

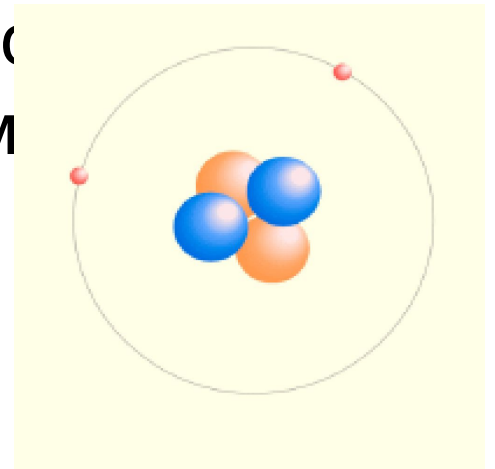


# Общая геохимия

## Лекция 2

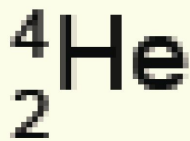
Происхождение химических элементов.

- Атомы состоят из нуклонов (протонов и нейтронов) в ядре, окруженных электронами.
- Число протонов определяет атомный номер  $Z$  (характеристика элемента).
- Число протонов  $Z$  и нейтронов  $N$  определяет атомную массу элемента  $A$ .
- Протоны заряжены положительно, нейтроны не имеют заряда, электроны – отрицательно.
- Нуклиды - атомы, различающиеся числом нуклонов в ядре или, при одинаковом числе нуклонов, содержащие разное число протонов или нейтронов.



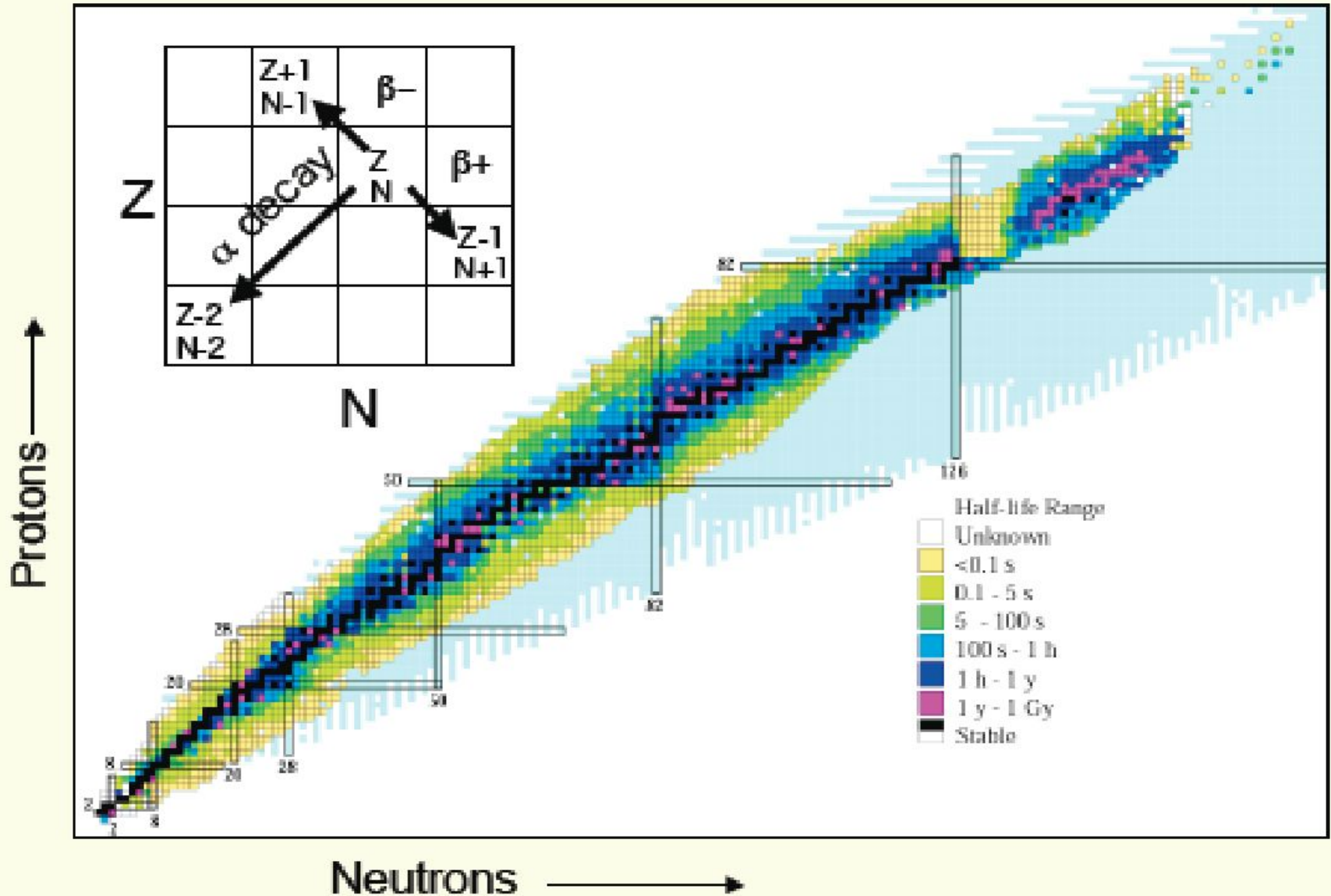
- Атомы с четным количеством протонов и нейтронов более стабильны по сравнению с атомами, где количество тех или иных нуклонов нечетное.
- Особенно стабильны атомы с «магическими числами» протонов или нейтронов (четное число и протонов, и нейтронов).

2, 8, 20, 28, 50, 82 and 126

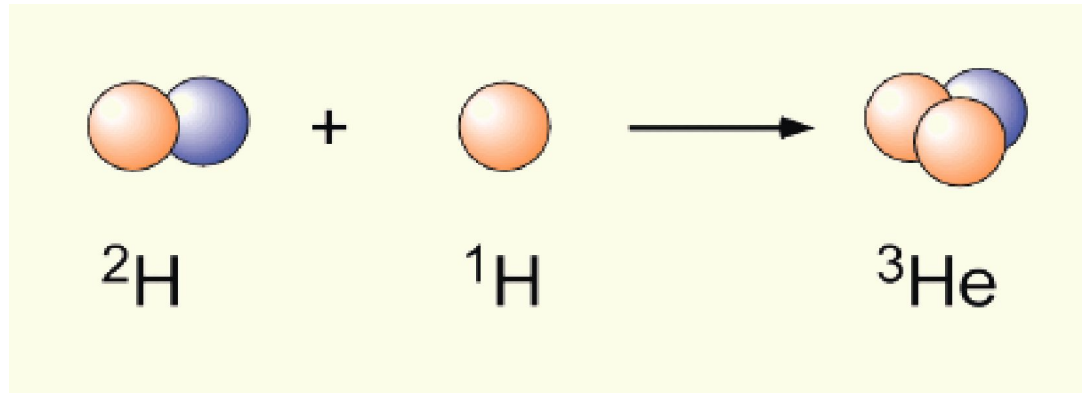


# Таблица нуклидов

## Chart of the Nuclides

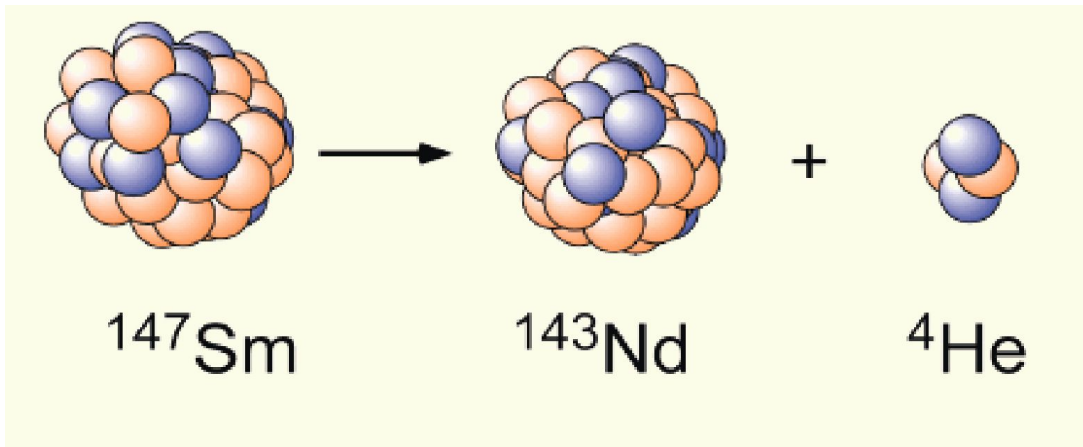


# Ядерные реакции



- Слияние (fusion) ядер происходит между легкими ядрами при экстремально высоких температурах и давлениях.

# Альфа-распад

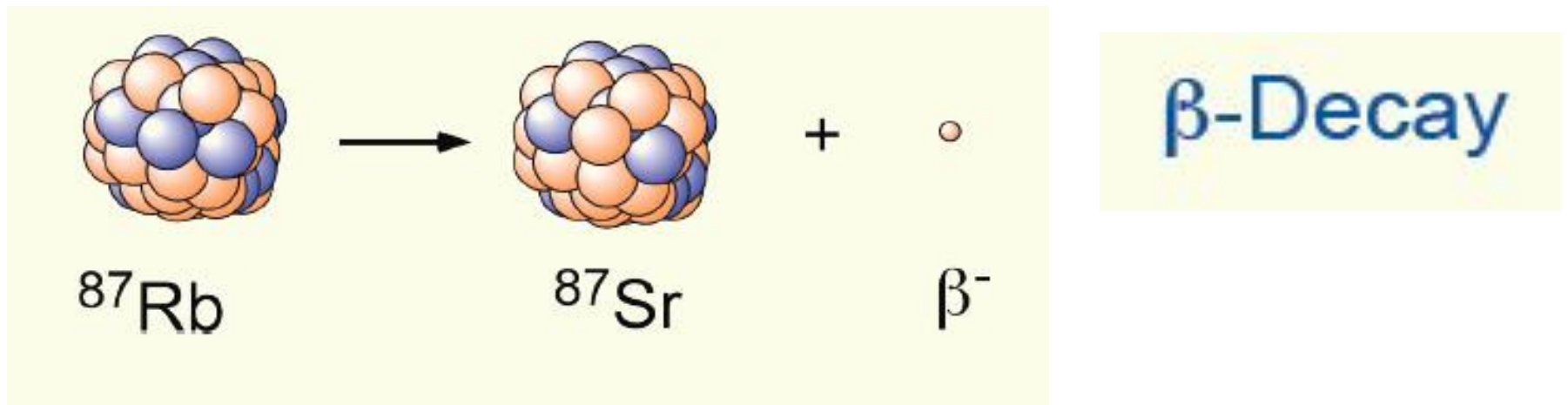


$\alpha$ -decay

Альфа-распад - вид радиоактивного **распада** ядра, в результате которого происходит испускание **альфа-частицы** (ядра атома гелия).

При этом массовое число уменьшается на 4, а атомный номер — на 2. **Альфа-распад** обычно происходит в тяжелых ядрах, где велико электростатическое отталкивание между протонами .

# Бета-распад

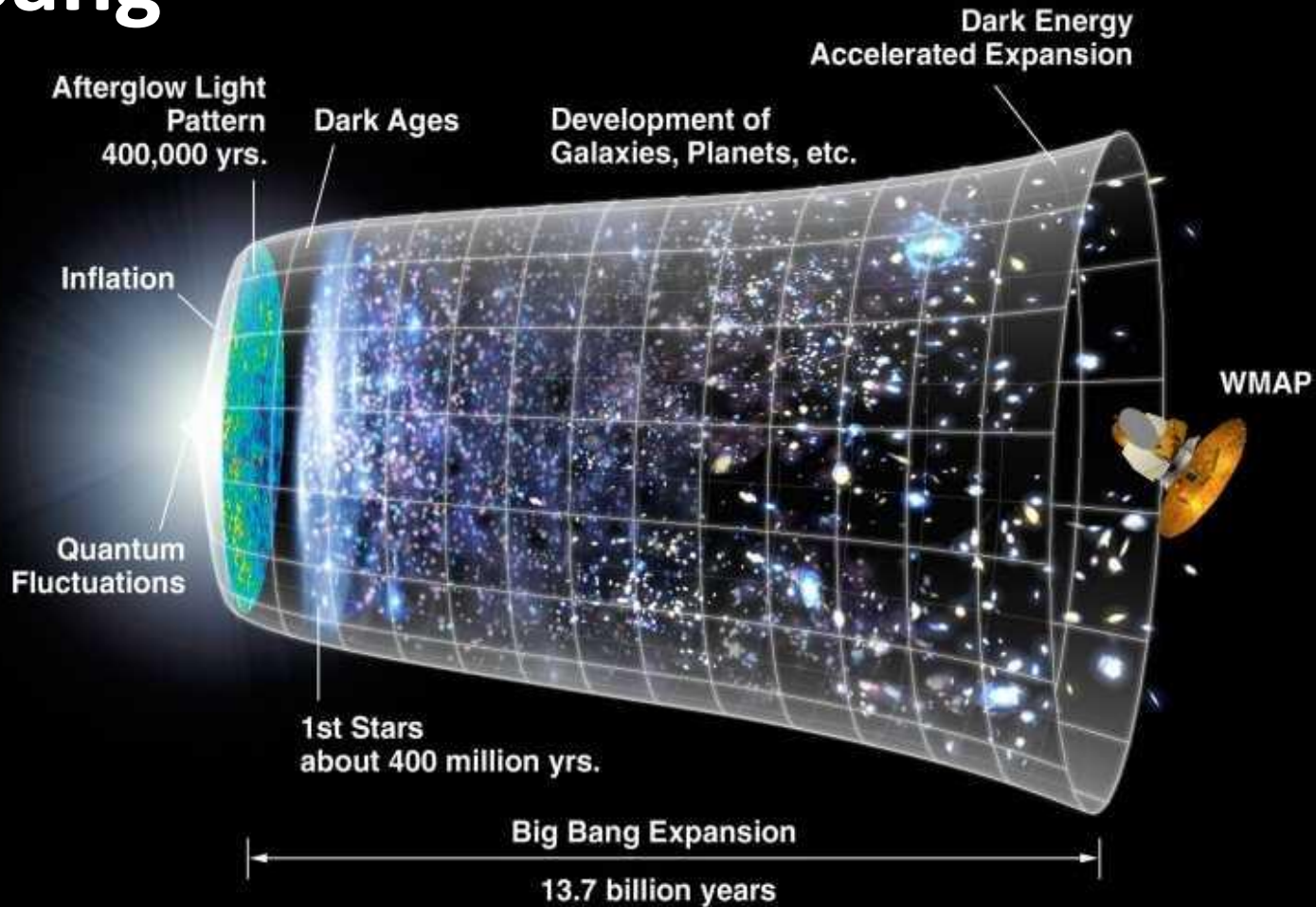


- Бета-распад - тип радиоактивного распада, обусловленного слабым взаимодействием и изменяющего заряд ядра на единицу. При этом ядро может излучать бета-частицу (электрон или позитрон).

- В случае испускания электрона он называется «бета-минус» ( $\beta^-$ ), а в случае испускания позитрона — «бета-плюс-распадом» ( $\beta^+$ ).
- Кроме  $\beta^-$  и  $\beta^+$  распадов, к бета-распадам относят также электронный захват, когда ядро захватывает атомный электрон.
- Во всех типах бета-распада ядро излучает электронное нейтрино ( $\beta^+$  распад, электронный захват) или антинейтрино ( $\beta^-$  распад).



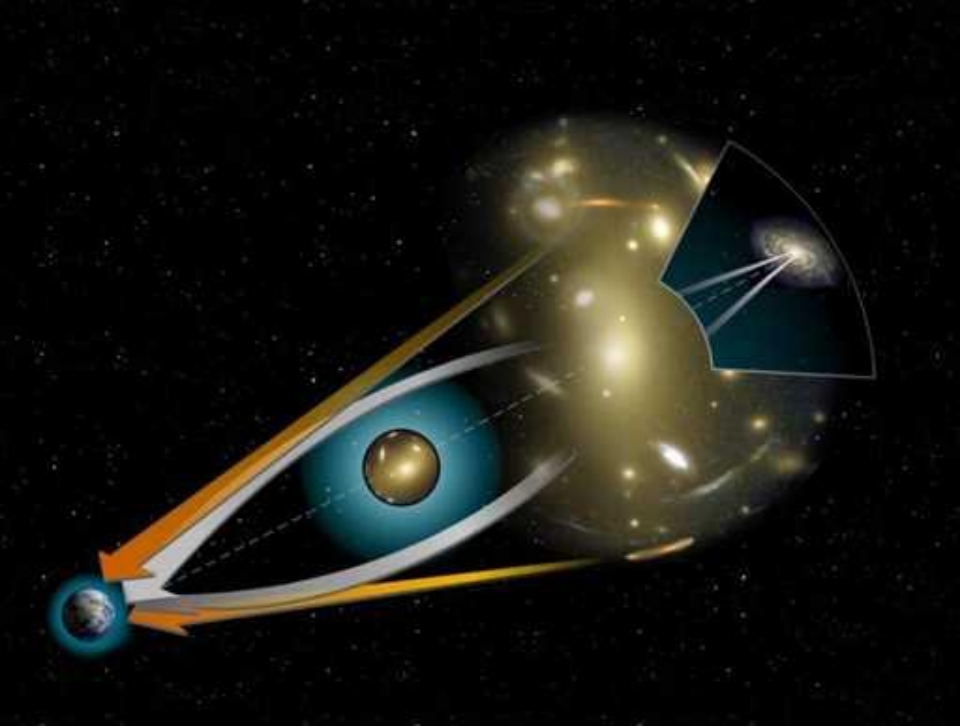
# Большой Взрыв – Big Bang





Возраст Вселенной  
 $13.75 \pm 0.17$  Ga  
определен с помощью  
гравитационной линзы и  
метода, предложенного  
45 лет назад норвежцем  
Рефсдалем.

Вселенная в целом расширяется с ускорением и в буквальном смысле слова «в никуда». Иными словами, галактики не просто разлетаются в разные стороны в пустом пространстве, а раздвигается само пространство: наиболее часто этот процесс ученые иллюстрируют примером воздушного шарика.



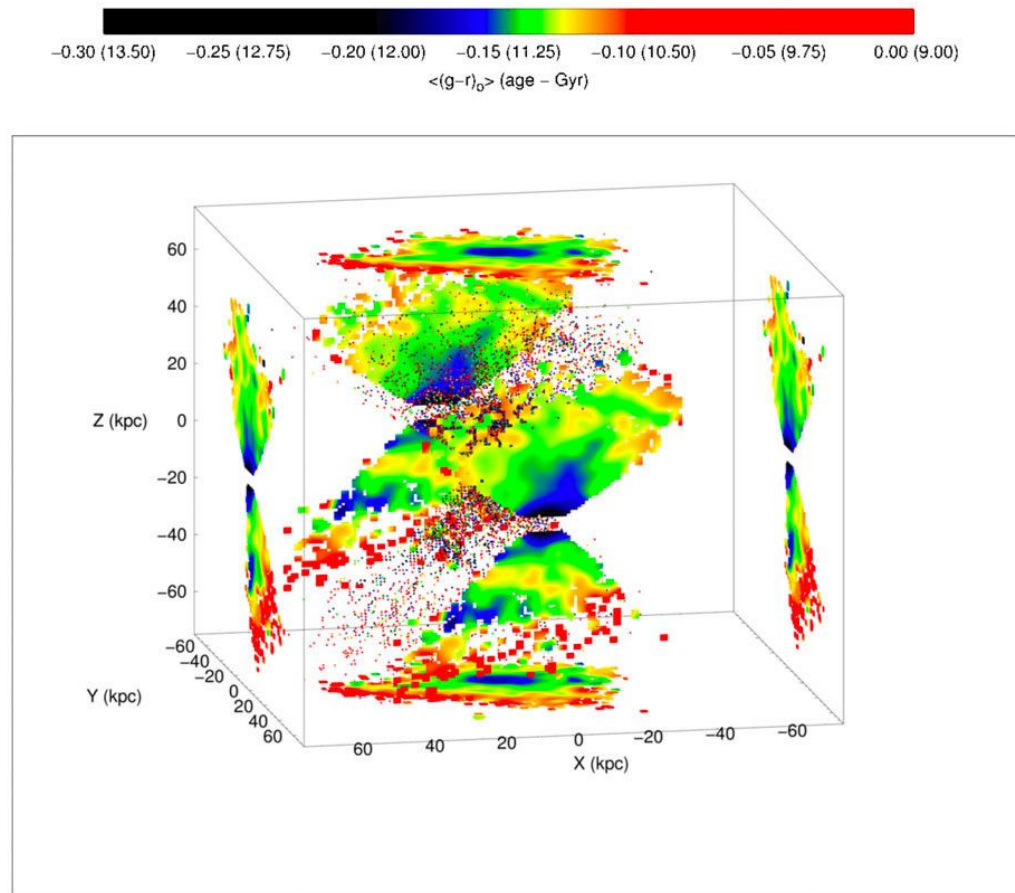
Другие методы — анализ реликтового излучения, электромагнитного излучения, возникшего при Большом Взрыве, наблюдения за вспышками далеких сверхновых.

Иллюстрация гравитационной линзы — свет от далекой галактики отклоняется некоторым массивным объектом и в результате астрономы видят не одно изображение, а несколько. Белые стрелки показывают путь света, оранжевые — кажущееся направление на галактику.

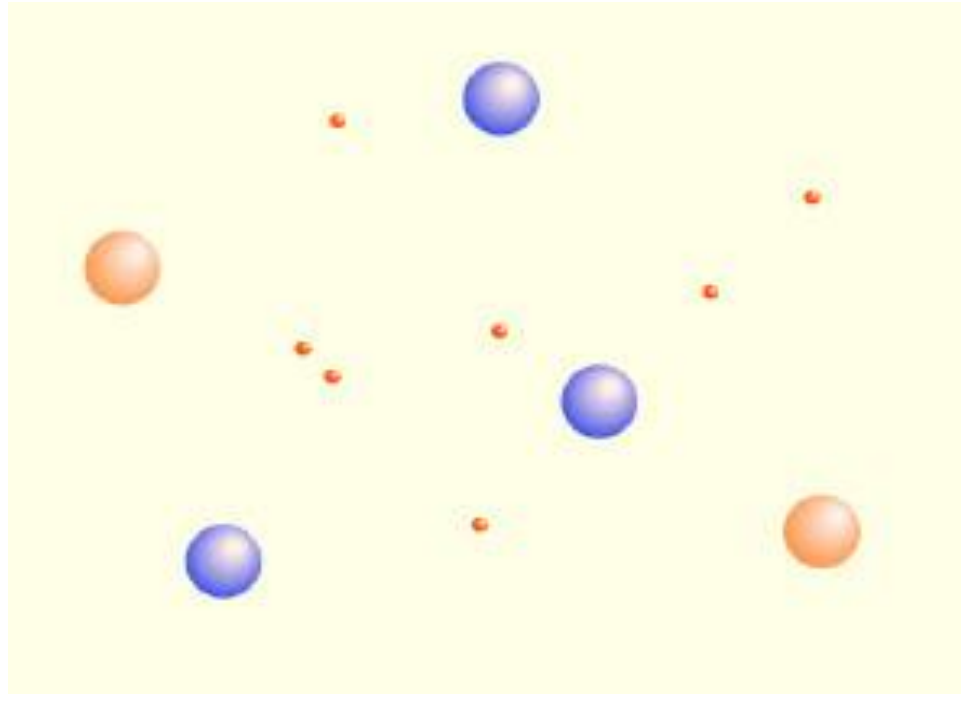
Цвета звёзд в различных регионах Галактики позволили наконец разобраться с тем, как именно сложилась огромная система из двухсот миллиардов

светил.

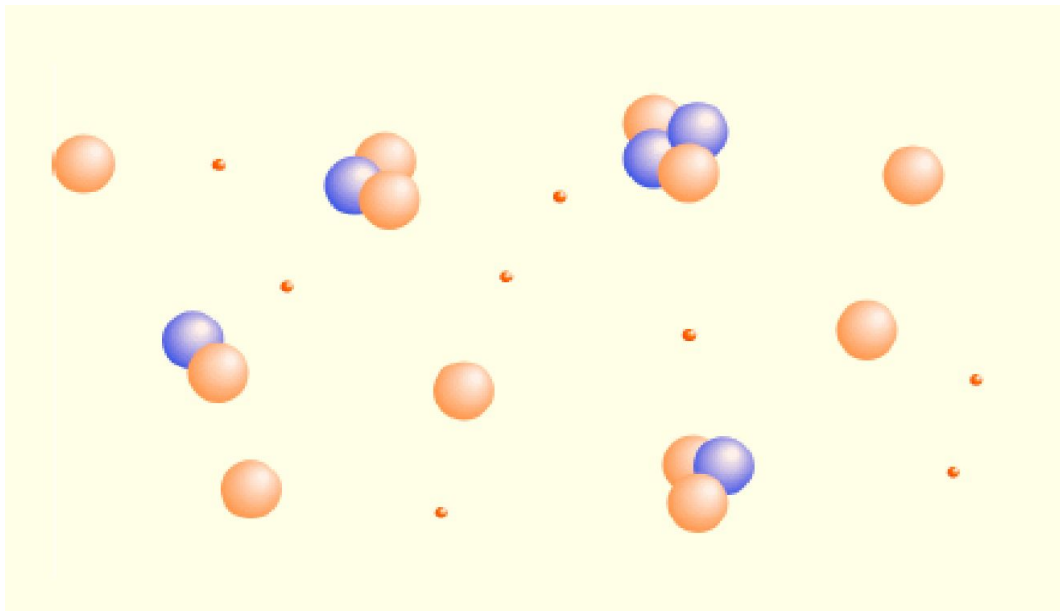
Ученые из Университета Нотр-Дам (США) обобщили данные по спектрам 130000 звёзд Млечного Пути, создав трёхмерную модель, на которой показано, в какой части галактики доминируют светила того или иного типа. С её помощью удалось установить, что формирование диска галактики шло от центра к периферии и началось почти сразу после Большого Взрыва.



# Первичный нуклеосинтез



- После первой секунды после Большого Взрыва материя присутствовала в виде протонов, нейтронов и электронов.
- Температура достигала  $10^{10}$  К.



- Через несколько минут, когда  $T$  понизилась до  $10^9$  К, протоны и нейтроны начали образовывать легкие атомы  ${}^2\text{H}$ ,  ${}^3\text{He}$ ,  ${}^4\text{He}$  и  ${}^7\text{Li}$ .

75 %  $^1\text{H}$

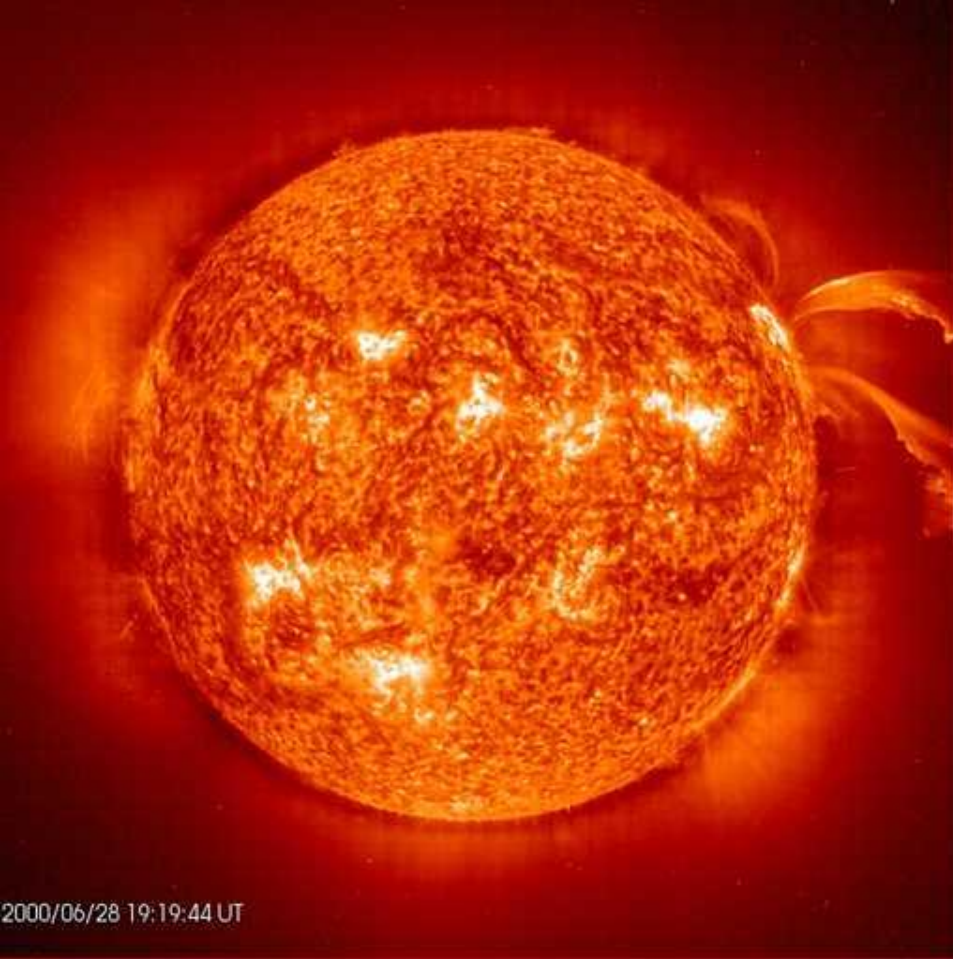
100 ppm  $^2\text{H}$

20 ppm  $^3\text{He}$

25%  $^4\text{He}$

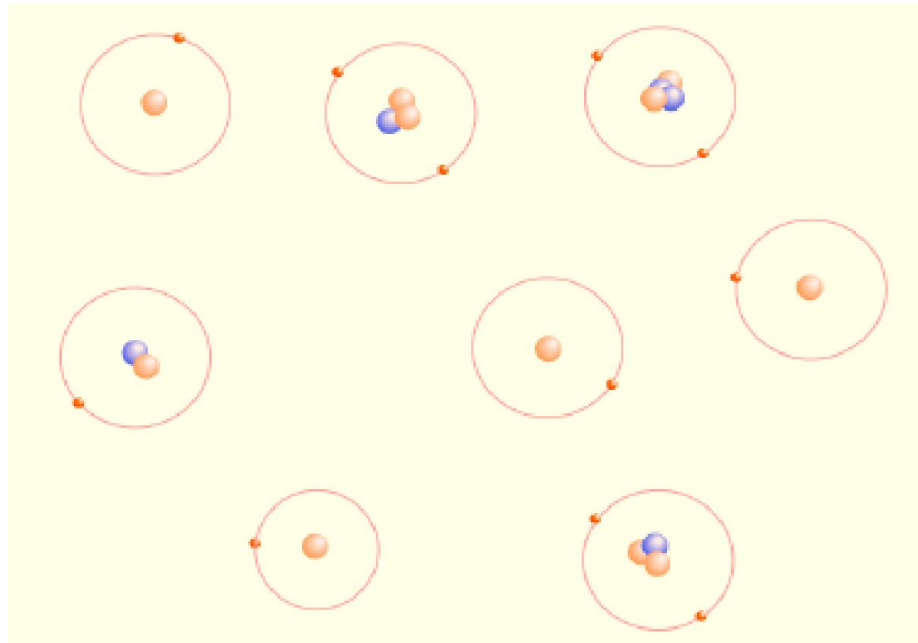
0.5 ppb  $^7\text{Li}$

- Вычисленные заранее количества нуклидов хорошо согласуются с наблюдаемыми в космосе содержаниями.
- В процессе первичного нуклеосинтеза образуются элементы не тяжелее Li.



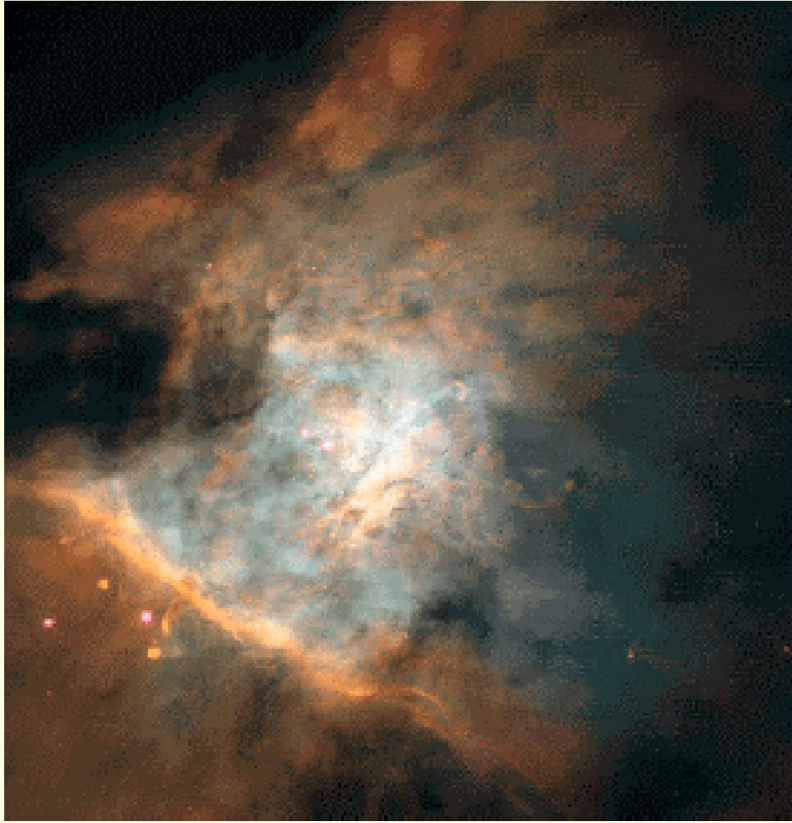
**Солнце** (98% массы Солнечной системы) состоит из **71% H**, **27% He** – результат Большого Взрыва, **2% более тяжелых элементов**, образованных в предшествующих звездах и суперновых после Большого Взрыва). Поэтому Солнце является звездой второго поколения.





- Примерно через 100 000 лет при понижении  $T$  до 5000 К начинают образовываться нейтральные атомы H и He.

# Образование звезд и звездный нуклеосинтез



Образование звезды  
в туманности Орион  
(NASA, телескоп Хаббла)

- Звезды образуются при гравитационной конденсации водородного облака.
- Высокие температуры и давления допускают ядерные реакции – слияние ядер.

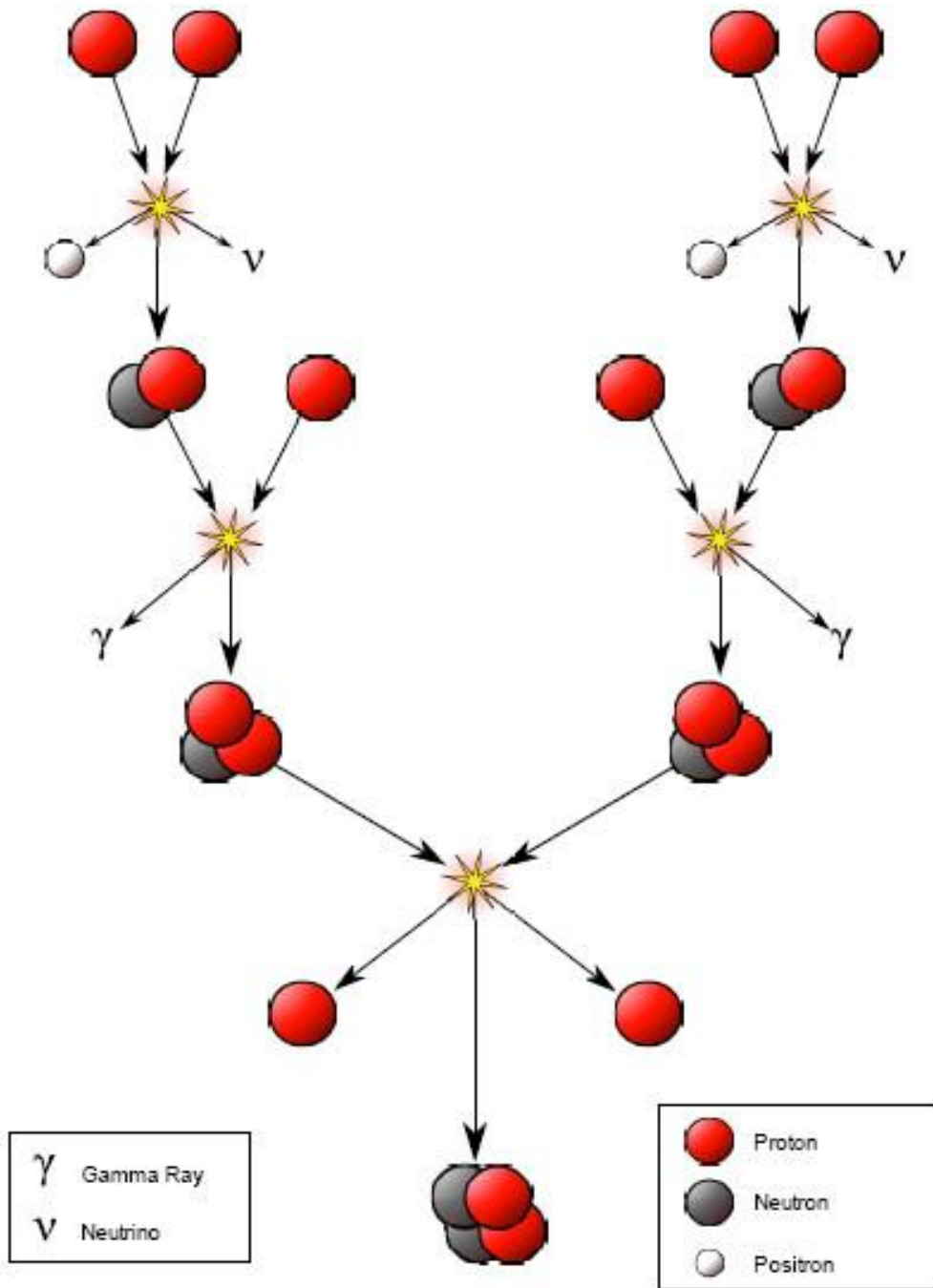
- Проблема происхождения атомов возникла при установлении природы источника энергии Солнца и звезд и при разработке теории Большого Взрыва Вселенной.
- Проблема источника энергии на Солнце была решена в конце 30-х годов XX века Х. Бете и К. Вейцзекером.
- На основе расчетов они пришли к выводу, что механизм генерации энергии на Солнце и в других звездах связан с образованием ядер гелия из четырех протонов.

- **Протон-протонный цикл** — совокупность цепочек термоядерных реакций, в ходе которых водород превращается в гелий в звёздах, находящихся на главной звездной последовательности, основная альтернатива CNO-циклу.
- Доминирует в звёздах с массой порядка Солнца или меньше.
- Время, через которое Солнце израсходует своё «топливо» и термоядерная реакция прекратится, оценивается в 6 миллиардов лет.

- Суммарным итогом реакции является слияние четырех протонов с образованием ядра атома He и выделением энергии, эквивалентной 0,7 % массы этих протонов.
- Эта реакция проходит в три стадии. Вначале два протона, имеющие достаточно энергии, чтобы преодолеть кулоновский барьер, сливаются, образуя дейтрон, позитрон и электронное нейтрино; затем дейтрон сливается с протоном, образуя ядро  $^3\text{He}$ ; наконец, два ядра атома гелия-3 сливаются, образуя ядро атома гелия-4. При этом высвобождается два протона.

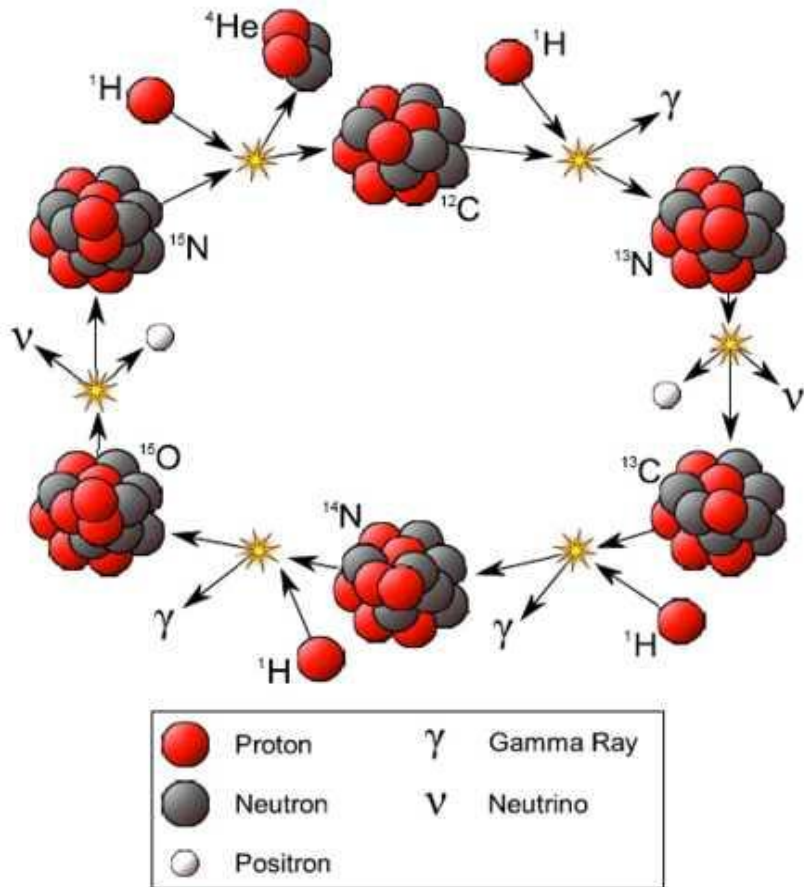
# p-p-ЦИКЛ

- $p + p \rightarrow {}^2\text{D} + e^+ + \nu_e + 0.4 \text{ МэВ}$
- ${}^2\text{D} + p \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma + 5.49 \text{ МэВ}$
- ${}^3\text{He} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + 2p + 12.85 \text{ МэВ}$

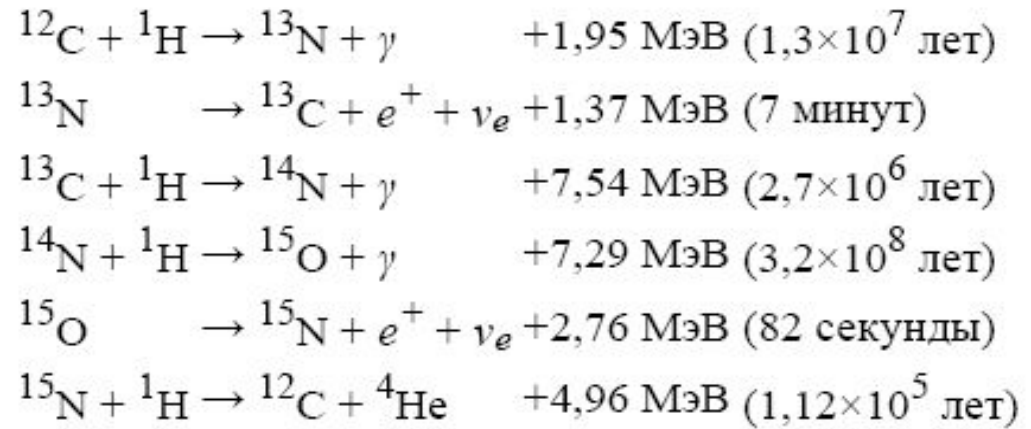


# CNO-ЦИКЛ

- **CNO-цикл** — термоядерная реакция превращения водорода в гелий, в которой углерод, кислород и азот выступают как катализаторы.
- Считается одним из основных процессов термоядерного синтеза в массивных звёздах главной последовательности.
- **CNO-цикл** — это совокупность трёх сцепленных друг с другом или, точнее, частично перекрывающихся циклов. Самый простой из них **CN-цикл** (цикл Бете или углеродный цикл) был предложен Хансом Бете в 1938 г. и, независимо от него, Карлом Вайцзекером.



Основной путь реакции CN-цикла :



Суть этого цикла состоит в непрямом синтезе  $\alpha$ -частицы из четырёх протонов при их последовательных захватах ядрами, начиная с  $^{12}\text{C}$ .

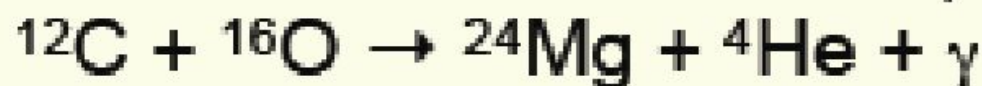
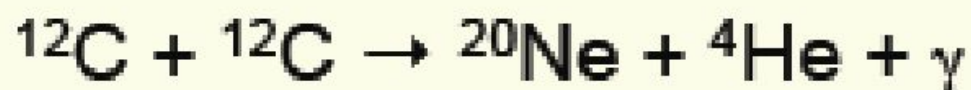


- **Звёздный нуклеосинтез** — собирательное понятие для ядерных реакций образования элементов тяжелее H, внутри звёзд, а также, в незначительной степени на их поверхности.
- М. Бербидж, Г. Бербидж, В. Фаулер, Ф. Хойл в 1957 году указали основные процессы звёздной эволюции, в которых происходит образование атомных ядер. К процессам **звёздного нуклеосинтеза** относятся:

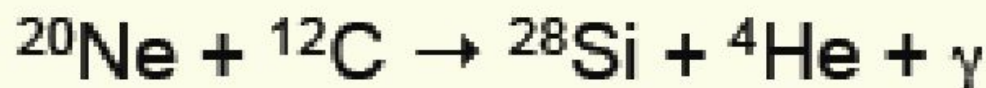
- «Горение» водорода (протон-протонный цикл) — образование  ${}^4_2\text{He}$
- CNO-цикл — образование  ${}^4_2\text{He}$
- «Горение» гелия (тройной  $\alpha$ -процесс) — образование  ${}^{12}_6\text{C}$

- Образование элементов, тяжелее гелия:
  - «Горение» углерода — образование  ${}_{10}^{20}\text{Ne}$ ,  ${}_{12}^{24}\text{Mg}$
  - «Горение» кислорода — образование  ${}_{14}^{28}\text{Si}$ ,  ${}_{16}^{32}\text{S}$
  - «Горение» неона — образование  ${}_{18}^{36}\text{Ar}$ ,  ${}_{20}^{40}\text{Ca}$
  - «Горение» кремния — образование  ${}_{26}^{52}\text{Fe}$ ,  ${}_{28}^{56}\text{Ni}$
  - $\alpha$ -процесс
  - Равновесный процесс ( $e$ -процесс)

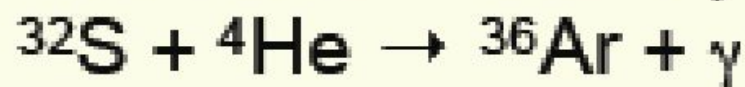
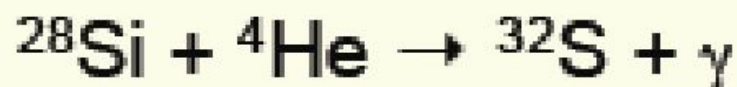
C and O burning:



Ne burning:

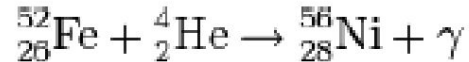
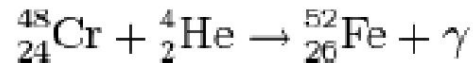
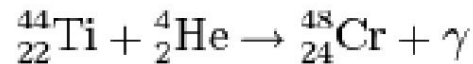
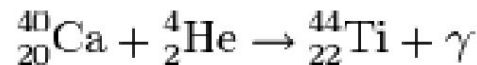
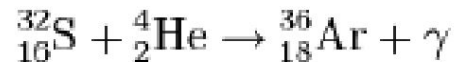
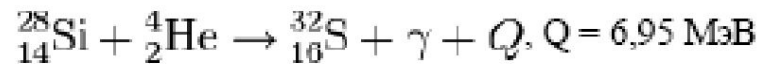
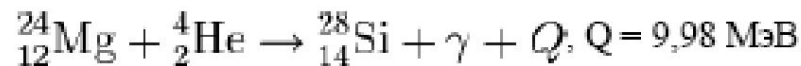
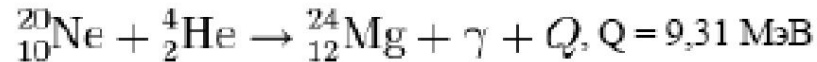
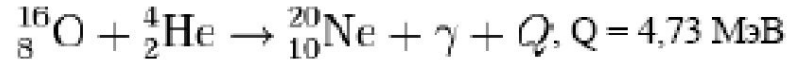
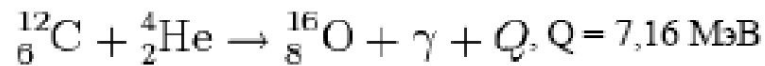


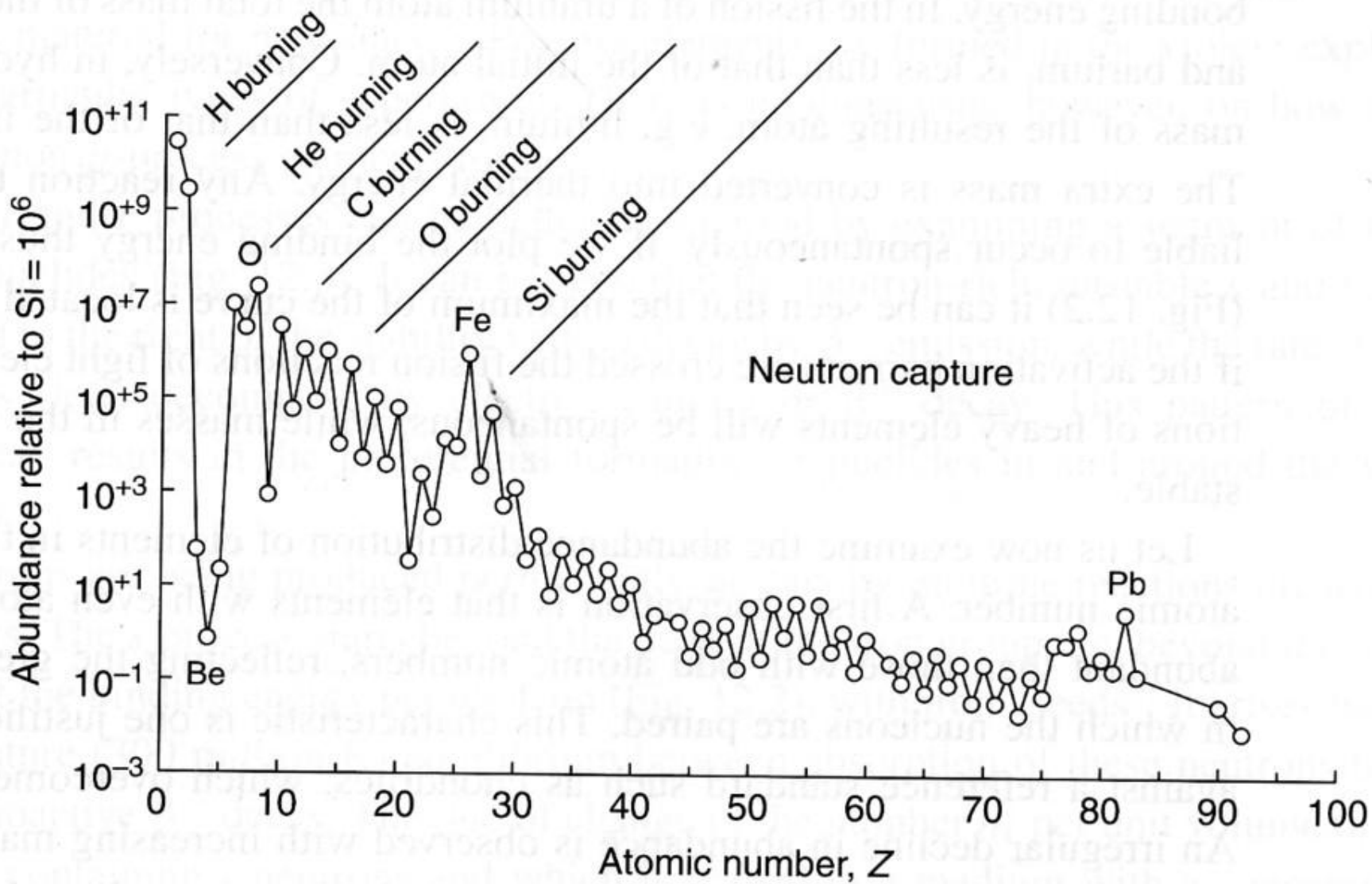
Si burning:



also produces  $^{40}\text{Ca}$ ,  $^{44}\text{Ca}$ ,  $^{48}\text{Ti}$ ,  $^{52}\text{Cr}$ ,  $^{56}\text{Fe}$

- **Альфа-процесс (α-процесс)** — ядерная реакция захвата α-частиц ядрами лёгких элементов. В звёздах он является основным источником производства элементов от He до Ni.



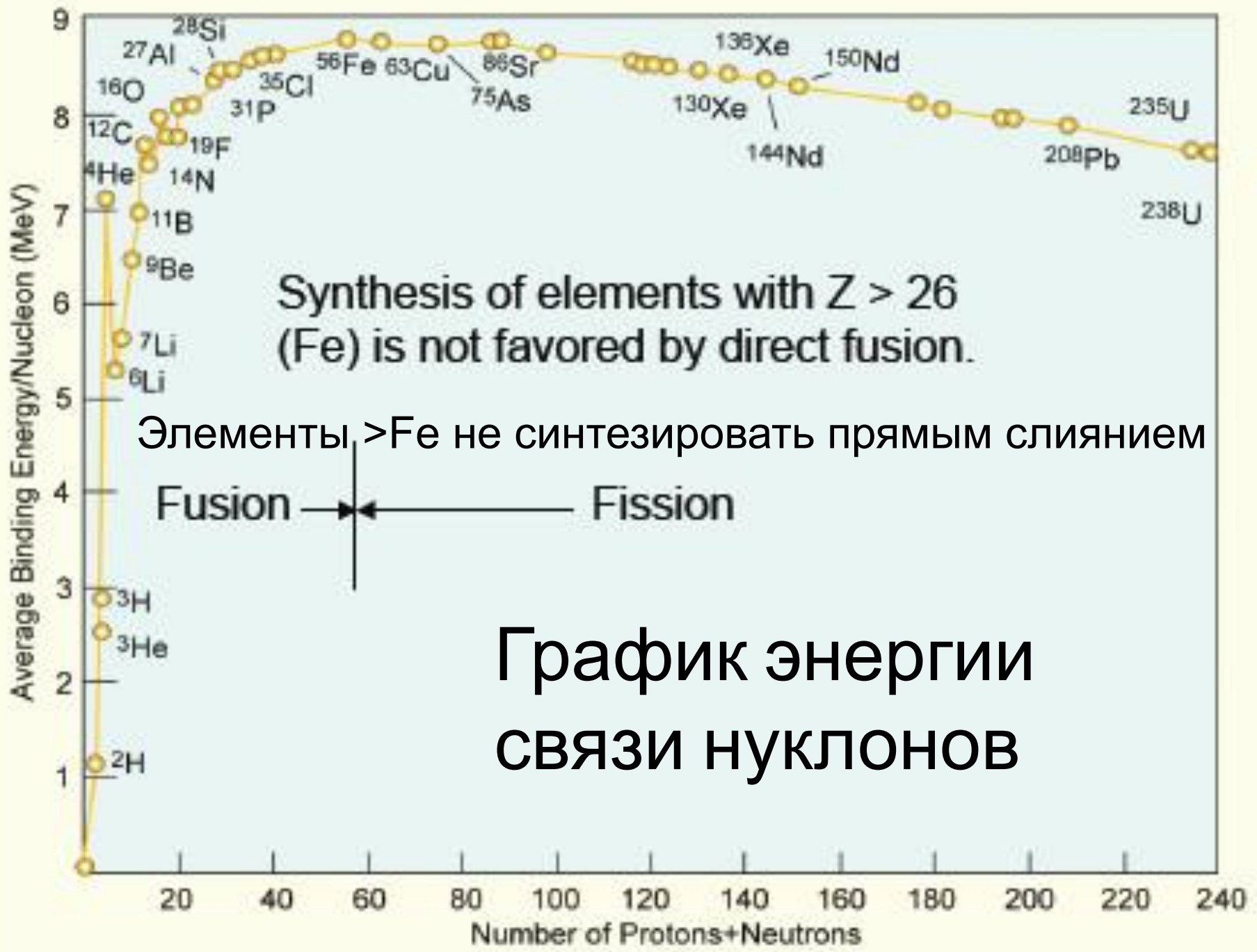


- Образование элементов, тяжелее железа:
  - Нейтронный захват:
    - $r$ -процесс
    - $s$ -процесс
  - Протонный захват ( $r$  $p$ -процесс)
  - Фоторасщепление:
    - $x$ -процесс
    - $p$ -процесс

# Образование тяжелых и сверхтяжелых элементов

- Синтез атомных ядер, расположенных в таблице Д. Менделеева за группой железа, должен обеспечиваться другими механизмами и, как показали М. и Дж. Бербиджи, У. Фаулер и Ф. Хойл еще в 1957 году, такие нуклиды образуются в результате трех принципиально разных процессов: *s*-, *r*- и *p*-процессов.
- Эти процессы сокращенно названы по первым буквам фамилий первооткрывателей:  $V^2FN$



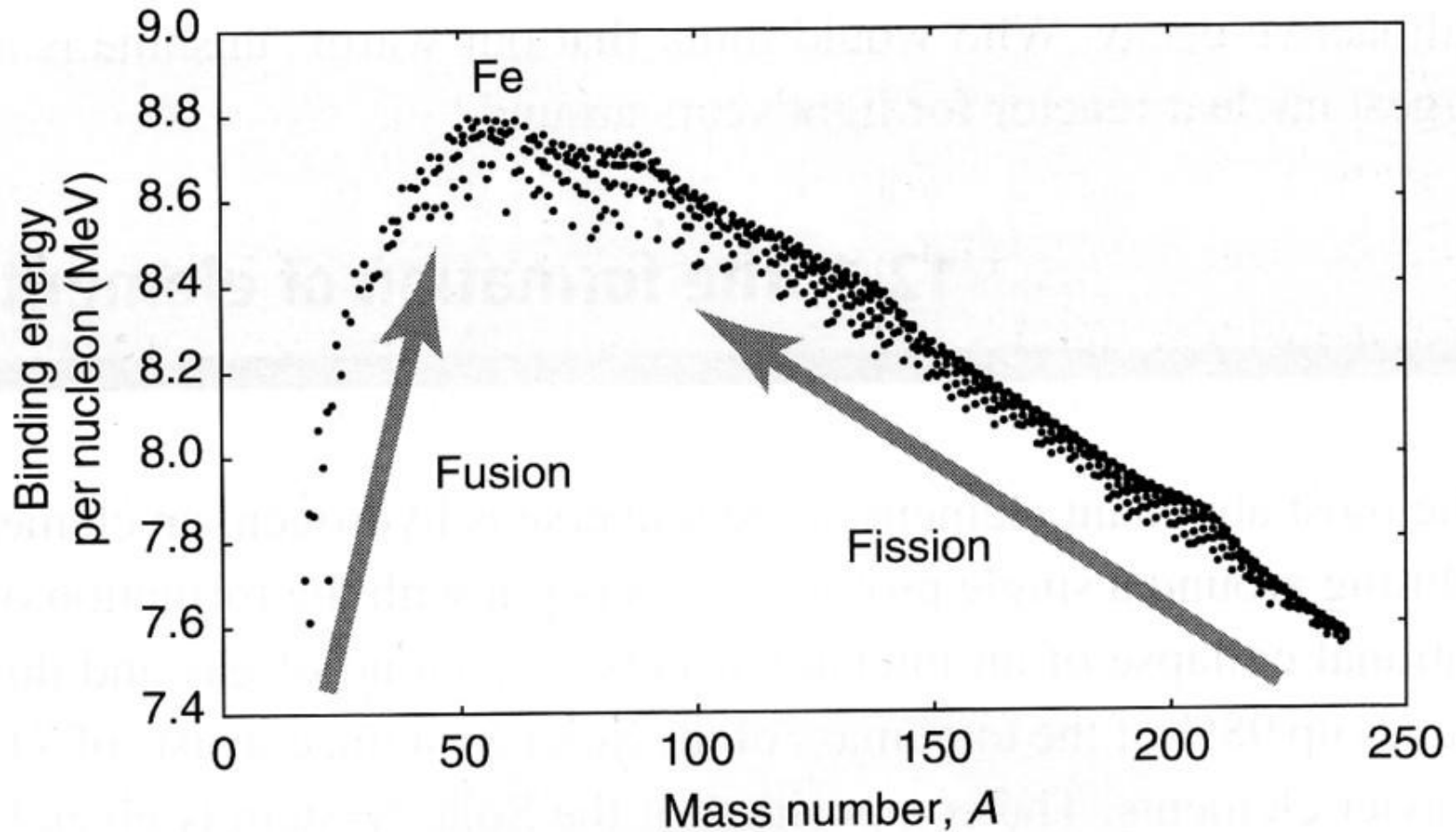


Synthesis of elements with  $Z > 26$  (Fe) is not favored by direct fusion.

Элементы  $> \text{Fe}$  не синтезировать прямым слиянием

Fusion ← Fission

График энергии  
связи нуклонов

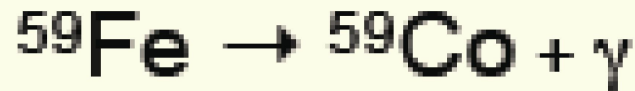


Реакции слияния ядер до Fe и деления ядер после Fe протекают с выделением энергии (самопроизвольно).

# S-процесс (slow)

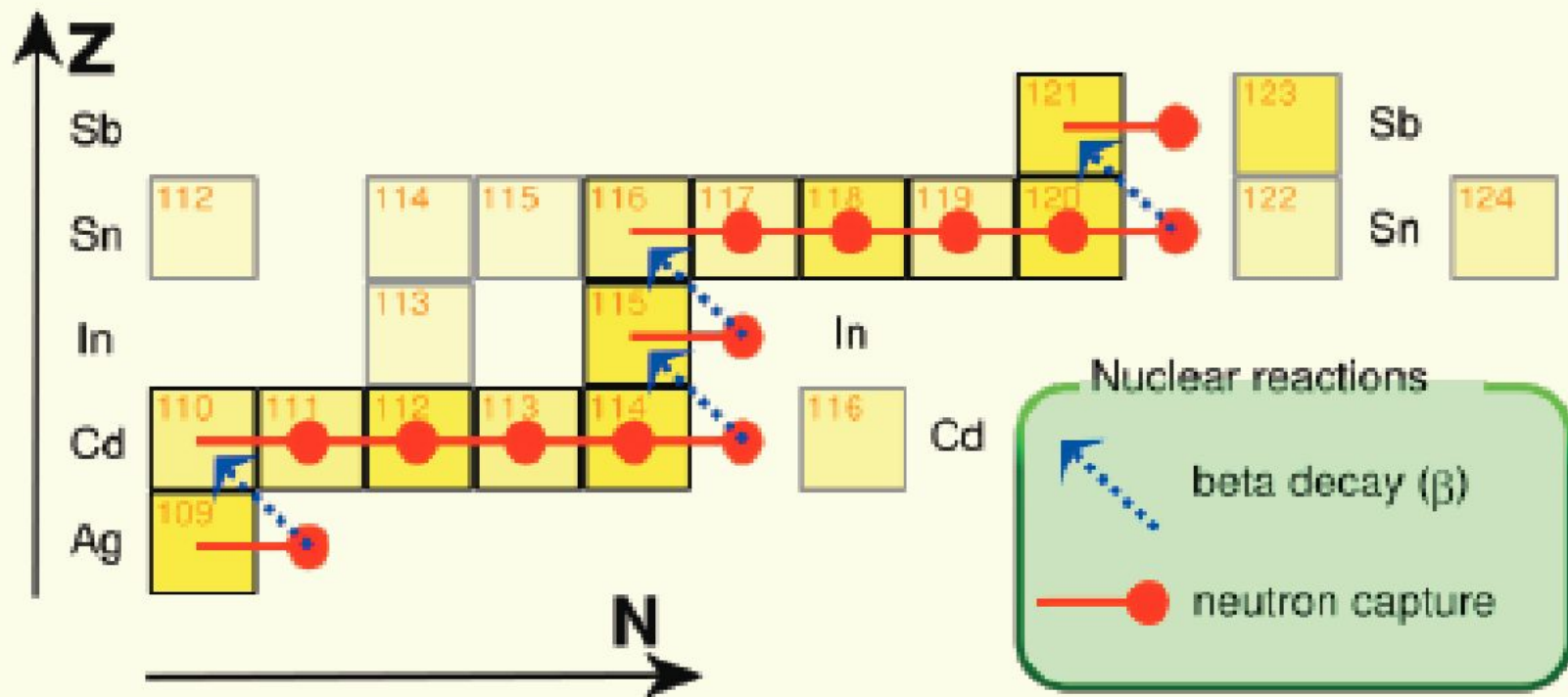
- Этот процесс представляет собой медленный захват нейтронов, при котором образующиеся неустойчивые ядра распадаются прежде, чем успеют присоединить следующий нейтрон.
- Поэтому можно заключить, что s-процесс идет в недрах звезд при их нормальной стадии эволюции.

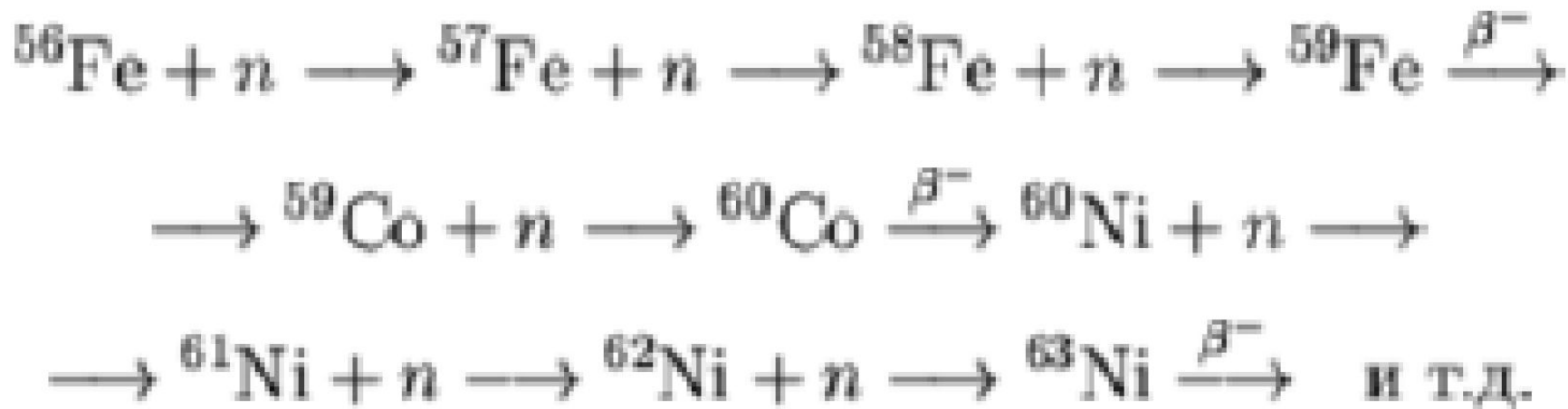
- В звездах – Красных гигантах – горение O и Si производит значительный поток нейтронов. Они могут быть захвачены ядрами для образования новых изотопов с массой более 56.



Но ядра  $^{59}\text{Fe}$  не стабильны и распадаются на  $^{59}\text{Co}$  с превращением нейтрона в протон и испусканием гамма-кванта.

# S-процесс от Ag до Sb



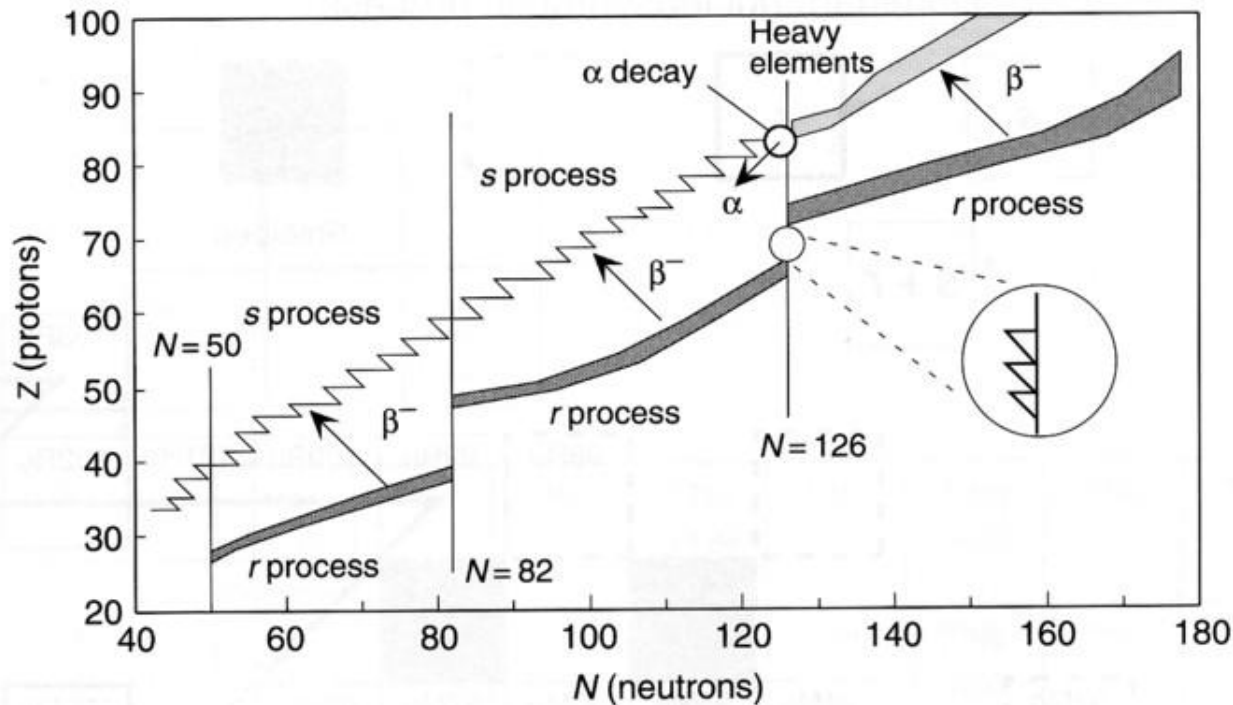


Завершаются цепочки превращений  $\beta^-$ -процесса на изотопах свинца и висмута  ${}^{209}\text{Bi}$ , так как последующие нуклиды  ${}^{210}\text{Po}$  и  ${}^{211}\text{Po}$  претерпевают  $\alpha$ -распад с периодом полураспада 138 суток и 0,5 с соответственно, превращаясь в свинец.

# r-процесс (rapid)

Тяжелые и сверхтяжелые элементы, находящиеся в таблице Менделеева за  $V_i$ , образуются в результате r-процесса. В этом процессе ядро должно быстро последовательно захватить много нейтронов, прежде чем произойдет его  $\text{beta}^-$ -распад.

Захваты продолжаются до тех пор, пока скорость реакции захвата не уравнивается со скоростью реакции выбивания нейтрона под действием гамма-фотона (либо скоростью  $\text{beta}^-$ -распада). После этого ядро "ждет", пока произойдет  $\text{beta}^-$ -распад, что позволит ему снова захватить нейтроны.



- $S$ -процесс останавливается, когда альфа-распад разрушает новообразованные ядра.
- Когда нейтроны добавляются слишком быстро без потери электронов ( $r$ -процесс), то образуются очень стабильные ядра (магические числа).



p-

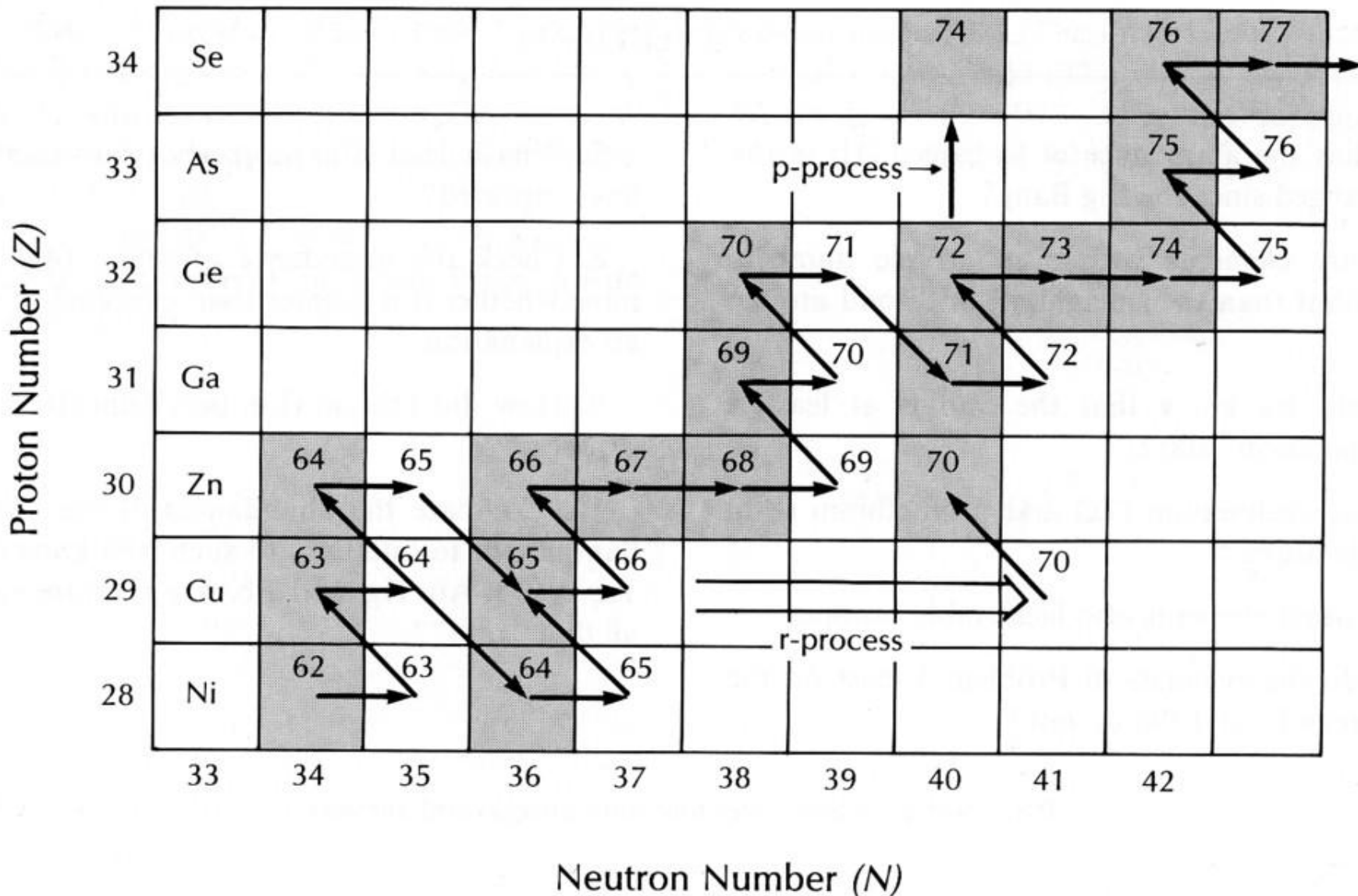
## процесс

Представляет собой образование редких, богатых протонами ядер путем захвата протонов или позитронов, так как ни одним процессом нейтронного захвата эти ядра не могут быть созданы.

К таким ядрам следует в первую очередь отнести изотопы олова  $^{111}\text{Sn}$ ,  $^{112}\text{Sn}$  и  $^{115}\text{Sn}$ .

Однако физические модели условий протекания p-процесса в звездах остаются пока в большей степени неоднозначными по сравнению с процессами захвата нейтронов

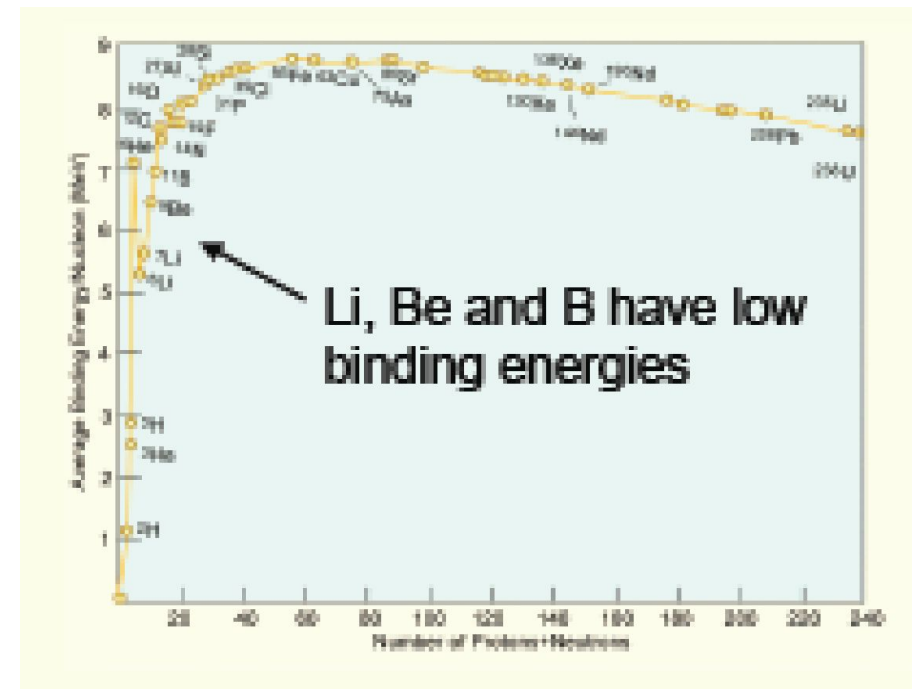
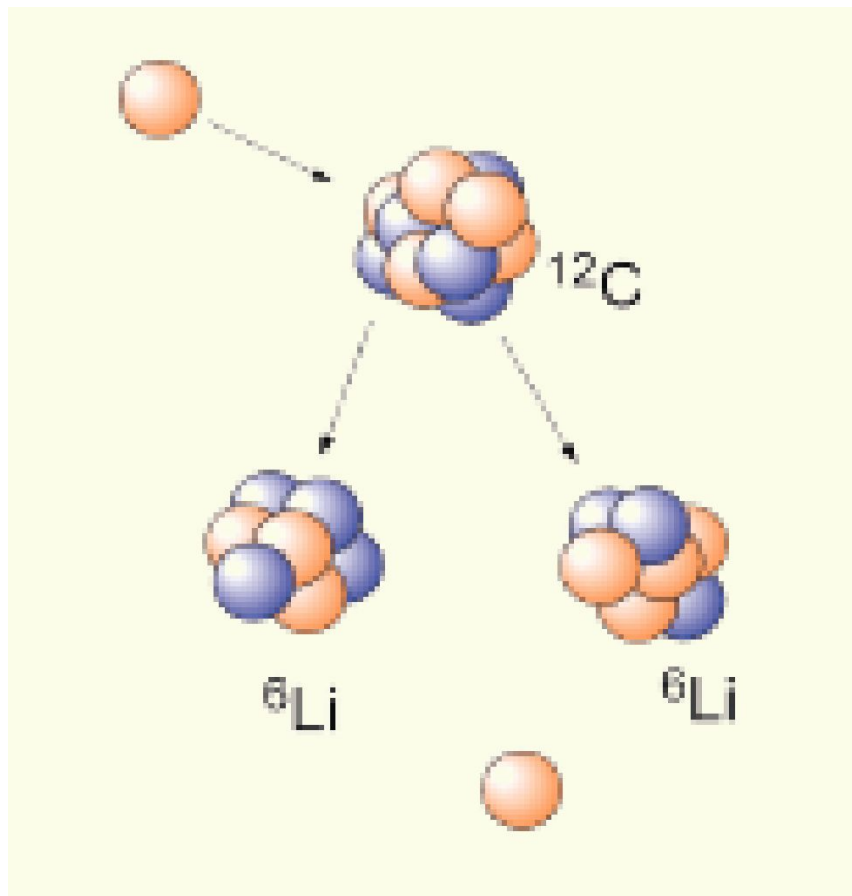
# Соотношение s-, p-, r- процессов



# Происхождение легких элементов

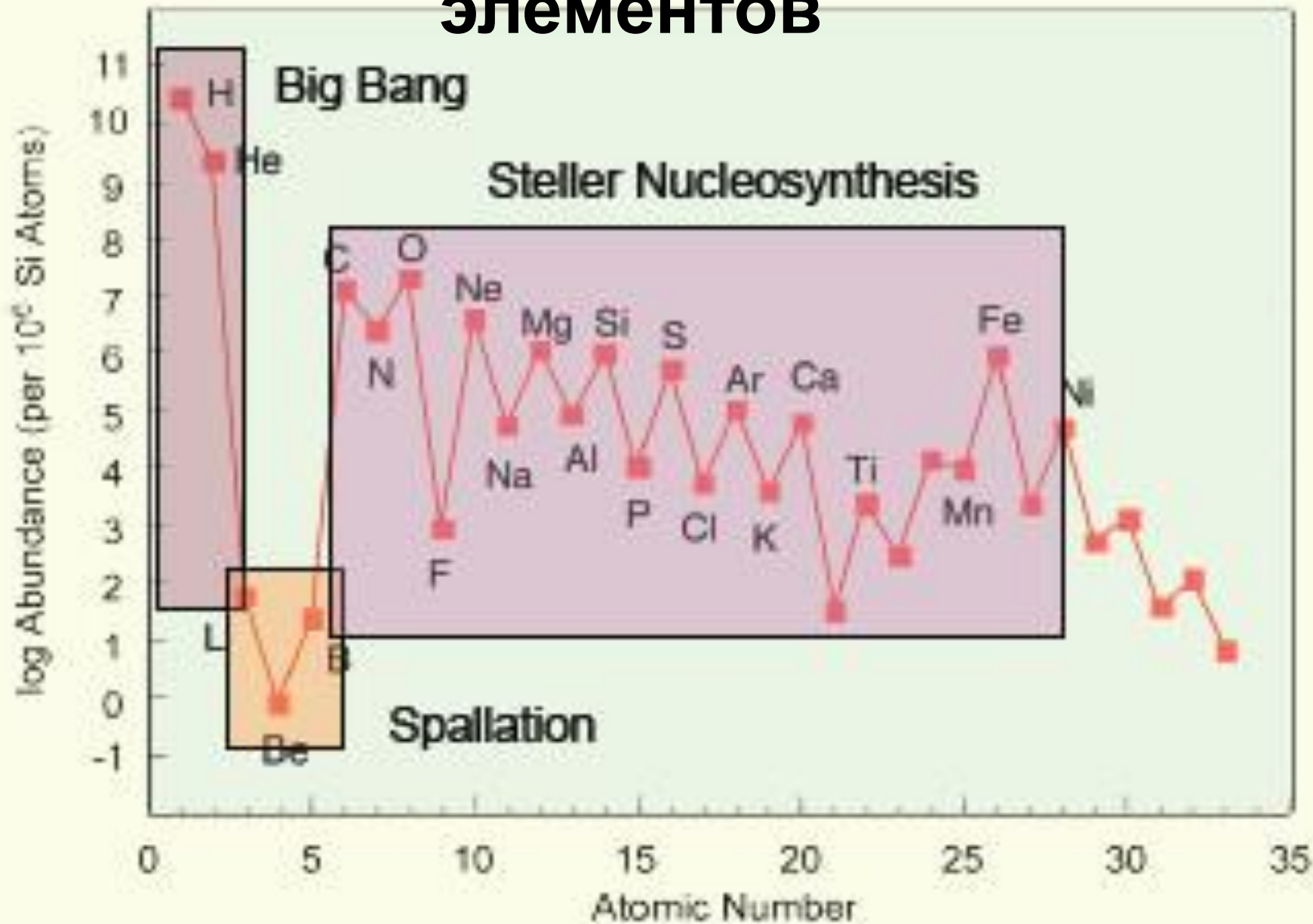
- Легкие нуклиды  ${}^6\text{Li}$ ,  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^9\text{Be}$ ,  ${}^{10}\text{B}$  и  ${}^{11}\text{B}$  характеризуются более низкой распространенностью и стабильностью по отношению к He, C, N, O и не могут образоваться в процессе обычного нуклеосинтеза в недрах звезд, так как они легко разрушаются.
- На сегодняшний день общепризнанной гипотезой образования легких ядер являются реакции скалывания - реакции деления ядер C, N, O при столкновении с ядрами H и He либо в космических лучах, либо космических лучей с атомами межзвездных газовых облаков.

- Космические лучи - это поток заряженных частиц, включая ядра ряда атомов (H, He) достаточно большой энергии, которые заполняют пространство Галактики. Считается, что основным источником космических лучей являются взрывы сверхновых звезд. В космических лучах содержание Li, Be, B приблизительно на пять порядков больше, чем в звездах. Это указывает на то, что реакции скалывания имеют место в космических лучах.



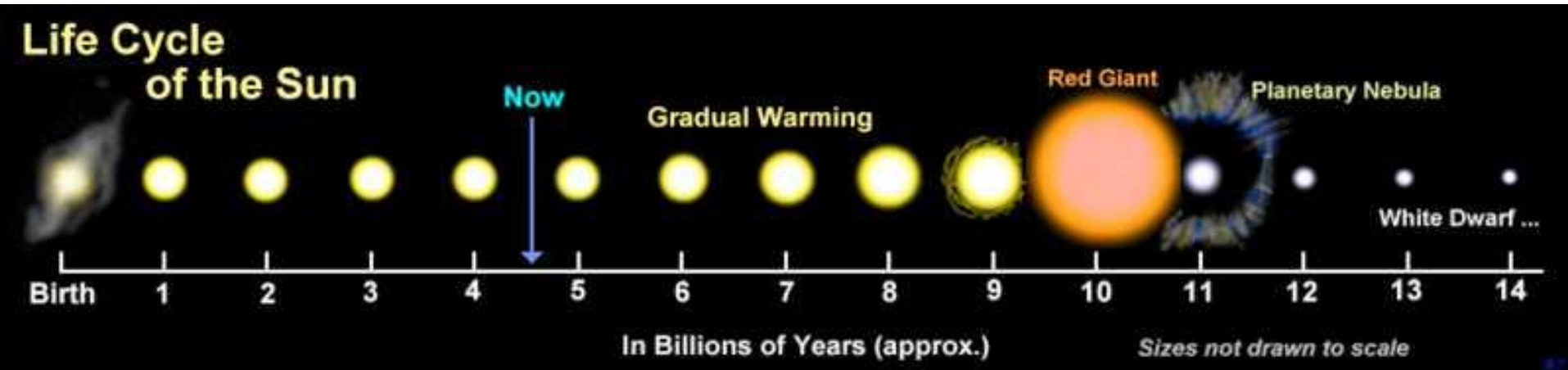
$\text{Li}$ ,  $\text{Be}$  и  $\text{B}$  разрушаются в недрах звезд. Хотя некоторое кол-во  $^7\text{Li}$  образовано при Большом Взрыве; другие изотопы  $\text{Li}$ , а также  $\text{Be}$  и  $\text{B}$  образованы при ядерных реакциях расщепления.

# 3 вида процессов образования элементов

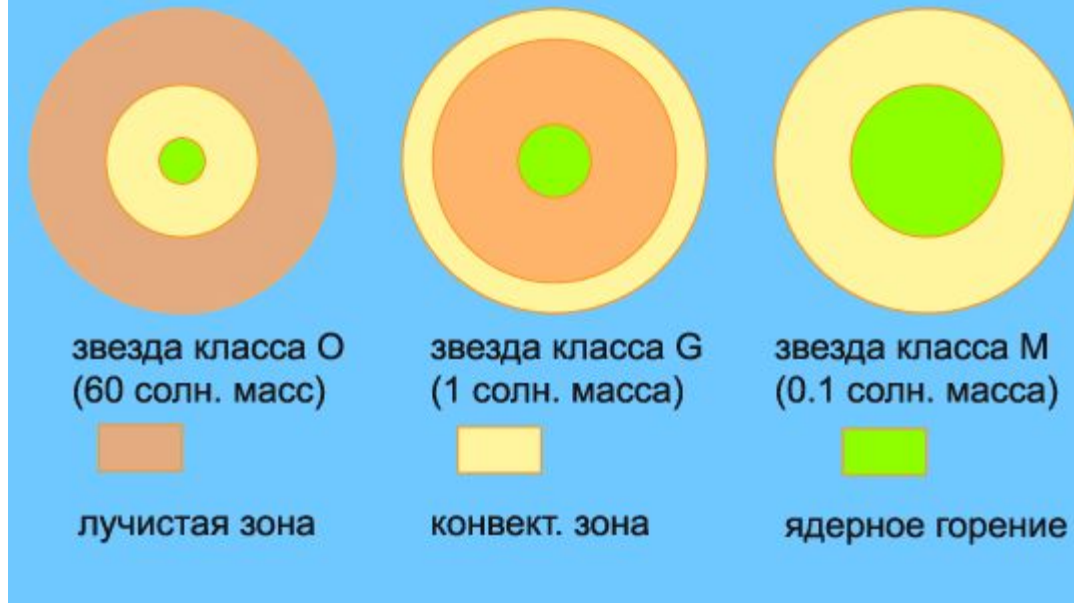


# Эволюция звезд

- 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.



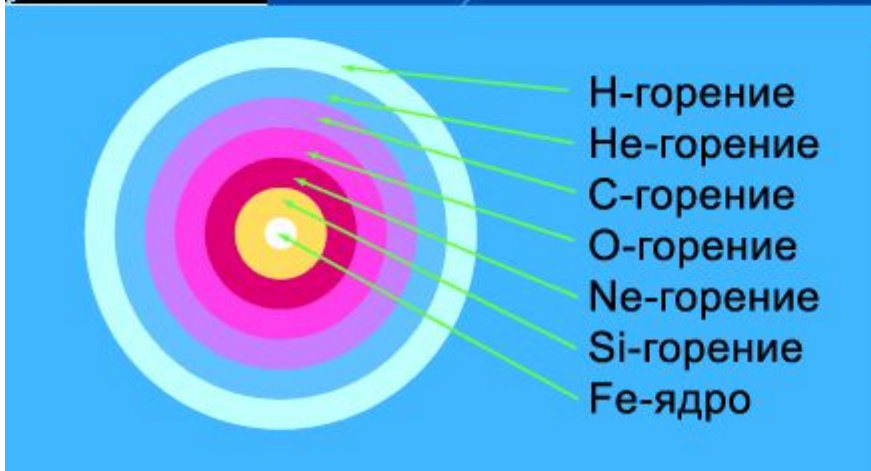
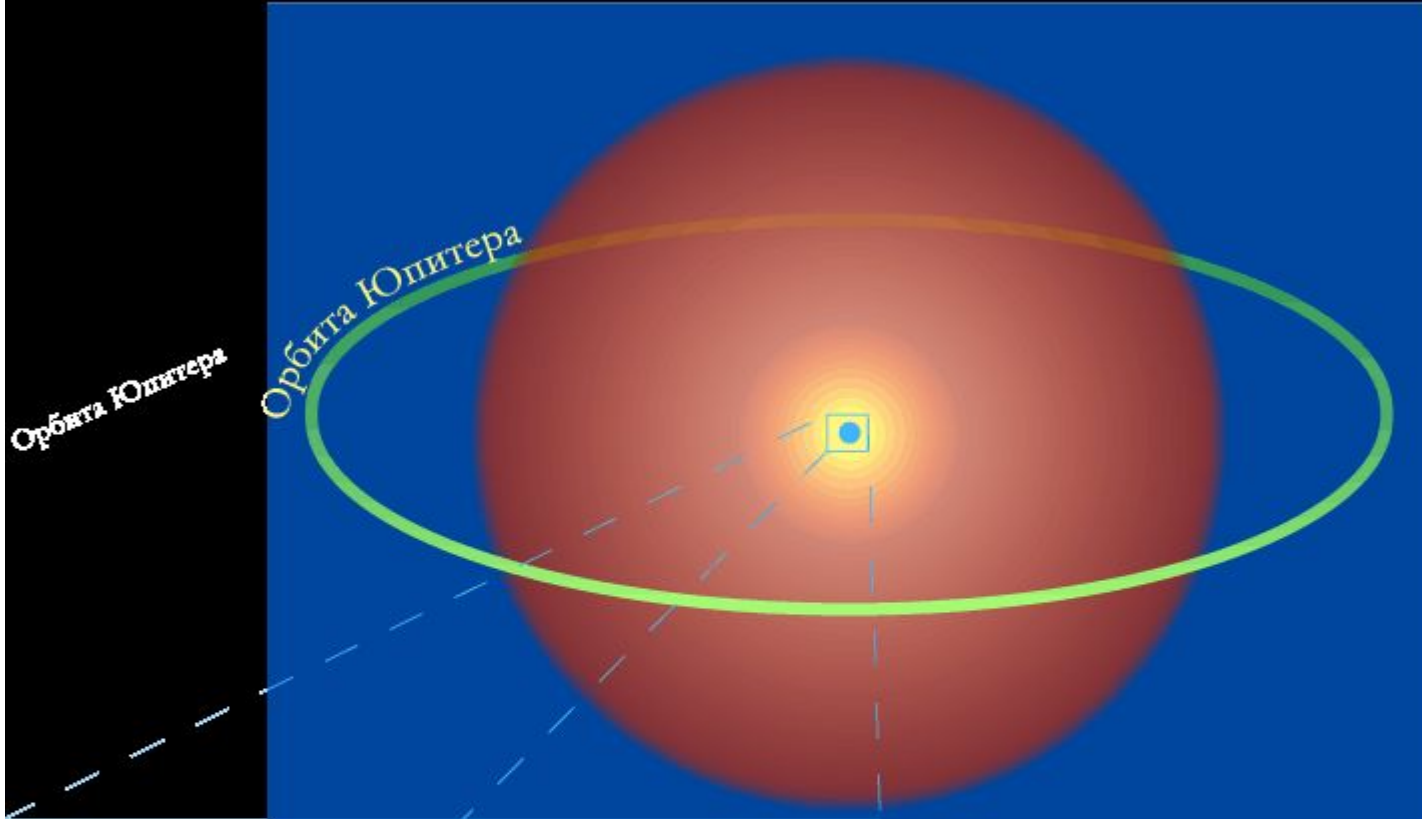
## Внутренняя структура звезд главной последовательности

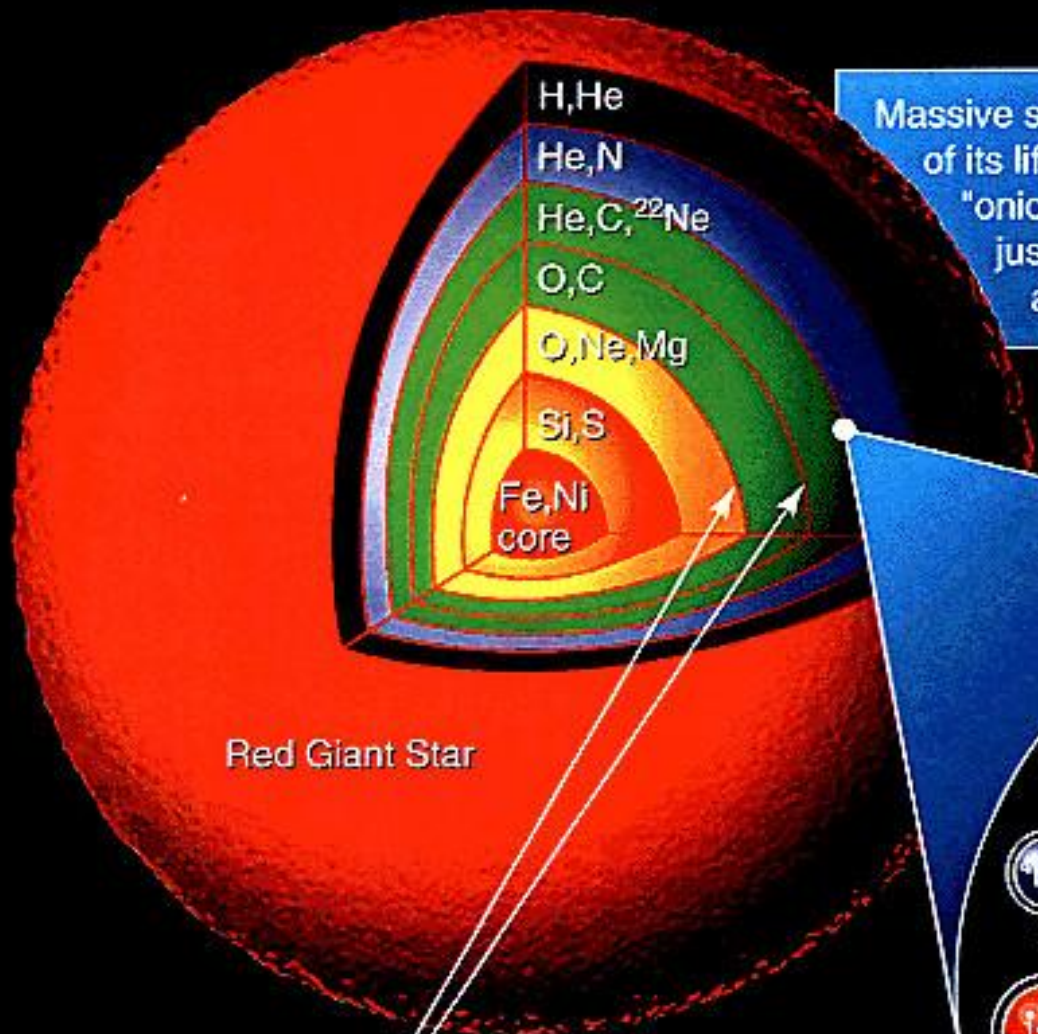


- Можно определить время жизни звезды на главной последовательности как время горения водорода в ядре, соответственно внутреннее строение звезды не остается постоянным и меняется за время жизни на ГП. Для Солнца время жизни на ГП составит  $10^{10}$  лет (современный возраст Солнца оценивается как  $4.5 \cdot 10^9$  лет).



# Строение сверхгиганта

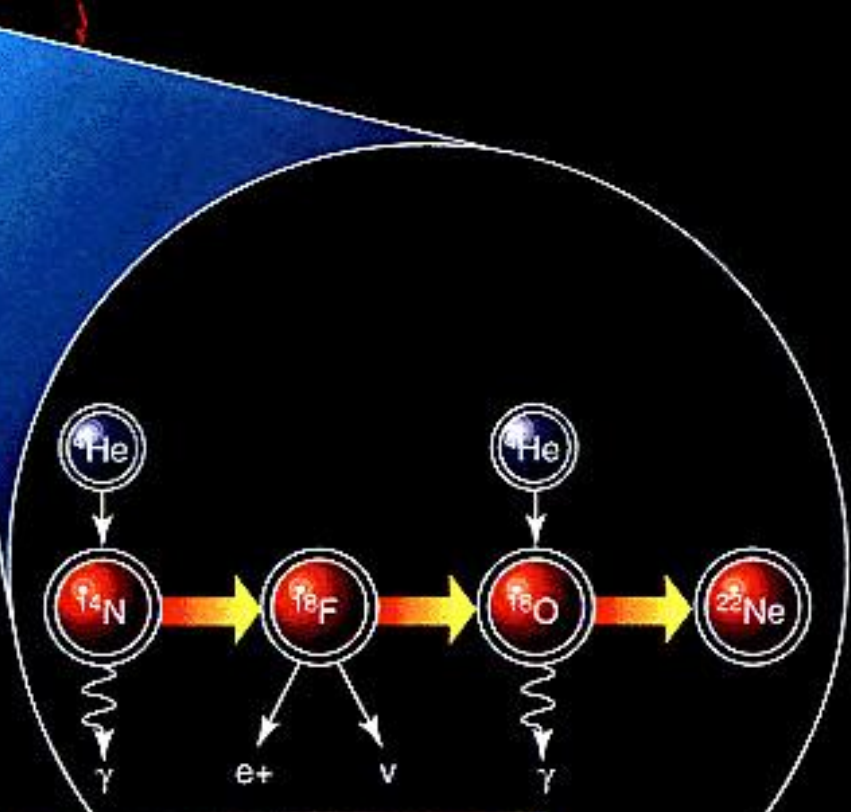




Massive star near the end of its lifetime has an "onion-like" structure just prior to exploding as a supernova

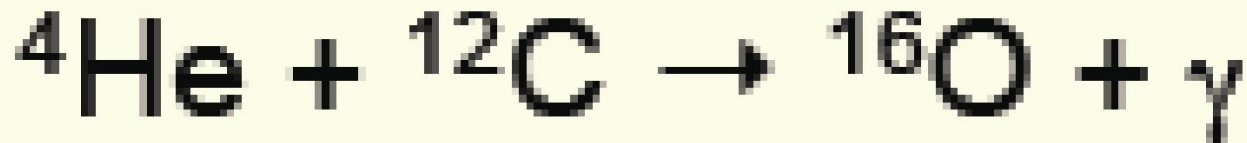
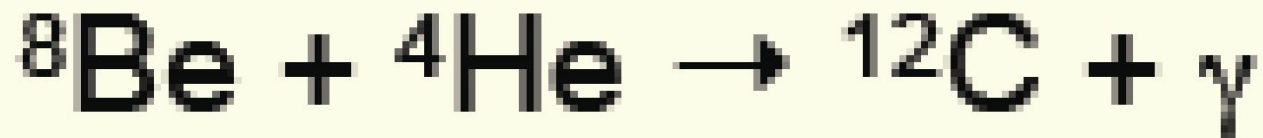
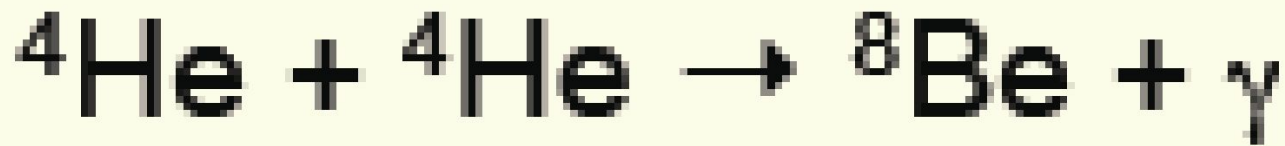
Red Giant Star

Nuclear burning occurs at the boundaries between zones



Example of nuclear reactions that build neutron-rich isotopes

- Когда весь водород использован, то звезда вступает в фазу развития Красного гиганта ( $T = 10^8 \text{K}$   $\rho = 10^4 \text{ g cm}^{-3}$ ) со следующими реакциями:



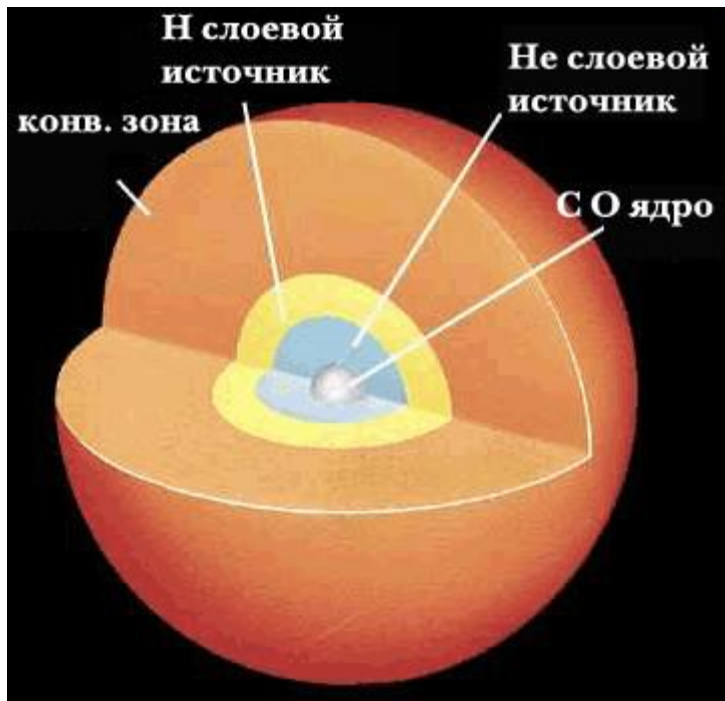
- Сверхгиганты, находящиеся на последних стадиях эволюции (красные сверхгиганты), имеют весьма сложное строение, в чем-то напоминающее строение луковицы в разрезе.
- Как известно из теории эволюции звезд на основе ядерных превращений в ядре звезды будут синтезироваться все новые и новые элементы, вплоть до элементов железного пика. В тоже время будет продолжаться горение элементов в слоевых источниках вокруг ядра. В сложном, далеко проэволюционировавшем сверхгиганте будет инертное Fe ядро и последовательные горящие оболочки из Si, Ne, O, C, He и H.

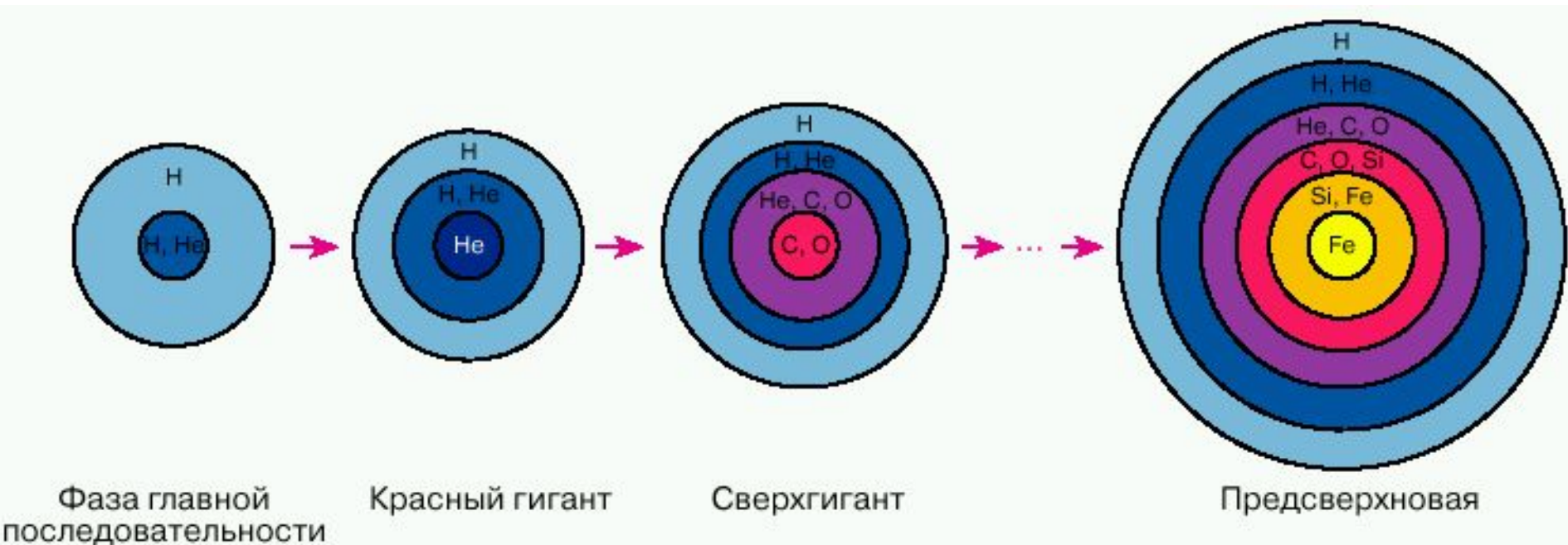
Железный пик - элементы группы железа от скандия Sc до никеля Ni, до которых совершаются ядерные превращения в ядрах массивных звезд. В ядрах звезд эти реакции идут с выделением энергии. Для синтеза более тяжелых элементов в звезде необходима затрата энергии и при обычных условиях в ядрах звезд такой синтез не происходит.

- Время выгорания все более тяжелых элементов все убыстряется и время горения кремния составляет всего несколько дней.

## Скорость сжигания элементов звездой в 15 масс Солнца

Горение H	10 млн. лет
Горение He	1 млн. лет
Горение C	300 лет
Горение O	200 дней
Горение Si	2 дня

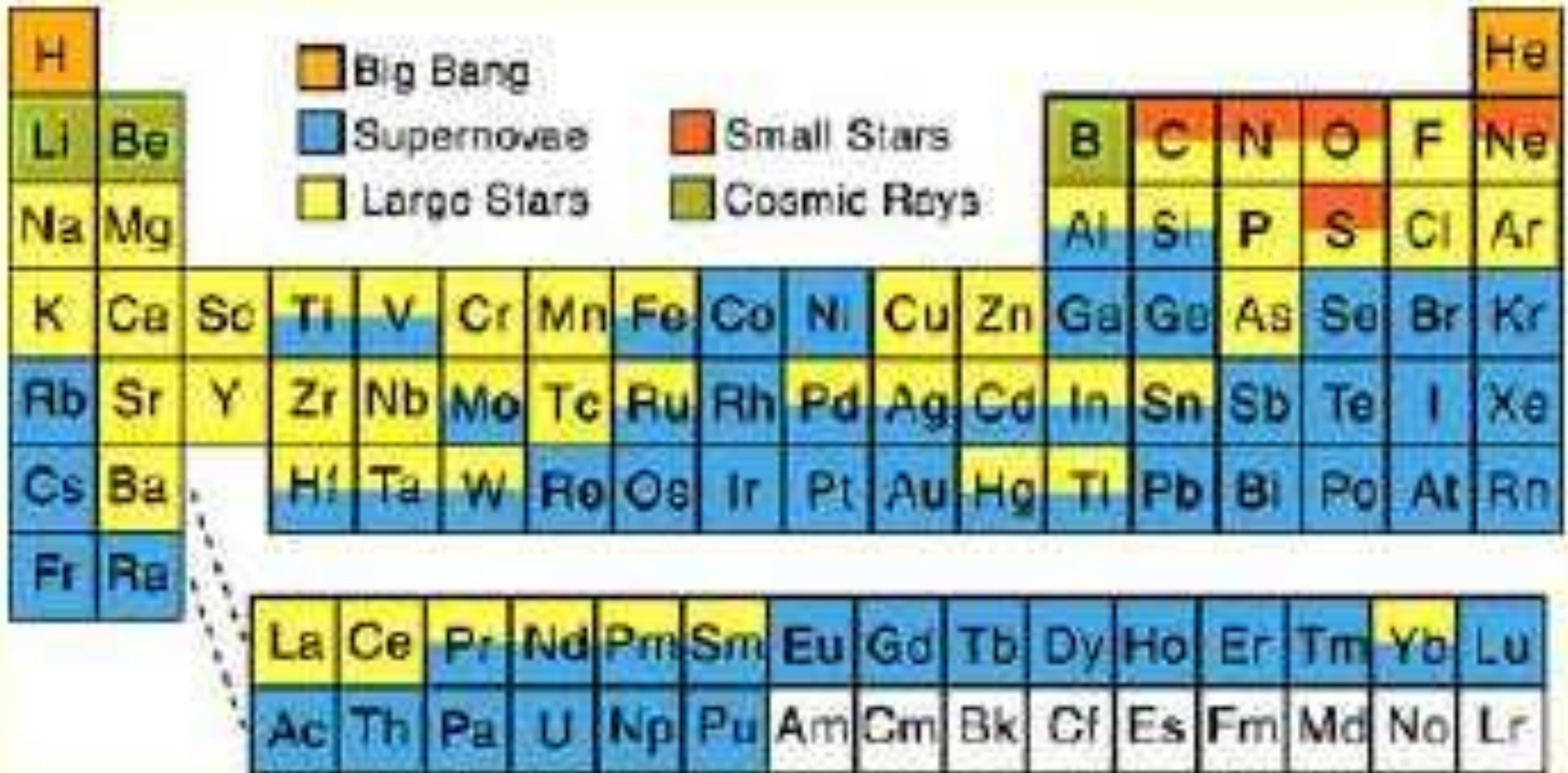




- Схема эволюции основного нуклидного состава массивной звезды

# Summary

## Нуклеосинтез в разных типах звезд





# Содержание

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



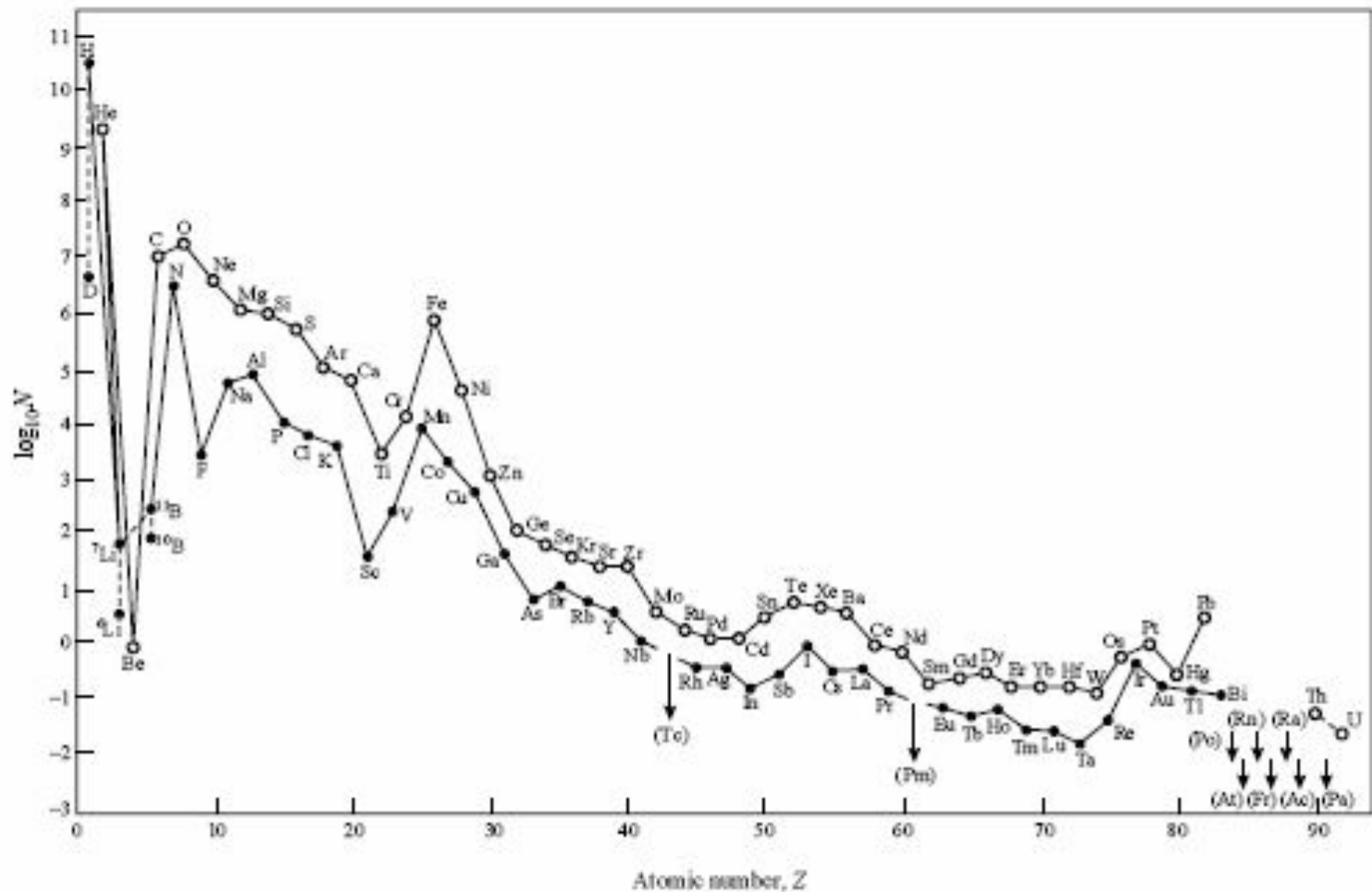
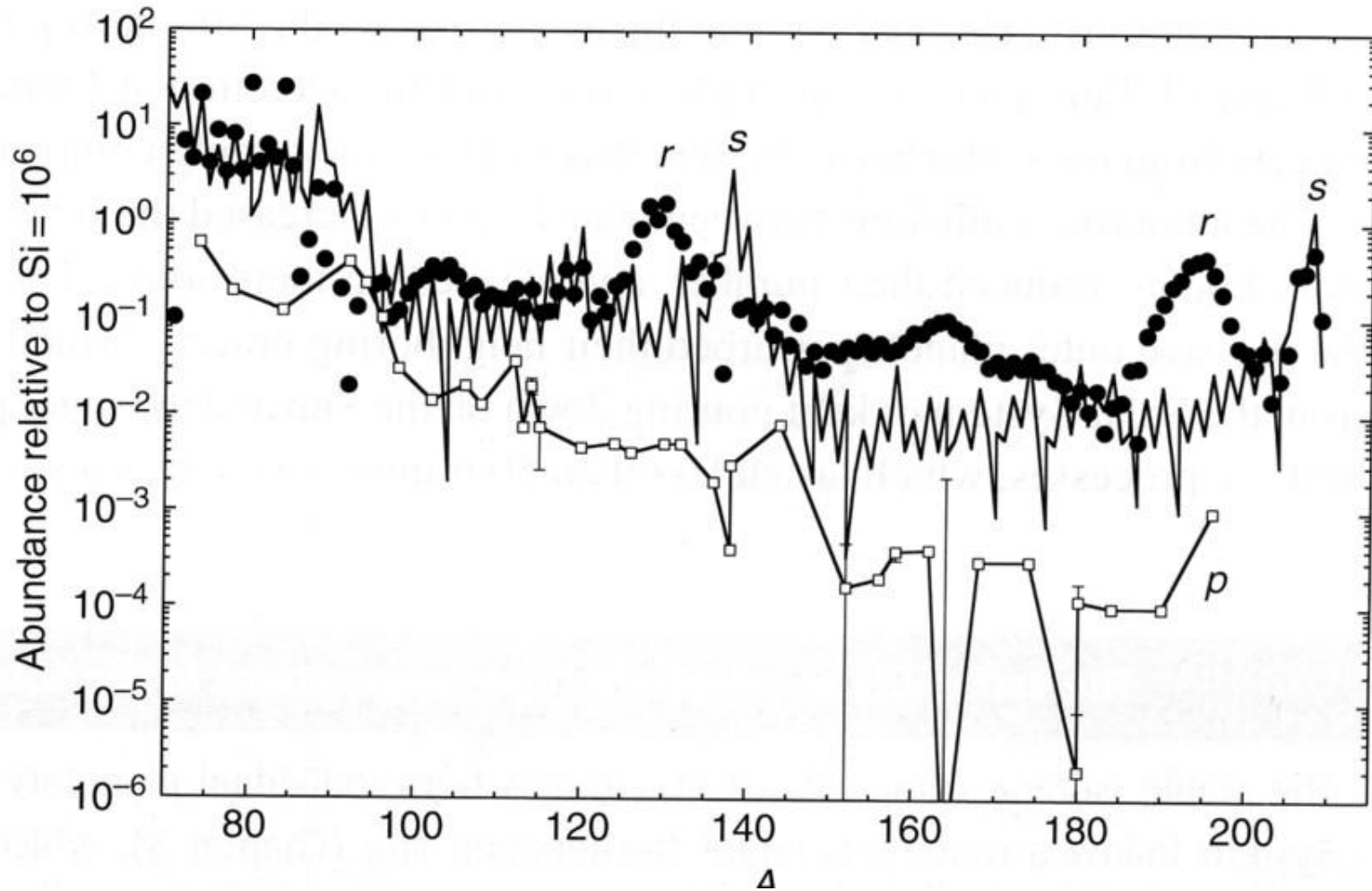


Figure 1.1 Cosmic abundances of the elements as a function of atomic number  $Z$ . Abundances are expressed as numbers of atoms per  $10^6$  atoms of Si and are plotted on a logarithmic scale, (From A. G. W. Cameron, *Space Sci Rev.* 15, 121–46 (1973) with some updating.)

- Космическая распространенность элементов отдельно для четных и нечетных номеров  $Z$ .



- Разбивка космической распространенности элементов по типам нуклеосинтеза – хорошая повторяемость линий.