

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 5. Горение водорода

Цель лекции

Познакомить студентов с основными термоядерными реакциями, происходящими в звёздах на стадии главной последовательности, — протон-протонной цепью (pp-chain) и углеродно-азотно-кислородным циклом (CNO-cycle); рассмотреть энергетический выход, температурные зависимости и роль этих процессов в эволюции звёзд различной массы.

Основные вопросы:

1. Физическая сущность горения водорода в звёздах.
2. Протон-протонная цепь (pp-chain) и её подветви (pp1, pp2, pp3).
3. Энергетический выход pp-цепи и температурная зависимость.
4. Углеродно-азотно-кислородный цикл (CNO-cycle) и его механизм.
5. Ключевая реакция $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ и её роль в определении скорости CNO-цикла.
6. Температурная зависимость и вклад CNO-цикла в энергосодержание звёзд.
7. Сравнение pp-цепи и CNO-цикла в зависимости от массы звезды.

Краткие тезисы:

Результат горения водорода: четыре протона соединяются в одно ядро гелия-4 (^4He), при этом выделяется энергия ≈ 26.7 МэВ, соответствующая дефекту массы $\sim 0.7\%$. Эти процессы — главный источник энергии для звёзд на главной последовательности

Протон-протонная цепь (pp-chain)

- Главный путь превращения водорода в гелий для звёзд солнечной и меньшей массы ($T_6 \approx 10\text{--}20$).
- Начальная реакция очень медленная, т.к. протон должен превратиться в нейтрон посредством слабого взаимодействия. Среднее время реакции $\sim 10^{10}$ лет.
- После образования дейтерия (^2D) реакция протекает быстро.
- Далее три возможные ветви завершения цепи. pp1, (доминирует при $T_6 \approx 5$), pp2, (доминирует при $T_6 \approx 15\text{--}20$), pp3, (активна при $T_6 > 24$). Вклад в светимость Солнца: pp1 — 83.6%, pp2 — 16.4%, pp3 — 0.015%. Первая реакция — самая медленная, именно она определяет общий темп pp-цепи.

Энергетический выход pp-цепи

- Ветви отличаются долей энергии, уносимой нейтрино $Q_{\text{eff}} \approx 26.2\text{--}25.0$ МэВ
- Энергия, выделяемая при образовании одной α -частицы, определяется вкладом всех ветвей.
- Температурная зависимость скорости реакций при низких температурах — близка к T^6 .

Углеродно-азотно-кислородный цикл (CNO-cycle)

- Основной источник энергии для звёзд $M > 1.5\text{--}2 M_{\odot}$, где температура в ядре $T_6 \gtrsim 20$.
- Цикл состоит из последовательных реакций захвата протонов ядрами углерода, азота и кислорода с β^+ -распадом нестабильных изотопов.
- В основном CN-цикле углерод и азот действуют как катализаторы.
- Ключевая реакция – самая медленная, определяет скорость всего цикла.
- Средний энергетический выход: $\approx 24.97 \text{ МэВ}$ на цикл
- Температурная зависимость: $\epsilon_{\text{CNO}} \propto T^{18}$
- CNO-цикл резко усиливается при росте температуры и становится доминирующим источником энергии в звёздах с $M > 2 M_{\odot}$.
- Конечный продукт — α -частица и ^{14}N (накапливается в качестве остатка).

Вопросы для контроля, изучаемого материал:

- 1) Почему реакция $p + p \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu_e$ считается лимитирующей для pp-цепи?
- 2) Назовите три ветви pp-цепи и объясните, при каких температурах они активны.
- 3) Какова роль нейтрино в энергетическом балансе звезды?
- 4) Почему CNO-цикл требует присутствия углерода, азота и кислорода?
- 5) В чём состоит ключевая реакция CNO-цикла и почему она определяет его скорость?
- 6) Почему CNO-цикл более чувствителен к температуре, чем pp-цепь?
- 7) Для каких звёзд CNO-цикл становится основным источником энергии?

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>

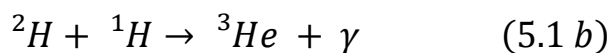
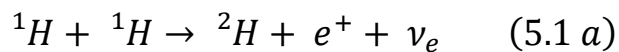
Лекция 5. Горение водорода

Результатом горения водорода является слияние четырёх ядер ${}^1\text{H}$ в одно ядро ${}^4\text{He}$. Разница в энергии связи составляет до **26.731 МэВ**, что соответствует так называемому дефекту массы около **0.7%**. Энергия, выделяющаяся при этом, примерно в 10 раз выше, чем при любых других процессах, происходящих в звезде. Существуют разные цепочки реакций, которые обычно протекают параллельно в звёздах. Для горения водорода важны две из них:

- **Протон-протонная цепь (pp-chain)**
- **Углеродно-азотно-кислородный цикл (CNO-cycle)**

5.1 Протон-протонная цепь

Название цепи связано с её первой реакцией: два протона соединяются в ядро дейтерия ${}^2\text{H}$, которое затем взаимодействует с протоном с образованием ${}^3\text{He}$:



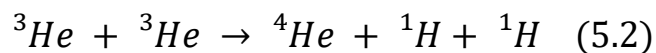
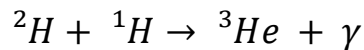
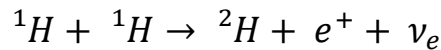
Здесь: e^+ — позитрон, γ — фотон, ν_e — электронное нейтрино.

Первая из этих реакций (реакция pp) необычна по сравнению с другими термоядерными процессами, так как протоны должны пройти через β^+ распад на своей минимальной дистанции сближения, чтобы один протон превратился в нейтрон. Процесс β^+ -распада вызван слабым ядерным взаимодействием и имеет крайне малую вероятность (малое сечение). Среднее время, необходимое для протекания этой реакции, порядка $\sim 10^{10}$ лет. Чтобы реакция произошла, протоны должны обладать достаточно высокой кинетической энергией для того, чтобы β^+ распад мог реализоваться. Это соответствует требованию температуры около $\sim 10^7$ К для преодоления электростатического отталкивания (кулоновского барьера). Создать и поддерживать длительное время эту реакцию в лаборатории пока невозможно (термоядерный синтез, nuclear fusion).

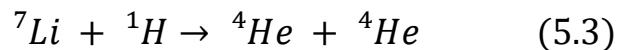
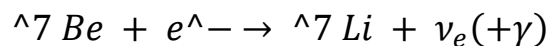
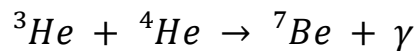
Вторая реакция — это **горение дейтерия**. Оно происходит чрезвычайно быстро (порядка секунд), так как является следствием сильного ядерного взаимодействия. Дейтерий начинает гореть уже при температуре порядка 10^6 К. Таким образом, протозвёзды ещё в процессе формирования успевают сжечь весь примордиальный дейтерий, прежде чем запускается pp-реакция. Первичный нуклеосинтез в результате оставляет изотопы ${}^3\text{He}$, которые участвуют в pp-цепочке, но до полного превращения водорода в гелий требуется температура около 5×10^6 К, чтобы установилось равновесие.

После образования ${}^3\text{He}$ в результате реакции pp , эта цепь может завершаться с образованием ядра ${}^4\text{He}$, также называемого **α -частицей**, в течение нескольких сотен лет. Это может происходить тремя ветвями: **pp1**, **pp2**, **pp3**. Все они начинаются с ${}^3\text{He}$ и имеют ${}^4\text{He}$ в качестве конечного продукта.

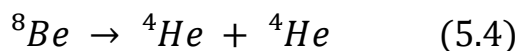
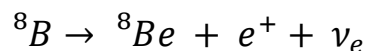
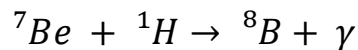
pp1:



pp2:



pp3:



Здесь e^- — электрон. Номера 1, 2 и 3 указывают на значимость подцепей с увеличением температуры. Ветвь **pp1** требует $T_6 \geq 5$, **pp2** требует $T_7 \geq 1.5$, а **pp3** требует $T_7 \geq 24$.

В Солнце 83.6% светимости обеспечивается подцепью **pp1**, 16.4% — **pp2** и 0.015% — **pp3**. Очень важно отметить, что различные реакции в pp -цепочке протекают с очень разными скоростями. Реакция pp (в целом, в частности ее первая реакция) является самой медленной (примерно в 10^{18} раз медленнее, чем все остальные). Для завершения **pp1** необходимо, чтобы реакция (5.1) происходила хотя бы дважды.

Реакция ${}^2\text{H}(p, \gamma){}^3\text{He}$ в цепи **pp1** настолько быстра, что концентрация дейтерия остаётся очень низкой. Последняя реакция в **pp1** снова медленнее второй, но всё же намного быстрее, чем сама pp -реакция.

Когда температура возрастает, концентрация ${}^3\text{He}$ уменьшается, поэтому первая реакция pp2 становится более важной (начиная с $T_7 \approx 1-2$). Цепь **pp2** продолжается через захват электрона ядром ${}^7\text{Be}$, который почти не зависит от температуры, в отличие от альтернативной реакции захвата протона ядром ${}^7\text{Be}$, при которой образуется ${}^8\text{B}$. В ветви **pp3** реакция ${}^7\text{Be}(p,\gamma){}^8\text{B}$ начинает доминировать при $T_6 \approx 24$.

Ядро ${}^8\text{B}$, образованное при захвате протона, является нестабильным относительно распада с испусканием позитрона, с периодом полураспада около 0.8 с. Нейтрино, испускаемое в этом процессе, так же, как и нейтрино от электронного захвата ${}^7\text{Be}$, были зарегистрированы в экспериментах по солнечным нейтрино.

Окончательная реакция в pp3 -цепи — это распад ${}^8\text{B}$ на два ядра ${}^4\text{He}$. Эта реакция важна не только потому, что завершает цепь pp3 , но и потому, что при высоких температурах она становится основным источником горения водорода.

5.2 Энергетический выход pp -цепи

Из-за того, что в каждой подцепи часть энергии уносится нейтрино, энергетический выход, приходящийся на одну альфа-частицу (ядро ${}^4\text{He}$), различается. В сумме это даёт: $Q = 26.2, 25.7, 19.2$ МэВ для ветвей pp1 , pp2 и pp3 соответственно. Эффективный выход Q_{eff} можно определить как усреднённое значение выделяемой энергии, учитывающее вклад всех трёх ветвей. Выделяемая ядерная энергия в pp -цепи вычисляется как:

$$\varepsilon_{pp} = \frac{(r_{pp} Q_{eff})}{\rho} = \psi f_{11} g_{11} \left(2.57 \times 10^4 \rho \frac{X^2}{(T_9)^{\frac{2}{3}}} \right) \exp \left(\frac{-3.381}{(T_9)^{\frac{1}{3}}} \right) \quad (\text{в эрг г}^{-1} \text{с}^{-1}) \quad (5.5)$$

Здесь:

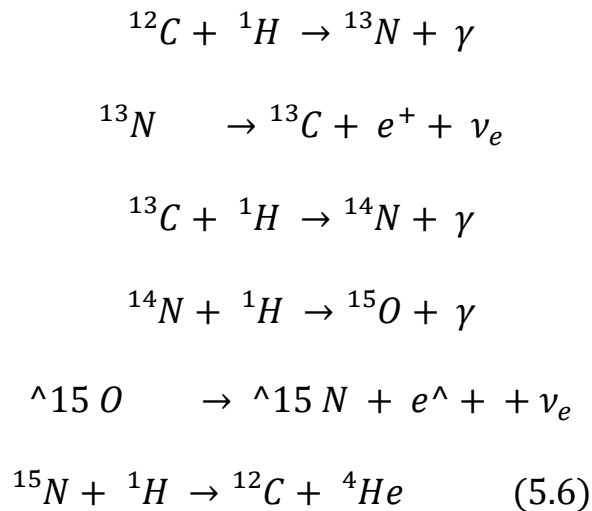
- f_{11} — коэффициент экранирования для рассматриваемой реакции,
- g_{11} — множитель, зависящий от полиномиальной аппроксимации четвёртого порядка по T_9 , полученной из лабораторных данных,
- ψ — фактор, учитывающий относительный вклад подцепей pp1 , pp2 и pp3 .

Формула (5.5) является параметрическим приближением, согласованным с табличными значениями скоростей ядерных реакций. Такие аппроксимации используются в астрофизике для вычисления скоростей реакций на основе экспериментальных данных и могут отличаться у разных исследовательских групп. Видно, что температурная зависимость скорости pp -цепи меняется от $\sim T^6$ при $T_6 = \text{до}$ $\sim T^{3.5}$ при $T_6 = 20$.

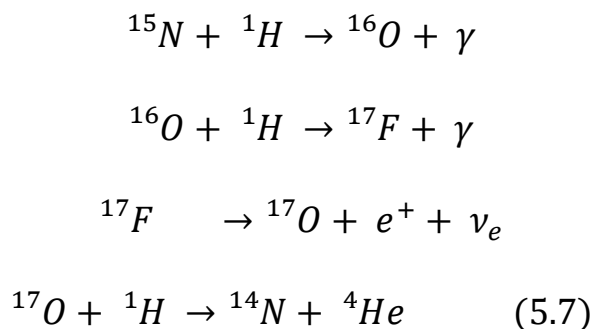
5.3 Углеродно-азотный цикл (CNO-cycle)

CNO-цикл описывает вторую цепь реакций, приводящую к горению водорода. Чтобы этот цикл работал, необходимы определённые изотопы углерода, азота и кислорода.

Реакции, протекающие при температурах, характерных для внутренних областей звёзд, таковы:



Или



Общая структура CNO-цикла состоит из серии реакций захвата протонов изотопами углерода, азота или кислорода, перемежающихся β^+ - распадом, процессы которого имеют периоды полураспада порядка 100–1000 секунд. Цикл всегда заканчивается захватом протона, который вызывает образование α -частицы.

Первые реакции, приведённые в (5.6), составляют так называемый **CN-цикл**, так как в них участвуют только изотопы углерода и азота, выполняя роль катализаторов. Полный CNO-цикл реализуется тогда, когда в звезде уже присутствует ${}^{16}\text{O}$, либо когда протекает реакция ${}^{15}\text{N}(p,\gamma){}^{16}\text{O}$, которая генерирует достаточное количество кислорода. Однако вероятность полного CNO-цикла примерно в 1000 раз ниже, чем вероятность CN-цикла. Конечным продуктом полного CNO-цикла является не только α -частица, но и изотоп ${}^{14}\text{N}$, который снова может участвовать в CN-цикле.

Подробное описание горения в CNO-цикле крайне сложно, так как многие изотопы участвуют циклическим образом. Энергетический выход, а также детальное распределение всех изотопов зависят от начальных концентраций катализаторов, скоростей реакций, температуры и возраста звезды. Здесь мы не будем описывать все реакции в цикле подробно. Вместо этого рассмотрим следствия самой важной цепочки в CNO-цикле.

Ключевая реакция в CNO-цикле — это $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$. Эта реакция относительно медленная, и именно она определяет скорость цикла в целом. Подобно pp-цепочке, это самая медленная реакция, поэтому именно она задаёт общий темп протекания цикла. Когда температура становится достаточно высокой, чтобы поддерживать устойчивое горение водорода в CNO-цикле, все доступные изотопы углерода, азота и кислорода постепенно трансформируются в ^{14}N , который затем становится наиболее распространённым продуктом водородного горения.

Энергетический выход цикла определяется самой медленной реакцией $^{14}\text{N}(p,\gamma)^{15}\text{O}$ и, следовательно, ограничивается ею. Среднее значение Q для этой реакции составляет 24.97 МэВ. Выделяемая ядерная энергия из-за усреднённого выхода Q_{eff} определённого для всех реакций, протекающих в CNO-цикле, выражается формулой:

$$\varepsilon_{\text{CNO}} \approx g_{14,1} \times \frac{8.24 \times 10^{25} \rho X Z}{(T_9)^{\frac{2}{3}}} \exp \left[-\frac{15.231}{(T_9)^{\frac{1}{3}}} - \left(\frac{T_9}{0.8} \right)^2 \right] \quad (\text{в эрг г}^{-1} \text{с}^{-1}) \quad 5.8$$

Здесь $g_{14,1}$ обозначает множитель, зависящий от T_9 аппроксимированный полиномом третьей степени.

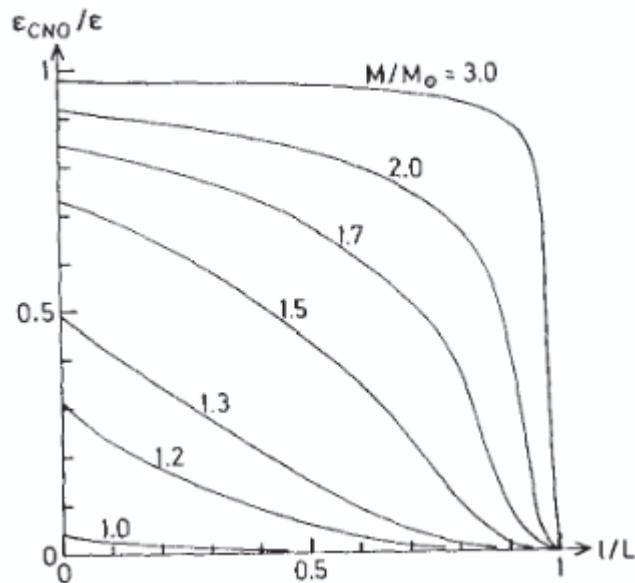


Рисунок 5.1. Доля общей энергии, производимой CNO-циклом во внутренней части звезды на нулевой возрастной главной последовательности (ZAMS) для звёзд с массой между $1 M_\odot$ и $3 M_\odot$.

Зависимость скорости реакции CNO-цикла от температуры значительно выше, чем у pp-цепи; примерно $\sim T^{18}$ при $T_6 \approx 20$.

На рисунке 5.1 показан вклад CNO-цикла в общую энергию, выделяемую при горении водорода, для звёзд с массами между $1 M_{\odot}$ и $3 M_{\odot}$ в зависимости от положения внутри звезды (представленного как l/L). Ясно, что CNO-цикл становится доминирующим источником энергии для звёзд с массой больше $2 M_{\odot}$.