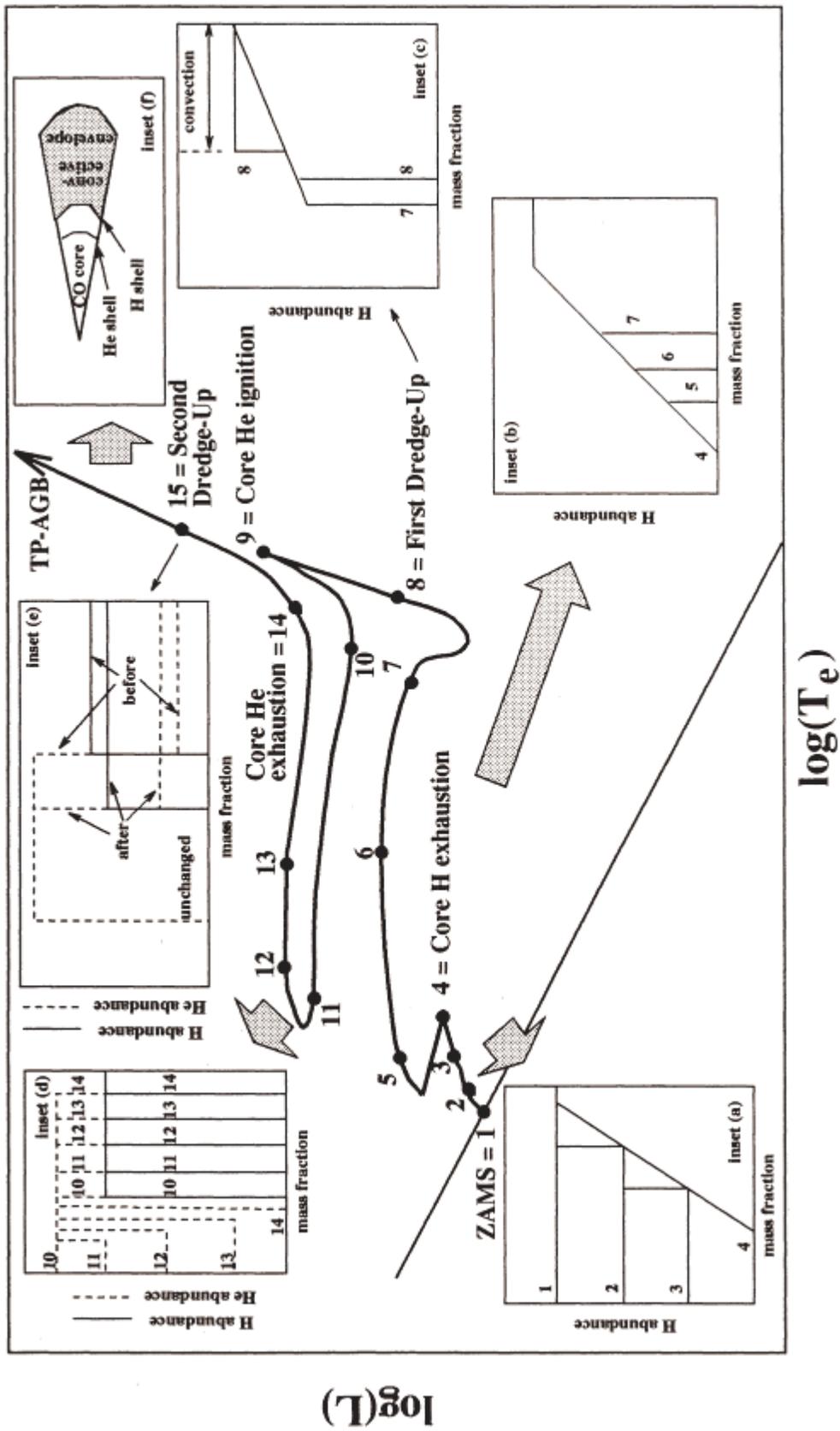


Рис. 2. Базовый эволюционный трек звезды с массой $5M_{\odot}$.

- (1) - ZAMS (Zero Age Main Sequence) модель нулевого возраста на ГП
- (1-3) - горение водорода в ядре (главная последовательность)
- (4) - истощение водорода в ядре
- (4-5) - общее гравитационное сжатие звезды
- (5-6) - возгорание водорода в слоевом источнике
- (6-7) - горение водорода в толстом слое
- (5-7) - провал Герцшпрунга
- (8) - возникновение обширной конвективной оболочки ("first dredge-up").
- (7-9) - фаза красного гиганта (ветвь красных гигантов)
- (9) - загорание гелия (спокойное)
- (9-10) - исчезновение конвективной оболочки
- (10-11) - горизонтальная ветвь
- (9-13) - горение гелия в ядре и водорода в слоевом источнике
- (14) - истощение гелия
- (15) - вторичное расширение внешней конвективной оболочки ("second dredge-up"), звезда переходит на асимптотическую ветвь сверхгигантов с тепловыми пульсациями в слоевом гелиевом источнике (TP-AGB). Красный сверхгигант, сжатие углеродного ядра, горение гелия в слоевом источнике и водорода в слоевом источнике
- далее постепенный сброс оболочки, возникновение планетарной туманности и образование белого карлика из обнажившегося ядра с массой $0.85M_{\odot}$.

Красные гиганты

По внутреннему строению красные гиганты ничем не отличаются от субгигантов - это звезды, в ядре которых уже закончилось горение водорода. Ядро красных гигантов состоит из вырожденного или нет газа, в зависимости от массы звезды. В звезде продолжают те же процессы, которые уже обозначились на ветви субгигантов, а именно гелиевое ядро сжимается и нагревается, а оболочка расширяется и охлаждается¹.

На ветви гигантов резко возрастает роль конвекции, до точки **7** (на рис. 1-2), вырабатываемая энергия передавалась наружу излучением, но температура наружных слоев звезды упала настолько, что большая ее часть становится непрозрачной для излучения и наступает время конвекции. Поверхностная конвективная зона расширяется вниз, до слоев, где шли ядерные реакции и при глубоком перемешивании вещества поверхностный химический состав изменяется, обогащаясь элементами ядерного горения. Иллюстрация такого процесса изображена на врезках (с) рис. 1 и 2. Этот процесс перемешивания конвекцией внешних слоев с внутренними слоями (подвергшимися ядерному преобразованию элементов) из-за расширения вниз конвективной зоны называется "первое вычерпывание" или по-английски "first dredge-up" (точка **8** рис. 1-2).

На ветви гигантов светимость звезды резко возрастает, а поверхностная температура остается почти неизменной. На диаграмме Г-Р звезда резко движется вверх и немного вправо.

Во время расширения оболочки ядро продолжает сжиматься и его температура растет. Когда температура ядра достигает примерно $10^8 K$, а плотность $\sim 10^4 \text{ г/см}^3$, гелиевое ядро загорается. Для звезд с массами меньше $3M_{\odot}$ загорание гелия происходит взрывообразно (так называемая гелиевая вспышка см. Приложение), вырождение газа в ядре снимается и начинается переработка гелий в углерод. Для звезд с массами больше $3M_{\odot}$ газ в ядре невырожден и процесс загорания гелия происходит спокойно. (см. главу ядерное горение: тройная гелиевая реакция или тройной альфа-процесс). После этого на диаграмме Г-Р звезды уходят с ветви красных гигантов и перемещаются на горизонтальную ветвь.

¹ В теории эволюции звезд существует эмпирическое правило: когда ядро сжимается, оболочка расширяется, и наоборот - ядро расширяется оболочка сжимается.

На рис. 1 момент гелиевой вспышки это точка 9. На рис. 2 спокойное загорание гелия также точка 9 (отметим, что гелий необязательно загорается именно в верхней точке кривой, возможно загорание и раньше, в зависимости от массы и хим. состава звезды).

Схематическое изображение красного гиганта показано на рис. 6.

Строение красного гиганта

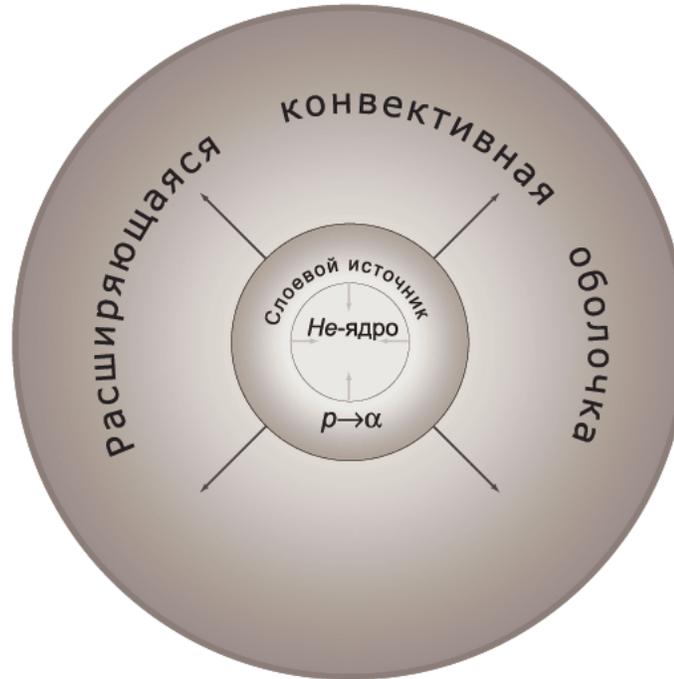


Рис..6. Строение красного гиганта. Красный гигант состоит из гелиевого ядра, в котором не происходят ядерные реакции (ядро сжимается), слоевого источника, в котором горит водород, и обширной расширяющейся конвективной оболочки.

Следует отметить, что реальные красные гиганты обладают очень сильной потерей массы со звездным ветром. Это подтверждено наблюдениями. В задаче STEV потеря массы учтена параметром η в меню ZAMS, параметр η изменяется в пределах от 1 до 0.

Пример красных гигантов - α Волопаса (α Boo) - Арктур ($130L_{\odot}, 28R_{\odot}$) и α Тельца (α Tau) - Альдебаран ($190L_{\odot}, 25R_{\odot}$).

Сноска: Нейтринные потери из ядра мало массивной звезды приводят к тому, что температурный максимум находится не в самом центре ядра, это показано на врезке (d) рис. 1.

Горизонтальная ветвь

После загорания гелия в ядре звезды (или при гелиевой вспышке или спокойно), слоевой водородный источник временно отключается, звезда теряет светимость и скатывается на

горизонтальную ветвь на диаграмме Г-Р. На горизонтальной ветви светимость остается практически неизменной. Для одинакового хим. состава, все звезды на горизонтальной ветви считаются имеющими одинаковую массу гелиевого ядра, но разную массу оболочек (V.Dorman, 1995). Более массивные звезды имеют меньшую поверхностную температуру и располагаются справа, а менее массивные - слева горизонтальной ветви. Между точками **10-14** на рис. 1-2 у звезды имеется горячее гелиевое ядро и водородный слоевой источник. Горение гелия увеличивает долю углерода C и кислорода O. (распределение содержания водорода и гелия внутри звезды показано на врезке **e** рис. 1 и врезке **d** рис. 2).

Отметим, что на горизонтальной ветви находятся два важных класса переменных звезд: цефеиды (это звезды средних масс) и звезды RR Lyra (звезды малых масс). На рис.7 показана полоса нестабильности на фоне теоретических треков, видно, что звезды на стадии горения гелия в ядре ее пересекают (для $7M_{\odot}$ даже дважды). На рис.:8 показаны классы нестабильных звезд на диаграмме Г-Р.

Мы не можем с уверенностью утверждать, что все звезды на горизонтальной ветви пройдут стадию или цефеид или звезд RR Lyra, но то, что и цефеиды и звезды RR Lyra являются звездами горизонтальной ветви сейчас считается общепризнанным. (В задаче STEV превращение звезд в переменные не запрограммировано).

Между точками **10-14** на рис. 1-2 у звезды формируется углеродное ядро.

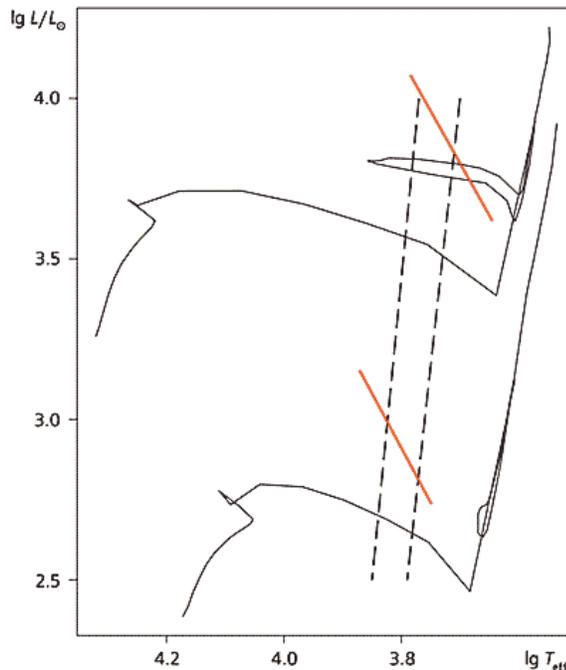


Рис.7. Полоса нестабильности звезд на фоне двух теоретических треков для масс звезд $4M_{\odot}$ и $7M_{\odot}$ (Бердников, Расторгуев и Самусь, 2006).

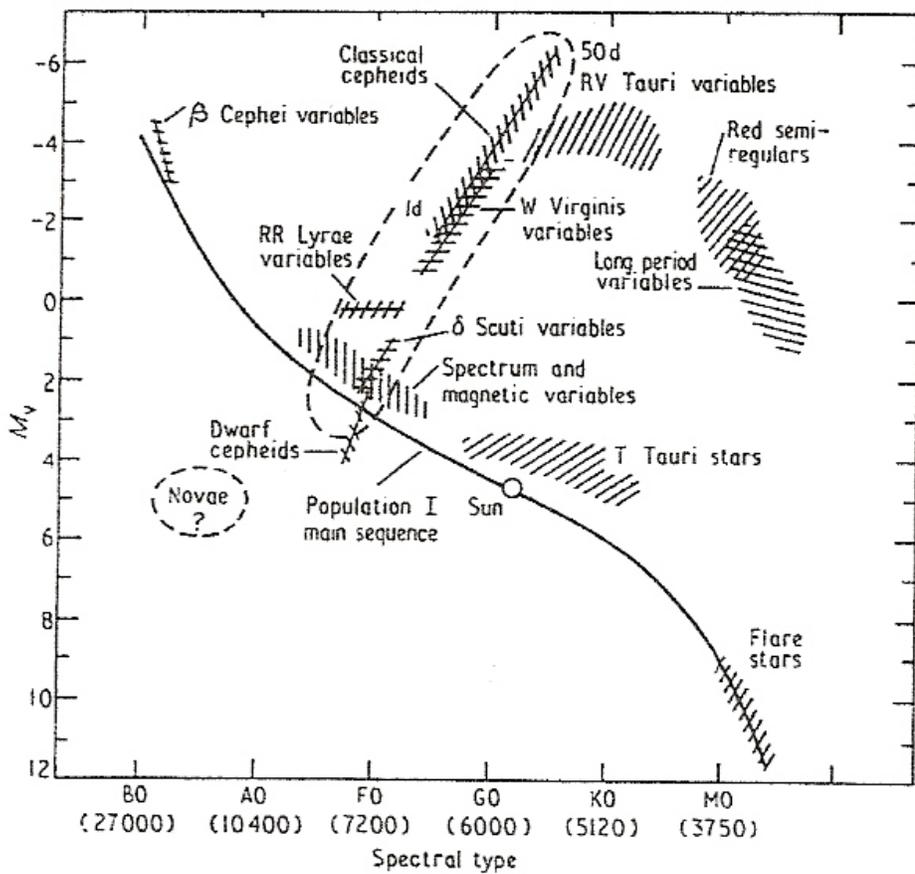


Рис.8. Положение некоторых групп нестабильных звезд на диаграмме Г-Р.,(Cox, 1974).

Сверхгиганты

Когда в ядре звезды выгорает весь гелий (точка **14**), звезда переходит на асимптотическую ветвь гигантов и становится красным или желтым сверхгигантом (или AGB звездой от английского asymptotic giant branch star, такое название было дано из-за поведения ее эволюционного трека на диаграмме Г-Р, на рис. это точки **14-15**). На этой стадии у сверхгиганта имеется вырожденное инертное углеродное ядро, в котором не идут ядерные реакции, оно окружено горячей гелиевой оболочкой, а она в свою очередь окружена горячей водородной оболочкой. Имеется глубокая конвективная зона. Эта структура показана на врезках (f) рис. 1 и 2, а также это точки **Н К** на рис. 9. Ситуация в какой то мере напоминает историю со звездой на ветви гигантов, когда она имела инертное гелиевое ядро, окруженное горячей водородной оболочкой. Гелиевый слоевой источник вообще то нестабилен, в горячей гелиевой оболочке наблюдаются тепловые вспышки (в задаче STEV не запрограммировано). Опять, как и на ветви гигантов происходит сильное

возрастание конвекции, опускание конвективной оболочки вниз и так называемое второе вычерпывание (second dredge-up). На рис. 2 это точка **15**, на рис. 7 – это точка **К**.

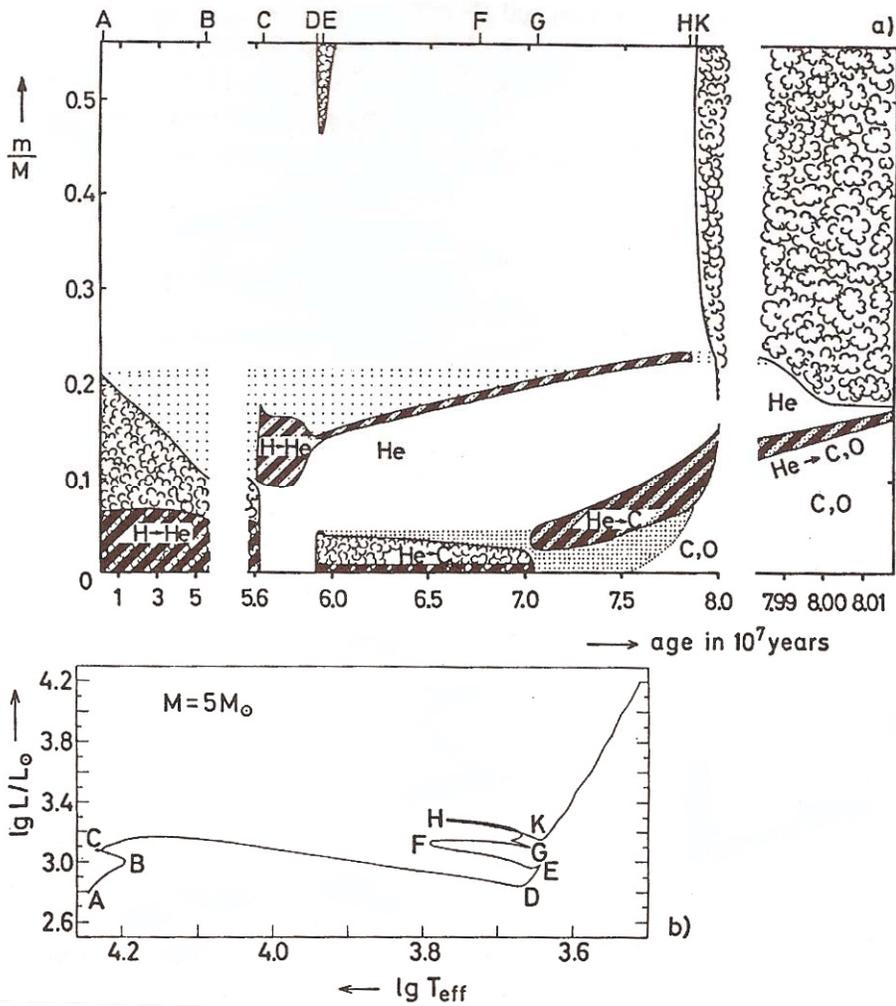


Рис.9. На рис. (a) показана эволюция внутреннего строения звезды с массой $5M_{\odot}$. По оси абсцисс отложено время жизни звезды (шкала неравномерная по времени, для того чтобы можно было разрешить участки с быстрым временем эволюции, перемена шкалы происходит в точках $5.5 \cdot 10^7$ и $8 \cdot 10^7$ лет). По оси ординат представлена внутренняя структура звезды в массовых координатах (включено только 60 процентов звезды по массе). “Облачные” участки представляют собой конвективные зоны. Заштрихованные участки представляют собой области ядерного горения, в которых скорость генерации ядерной энергии \mathcal{E} достигает $10^3 \text{ эрг}/(\text{г} \cdot \text{с})$. Точками отмечены области с измененным хим. составом. Точки А...К на рис. (a) соответствуют этим же точкам на рис. (b), на котором изображен эволюционный трек для звезды $5M_{\odot}$. (Kippenhahn & Weigert 1990)

Дальнейшая эволюция на ветви сверхгигантов

Если звезда достаточно массивна, для того что бы достигнуть центральной температуры примерно в $6 \cdot 10^8 \text{ K}$, необходимой для горения углерода, то она будет эволюционировать и дальше. В звездах же подобных Солнцу углерод никогда не загорится.

Массивные сверхгиганты, находящиеся на последних стадиях эволюции, имеют весьма сложное строение. Они состоят из нескольких вложенных друг в друга сферических оболочек.

Как известно из теории эволюции звезд, на основе ядерных превращений в ядре звезды будут синтезироваться все новые и новые элементы, вплоть до элементов железного пика. В тоже время будет продолжаться горение элементов в слоевых источниках вокруг ядра. В сложном, далеко проэволюционировавшем сверхгиганте будет инертное железное ядро и последовательные горящие оболочки из кремния, неона, кислорода, углерода, гелия и водорода. В задаче STEV промоделировано горение водорода, гелия, углерода и кислорода. Времена выгорания все более тяжелых элементов все убаыстряются, и время горения кремния составляет всего несколько дней.

Скорость сжигания элементов звездой $15M_{\odot}$	
Горение водорода	10 млн. лет
Горение гелия	1 млн. лет
Горение углерода	300 лет
Горение кислорода	200 дней
Горение кремния	2 дня

Сверхгиганты имеют очень протяженные и разряженные атмосферы, которые трудно удерживать гравитационным силам. Следует отметить необыкновенно сильную потерю массы звездами на стадии сверхгигантов, которая обусловлена не только звездным ветром с разряженной оболочки, но и сильными тепловыми пульсациями звезды, которые помогают ей терять атмосферу. Наблюдения показывают, что сверхгиганты пульсируют с периодом от 200 до 600 дней. Эти потери уносят прочь вновь произведенные элементы, такие как например углерод, а также частички пыли, которая формируется в сравнительно холодных атмосферах этих сверхгигантов. Таким образом, истечение материи с поверхности сверхгигантов помогает формировать пылевые и молекулярные облака, из которых в свою очередь потом формируются новые звезды и планеты.

Наиболее известный красный сверхгигант – это α Ориона (α Ori) - Бетельгейзе, так как Бетельгейзе - неправильная переменная, то ее радиус изменяется $R = 550 - 920 R_{\odot}$. Светимость также меняется, но примерно равна $L \approx 15 \cdot 10^3 L_{\odot}$.

Конец звезд

Для полноты картины скажем об окончании жизни звезд, хотя это и не является предметом этой задачи.

Температура в ядрах звезд с массами $\sim 0.5 M_{sun} < M_* < \sim 8 M_{sun}$ недостаточно высока, чтобы поджечь углерод после выгорания гелия. В недрах звезды формируется углеродно-кислородное ядро с вырожденным газом, очень похожее на белый карлик, да оно в сущности и есть белый карлик. При этом оболочка продолжает расширяться и в конце концов звезда и оболочка разделяются. Оболочка постепенно расширяется, формируя так называемую планетарную туманность. Оставшееся ядро и есть углеродно-азотный белый карлик с вырожденным газом, расположенный на диаграмме Г-Р в левом нижнем углу.

Резюме: все звезды с $M_* < \sim 8 M_{\odot}$ превратятся в белые карлики. Их ядра должны быть $M_{ядра} < \sim 1.4 M_{\odot}$ (предел Чандрасекхара). Лишняя масса теряется, по-видимому, со звездным ветром и на последней стадии сбрасывается с планетарной туманностью.

Звезды с высокой массой $\sim 8 M_{sun} < M_* < \sim 10 M_{sun}$ эволюционируют так же, как и со средней до момента формирования углеродно-кислородного ядра. Это ядро сжимается и становится вырожденным до того как загорится углерод, форсируя вспышку, известную как углеродная детонация - аналог гелиевой вспышки. Хотя в принципе углеродная детонация может привести к вспышке звезды как сверхновой, некоторые звезды могут пережить эту стадию, и не взорваться. При повышении температуры в ядре вырождение газа может сняться, после чего звезда продолжает эволюционировать как очень массивная звезда. Считают, что такие звезды могут сформировать неоновно-кислородный белый карлик.

Очень массивные звезды с $M > 10 M_{\odot}$. После исчерпания гелия в ядре температура в этих звездах настолько высока, что углерод загорается до того, как газ станет вырожденным и

углеродное горение включается постепенно без взрывных процессов. Загорание происходит до того, как звезда достигнет асимптотической ветви гигантов. Во все время горения углерода в ядре происходит отток энергии из ядра за счет нейтринного охлаждения, и основным источником поверхностной светимости является горение водорода и гелия в слоевых источниках. Эти звезды продолжают вырабатывать все более и более тяжелые элементы вплоть до железа, после чего ядро коллапсирует, образуя нейтронную звезду или черную дыру (в зависимости от массы ядра), а внешние слои разлетаются, что выглядит как взрыв сверхновой II типа.

Мы не можем точно указать массу одиночной звезды, которая должна взорваться как сверхновая второго типа, так как мы не знаем скорости потери вещества массивными звездами, хотя точно знаем, что вещество они теряют на всем протяжении эволюции. Приблизительная оценка массы звезды, которая должна взорваться как сверхновая II типа:

$$M = 10 \pm 3 M_{\odot}.$$

Сводные материалы

В таблице 1 приведена сводная схема эволюции одиночных звезд разных масс.

Эволюция одиночной звезды

(Белый фон – статус звезды. Серый фон – эпизоды горения)

малая масса $0,08M_{\odot} < M < 0,5M_{\odot}$	средняя масса $0,5M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$	большая масса $8M_{\odot} < M < 60 \div 100 M_{\odot}$	
	$0,5M_{\odot} < M < 3M_{\odot}$	$3M_{\odot} < M < 8M_{\odot}$	$8M_{\odot} < M < 10M_{\odot}$
горение водорода в ядре			
гелиевый белый карлик	горение водорода в слоевом источнике		
	вырожденное гелиевое ядро	невырожденное гелиевое ядро	
	гелиевая вспышка		
спокойное горение гелия в ядре			
горение водорода и гелия в слоевых источниках			
	планетарная туманность	вырожденное углеродно-кислородное ядро	невырожденное углеродно-кислородное ядро
	углеродно-кислородный белый карлик		
		углеродная детонация	
		горение углерода и последующих элементов (O, Ne, Si, Fe, Ni ...) в ядре	
		горение элементов (O, Ne, Si, Fe, Ni ...) в слоевых источниках	
	планетарная туманность	взрыв сверхновой II типа	
	O, Ne, Mg ... белый карлик или нейтронная звезда	черная дыра	

Приведем, еще один крайне полезный график из работы Ибена (1985), который иллюстрирует эволюцию в центре звезд.

На рис.10 приведены треки в координатах плотность-температура в центре звезд с массами 1, 2,7 и 15 M_{\odot} . Показаны пунктирные линии, где загорается водород, гелий и углерод. Коротким пунктиром показана линия, разделяющая вырожденные ядра звезд от невырожденных (с обозначением $\epsilon_F/kT=10$, эта запись обозначает, что энергия Ферми электронов равна $10 \times kT$).

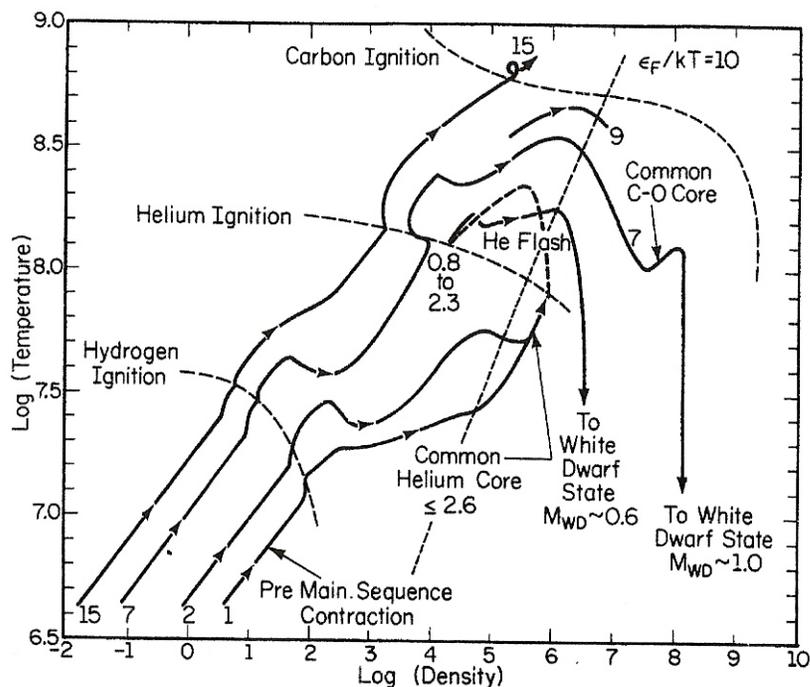


Рис.10. Треки звезд с массами 1, 2,7 и 15 M_{\odot} в координатах центральная плотность - центральная температура.

Предметный указатель:

Гелиевая вспышка в ядре - взрывообразный характер загорания гелия в вырожденном ядре красных гигантов. Характерен только для звезд с массами меньше 3 солнечных, так как только в них развивается гелиевое ядро состоящее из вырожденного электронного газ (масса ядра не должна превышать $1.4M_{\odot}$ так называемый предел Чандрасекхара). Для вырожденного газа характерна почти полная независимость давления от температуры. Так

как давление не растёт, хотя ядро и нагревается, то не происходит расширения, а следовательно и охлаждения материи. Ядро становится все горячее и горячее пока взрывообразным характером не загорится гелий - это и называется гелиевой вспышкой. Длительность вспышки $5 \cdot 10^4$ лет, и в ней сгорает не более 1% гелия. Газ остается вырожденным до тех пор, пока температура не поднимется при вспышке, при новой температуре у электронов будет больше степеней свободы и вырождение газа снимается. Результатом будет новое равновесие звезды, спокойное горение гелия в ядре и ее перемещение на горизонтальную ветвь.

Углеродная детонация - Аналог гелиевой вспышки, но только с углеродом, т.е. взрывообразный характер загорания углерода в вырожденном ядре сверхгигантов. По-видимому характерна для звезд с массами $8M_{\odot} < M_* < 10M_{\odot}$. Взрывообразное загорание углерода в ядре сверхгиганта может привести к взрыву звезды как сверхновой типа II.

Тепловая вспышка в гелиевом слоевом источнике (тепловые пульсации). Горящая гелиевая оболочка находится в тепловой неустойчивости. И в ней периодически происходят вспышки, называемые “” или тепловые пульсации. Порождается тепловой неустойчивостью в невырожденных гелиевых слоевых источниках. Характерна для звезд на асимптотической ветви сверхгигантов. Вспышек бывает до нескольких десятков на протяжении от десятков до сотен тысяч лет для звезд разных масс.

Цефеиды

RR Lyra По современным теоретическим представлениям – звезды находящиеся на горизонтальной ветви в стадии горения гелия в ядре, и водорода в слоевом источнике.

Короткопериодические переменные звезды, белые или желтые гиганты. Они имеют период от 0.2 до 2 дней. Спектральный класс от A2 до F6 меняют амплитуду от 0.3 до 2 magnitudes.

Трек Хаяши (Hayashi track) — *трек Хаяши*. Почти вертикальный эволюционный трек протозвезды на диаграмме Герцшпрунга-Рессела, проходящий в направлении к главной последовательности через фазы, когда звезда большей частью или полностью находится в конвективном равновесии. Светимость, вначале очень высокая, быстро уменьшается при сжатии, а температура поверхности остается почти постоянной.

Предел Чандрасекара. Максимальная предельная массы звезды (белого карлика), гравитационное равновесие в которой поддерживается давлением вырожденного электронного газа. Значение Чандрасекаровской массы слегка зависит от химического состава белого карлика и лежит в интервале $M = 1.38 - 1.44 M_{\odot}$.

Литература к разделу “Эволюция и эволюционные изменения внутреннего строения звезд”

1. **В.А. Батурич, И.В. Миронова, В.Г. Сурдин** "Физика и эволюция звезд" в книге "Астрономия: век XXI" . Редактор-составитель В.Г. Сурдин. Фрязино: "Век 2", 2007
2. **Л.Н. Бердников, А.С. Расторгуев, Н.Н. Самусь** **Современные наблюдения классических цефеид** Природа Август 2006..
http://vivovoco.rsl.ru/VV/JOURNAL/NATURE/08_06/STAR
3. **А. В. Засов, К. А. Постнов.** Общая Астрофизика. Фрязино: "Век 2" 2006.
4. **J.P. Cox. Pulsating stars.** Progress in Physics, vol. 37, no. 5, p. 563-698. 1974.
5. **B.Dorman, 1995 Horizontal Branch stellar Evolution.** Proceedings of the 32nd Liege International Astrophysical Colloquium, July 1995, Universite de Liege, Institute d'Astrophysique, B-400 Liege-Belgium
6. **C.F.Frost & J.C.Lattanzio "AGB Stars: What Should Be Done?"** Proceedings of the 32nd Liege International Astrophysical Colloquium, July 3-5, 1995, Universite de Liege, Institute d'Astrophysique, B-400 Liege-Belgium
7. **Iben I.Jr. The life and times of an intermediate mass star - In isolation/in a close binary.** Royal Astronomical Society, Quarterly Journal (ISSN 0035-8738), v.26, March 1985, p.1-39.
8. **Kippenhahn & Weigert 1990**
9. **Kippenhahn R. 1965,** Mitteilungen der Astronomischen Gesellschaft, Vol. 19, p.53