

КАЗАХСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АЛЬ-ФАРАБИ

А.Т. Агишев

СТРОЕНИЕ И ЭВОЛЮЦИЯ ЗВЕЗД

**Сборник лекций для студентов бакалавриата,
обучающихся по образовательной программе
«6В05306 - Физика и астрономия»**

Алматы, 2025

Лекция 7. Звезды на стадии Post AGB

Цель лекции

Изучить физические процессы, происходящие после стадии асимптотической ветви гигантов (AGB), рассмотреть эволюцию звёзд с углеродно-кислородным ядром при потере оболочки, механизм тепловых импульсов, сценарий повторного рождения звезды (“born-again scenario”), а также переход к стадиям планетарной туманности и белого карлика.

Основные вопросы:

1. Особенности строения и эволюции звёзд на стадии AGB.
2. Механизм тепловых импульсов и потери массы.
3. Переход звезды к стадии post-AGB.
4. Сценарий “born-again” — повторное горение в оболочке.
5. Условия образования планетарной туманности.
6. Завершение эволюции — образование белого карлика.
7. Наблюдательные признаки и спектроскопические особенности post-AGB звёзд.

Краткие тезисы:

На стадии AGB звезда имеет массивное углеродно-кислородное ядро и испытывает повторяющиеся тепловые импульсы, вызванные нестабильным горением гелия в оболочке. Светимость полностью определяется массой ядра. Потери массы происходят из-за сильных **пульсаций оболочки** и **пылевого ветра**, приводящих к истощению внешних слоёв.

Когда масса водородной оболочки снижается до $\approx 0.03 M_{\odot}$, пульсации прекращаются, звезда теряет оболочку, и её **эффективная температура (T_{eff})** быстро растёт. Светимость при этом остаётся почти постоянной — она определяется только массой ядра. Начинается стадия **post-AGB**, которая длится **$\sim 10\,000$ лет**.

В это время звезда перемещается по диаграмме Герцшпрунга–Рассела к области более высоких температур. Её оболочка становится прозрачной, и становится видимым горячее ядро.

Последний тепловой импульс и сценарий “born-again”. Примерно у 25% post-AGB звёзд может произойти последний тепловой импульс, даже после выхода звезды на путь белого карлика. В результате загорается горение в гелиевой оболочке, звезда временно возвращается к стадии AGB, этот процесс называется “born-again scenario”. Продолжительность этого возвращения — около 200 лет, после чего звезда вновь движется к области белых карликов. В итоге она становится гелиево-обеднённой, с ядром CO и оболочкой, обогащённой He, C, O

Эволюция и формирование планетарной туманности. Когда эффективная температура звезды достигает $T_{\text{eff}} \approx 30\,000\text{ K}$, окружающее вещество ионизуется, формируя планетарную туманность. Однако не все post-AGB звёзды становятся планетарными туманностями: иногда пылевая

оболочка слишком далеко, либо её масса недостаточна для видимого свечения. Этап планетарной туманности длится $\sim 10^5$ лет, а затем звезда становится белым карликом.

Белый карлик — финальный этап. После рассеивания оболочки остаётся углеродно-кислородное ядро с массой:

$$0.6 \leq M_{\text{core}} \leq 1.1 M_{\odot}$$

где более массивные ядра происходят от звёзд с начальными массами 6–8 $M_{\odot}$. Так как звёзды малой массы рождаются чаще, большинство белых карликов имеют $M \approx 0.6 M_{\odot}$. Светимость белого карлика постепенно снижается — он уходит на **путь охлаждения**.

Наблюдательные особенности и значение стадии post-AGB. Пост-AGB-звёзды часто демонстрируют сильные инфракрасные излучения из-за остаточной пыли. Они важны для исследования: третьего подъёма (third dredge-up) — процесса перемешивания обогащённых элементов; химического состава звёздных оболочек по спектрам высокого разрешения. Эта стадия является мостом между AGB-звёздами и белыми карликами и позволяет проверить теории нуклеосинтеза и потерь массы.

Вопросы для контроля, изучаемого материал:

- 1) Как определяется светимость звезды на стадии AGB?
- 2) При какой массе оболочки прекращается пульсация и начинается стадия post-AGB?
- 3) В чём заключается сценарий “born-again”?
- 4) Почему не каждая post-AGB звезда становится планетарной туманностью?
- 5) Как связаны масса белого карлика и масса его предшественника?
- 6) Чем интересны post-AGB звёзды с точки зрения наблюдательной астрофизики?
- 7) Какой процесс отвечает за перемешивание химических элементов в оболочке AGB-звёзд?

Рекомендуемый список литературных источников:

- 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>

Лекция 7. Звезды на стадии Post AGB

Количество тепловых импульсов, которые переживает звезда на стадии AGB во время фазы TP-AGB, зависит от времени рождения и массы ядра, потери массы и металличности звезды. Звёзды продолжают подниматься по AGB траектории по мере того, как их углеродно-кислородное ядро становится всё более массивным. Светимость звезды на стадии AGB полностью определяется массой её ядра и не зависит от массы оболочки. С хорошей точностью можно записать:

$$\frac{L}{L_{\odot}} = 6 \times 10^4 \left(\frac{M_{core}}{M_{\odot}} - \frac{1}{2} \right) \quad (1)$$

L — светимость звезды, $L_{\odot}$ — светимость Солнца, M_{core} — масса ядра звезды, $M_{\odot}$ — масса Солнца. В то же время звёзды теряют значительную часть своей оболочки из-за связи между пульсациями и пылевым звёздным ветром.

Тепловые импульсы продолжают происходить до тех пор, пока масса водородной оболочки составляет больше примерно $0.1M_{\odot}$. Когда она становится менее массивной, горение водорода не может больше продолжаться, и, следовательно, гелиевый слой и звёздное ядро больше не растут в массе. Последний тепловой импульс происходит, когда гелиевый слой сжимается в последний раз до тех пор, пока он не станет достаточно горячим, чтобы снова зажечь цикл горения в гелиевой оболочке.

Когда масса водородной оболочки уменьшается до $\lesssim 0.03M_{\odot}$ пульсации также прекращаются, и в результате потеря массы быстро уменьшается и останавливается. Эффективная температура звезды начинает увеличиваться, когда прекращается потеря массы. Это вызвано исчезновением внешней оболочки и появлением более горячих внутренних слоёв, окружающих сжимающееся звёздное ядро. Звезда покидает стадию AGB и начинает свою **пост-AGB фазу**. Эта стадия длится всего около 10 000 лет. Во время этой стадии светимость звезды остаётся практически постоянной, так как она определяется только массой ядра (см. уравнение 1). Эффективная температура, напротив, продолжает расти из-за сжатия ядра, с одной стороны, и появления более горячих внутренних областей — с другой.

Последний тепловой импульс может всё ещё произойти вовремя пост-AGB стадии и даже несколько позже, на горячем участке эволюционного трека белого карлика. Это связано с короткой пост-AGB фазой, в то время как сжатие ядра всё ещё продолжается. В результате горение гелия может вспыхнуть ещё один раз. Такой последний импульс происходит примерно у 25% всех пост-AGB звёзд. В этом случае звезда возвращается обратно на стадию AGB, так как она снова переживает горение в оболочке. Это называется **«сценарием нового рождения» (born-again scenario)**, когда звезда очень быстро перемещается по диаграмме Герцшпрунга–Рассела. Затем она возвращается на стадию белого карлика за промежуток времени, обычно равный около 200 лет.

В зависимости от массы ядра звезда становится либо излучательно-устойчивой звездой, либо превращается в гелиевую горящую звезду, обеднённую водородом, которая состоит из углеродно-кислородного ядра, окружённого поверхностными слоями, обогащёнными гелием, углеродом и кислородом.

Несмотря на то, что стадия post-AGB является короткой, она чрезвычайно полезна для наблюдательных тестов третьего подъёма (dredge-up) и связанного с ним перемешивания в межоболочечной и внешней конвективной зонах. С пульсациями исчезает и пылевая оболочка, и, как следствие, продукты нуклеосинтеза в оболочках звезды могут быть изучены. Химический анализ пост-AGB звёзд на основе спектроскопии высокого разрешения является активной областью исследований в звёздной астрофизике.

Когда эффективная температура повышается до значения около 30 000 K, окружающее звезду вещество становится ионизованным. Звезда становится **планетарной туманностью**. Однако не каждая пост-AGB звезда превращается в планетарную туманность таким образом. Иногда окружающая пылевая оболочка уже слишком далека от звезды, прежде чем эффективная температура превысит 30 000 K, и/или эта оболочка содержит слишком малую массу. Тепловые импульсы, которые переживает звезда на стадии AGB, являются эволюционным феноменом, который не зависит от массы ядра.

Последняя стадия характеризуется как стадия **белого карлика**. Из того факта, что белых карликов значительно больше, чем планетарных туманностей, следует, что стадия планетарной туманности должна быть гораздо короче, даже если учитывать то, что не каждая post-AGB звезда становится планетарной туманностью. Стадия планетарной туманности длится около 10^5 лет.

В конце стадии post-AGB масса углеродно-кислородного ядра находится в диапазоне от **0.6 до 1.1 $M_{\odot}$** . Более высокие значения масс соответствуют звёздам, которые имели массу при рождении в пределах от **6 до 8 $M_{\odot}$** . Так как рождение звёзд с низкой массой встречается гораздо чаще, чем рождение звёзд с высокой массой, мы ожидаем, что массы углеродно-кислородных ядер будут сосредоточены около значения **0.6 $M_{\odot}$** . Это действительно соответствует распределению масс, наблюдаемому у белых карликов.

Эволюция звезды: AGB → Post-AGB → Планетарная туманность → Белый карлик

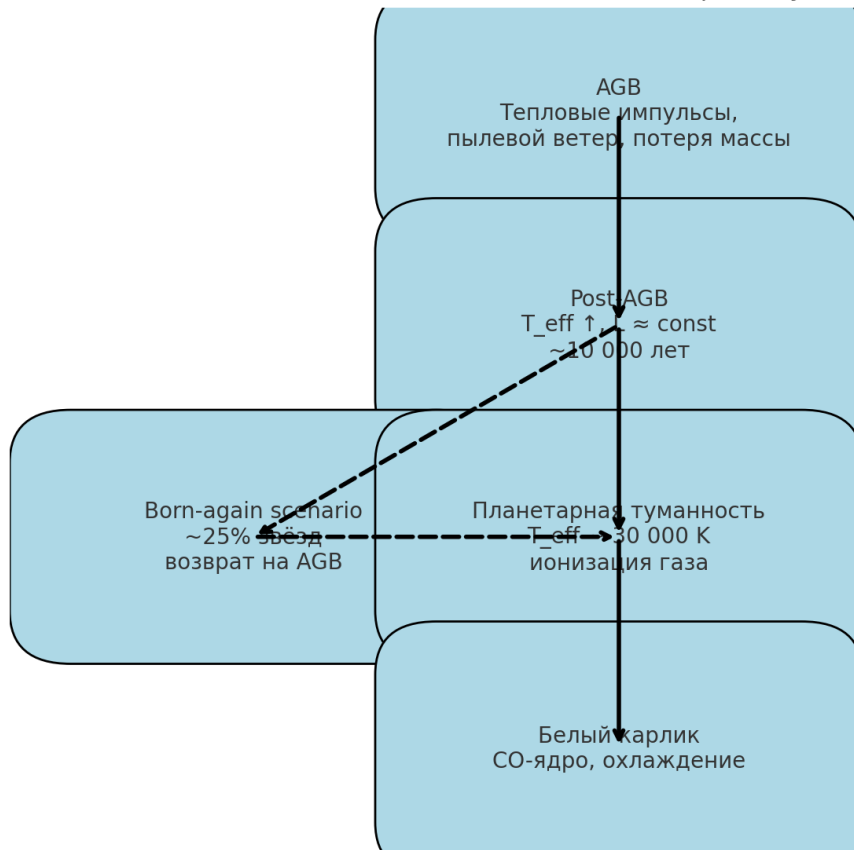


Схема-обобщение: AGB → post-AGB → белый карлик → планетарная туманность

1. AGB стадия (Asymptotic Giant Branch)

- Звезда имеет массивное углеродно-кислородное ядро.
- Идут пульсации оболочки и сильные потери массы через пылевой звёздный ветер.
- Происходят **тепловые импульсы** в гелиевой оболочке.
- Продолжается горение водорода и гелия в слоях.

2. Пост-AGB стадия

- Масса водородной оболочки уменьшается до $\lesssim 0.03M_{\odot}$.
- Пульсации прекращаются → потеря массы останавливается.
- **Эффективная температура звезды быстро возрастает**, так как оболочка рассеивается, и становится видна горячая внутренняя область.
- Светимость остаётся почти постоянной, определяется только массой ядра.
- Продолжительность стадии: около **10 000 лет**.

3. Возможный последний тепловой импульс

- Может произойти вовремя post-AGB стадии или даже на раннем пути белого карлика.
- У $\sim 25\%$ звёзд → звезда возвращается на AGB (так называемый **born-again scenario**).

- После этого за ~ 200 лет звезда вновь переходит к белому карлику.
- Итог: ядро CO, окружённое оболочкой, обогащённой He, C, O.

4. Планетарная туманность

- При $T_{\text{eff}} \approx 30\,000$ К окружающее вещество ионизуется.
- Звезда превращается в **планетарную туманность**.
- Не все post-AGB звёзды проходят эту фазу:
 - пылевая оболочка может быть слишком далека,
 - или масса оболочки слишком мала.

5. Белый карлик

- После рассеивания оболочки остаётся оголённое CO-ядро.
- Светимость постепенно снижается $\rightarrow$ звезда уходит на трек охлаждения белого карлика.
- **Чем массивнее ядро $\rightarrow$ тем быстрее проходит стадия post-AGB.**

Список литературы:

- 4) 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>
- 5) Шварцшильд, М. (2009). *Строение и эволюция звезд* (Пер. с англ., 4-е изд.). URSS.
- 6) 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>