

# Происхождение элементов

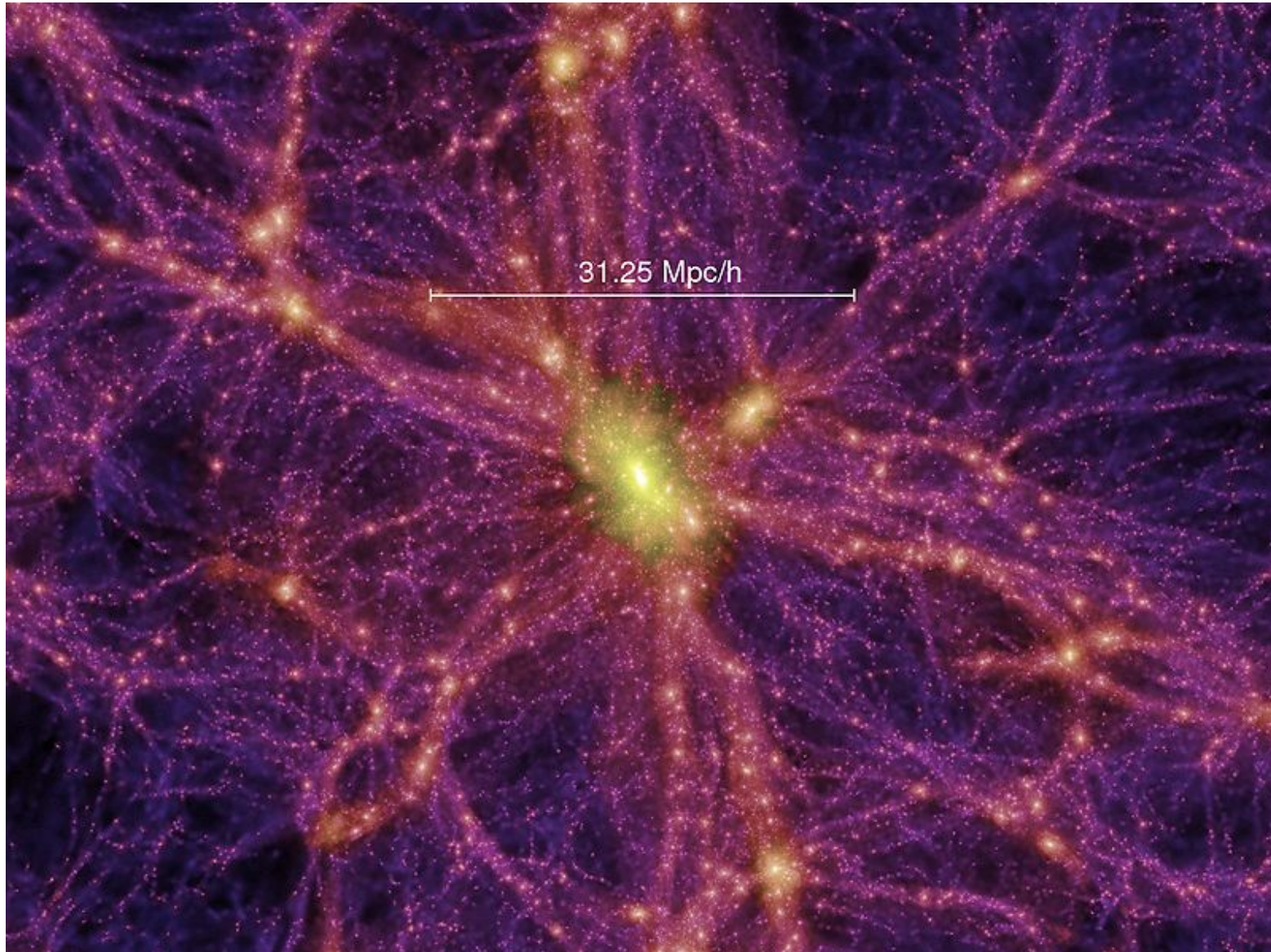
**Это одна из сложнейших проблем.**

Решение будет определяться принятой **моделью происхождения Вселенной.**



Астрономы полагают, что наш мир возник в результате Большого Взрыва. Взорвавшись, гигантский огненный шар разметал по пространству материю и энергию, которые впоследствии сгустились, образовав миллиарды звезд, а те, в свою очередь, объединились в многочисленные галактики

Интернациональная команда астрофизиков возглавляемая учеными из института Макса Планка представляет самую большую симуляцию развития космических структур включая детальную модель формирования галактик и супер-массивных черных дыр.

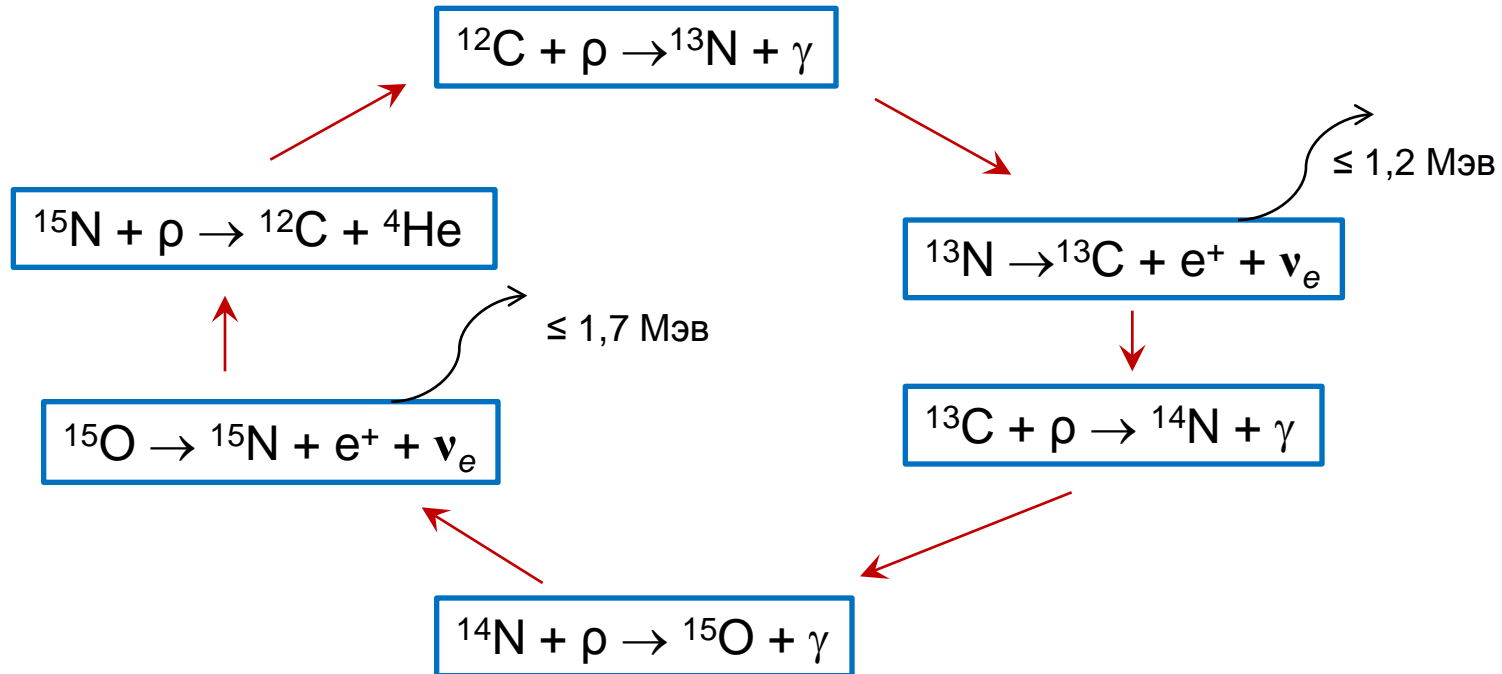


1 mpc/h = 1Megaparsec/0.72(h-безразмерный параметр Хаббла(телескоп) в настоящее время равный 0,72 )  
1Megaparsec(мегапарсек) = 1 000 000 parsec  
1 Parsec(парсек) = 3.26163626 light years  
1 Light Year(Световой год) = 9 460 800 000 000 kilometers

Расчётная структура Вселенной

Проблема происхождения атомов возникла при установлении природы источника энергии Солнца и звезд и при разработке теории Большого Взрыва Вселенной. Проблема источника энергии на Солнце была решена в конце 30-х годов XX века Х. Бете и К.Вейцзекером. На основе расчетов они пришли к выводу, что механизм генерации энергии на Солнце и в других звездах связан с образованием ядер гелия из четырех протонов: p-p-цикл и CNO-цикл. Однако расчеты показали, что в недрах звезд за время существования Вселенной может образоваться относительно мало гелия ( $\approx 2\%$ ) по сравнению с наблюдаемой его распространенностью ( $\approx 25\%$ ).

# Цикл Бете



Спустя примерно десятилетие после публикации работ Х. Бете и К. Вейцекера, Г.А. Гамовым была разработана **теория Большого Взрыва Вселенной**. Согласно этой теории, Вселенная прошла эру нуклеосинтеза в самый начальный момент, когда образовались протоны и нейтроны и вслед за ними изотопы водорода, гелия и лития. Предпринятая Г. Гамовым попытка развить космологическую идею образования всех атомов на раннем этапе расширения Вселенной ( $\alpha\beta\gamma$ -теория) путем последовательного присоединения нейтронов и последующими  $\beta^-$  распадами не увенчалась успехом вследствие возникшей проблемы **"провала масс"** - отсутствия в природе ядер с массовыми числами 5 и 8: как было установлено, ядра  ${}^5_2\text{He}$ ,  ${}^5_3\text{Li}$  и  ${}^8_4\text{Be}$  очень неустойчивые и быстро распадаются.

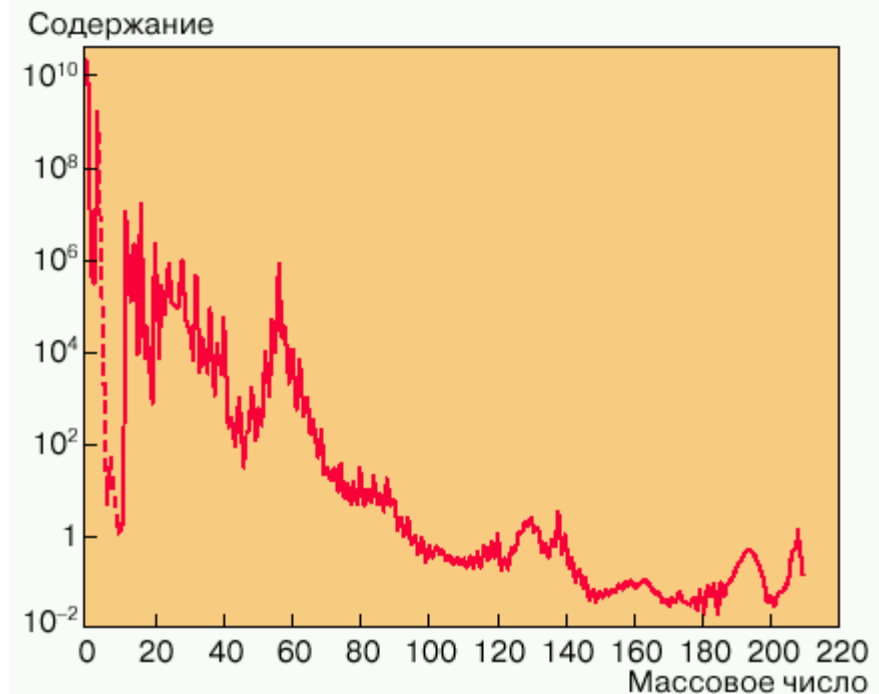


**Геóргий Антонович Га́мов**, также известен как **Джордж Гамов** (1904-1968)

В тот же период **Эдвин Солпíтер** показал, что при условиях, характерных для недр звезд, наряду с горением водорода (p-p- и CNO-циклы) возможно горение гелия с образованием углерода. Так возникли первые основные представления ядерного синтеза, большой вклад в развитие которых кроме названных выше ученых внесли У.Фаулер, Ф. Хойл, Джеффри и Элино́р Маргерит Бербиджи, А.Камерон. Согласно современным научным представлениям, практически все химические элементы образовались и **образуются в результате процессов, происходящих в звездах**, что приводит к эволюционным изменениям состояния звезд. Поэтому проблема образования нуклидов тесно связана также и с вопросами эволюции звезд.

На основе данных о распространённости химических элементов в природе ученые пришли к выводу, что наиболее вероятным источником образования большинства ядер являются последовательности дискретных ядерных процессов, протекающих в недрах звезд, то есть отдельных групп ядерных реакций.

Впервые таблица распространённости элементов была составлена Г. Зюссом и Г. Юри в 1956 году на основе химического состава земной коры, метеоритов и Солнца. Современные данные о распространённости нуклидов представлены на рисунке графической зависимостью содержания нуклидов от массового числа. График завершается последними устойчивыми изотопами Рb и Вi и иллюстрирует многие особенности, отражающие характерные свойства различных процессов нуклеосинтеза. Среди наиболее заметных особенностей выделяется пик группы железа, содержание элементов в котором на 2-3 порядка выше, чем на сглаженной части. Имеются также небольшие двойные пики вблизи массовых чисел 90, 135 и 200.



Распространенность нуклидов в первичной солнечной туманности по отношению к содержанию кремния, принятого за  $10^6$ .



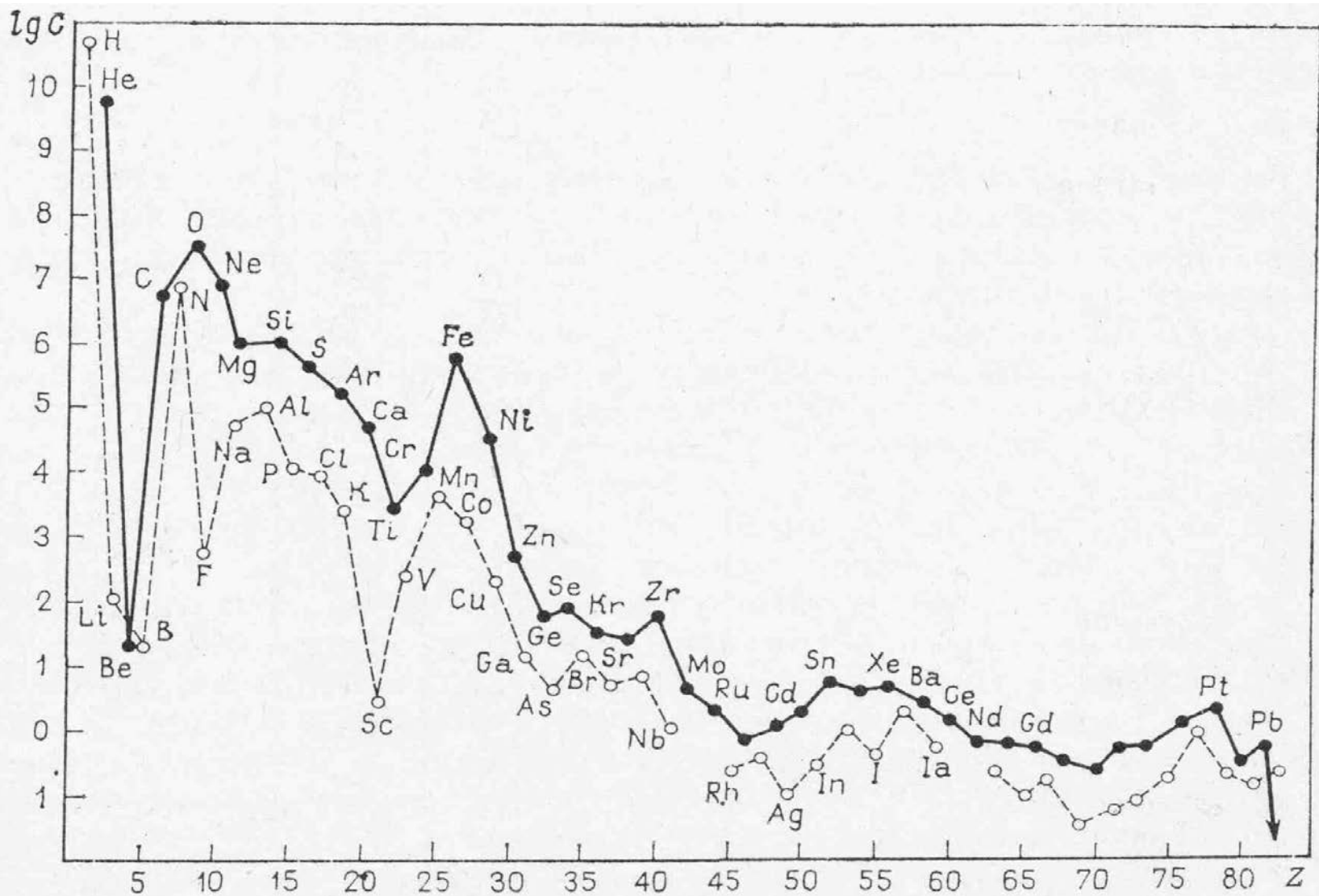
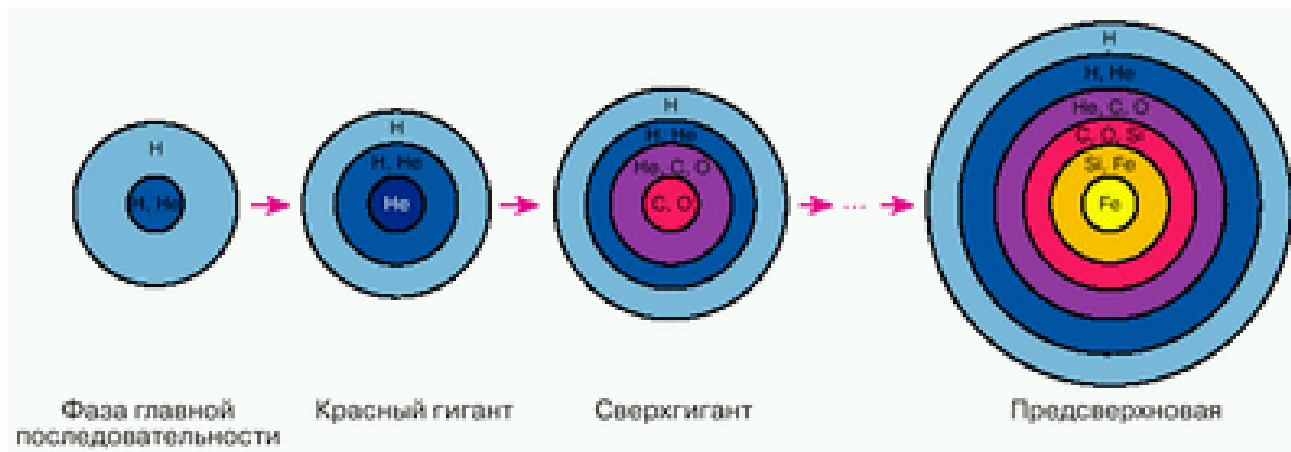


Рис. 39. Зависимость между галактическим распространением элементов ( $\lg C$ ) и порядковым номером  $Z$

Образование ядер химических элементов от углерода до группы железа, согласно современным представлениям, происходит в результате гелиевого, углеродного, кислородного, неоновомго и кремниевого горения в недрах звезд, то есть **благодаря термоядерным реакциям**, в которых участвуют названные нуклиды. Следует отметить, что расчеты ядерных реакций, протекающих в недрах звезд, не имеют столь высокой надежности в отличие от лабораторных ядерных измерений, так как в лабораторных измерениях энергии сталкивающихся частиц намного превышают значения энергии, обнаруживаемой в недрах звезд. Поэтому полученные лабораторные эффективные сечения, характеризующие вероятность реакций, не могут быть приняты для астрофизических реакций, так как зависит от энергии сталкивающихся частиц.

**Горение гелия.** После истощения запасов водорода в ядре звезды в результате p-p- или CNO-циклов он продолжает гореть в слое, который окружает это гелиевое звездное ядро. Масса гелиевого ядра постепенно увеличивается, гравитационные силы в то же время сдвливают ядро звезды, повышая его плотность и температуру. Оболочка звезды, напротив, сильно расширяется, приспособившись к увеличивающейся светимости звезды так, что температура поверхности звезды даже падает. В результате изменившихся физических свойств звезда сходит с главной последовательности диаграммы “спектр-светимость” и превращается в **КРАСНЫЙ ГИГАНТ**.



К моменту, когда в ядре звезды температура достигает  $1,5 \times 10^8$  К, а плотность  $5 \times 10^4$  г/см<sup>3</sup>, начинается так называемая тройная реакция с участием ядер гелия  $3^4\text{He} \rightarrow ^{12}\text{C}$ . Еще до экспериментального обнаружения возбужденного состояния ядра  $^{12}\text{C}$  Ф. Хойл из чисто астрофизических соображений показал, что для образования углерода в процессе горения гелия должно существовать его возбужденное состояние вблизи порога распада на  $^8\text{Be}$  и  $^4\text{He}$ . Несмотря на то что ядро  $^8\text{Be}$ , образуемое из двух ядер гелия, нестабильно ( $\tau = 10^{-16}$  с), оно успевает провзаимодействовать с ядром  $^4\text{He}$ . Это взаимодействие является резонансным и сечение достаточно велико благодаря тому, что энергия второго возбужденного состояния  $^{12}\text{C}^{**}$  соответствует 7,65 МэВ и близка к энергии порога распада на нуклиды  $^8\text{Be} + ^4\text{He}$ , равной 7,37 МэВ.

Наряду с рассмотренной реакцией возможна реакция с образованием кислорода:



Относительные количества  $^{12}\text{C}$  и  $^{16}\text{O}$  в значительной степени определяются скоростями реакций  $3^4\text{He}$  и  $^{12}\text{C}(\alpha, \gamma), ^{16}\text{O}$ . К сожалению, имеются значительные неопределенности в установлении скорости последней реакции. Образующиеся ядра  $^{16}\text{O}$  вступают в реакцию с ядрами  $^4\text{He}$  и образуют ядра неона  $^{16}\text{O} + ^4\text{He} \rightarrow ^{20}\text{Ne} + \gamma$ . Ядро  $^{20}\text{Ne}$  не обладает энергетическим уровнем, близким к порогу распада на  $^{16}\text{O} + ^4\text{He}$ , и поэтому скорость этой реакции небольшая. Напротив, реакция



характеризуется многими вероятными резонансами в области температур, соответствующих горению гелия. Процесс горения гелия сопровождается другими реакциями с образованием различных нуклидов. Например, радиоактивный изотоп фтора  $^{18}\text{F}$ , образующийся в реакции



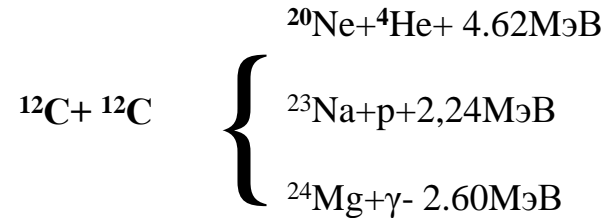
в результате позитронного распада превращается в изотоп кислорода  $^{18}\text{F} \rightarrow ^{18}\text{O} + e^+ + \nu$ . Вслед за образованием  $^{18}\text{O}$  последуют реакции



и другие с участием гелия.

## Горение углерода, кислорода, неона и кремния.

Горение гелия приводит к росту звездного ядра, состоящего главным образом из углерода и кислорода. Звездное ядро окружено слоем, в котором продолжается горение Ne. Когда температура и плотность звездного ядра становятся достаточно большими ( $5 \times 10^8$  К) в результате гравитационного сжатия ядра звезды, начинается слияние ядер углерода с образованием ядер неона, натрия и магния:



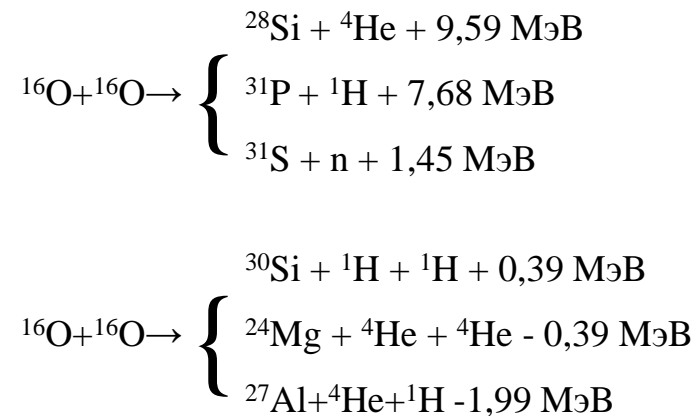
Одновременно с этими реакциями образуются алюминий, кремний и некоторые другие соседние нуклиды в результате захвата образующимися нуклидами высвободившихся  $\text{p}$ ,  $\text{n}$ ,  $\alpha$ . Например,  $^{25}\text{Al}$  образуется в результате



Характер горения углерода сильно зависит от массы звезды. В массивных звездах углерод может загораться и продолжать горение в условиях статического равновесия звезды. В звездах массой всего лишь несколько солнечных масс углерод загорается в условиях вырожденного состояния электронов, если вообще сможет образоваться углеродное ядро.

Горение неона характеризуется короткой стадией и заключается в фотодиссоциации  $^{20}\text{Ne}$  под действием высокоэнергетических  $\gamma$ -квантов с отрывом  $\alpha$ -частицы. Освободившиеся  $\alpha$ -частицы взаимодействуют с неоном и другими ядрами до тех пор, пока не исчерпается запас неона.

Горение кислорода подразумевает слияние двух ядер  $^{16}\text{O}$  при энергиях несколько мегаэлектронвольт ( $T \approx 10^9 \text{K}$ ). Эта реакция имеет также несколько каналов:



Вслед за стадией горения  $^{16}\text{O}$  по мере роста температуры и плотности следует **горение кремния**. Однако фотодиссоциации становятся подвержены сложные атомные ядра, а освобождающиеся  $\alpha$ -,  $p$ -,  $n$ -частицы взаимодействуют с не успевшими диссоциировать ядрами и образуют более тяжелые ядра, включая ядра железного пика на кривой распространенности элементов. Этот процесс описывается сотней ядерных реакций. В качестве примера приведем две из них:



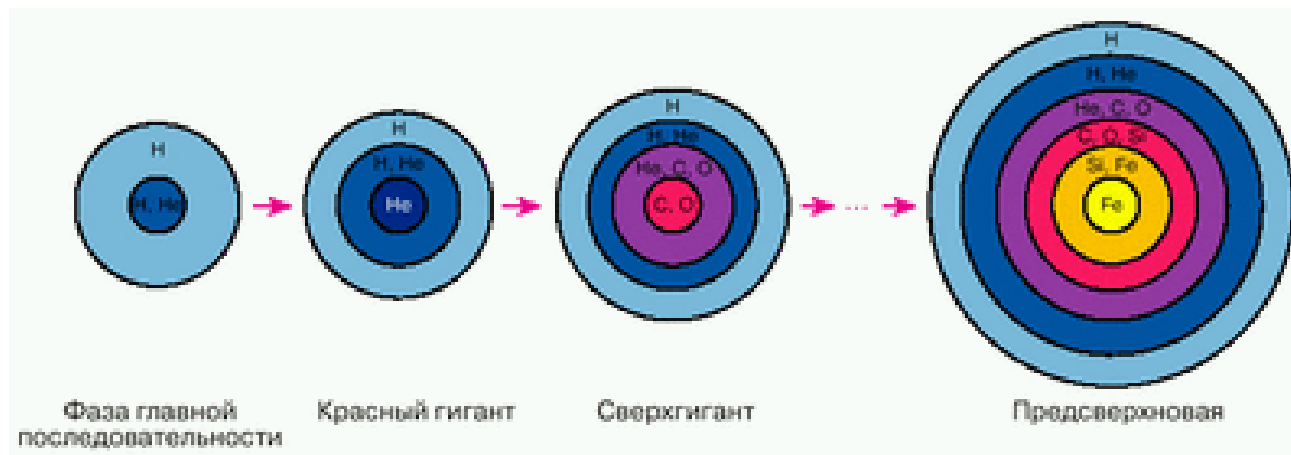
Реакция типа  $^{28}\text{Si} + ^{28}\text{Si} \rightarrow ^{56}\text{Ni} + \gamma$  маловероятна из-за большого кулоновского барьера. Эту реакцию символически можно заменить на следующие:



Ядра  $^{56}\text{Ni}$  в результате двух  $\beta^-$ -распадов превращаются в  $^{56}\text{Fe}$ . Горение кремния является конечной стадией термоядерного синтеза нуклидов в массивных звездах, на которой образуются ядра группы железа, обладающие максимальной удельной энергией связи. Последующий термоядерный синтез в результате присоединения легких ядер ядрами группы железа не имеет места, так как этот процесс должен протекать только с поглощением энергии.



Образование редких (с относительно низким содержанием нейтронов) изотопов тяжелых элементов, которые не могли сформироваться в процессе последовательного присоединения нейтронов (откуда и термин **обойденные ядра**), возможно только на последней, катастрофической стадии эволюции массивных звезд либо под действием потока нейтринного излучения от коллапсирующего ядра звезды, либо в каких-либо других неравновесных процессах.



Итак, по Джеффри Бербиджу для того, чтобы в звездах могли образовываться все химические элементы, **требуется 8 следующих типов ядерных процессов:**

1. **Выгорание Н в результате p-p- реакции или C-N-O цикла** (цикла Бете). При обоих процессах Н преобразуется в He. Эти процессы требуют  $T^0$  порядка  $8 \cdot 10^6 \text{K}$ . Последовательность завершается путем реакций:

либо  ${}^3\text{He} (\alpha, \gamma)$ ,  ${}^7\text{Be} (e^-, \nu)$ ;  ${}^7\text{Li} (\rho, \alpha)$ ,  ${}^4\text{He}$ ,

либо путем  ${}^3\text{He} (\alpha, \gamma)$ ,  ${}^7\text{Be} (\rho, \gamma)$ ,  ${}^8\text{B} (\beta^-, \nu)$ ,  ${}^8\text{Be} (\alpha)$ ,  ${}^4\text{He}$ ;

2. **Выгорание He по реакции  $3\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$** . При последующем добавлении  $\alpha$ -частиц образуются  ${}^{16}\text{O}$  и  ${}^{20}\text{Ne}$ . Этот процесс требует более высокой температуры.

3. **Процесс с участие вновь образованных  $\alpha$ -частиц**, приводящий к образованию из ядер  ${}^{20}\text{Ne}$  последовательно  ${}^{24}\text{Mg}$ ,  ${}^{28}\text{Si}$ ,  ${}^{32}\text{S}$ ,  ${}^{36}\text{Cl}$ ,  ${}^{40}\text{Ca}$ ,  ${}^{44}\text{Sc}$ ,  ${}^{48}\text{Ti}$ . Для этих превращений требуется еще более высокая температура.

4. **Равновесный процесс, который образует элементы в области «железного пика»**, т.е.  ${}^{50}\text{V}$ ,  ${}^{52}\text{Cr}$ ,  ${}^{54}\text{Mn}$ ,  ${}^{56}\text{Fe}$ ,  ${}^{56}\text{Co}$ ,  ${}^{58}\text{Ni}$ . Этот равновесный процесс происходит при  $4 \cdot 10^9 \text{K}$ .

5. **S-процесс** (slow-медленный), являющийся цепной реакцией с захватом нейтронов. Он протекает достаточно медленно для того, чтобы некоторое число  $\beta$ -активных ядер успело распасться, прежде чем произойдет очередной захват нейтрона. В этом процессе образуются ядра вплоть до  $^{200}\text{Bi}$ . **S-процесс** играл важную роль в синтезе элементов Солнечной системы;
6. **r-процесс** (rapid - быстрый) – быстро (менее 100с) протекающая цепная реакция с захватом нейтронов, при которой образуются ядра U, Th, Np, Pu вплоть до Lr;
7. **p-процесс**. В результате его образуются некоторые редкие тяжелые изотопы, богатые протонами. Он протекает при высоких температурах ( $\approx 10^9\text{K}$ ) в реакциях типа  $(p,\gamma)$  и  $(\gamma,n)$  с уже существующими тяжелыми изотопами;
8. **x-процесс**, необходимый для образования ядер дейтерия, Li, Be и B, крайне неустойчивых в условиях звездных недр.

Доказательством реальности этих процессов являются наблюдения, свидетельствующие, что **многим звездам свойственно превращение H в He**. При этом **в звездах небольших размеров синтезируются и другие легкие ядра начала периодической системы элементов**.

**Тяжелые атомные ядра образуются при звездных взрывах, связанных с определенными катастрофическими этапами жизни гигантских сверхзвезд.**

Было замечено, что огромные вспышки, сопровождающие такие этапы и соответствующие по яркости свечению сотен тысяч солнц, довольно быстро гаснут. При этом **полупериод падения яркости (56 сут.) поразительно точно совпадает с периодом полураспада Cf**. Не исключено, что в момент взрыва сверхзвезд происходит синтез таких тяжелых ядер, как  $^{254}\text{Cf}$  и ему подобных. В пользу этого предположения говорит тот факт, что **Cf обнаружен в продуктах взрыва водородных бомб**.

Согласно модели «горячей Вселенной» в первые моменты после «взрыва» не существовали не только молекулы и атомы, но даже ядра еще не могли существовать. Плазмообразная среда представляла собой смесь фотонов, нейтрино и некоторых других элементарных частиц.

Когда температура упала до  $\approx 10^{11}$  К, в плазме образовались протоны и нейтроны с соотношением 1:5. Протоны стали соединяться с нейтронами, образуя дейтерий. Из 2 ядер дейтерия возник тритий (Т) или  ${}^3\text{He}$ , из трития и дейтерия – устойчивый  ${}^4\text{He}$ . В итоге дозвездный газ оказался состоящим из Н(75%) и He(25%) ядер. В небольшом количестве присутствовали  ${}^2_1\text{D}$   ${}^3_2\text{He}$   ${}^7_3\text{Li}$   ${}^9_4\text{Be}$ .

Остальные ядра образовались в недрах звезд.

Считается, что большая часть газа расширяющейся Вселенной заполняет пространство между галактиками и лишь меньшая часть превратилась и превращается ныне в галактики и звезды. **Если плотность межгалактического газа достигнет более чем 10 протонов на 1 м<sup>3</sup> пространства, то силы тяготения остановят расширение Вселенной и через 10-20 млрд. лет начнется противоположный процесс.** Вселенная начнет сжиматься и через миллиарды лет масса вещества Вселенной соберется в ничтожно малый объем, где плотность опять окажется бесконечно большой и где элементы как таковые перестанут существовать в привычном для нас состоянии.