

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 6. Звезды Главной Последовательности Нулевого Возраста

Цель лекции

Рассмотреть физические характеристики звёзд нулевого возраста главной последовательности (ZAMS), их энергетическое равновесие, зависимости между массой, радиусом и светимостью, а также влияние металличности на положение звезды в диаграмме Герцшпрунга–Рассела.

Основные вопросы:

1. Определение и физическое состояние звёзд ZAMS.
2. Временные масштабы жизни звезды и фаза устойчивого горения водорода.
3. Диаграмма Герцшпрунга–Рассела для звёзд ZAMS.
4. Соотношения «масса–светимость» и «масса–радиус».
5. Влияние давления излучения и металличности.
6. Отклонения от идеального поведения и роль конвекции.

Краткие тезисы:

Звёзды нулевого возраста главной последовательности (ZAMS) – это объекты, достигшие полного гидростатического и теплового равновесия, в ядрах которых устойчиво горит водород. Энергия термоядерных реакций полностью компенсирует потери излучением, а доля энергии от гравитационного сжатия не превышает ~1%

Продолжительность жизни на главной последовательности (~90% общей жизни звезды) определяется медленным расходом водорода в ядре. Возраст звезды обычно отсчитывается от момента выхода на ZAMS — $t = 0$.

На **диаграмме Герцшпрунга–Рассела (HRD)** положение звёзд ZAMS зависит от их массы и химического состава (X, Y, Z). Более массивные звёзды → более горячие и светящиеся. Звёзды с низкой металличностью → более синие и яркие.

Связь массы, радиуса и светимости: Численные модели и наблюдения двойных систем подтверждают строгую зависимость между этими параметрами. Наблюдается согласие между теоретическими моделями и данными по динамическим массам и радиусам звёзд.

Соотношение “масса–светимость” ($M-L$): Эмпирическая величина, где показатель степени зависит от диапазона масс: для $0.5 M_{\odot} < M < 10 M_{\odot}$: $\eta \approx 4$, для $M > 10 M_{\odot}$: $\eta \approx 3$, для $M < 0.5 M_{\odot}$: $\eta \approx 2.5$.

Приближённая универсальная форма, полученная из ZAMS-моделей:

$$L/L_{\odot} = 1.03(M/M_{\odot})^{3.9}$$

что соответствует наклону теоретической зависимости.

Уменьшение наклона η_1 для массивных звёзд связано с ростом вклада **давления излучения** и приближением к **пределу Эддингтона** — состоянию, при котором излучение уравнивает гравитацию.

Соотношение “масса–радиус” ($M-R$): Эмпирическая величина, $R \propto M^\xi$
Где для маломассивных звёзд ($M < 1 M_\odot$): $\xi \approx 0.8-1.0$, для звёзд солнечной массы: $\xi \approx 0.6$, для массивных звёзд ($M > 10 M_\odot$): $\xi \approx 0.3-0.4$.

Малые массы $\rightarrow$ выраженная конвективная оболочка $\rightarrow$ радиус увеличен относительно радиативных звёзд.

Для звёзд высокой массы, где преобладает радиационный перенос, зависимость становится более пологой

Влияние металличности (Z):

Металличность влияет на непрозрачность звёздного вещества: при меньшем Z газ менее непрозрачен $\rightarrow$ излучение выходит легче $\rightarrow$ звезда горячее и светлее.

Приближённое соотношение для учёта металличности:

$$L \propto M^{3.9} (Z/Z_\odot)^{-0.1}$$

$$R \propto M^{0.8} (Z/Z_\odot)^{-0.05}$$

Таким образом, звёзды с низкой металличностью (например, Population II) **более синие и светящиеся**, чем звёзды того же M , но богатые металлами.

Конвекция и радиация:

У звёзд **низкой массы** ($T_{\text{eff}} < T_\odot$) — развитая конвективная оболочка $\rightarrow$ больший радиус.

У звёзд **высокой массы** — конвекция возможна в ядре (из-за CNO-цикла), но внешние слои радиационные.

Это различие объясняет “излом” в зависимости $M-R$ около $1 M_\odot$.

Значение отношений подобия (Homology relations):

При условии одинакового химического состава и термодинамического состояния можно выразить светимость и радиус через степень массы:

$$L \propto M^\eta, R \propto M^\xi$$

Эти законы отражают масштабные свойства звёзд в термодинамическом равновесии.

Вопросы для контроля, изучаемого материал:

- 1) Что означает термин “звезда нулевого возраста главной последовательности”?
- 2) Почему звезда проводит около 90% своей жизни на главной последовательности?
- 3) Объясните физический смысл соотношения “масса–светимость”.
- 4) Почему показатель η уменьшается для очень массивных звёзд?
- 5) Чем объясняется “излом” зависимости “масса–радиус” около $1 M_\odot$?
- 6) Как влияет металличность на положение звезды в HR-диаграмме?

- 7) Почему маломассивные звёзды имеют более развитую конвективную оболочку?

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>
- 4) Salaris, M., Usher, C., Martocchia, S., Dalessandro, E., Bastian, N., Saracino, S., & Lardo, C. (2020). Photometric characterization of multiple populations in star clusters: the impact of the first dredge-up. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 492(3), 3459-3464.

Лекция 6. Звезды Главной Последовательности Нулевого Возраста

6.1 Модели звёзд нулевого возраста главной последовательности

Теперь мы рассмотрим ряд моделей звёзд, находящихся в механическом и тепловом равновесии и обладающих одинаковым химическим составом, но различными массами. Эти звёзды прибыли на **нулевой возраст главной последовательности (ZAMS)**, как объяснялось в предыдущей лекции, эти звёзды испытывают горение водорода в их ядрах в условиях полного равновесия. Это термоядерное горение является для них источником энергии на протяжении очень длительного времени. На данный момент звёзды эволюционируют по временной шкале τ_n которая значительно длиннее, чем временной интервал τ_{HK} пройденный звездой в её предыстории формирования.

Потребление водорода в ядре протекает с настолько низкой скоростью, что звезда проводит почти всю свою жизнь на главной последовательности (около 90%). Таким образом, большинство звёзд, которые мы наблюдаем, являются звёздами главной последовательности. Возраст звезды обычно отсчитывается от момента выхода на **нулевой возраст главной последовательности (ZAMS)**, то есть $t=0$ в точке ZAMS. Напомним ещё раз, что эта точка определяется как момент, когда центральное горение водорода протекает в полном равновесии и становится безусловно основным источником энергии (то есть, вклад энергии от гравитационного сжатия падает ниже одного процента).

Равновесные модели звёзд главной последовательности на стадии центрального горения водорода могут быть определены на основе схемы, описанных в первых лекциях. На Рисунке 6.1 показано положение звёзд в точке ZAMS на диаграмме Герцшпрунга–Рассела (HR-диаграмме) для диапазона масс от $0.1 M_{\odot}$ до $100 M_{\odot}$ для начального содержания водорода, заданного массовой долей $X=0.70$, и для двух значений металличности. С увеличением массы звезды её светимость и эффективная температура возрастают. Эти начальные значения, соответствующие различным звездным массам, определяют их положение на линии ZAMS. Как видно на Рисунке 6.1, существует чёткая взаимосвязь между значениями массы и светимости звездных моделей. Таким образом, учитывая зависимость светимости L от эффективной температуры, становится ясно, что **массы и светимости** должны быть жёстко связаны.

Модели звёзд в точке ZAMS действительно удовлетворяют так называемым **отношениям подобия (homology relations)**. Мы рассмотрим это подробнее в дальнейшем.

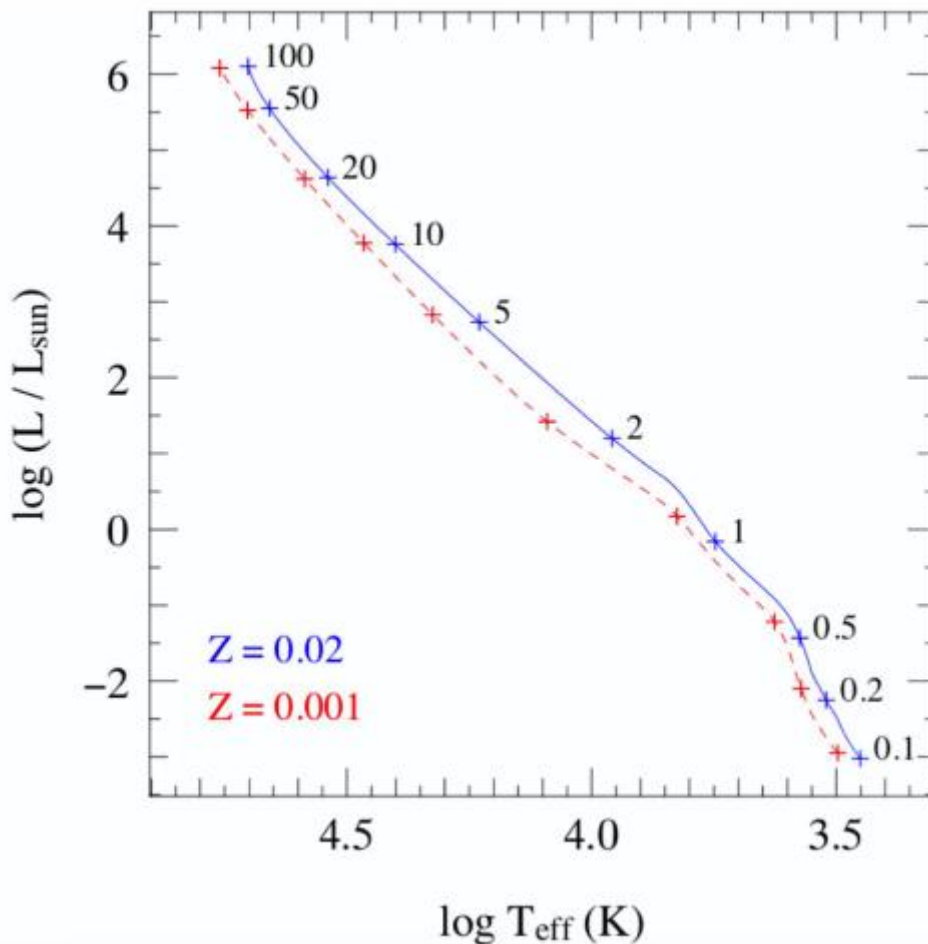


Рисунок 6.1. Нулевая возрастная главная последовательность (ZAMS) на диаграмме Герцшпрунга–Рассела для моделей звёзд с $X=0.70$ и двумя значениями металличности Z . Положения моделей для различных масс между 0.1 и $100 M_{\odot}$ обозначены знаками «плюс», что показывает: звёзды с меньшим содержанием металлов оказываются более синими, чем звёзды, богатые металлами.

Прежде чем перейти к этим деталям, мы сравним соотношения «масса–светимость» (ML) и «масса–радиус» (MR) для ZAMS, полученные из теории, с наблюдательными данными, которые не опираются на модели внутреннего строения звёзд. Такое сравнение возможно для широкого диапазона звёздных масс, используя данные по невзаимодействующим двойным звёздам с отделёнными компонентами. Результат показан на Рисунке 6.2 и демонстрирует весьма хорошее согласие между теорией и наблюдениями, особенно если учитывать, что теоретические модели относятся исключительно к ZAMS, тогда как наблюдения охватывают звёзды, находящиеся на всей главной последовательности. Стоит отметить, что это хорошее согласие между измерениями и теоретическими кривыми является поразительным, так как оно охватывает исключительно широкий диапазон масс и светимостей: примерно фактор ~ 200 по массе и фактор 10^8 по светимости.

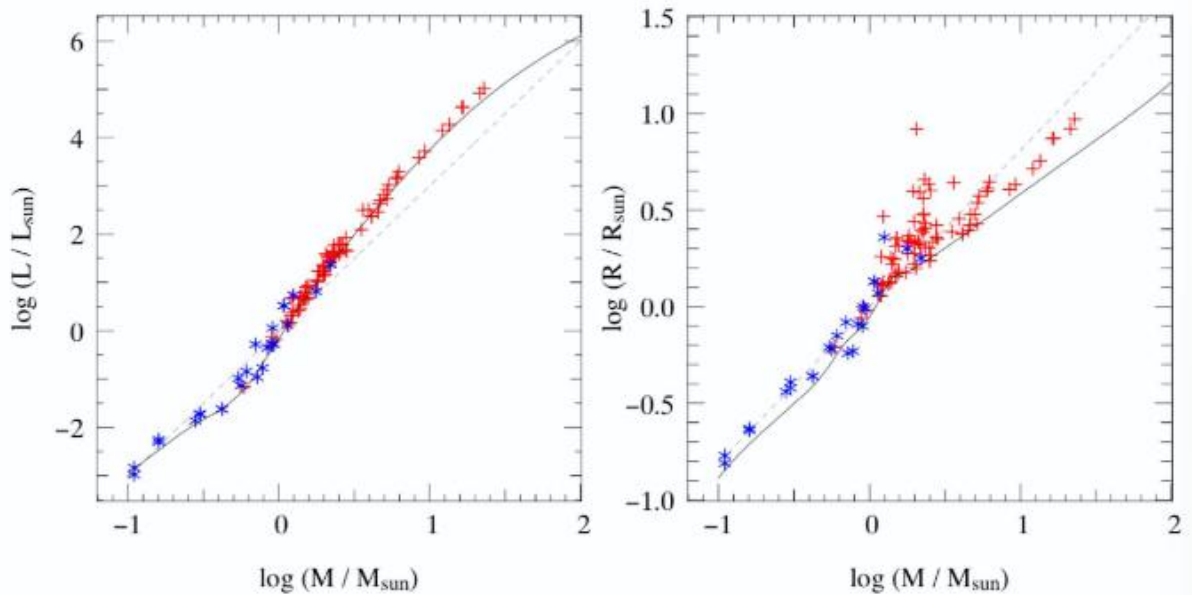


Рисунок 6.2. Сплошная линия показывает соотношение «масса–светимость» (слева) и «масса–радиус» (справа) для ZAMS, полученные из вычисленных моделей звёзд с $Z=0.02$, которые уже были показаны на Рисунке 6.1. Пунктирные линии показывают приближённые выражения для соотношений M/L и M/R , обсуждаемых в тексте. Цветные символы обозначают наблюдательные данные, основанные на динамических массах и радиусах, которые были определены модель-независимым образом. Точность этих измерений, как правило, выше размеров самих символов. Синие звёзды обозначают одиночные звёзды; красные кресты — двойные системы; красные плюсы — спектроскопические двойные звёзды.

6.2 Соотношения «масса–светимость» и «масса–радиус»

Мы можем вывести и исследовать зависимости «масса–светимость» и «масса–радиус», используя результаты численных расчётов. Учитывая тесную взаимосвязь между массой, эффективной температурой и светимостью, показанную на рисунках 6.1 и 6.2, а также тот факт, что

$$L \sim R^2 T_{eff}^4$$

и что средняя молекулярная масса определяется исходным химическим составом (X, Y, Z) мы можем рассмотреть приближения следующего вида:

$$L \sim M^{\eta_1} \mu^{\eta_2}, \quad R \sim M^{\xi_1} \mu^{\xi_2}$$

Если рассмотреть результаты численных интегрирований, проведённых для получения ZAMS-моделей, как это показано на Рисунке 6.2, можно заметить,

что наклон в зависимости «масса–светимость», то есть значения η_1 , η_2 соответственно, ξ_1 и ξ_2), будет зависеть от выбранного интервала масс. При ограничении уравнения состояния (EOS) идеальным газом можно аналитически показать, что $\eta_1 = 3$ и $\eta_2 = 4$. Поскольку масса M может изменяться в пределах трёх порядков величины, в то время как средняя молекулярная масса μ почти не меняется, имеет смысл зафиксировать $\eta_2 = 4$ и варьировать только η_1 . Используя такой подход для всего диапазона масс, наилучшее приближение к моделям ZAMS соответствует значению

$$\eta_1 = 3.3$$

— это штриховая линия, показанная на левой панели рисунка 6.2. Также видно, что наибольшее значение наклона η_1 достигается, если ограничить аппроксимацию диапазоном масс $[1, 10] M_\odot$ что даёт

$$\eta_1 = 3.9$$

Заметное уменьшение η_1 для самых массивных звёзд связано с возрастанием роли давления излучения в уравнении состояния и зависимости от массы (так называемой светимостью Эддингтона). Для ZAMS-звёзд с массой меньше половины солнечной значение

$$\eta_1 = 5$$

Что касается соотношения масса–радиус для ZAMS-звёзд, мы получаем примерно

$$\eta_1 = 0,81$$

(штриховая линия на рис. 6.2). Более крутое соотношение для маломассивных звёзд хорошо видно в модельно-независимых данных о динамических массах и радиусах, полученных из наблюдений за затменно-двойными системами (Salaris et al. 2021). Эта же фигура также показывает, что **соотношения масса–светимость, масса–радиус и масса–температура справедливы только для звёзд главной последовательности**. Сплошная линия на правой панели рис. 6.2 является результатом теории и показывает явный «излом» в области около $M \approx 1 M_\odot$ что согласуется с расширенной выборкой эталонных звёзд. Это связано с тем, что звёзды с эффективной температурой ниже солнечной имеют гораздо более развитую конвективную оболочку, что вызывает увеличение радиуса по сравнению со звёздами аналогичной массы, для которых радиативный перенос энергии преобладает. Это приводит к более крутому росту радиуса по сравнению с массой при малых массах. Данный тренд не распространяется на область больших масс, так как такие звёзды имеют радиационные внешние зоны.

В целом, согласие между данными и штриховой/сплошной линиями на рис. 6.2 хорошее, учитывая, что эти кривые представляют зависимости, основанные лишь на одном показателе степени. В общем случае радиус и, соответственно, светимость звезды зависят от её металличности (см. рис. 6.1), и потому соотношения масса–радиус и масса–светимость могут зависеть и от металличности. Вместо того чтобы вводить это косвенно через выражение для молекулярного веса (который численно почти не меняется для различных звёзд), мы можем явно ввести аппроксимацию с учётом параметра Z , так как он определяется наблюдательно из спектроскопии звёзд. Зависимость от металличности слаба, но заметна. Хорошее математическое приближение для фиксированной массы имеет вид:

$$R \sim Z^{1/6}, \quad L \sim Z^{-7/6}$$

Таким образом, поскольку

$$T_{\text{eff}}^4 \sim \frac{L}{R^2}$$

мы получаем

$$T_{\text{eff}} \sim Z^{-9/24}$$

В результате звёзды с низкой металличностью оказываются более голубыми и более светящимися, чем их богатые металлами аналоги той же массы, что уже видно на рис. 6.1, за исключением наиболее массивных звёзд, для которых начинает играть важную роль звёздный ветер, управляемый излучением.