

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 4. Молодые Звезды

Цель лекции

Показать основные этапы эволюции протозвезды после завершения коллапса до выхода на главную последовательность, рассмотреть физические механизмы переноса энергии, характерные временные масштабы, и различие в эволюции звёзд разной массы, включая природу коричневых карликов.

Основные вопросы:

1. Стадия квазигидростатического равновесия протозвезды.
2. Временной масштаб Кельвина–Гельмгольца и его значение.
3. Эволюция по треку Хаяши и треку Хеная.
4. Начало ядерных реакций (горение дейтерия и водорода).
5. Особенности эволюции звёзд различной массы.
6. Предглавно-последовательные звёзды: Т Тельца и Ae/Be Хербига.
7. Формирование ZAMS и минимальная масса для звезды.
8. Коричневые карлики и нижний предел звёздного горения.

Краткие тезисы:

После завершения **динамического коллапса** протозвезда достигает **квазигидростатического равновесия**: гравитация уравнивается давлением, но термоядерные реакции ещё не начались.

Энергия сжатия является единственным источником светимости; часть гравитационной энергии идёт на нагрев вещества, другая часть излучается.

Временной масштаб Кельвина–Гельмгольца:

$$\tau_{KH} \approx GM^2/RL$$

определяет время, за которое звезда может излучить запас гравитационной энергии.

На ранних стадиях **перенос энергии конвективный**, и звезда эволюционирует вдоль **трека Хаяши** — почти при постоянной эффективной температуре, уменьшая радиус и светимость.

Когда газ частично ионизуется и становится более прозрачным, конвекция исчезает — начинается **радиативное сжатие**. Звезда уходит с трека Хаяши на **треки Хеная**, двигаясь влево по диаграмме Герцшпрунга–Рассела (HRD) — температура растёт, светимость увеличивается.

При достижении температуры $T \approx 10^6 \text{ K}$ начинается **горение дейтерия**:



Это временно стабилизирует звезду, замедляя сжатие.

Для **низкомассивных звёзд** ($M < 1.1 M_{\odot}$): ядро становится радиативным, внешние слои остаются конвективными, энергия выделяется в основном в результате pp-реакций.

Для **более массивных звёзд** ($M > 1.1 M_{\odot}$): зажигается CNO-цикл, ядро остаётся конвективным на протяжении всей стадии водородного горения.

Звёзды Т Тельца ($M < 1.6 M_{\odot}$) и **звёзды Ae/Be Хербига** ($1.6\text{--}9 M_{\odot}$) наблюдаемые примеры предглавно-последовательных звёзд. Они окружены

аккреционными дисками, обладают сильной активностью и биполярными истечениями, связанными с переносом углового момента.

Массивные протозвёзды ($M > 9 M_{\odot}$) достигают ZAMS очень быстро (менее чем за 1 млн лет) и становятся видимыми только после окончания аккреции.

Нулевой возраст главной последовательности (ZAMS) — момент, когда водородное горение полностью стабилизирует энергообмен, и сжатие прекращается.

Коричневые карлики ($M < 0.08 M_{\odot}$) не достигают температуры, необходимой для устойчивого горения водорода. Они могут временно сжигать дейтерий и литий, но после исчерпания этих запасов только медленно остывают.

Граница между коричневыми карликами и планетами проходит около **$0.013 M_{\odot}$** , соответствуя минимальной массе для горения дейтерия.

Вопросы для контроля, изучаемого материал:

- 1) Что представляет собой стадия квазигидростатического равновесия протозвёзды?
- 2) Объясните физический смысл времени Кельвина–Гельмгольца.
- 3) Чем различаются треки Хаяши и Хеная?
- 4) При какой температуре начинается горение дейтерия, и как оно влияет на эволюцию звезды?
- 5) В чём отличие эволюции звёзд низкой и высокой массы?
- 6) Кто такие звёзды Т Тельца и Ae/Be Хербига?
- 7) Что означает понятие ZAMS?
- 8) Почему коричневые карлики не становятся полноценными звёздами?
- 9) Как наблюдательно отличить коричневый карлик от низкомассивной звезды?

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 4. Молодые Звезды

Эволюция протозвезды к стадии нулевого возраста главной последовательности (ZAMS)

После стадии динамического коллапса, описанной в лекции 3, протозвезда достигает состояния **квазигидростатического равновесия**. До тех пор, пока центральная температура протозвезды остаётся ниже температуры, необходимой для зажигания горения водорода, звезда может использовать только сжатие для генерации энергии, достаточной для противодействия гравитации. Звезда ещё не находится в состоянии теплового равновесия. Она медленно сжимается на временном масштабе Кельвина–Гельмгольца, одновременно аккрецируя последние остатки вещества из окружающей среды. Во время этой стадии эволюции временной масштаб Кельвина–Гельмгольца может быть приближён выражением:

$$\tau_{HK} \approx M^{-2.5},$$

где τ_{HK} — время Кельвина–Гельмгольца, а M — масса протозвезды (в солнечных массах). Согласно **теореме вириала**, часть энергии гравитационного сжатия преобразуется во **внутреннюю энергию**, а другая часть отвечает за **светимость протозвезды**.

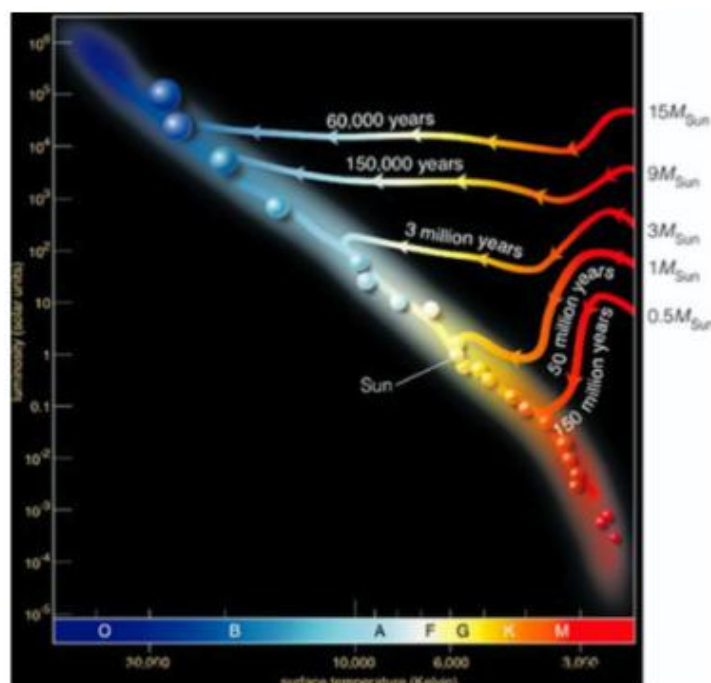


Рисунок 4.1. Эволюционные треки (Heneyey tracks) – эволюционирующих моделей, описывающих сжимающиеся протозвезды между треком Хаяши (Hayashi Track) и стадией нулевого возраста главной последовательности (ZAMS). Временные масштабы сжатия указаны для различных масс.

Вещество в протозвезде остаётся очень непрозрачным до тех пор, пока оно не ионизовано, и пока не начнётся ядерное горение. В этих условиях конвекция является единственным возможным механизмом переноса энергии. Протозвезда эволюционирует по **треку Хаяши**. В процессе сжатия протозвезда сохраняет почти постоянную эффективную температуру, но её радиус уменьшается, и, следовательно, уменьшается её светимость (пропорционально R^{-2}). Таким образом, протозвезда смещается вниз на диаграмме Герцшпрунга–Рассела. Это проиллюстрировано на рисунке 4.1 красными стрелками.

У протозвезд с более высокой массой центральная температура растёт быстрее, чем центральная плотность. У низкомассивных звёзд ситуация противоположна: центральная плотность возрастает быстрее, чем центральная температура. Для низкомассивных протозвёзд излучение половины энергии сжатия происходит с большим трудом, и поэтому звезда остаётся конвективной, находясь ближе к треку Хаяши. По мере того, как внутренняя температура в ядре протозвезды продолжает возрастать, газ постепенно становится ионизованным. В ядре снижается непрозрачность, и конвективная зона исчезает. Это означает, что протозвезда покидает трек Хаяши, поскольку она уже не полностью конвективна. Дальнейшая её эволюция продолжается как **радиативное сжатие ядра**, и протозвезда движется по так называемым **трекам Хеная** влево на диаграмме Герцшпрунга–Рассела. Поскольку сжатие ядра протозвезды происходит в условиях всё большей прозрачности, связанной с ростом температуры, светимость протозвезды перестаёт уменьшаться и начинает возрастать. На этом этапе звезда становится **пред-главно-последовательной звездой (pre-MS star)**. Кратко её положение на диаграмме обозначено **оранжево-жёлто-бело-голубыми треками**.

Пока пред-главно-последовательная (pre-MS) звезда продолжает своё движение по треку Хеная влево на диаграмме Герцшпрунга–Рассела, её центральная температура достигает значения, необходимого для начала горения дейтерия (приблизительно 10^6 К). Дейтерий немедленно преобразуется в ^3He и выделяет фотон. Чем меньше масса протозвезды, тем ближе она будет к треку Хаяши в момент первых ядерных реакций, основанных на примордиальном (первичном) содержании дейтерия. Полные цепочки pp-реакций не могут завершаться, так как первая реакция pp-превращения требует гораздо более высокой температуры, и весь pp-цикл может происходить только в условиях равновесия при температурах выше 5×10^6 К. Следовательно, ^3He образующийся при горении дейтерия, не достигает равновесной концентрации, необходимой для запуска полного цикла водородного горения. Таким образом, чувствительность ядерных реакций на этой стадии выше (обычно в степени около 3), чем когда pp-цепочки происходят в равновесии. Это означает, что пред-главно-последовательная звезда развивается с конвективным ядром.

У звёзд с массой ниже примерно $1.1 M_{\odot}$ это конвективное ядро исчезнет, когда pp-цепочки с их сопутствующими химическими реакциями установятся

в равновесии. Более массивные звёзды быстро переключаются от горения водорода через pp-цепочки к циклу CNO. Этот тип ядерного горения гораздо более чувствителен к температуре (требует больших значений температуры), чем pp-цепочки. Следовательно, такие звёзды сохраняют конвективное ядро на протяжении всей стадии горения водорода.

Аккреция продолжается почти на всей пред-главно-последовательной стадии, в течение временного масштаба Кельвина–Гельмгольца. Протозвёзды с массой около 9 солнечных масс эволюционируют так быстро от своего трека Хаяши к главной последовательности (временной масштаб значительно меньше миллиона лет), что они не видимы во время своей пред-главно-последовательной стадии, также потому, что они остаются заключёнными в плотную околозвёздную оболочку падающего вещества. Эти массивные звёзды становятся заметны на диаграмме Герцшпрунга–Рассела только после достижения ZAMS. В этот момент падение вещества прекращается из-за сильного наружного излучения. Пред-главно-последовательная стадия звёзд большой массы изучена плохо. Известно, что звёзды с массами между примерно $1.6M_{\odot}$ и $9M_{\odot}$ завершают стадию аккреции до выхода на главную последовательность. Такие объекты называются **звёздами Ae/Be Хербига**. Звёзды с массами ниже примерно $1.6M_{\odot}$ называются **звёздами Т Тельца**.

С точки зрения наблюдений действительно видно, что диаграммы Герцшпрунга–Рассела молодых звёздных скоплений (например, Плеяды, η и χ Персея) показывают, что массивные звёзды находятся уже на главной последовательности, тогда как звёзды малой массы всё ещё находятся в стадии сжатия, занимая область справа от линии главной последовательности. Многие из этих звёзд действительно являются звёздами Т Тельца. Наблюдения звёзд Ae/Be Хербига и Т Тельца показывают, что обе группы звёзд испытывают активные явления, связанные с аккреционными дисками и дифференциальным вращением. Сочетание вращения и конвекции во внешних слоях приводит к возникновению хаотического магнитного поля. Это поле переносит угловой момент наружу, где его часть может теряться через звёздный ветер. Этот ветер выходит преимущественно вдоль оси вращения, из-за наличия аккреционного диска в плоскости экватора. Следовательно, **биполярные истечения** формируют процесс аккреции до достижения звезды главной последовательности. Во время своей пред-главно-последовательной стадии у Т Тельца и звёзд Ae/Be Хербига наблюдается толстый аккреционный диск. Возможно, именно в этой фазе формируется планетная система. Однако вопрос о том, является ли плането-образование типичным или исключительным явлением, остаётся предметом интенсивных современных исследований.

Когда горение водорода становится возможным в равновесном режиме и полностью начинает доминировать в энергетическом балансе, звезда достигает стадии теплового равновесия, и процесс сжатия прекращается. Эта стадия называется **нулевым возрастом главной последовательности (Zero-Age Main Sequence, ZAMS)**. В таблицах, приведённых выше, ZAMS обозначает момент, когда звезда впервые выходит на главную последовательность.

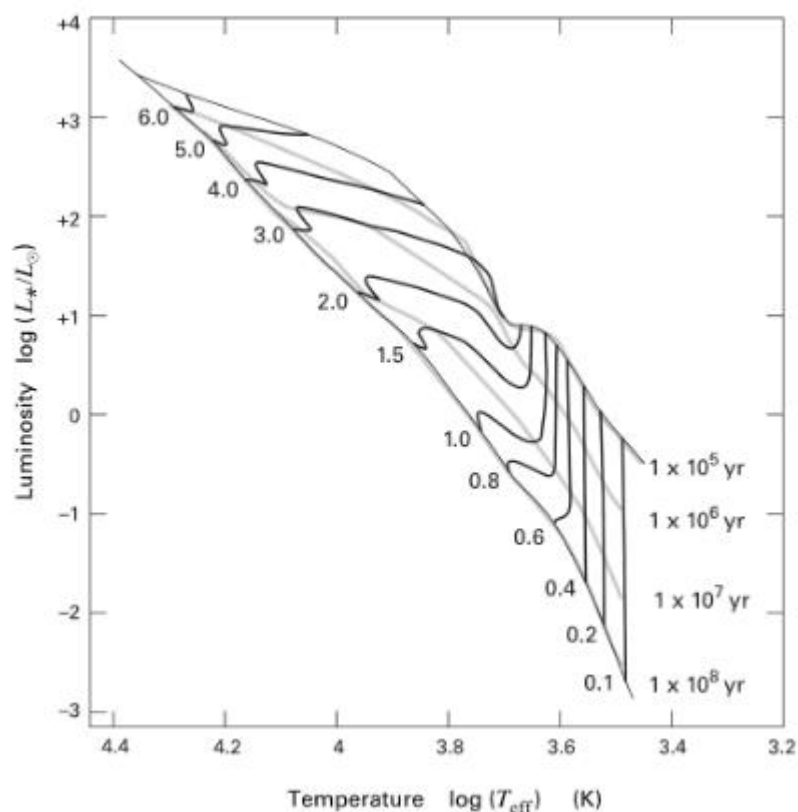


Рисунок 4.2. Диаграмма Герцшпрунга–Рассела (HR) с эволюционными треками для звёзд солнечной металличности (чёрные линии) и изохронами для возрастов 0.1, 1, 10 и 100 млн лет (серые линии) для звёзд с начальными массами от 0.1 до 6 $M_{\odot}$.

Когда доля энергии, выделяемой из-за гравитационного сжатия, падает ниже $\sim 1\%$ от общего энергетического вклада, внутренняя структура звезды требует перестройки. Два источника энергии — **гравитационная энергия сжатия** и **ядерная энергия** — меняются по значимости. Они по-разному влияют на структуру: удельная мощность гравитационного источника зависит от температуры слабо и примерно линейно, тогда как ядерные реакции протекают намного более концентрированно к центру звезды и обладают сильной температурной чувствительностью (особенно цикл CNO). В результате **ядерная энергия быстро становится доминирующей**, и дальнейшая эволюция звезды определяется горением водорода. На рис. 4.2 показаны пред-главно-последовательные треки до выхода на ZAMS для разных масс (согласно модели MESA).

Наконец, заметим: сжимающаяся сфера с массой ниже критической никогда не достигает центральной температуры, достаточной для запуска водородного горения. **Протозвёзды с $M < 0.08 M_{\odot}$ не могут поддерживать стационарное водородное горение и потому не доходят до ZAMS** — это **коричневые карлики (brown dwarfs)**. Звёзды полностью конвективны на протяжении своей стадии сжатия. Сжатие отвечает за производство

светимости до тех пор, пока не происходят ядерные реакции. Центральная плотность продолжает возрастать, что в протозвезде с массой меньше примерно $0.08 M_{\odot}$ приводит к возникновению вырождения электронного газа до того, как начнутся реакции **pp-цепочки**. Это электронное вырождение (давление вырожденного электронного газа) препятствует дальнейшему росту температуры, и звезда никогда не сможет достичь условий для стационарного водородного горения в полном термодинамическом равновесии.

Звезда на стадии образования обречена стать коричневым карликом, если её масса недостаточна для того, чтобы воспламенить полный цикл водородного горения в ядре до начала вырождения. Ограничивающая масса несколько зависит от исходного химического состава и степени ионизации, поскольку это влияет на среднюю молекулярную массу и, следовательно, на давление газа. С учётом этих факторов в численных моделях для нуклеосинтеза эпохи Большого взрыва и для более поздних металличностей получается минимальная масса для звезды главной последовательности в диапазоне $0.06\text{--}0.09 M_{\odot}$.

Коричневые карлики с массой больше примерно $0.065 M_{\odot}$ могут сжигать как дейтерий, так и ${}^7\text{Li}$ в течение пред-главно-последовательной стадии сжатия, тогда как объекты с меньшей массой этого сделать не могут. Таким образом, «более массивные» коричневые карлики способны производить ${}^3\text{He}$ и фотоны, но не ${}^4\text{He}$ поскольку их центральная температура остаётся слишком низкой для преодоления кулоновского барьера реакции ${}^3\text{He}$. Таким образом, их термоядерная энергия в основном обеспечивается горением их изначального дейтерия. Когда этот запас исчерпан, коричневый карлик может только остывать. Примерно через 10^7 лет после начала дейтериевого горения светимость коричневых карликов падает с возрастом по закону $L \sim \tau^{-1.2}$. Приближённое соотношение светимость–масса–возраст имеет вид:

$$\frac{L}{L_{\odot}} \simeq \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{2.6} \left(\frac{\tau}{10^7 \text{ yr}} \right)^{-1.2}$$

Коричневые карлики с малой массой не сжигают свой примордиальный литий. Поэтому спектроскопия, фокусирующаяся на присутствии или отсутствии линий лития, предоставляет наблюдательный метод для различения низкомассивной звезды и низкомассивного коричневого карлика.

На другом конце (планетарной) шкалы масс проводится различие между коричневыми карликами и газовыми планетами по предельной массе около $0.013 M_{\odot}$ поскольку это примерно та масса газа, которая необходима для достижения достаточно высокой температуры и плотности, чтобы воспламенить горение дейтерия ($T_c \approx 10^6 \text{ K}$). Однако это значение для предельной массы не имеет смысла для каменных планет, где оно скорее составляет около $0.025 M_{\odot}$. Таким образом, низкомассивные коричневые карлики и массивные планеты перекрываются по диапазону масс.

Коричневые карлики некоторое время рассматривались как возможный ответ на проблему «скрытой массы» (*missing mass*) во Вселенной. Из-за их низкой светимости их трудно наблюдать. Поэтому предполагалось, что значительная часть массы во Вселенной может быть «спрятана» ниже порога обнаружения. Точная оценка вклада коричневых карликов в общую массу Вселенной имеет большое значение для построения космологических моделей. В этом контексте поиск коричневых карликов остаётся актуальной задачей.

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>