КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

А.Т. Агишев

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

**Сборник лекций для студентов бакалавриата,
обучающихся по образовательной программе
«6B05306 - Физика и астрономия»**

Алматы, 2025

Лекция 10. Эволюция звезд с массами более 60 солнечных масс

Мы показываем эволюцию звезды с начальной массой $60M_{\odot}$ на рисунке 10.1. Верхняя граница в нижней панели указывает на убывающую массу из-за потери вещества. Во время стадии центрального горения водорода (от A до C) водород в ядре преобразуется в гелий через цикл CN. Эта стадия длится всего лишь 3.7×10^{6} лет и вызывает увеличение содержания гелия и ^{14}N, а также уменьшение количества водорода и ^{12}C в обширной конвективной зоне. Одновременно масса звезды значительно уменьшается вследствие потери вещества. Последняя возрастает от 1.4×10^{-6} $M_{\odot}$/год на стадии ZAMS (нулевая возрастная главная последовательность) до 7.0×10^{-6} $M_{\odot}$/год на стадии TAMS (конец главной последовательности).

На стадии **B**, когда стадия главной последовательности почти подошла к концу, продукты горения водорода через CN-цикл в ядре переносятся к поверхности звезды благодаря обширной конвективной зоне. Звезда достигает стадии, когда вертикальные линии пересекают контур в точке B в нижней панели рисунка 10.1. В этот момент на поверхности звезды увеличиваются содержания азота и гелия, в то время как количества водорода и углерода уменьшаются. Звезда становится объектом типа ON, обогащённым азотом.

Когда запасы водорода в ядре полностью исчерпываются, оно начинает сжиматься, заставляя звезду перемещаться влево по диаграмме Герцшпрунга–Рассела. Это движение продолжается до тех пор, пока температура в области вокруг ядра не станет достаточно высокой, чтобы зажечь горение водорода в оболочке. Это происходит в точке C. К этому времени масса звезды уже уменьшилась примерно до $15M_{\odot}$ а область оболочечного горения окружает ядро массой около $30M_{\odot}$

С началом горения водорода в оболочке внешние слои звезды начинают расширяться, и звезда перемещается вправо по диаграмме Герцшпрунга–Рассела. В диаграмме Герцшпрунга–Рассела звезда вскоре становится нестабильной и превращается в **LBV** (яркая голубая переменная) (стадии E → F). Она испытывает сильную потерю массы порядка 5×10^{-4} $M_{\odot}$/год. В целом она теряет около $5M_{\odot}$ за время стадии LBV, которая длится около 10 000 лет.

Из-за интенсивной потери массы обогащённые гелием слои становятся видимыми на поверхности звезды, где отношение He/H достигает значения около 0.4. В то время как звезда продолжает свою пост-главно-последовательную эволюцию и перемещается вправо на диаграмме Герцшпрунга–Рассела, она теряет ещё больше массы во время стадии LBV, так что её расширение прекращается.

Другими словами, она достигает **предела Хамфрис–Дэвидсона**, и, следовательно, её оболочка снова сжимается, а сама звезда возвращается влево на диаграмме Герцшпрунга–Рассела (после точки E). Эта звезда теперь превратилась в светящуюся, относительно маломассивную горячую звезду с He- и N-обогащённой фотосферой.

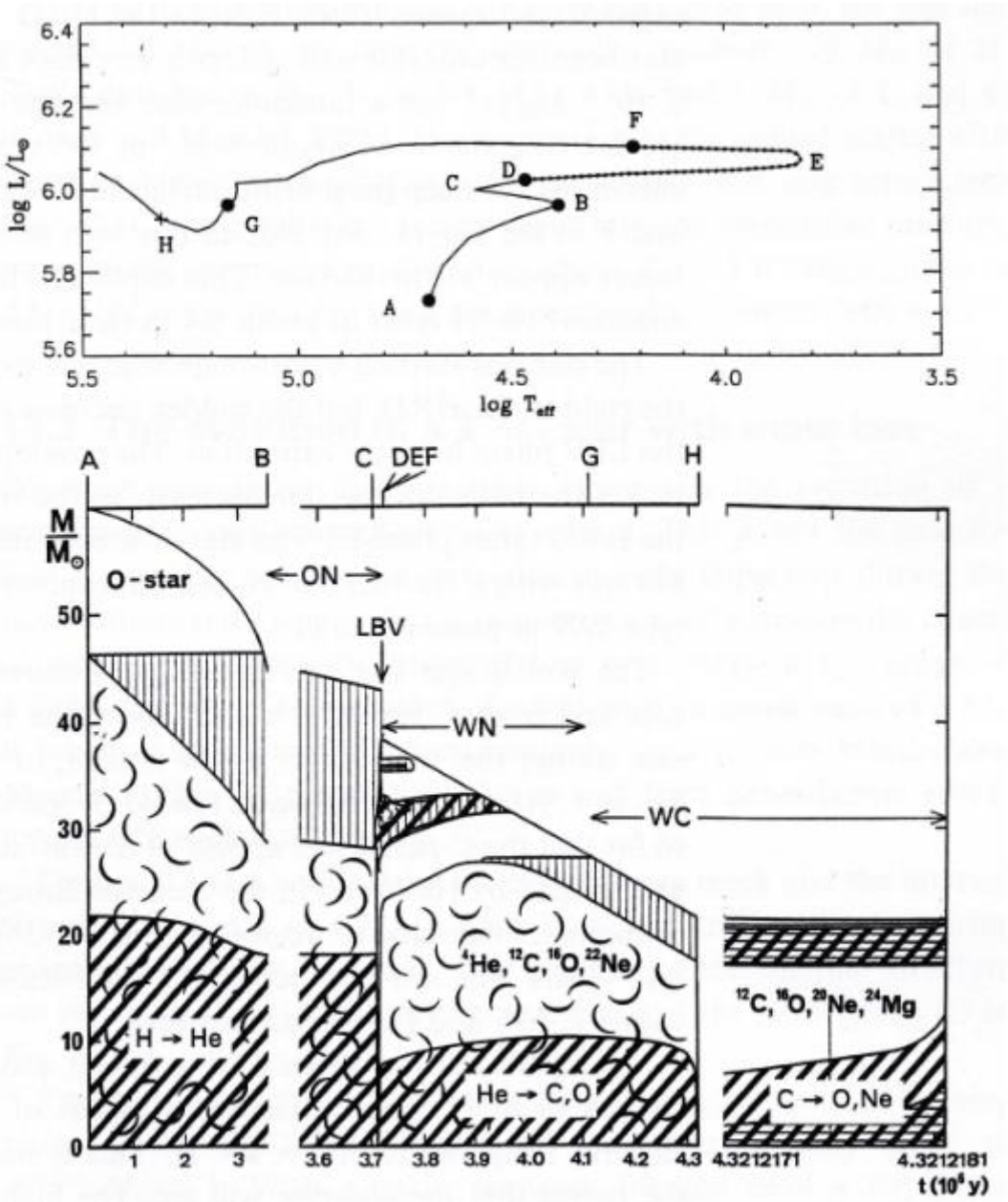

Рисунок 10.1. Верхняя панель: эволюционный трек звезды с начальной массой $60M_{\odot}$ на диаграмме Герцшпрунга–Рассела. Нижняя панель: внутренняя структура звезды как функция времени. Показаны стадии различных спектральных классов. В областях, обозначенных «облаками», перенос энергии происходит за счёт конвекции. Области с диагональными линиями указывают на зоны, где происходит термоядерное горение. Области с тонкими вертикальными линиями показывают места, где первоначальный химический состав значительно изменяется. Ось времени разделена на три части. Буквы в каждой из панелей обозначают конкретные стадии в жизни звезды, как это обсуждается выше.

Звезда становится **WR-звездой типа WN** на стадиях F → G. Она продолжает терять водородную оболочку и получает энергию из комбинации горения водорода в ядре и горения водорода в оболочке, до тех пор, пока в

наружной оболочке остаётся достаточно водорода. Потеря массы во время стадии WR остаётся значительной — около 3×10^{-5} $M_\odot$/год. Примерно через 4×10^6 лет (стадия G) внешние слои теряются настолько сильно, что на поверхности звезды появляются богатые углеродом слои. Этот углеродсодержащий материал был образован в результате **тройной альфа-реакции** и вынесен наружу за счёт конвективных движений. Звезда теперь становится WR-звездой типа **WC** с оболочкой, богатой углеродом и гелием.

Тем временем звезда продолжает сжиматься (стадия G → H). Светимость остаётся почти постоянной до тех пор, пока радиус не достигнет значения около $0.8R_\odot$ и эффективной температуры порядка 200 000 K. Однако наблюдатель не может «видеть» эту температуру из-за окружающего вещество́ оболочки. Большая потеря массы приводит к тому, что ветер становится оптически толстым. Излучение, которое уходит в направлении наблюдателя, исходит от области звёздного ветра, где температура составляет около 30 000 K. Радиус этой области, где ветер становится оптически толстым, составляет около $10R_\odot$. Это излучение наблюдается от ближнего ультрафиолета до инфракрасного диапазона. Следовательно, наблюдаемые WR-звёзды имеют гораздо более низкую эффективную температуру и гораздо больший радиус, чем те, что предсказываются расчётами эволюции звёзд. Оптически толстый ветер делает очень трудной задачу определения наблюдательных параметров WR-звёзд.

Стадия центрального горения гелия (стадия D → H) длится около 6×10^5 лет и затем сопровождается стадией горения углерода. Последняя стадия длится только около 2000 лет. Все последующие стадии горения, которые всегда короче по времени, завершаются менее чем за год. Звезда взрывается как сверхновая с коллапсирующим ядром, после чего остаётся чёрная дыра. За время своей эволюции до взрыва звезда потеряла $38M_\odot$ из своей начальной массы и передала её в межзвёздную среду:

- $29M_\odot$ водорода, частично обогащённого ^{14}N,
- $8M_\odot$ гелия,
- $1M_\odot$ углерода и кислорода.
-

Взаимодействие выброшенного вещества с окружающей межзвёздной средой часто приводит к образованию **туманности WR (кольцевой/оболочечной туманности)**.

10.1 Чёрные дыры

Когда звезда с массой $M \gtrsim 25 M_\odot$ проходит через различные циклы горения и через стадии LBV и WR, возврата уже нет: звезда вскоре завершит свою жизнь как сверхновая. (До сих пор довольно неопределённые) теоретические варианты уравнений состояния (EOS) для нейтронных звёзд накладывают верхний предел около $2 M_\odot$ для массы такого остатка. Для компактных объектов, которые оказываются более массивными, в настоящий момент не известно ни одного механизма, способного противостоять гравитации. Такие объекты коллапсируют в то, что называется **чёрной дырой**. Если нейтронные звёзды уже являются экстремальными по своей плотности, вращению и магнитным полям, то чёрные дыры представляют собой высшую форму этих экстремальных состояний.

Компактность — это конечная стадия, к которой может эволюционировать массивная звезда. По определению, коллапсировавшая звезда больше не может наблюдаться напрямую через электромагнитное излучение. Остаётся только сильное гравитационное поле.

Теоретическое описание чёрной дыры, а также сама концепция такого объекта полностью основаны на теории общей относительности. Это выходит за рамки данного курса и изучается отдельно. Тем не менее, даже простые рассуждения позволяют вывести странную ситуацию, когда радиус звезды с определённой массой становится настолько малым, что скорость убегания приближается к скорости света. Этот предельный радиус известен как радиус Шварцшильда и определяется выражением:

$$R_{Sch} = \frac{2GM}{c^2} \approx 3 \frac{M}{M_\odot} \text{ км.}$$

Классическая механика никогда бы не привела к гравитационному полю для $r \leq R_{Sch}$, из которого фотоны больше не могут покинуть объект, так как фотоны не имеют массы. Однако концепция шварцшильдовского радиуса даёт наглядное объяснение «чёрноте» чёрной дыры.

Несмотря на недавнее «изображение» сверхмассивной чёрной дыры в центре галактики M87, звёздные чёрные дыры остаются трудными для обнаружения. Один из подходов заключается в регистрации рентгеновского излучения, испускаемого веществом, падающим в чёрную дыру.

Другой, более простой метод — наблюдать движение видимого компонента в двойной системе, где второй компонент является чёрной дырой. Таким образом было доказано существование чёрных дыр. Сегодня известно много чёрных дыр в двойных системах. Наиболее известным и первым подтверждённым примером является **Cygnus X-1**. Этот объект является источником рентгеновского излучения, для которого спектроскопически измерено, что его компаньон — массивная звезда спектрального типа O (сверхгигант). Из оценки массы этого компаньона и наклона орбитальной

плоскости масса невидимого компактного объекта оценивается примерно в $6M_{\odot}$ что исключает возможность того, что это нейтронная звезда.

Тем временем были открыты многие другие подобные примеры двойных систем с невидимым массивным компаньоном, которые получили название **«рентгеновские двойные системы» (X-ray binaries)**. В этих объектах невидимые компаньоны обладают массой, превышающей (неопределённый) верхний предел для нейтронной звезды. Чёрные дыры в двойных системах упоминаются как финальная стадия эволюции звёзд с большой массой.

Краткие выводы

Мы подытожим некоторые из результатов, которые были описаны в этих лекциях. Потеря массы, вызванная звёздным ветром, приводимым в действие излучением, оказывает значительное влияние на жизненный цикл звёзд с начальной массой выше $15M_{\odot}$ и, следовательно, на эволюцию галактик, содержащих такие звёзды.

Эта потеря массы:

1. изменяет химический состав поверхности звезды,
2. радикально изменяет продолжительность жизни звезды на определённых стадиях эволюции,
3. объясняет наличие околозвёздного вещества вокруг чёрных дыр,
4. существенно меняет эволюционные треки звёзд после стадии главной последовательности на диаграмме Герцшпрунга–Рассела,
5. объясняет отсутствие очень ярких красных сверхгигантов,
6. объясняет существование LBV (ярких голубых переменных) и WR-звёзд, которые являются предшественниками чёрных дыр,
7. и, **наконец, что не менее важно**, приводит к значительному обогащению тяжёлыми элементами межзвёздной среды и, таким образом, определяет химическую эволюцию галактик.

Список литературы:

1) Kippenhahn, R., Weigert, A., & Weiss, A. (2012). *Stellar structure and evolution* (2nd ed.). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30304-3
2) Шварцшильд, М. (2009). *Строение и эволюция звезд* (Пер. с англ., 4-е изд.). URSS.
3) Hansen, C. J., Kawaler, S. D., & Trimble, V. (2004). *Stellar interiors: Physical principles, structure, and evolution* (2nd ed.). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/b97471
4) Lamers, H. J. G. L. M., & Levesque, E. M. (2017). *The evolution of massive stars of 25–120 M⊙: Dominated by mass loss*. IOP Publishing. https://doi.org/10.1088/978-0-7503-1278-3