

# Источник энергии звёзд

---

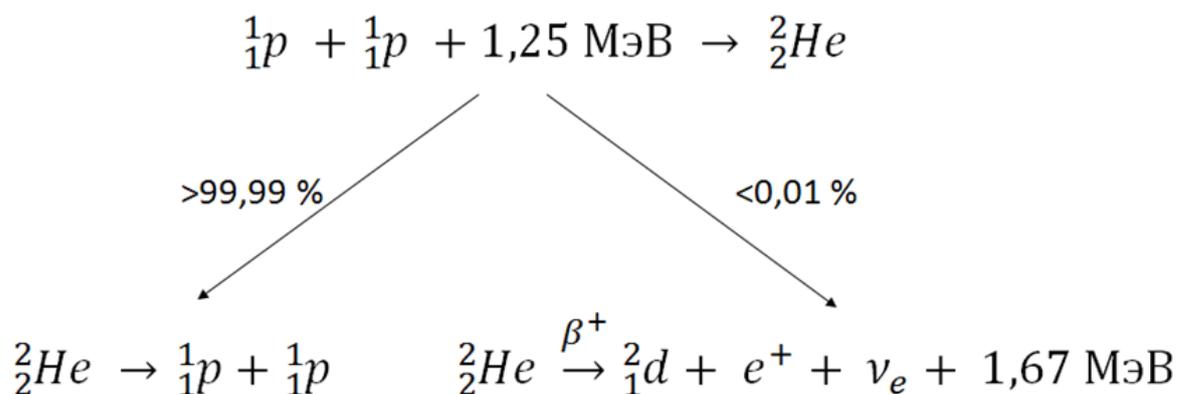
## Оглавление

Протон-протонный цикл .....	1
CNO-цикл .....	2
Тройная гелиевая реакция .....	4
Ядерное «горение» углерода, неона, кислорода, кремния .....	5
Химический состав звёзд .....	5

## Протон-протонный цикл

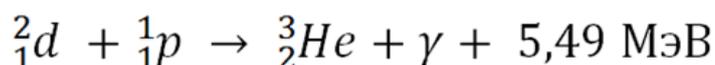
Источником энергии звёзд главной последовательности (красных, оранжевых и жёлтых карликов) являются термоядерные реакции, в ходе которых протоны превращаются в ядра гелия. Последовательность этих реакций называется протон-протонный цикл или pp-цикл. Существует несколько разновидностей pp-цикла (ppI, ppII, ppIII). Все они состоят из нескольких стадий и при температурах 10-14 млн К вносят доминирующий вклад в энерговыделение звёзд.

Наиболее распространён ppI-цикл. На первой стадии два протона, чья энергия позволяет им преодолеть кулоновский барьер, сливаются в ядро гелия-2. Гелий-2 крайне нестабилен. В 99,99% случаев он практически мгновенно распадается обратно на два протона. Но в 0,01% ядро успевает испытать  $\beta^+$ -распад.

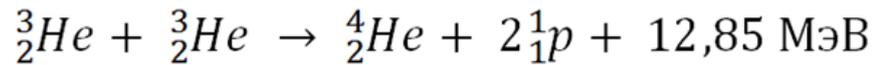


Данный процесс является экзотермическим и сопровождается выделением энергии 0,42 МэВ (1,67 МэВ, выделяющие при распаде, минус 1,25 МэВ, необходимые для преодоления кулоновского барьера). Именно данный распад и запускает цикл реакций, за счёт которых происходит энерговыделение звёзд.

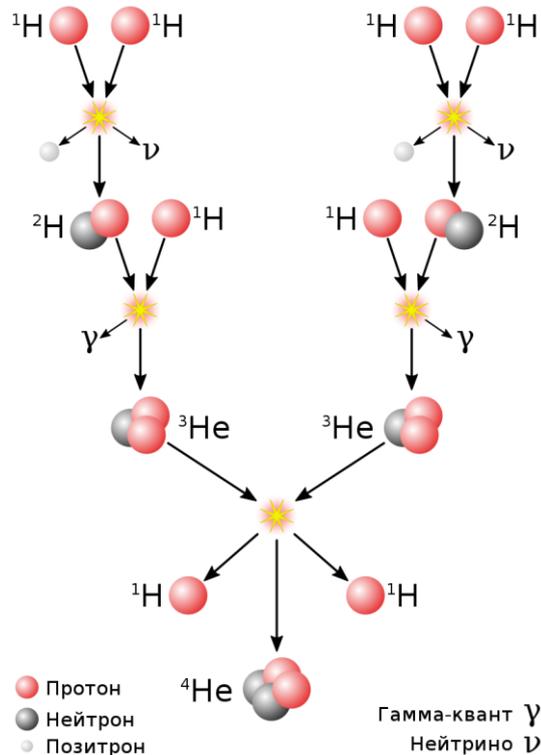
На второй стадии дейтрон, полученный при  $\beta^+$ -распаде, вступает в реакцию с протоном с образованием гелия-3:



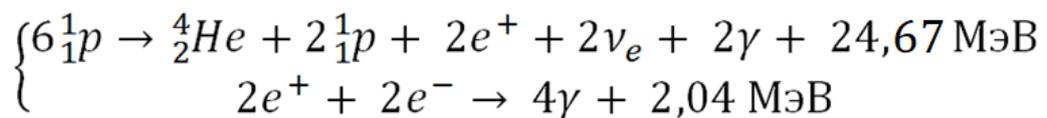
На третьей стадии происходит слияние двух ядер гелия-3 с образованием гелия-4:



Схематично все три стадии можно представить так:



Т.е. для образования одного ядра гелия-4 проходят две реакции первой стадии, две реакции второй стадии и одна реакция третьей стадии. Суммарно в этих реакциях выделяется 24,67 МэВ. Плюс ещё 2,04 МэВ выделяется за счёт аннигиляции двух образующихся в этом цикле позитронов:



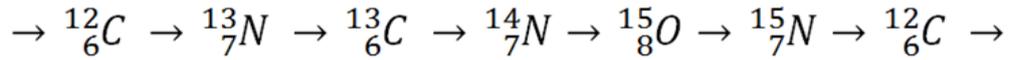
Итого, общий энергетический выход при синтезе одного ядра гелия-4 в ходе протон-протонного цикла составляет 26,71 МэВ.

### CNO-цикл

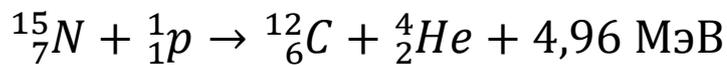
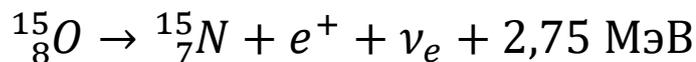
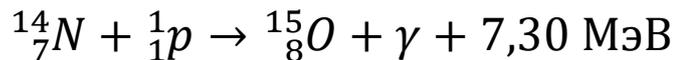
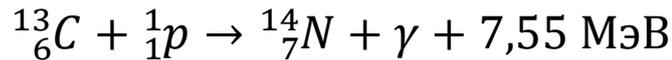
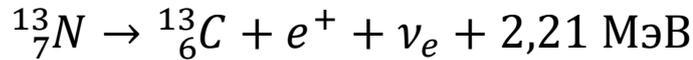
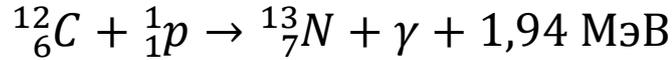
Это несколько вариантов синтеза гелия, представляющих из себя циклическую последовательность термоядерных реакций и радиоактивных распадов, где продукт каждой предыдущей реакции является источником для последующей.

Цикл CNO-I является определяющим в энерговыделении звёзд солнечного типа, сходящих с главной последовательности. Циклы CNO-II, CNO-III и CNO-IV характерны для массивных звёзд.

Цикл CNO-I представляет из себя следующую цепочку:

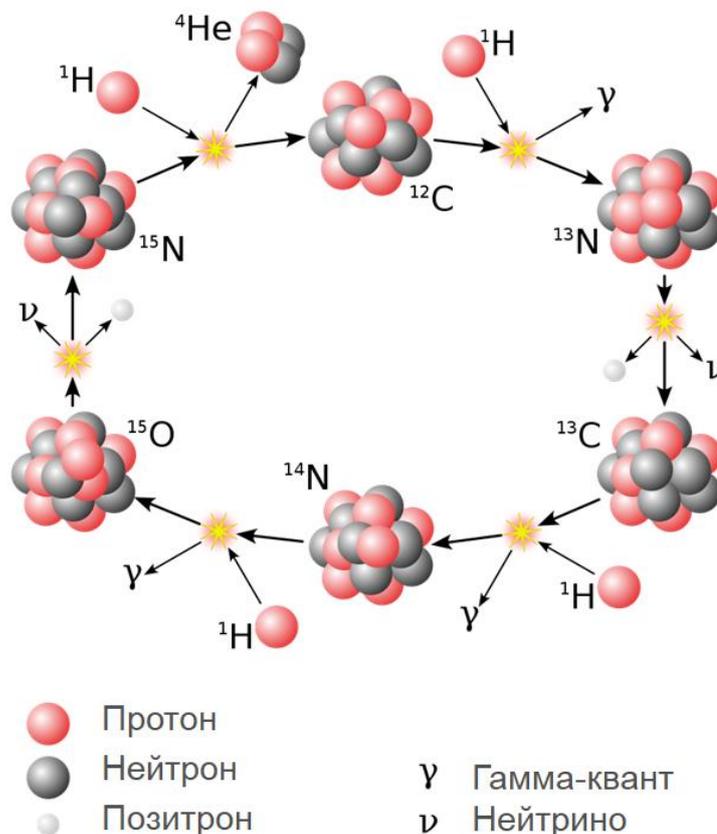


Для запуска цикла звезда должна достигнуть возраста, при котором в ней начал синтезироваться углерод-12. Подробнее цепочку реакций можно расписать так:

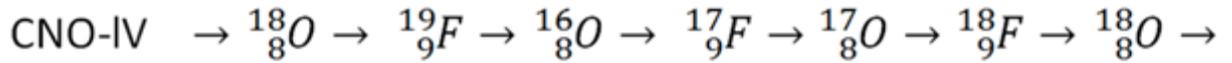
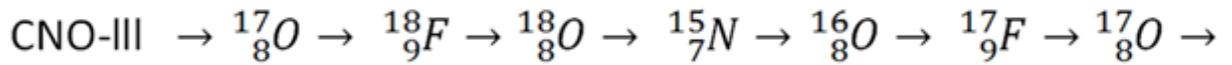
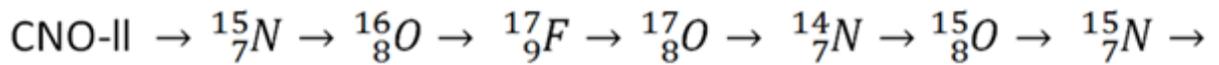


Ядра углерода, азота и кислорода являются катализаторами, т.е. они выступают и как продукт реакции, и как источник её протекания. Фактически, на входе в цикл находятся четыре протона, на выходе – ядро гелия-4. Причём его синтез, также как и в протон-протонном цикле, сопровождается выделением энергии 26,71 МэВ.

Схематично цикл CNO-I можно продемонстрировать на следующем графическом изображении:



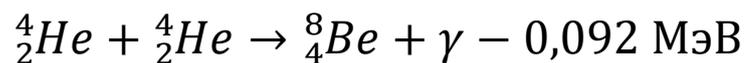
Цепочки реакций и распадов для других типов CNO-цикла характерны для массивных звёзд:



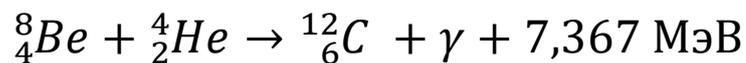
### Тройная гелиевая реакция

Термоядерная реакция синтеза углерода-12 из трёх ядер гелия-4, также известная ядерное «горение» гелия. Для запуска этой реакции ядро звезды должно обладать высокой плотностью и температурой порядка 100 млн К.

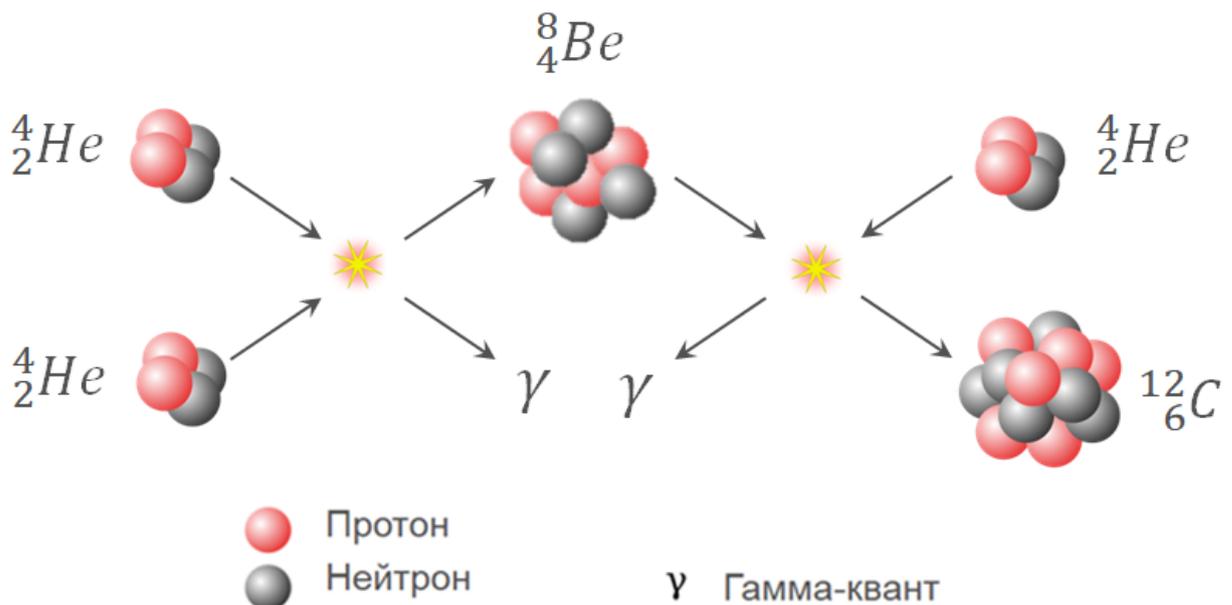
Реакция протекает в два этапа. На первом этапе взаимодействуют два ядра гелия-4 с образованием бериллия-8:



Это эндотермическая реакция. Более того, большинство ядер бериллия распадаются обратно на два ядра гелия-4. Но часть ядер успевает провзаимодействовать с ещё одним гелием-4 с образованием углерода-12. Большая часть углерода-12 также очень быстро распадается обратно на три ядра гелия-4. Но часть испускает гамма-квант и переходит в стабильное состояние. И эта реакция уже экзотермическая:

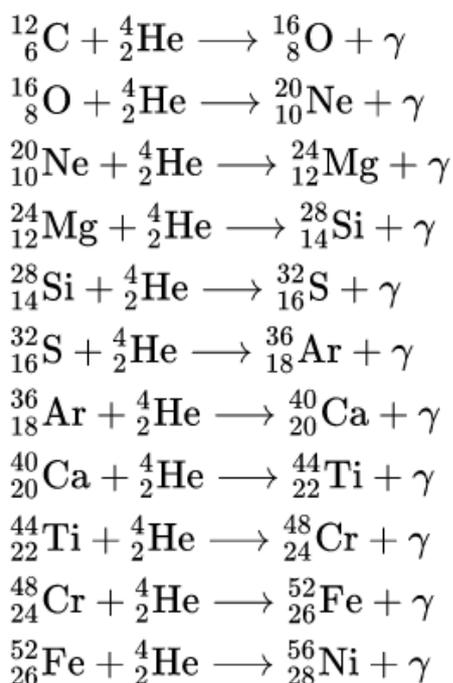


Тройную гелиевую реакцию можно проиллюстрировать следующим образом:



Энергетический выход такой реакции составляет 7,275 МэВ (7,367 – 0,092).

Ядерное «горение» гелия на этом не прекращается. После начала выработки углерода-12 запускается «альфа-лестница» – последовательность реакций, где участвуют альфа-частица (ядро атома гелия) и продукт предыдущей реакции:



Заканчивается эта «лестница» с достижением массового числа 56, после чего дальнейший термоядерный синтез становится энергетически невыгодным.

### Ядерное «горение» углерода, неона, кислорода, кремния

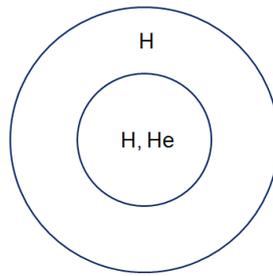
Данные термоядерные реакции характерны для массивных звёзд на последнем этапе их существования. После исчерпания запасов гелия ядро звезды под действием гравитации сжимается и разогревается, в нём начинают протекать термоядерные реакции с очень высоким кулоновским барьером. Продолжительность этой стадии крайне невелика. «Горение» углерода может продолжаться несколько тысяч лет, а «горение» кремния занимает несколько дней.

Термоядерный синтез более тяжелых элементов является эндотермическим. Поэтому звезда больше не может вырабатывать энергию, которая противостояла бы её гравитационному сжатию. Ядро звезды коллапсирует и происходит вспышка сверхновой.

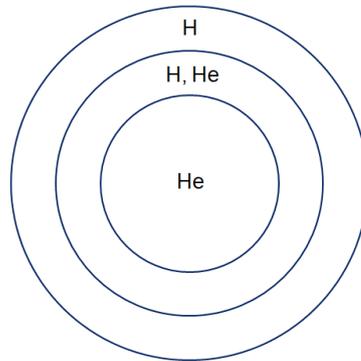
### Химический состав звёзд

Молодые звёзды главной последовательности состоят в основном из водорода и небольшого количества гелия. Процесс энерговыделения сопровождается синтезом новых элементов за счёт протекания термоядерных реакций.

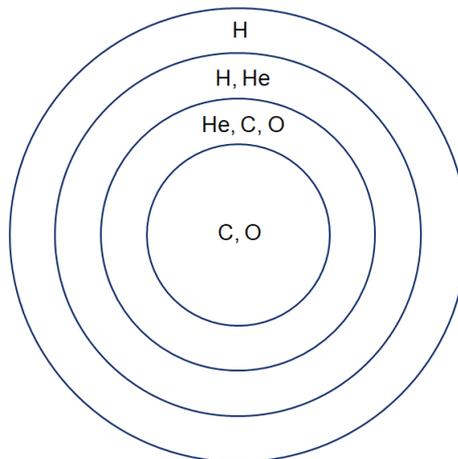
На последующих рисунках показан примерный химический состав основных типов звёзд (без соблюдения масштаба).



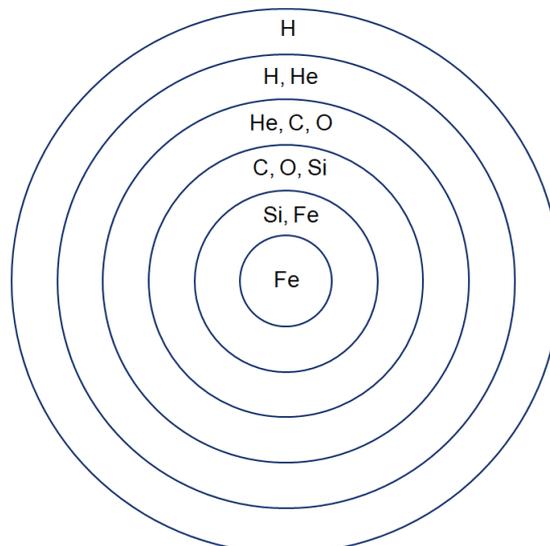
Молодая звезда главной последовательности



Красный гигант



Сверхгигант



Сверхгигант перед вспышкой сверхновой