

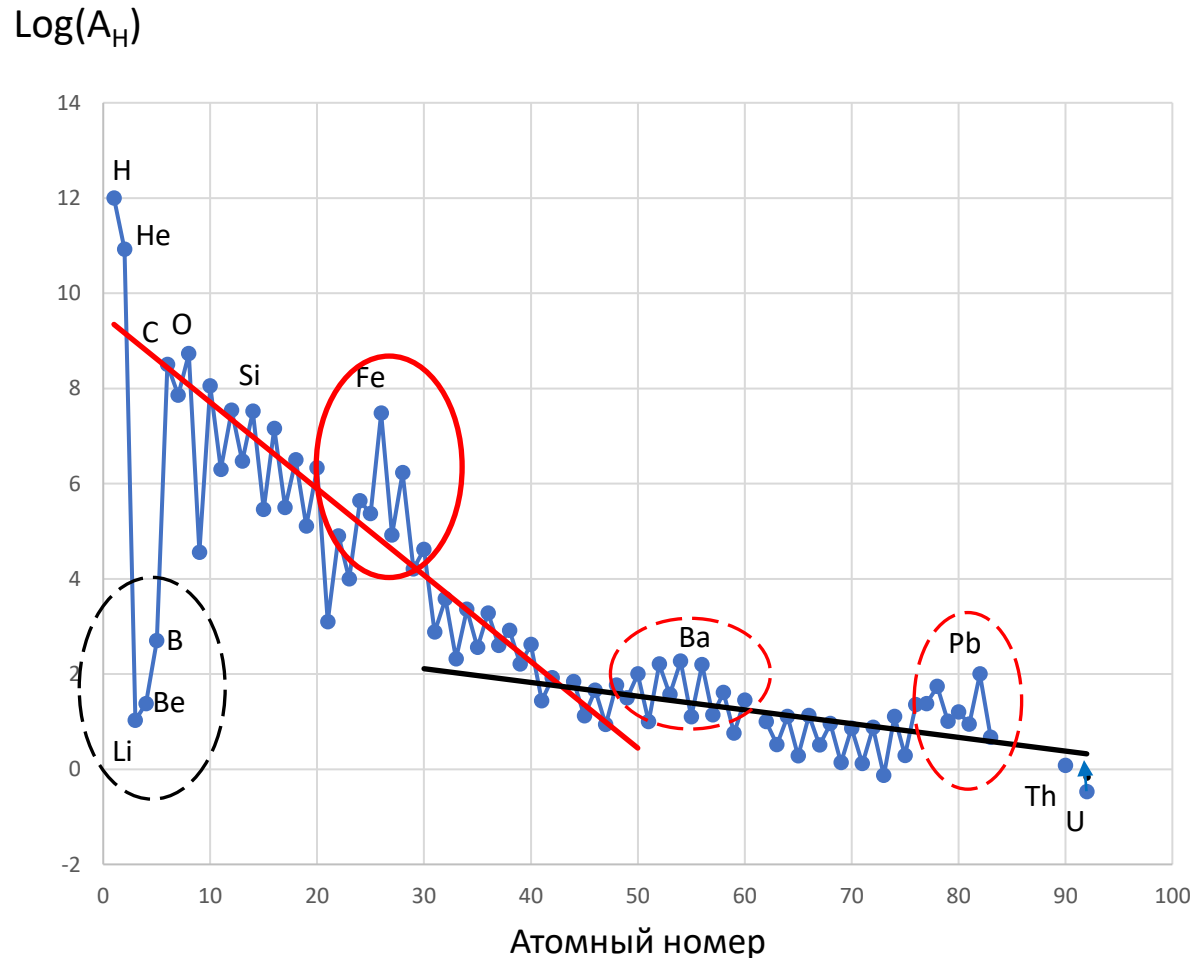
# Тема 3. Нуклеосинтез

Нуклеосинтез – совокупность процессов образования ядер элементов тяжелее водорода.

По месту и времени образования новых элементов выделяют:

- Первичный нуклеосинтез
- Звездный нуклеосинтез
- Синтез и расщепление (спалляция) под воздействием космических лучей
- (Радиоактивный распад)

# “Космическая распространенность” элементов – основа для проверки идей о нуклеосинтезе



## Закономерности:

1. “Космическая распространенность” элементов убывает с увеличением атомного номера.
2. Две ветви зависимости от атомного номера: крутая для легких элементов (до  $N \sim 40$ ) и пологая для тяжелых элементов.
3. Распространенность четных элементов больше, чем их нечетных соседей (правило Оддо-Харкинса).
4. Преобладание изотопов с массами, кратными 4 (правило “ $4q$ ”)

## Локальные особенности:

- Максимум в области Fe.
- Дефицитные легкие элементы Li, Be, B.

# «Большой взрыв»

Предположение о взрывном начале развития расширяющейся Вселенной (Фридман, 1922).

Линейный характер расширения Вселенной – закон Хаббла (1929).

Модель «горячей Вселенной» (Гамов, 1948).

Подтверждение – открытие реликтового излучения – 1965 г.

Возраст Большого Взрыва –  $13,799 \pm 0,021$  млрд. лет.

При Большом Взрыве рассчитанный состав Вселенной (совпадает с наблюдениями межгалактического газа):

$^1\text{H}$  – 75 %

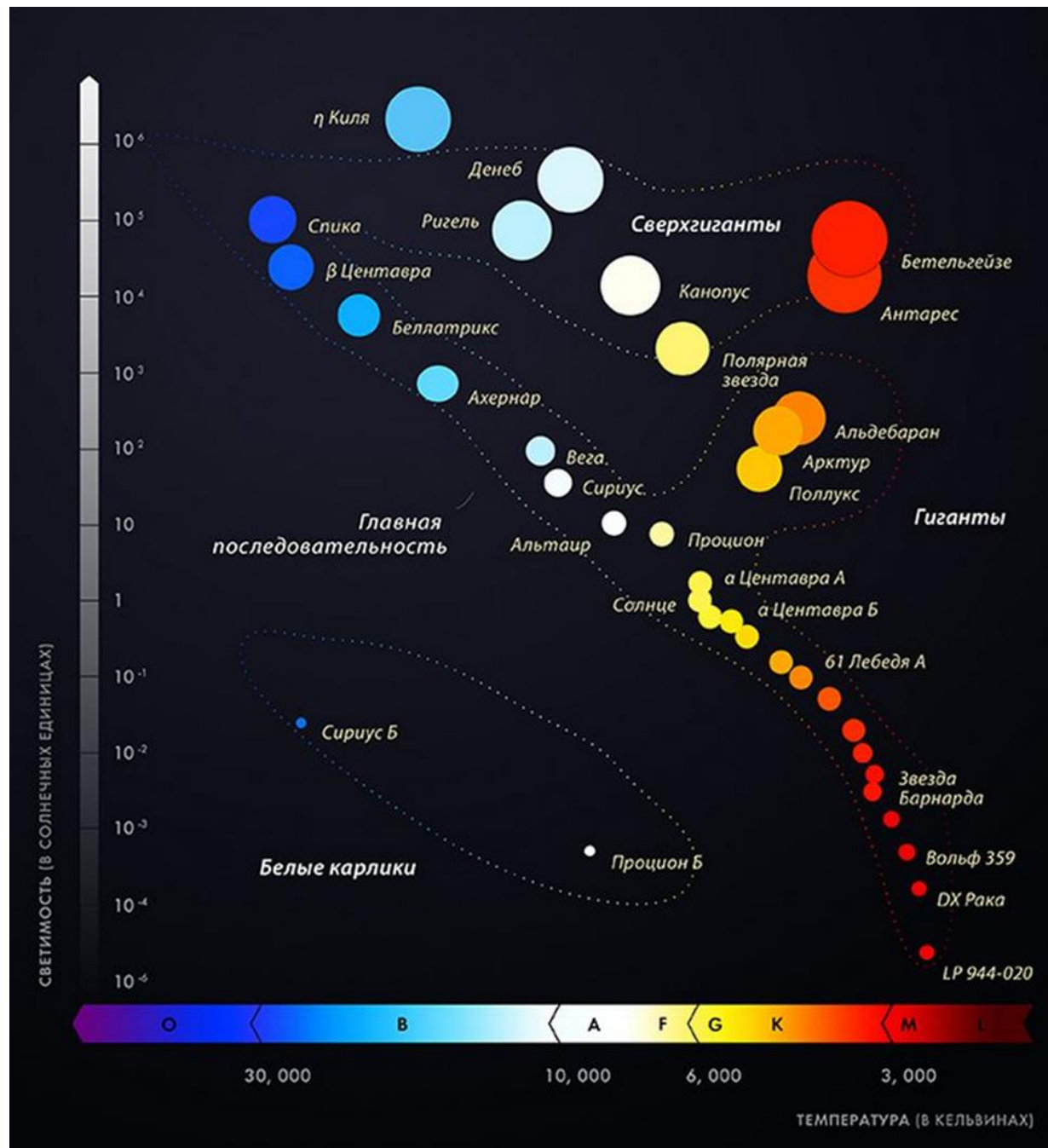
$^4\text{He}$  – 25 %

$^2\text{H}$  (D) – 0.003 %

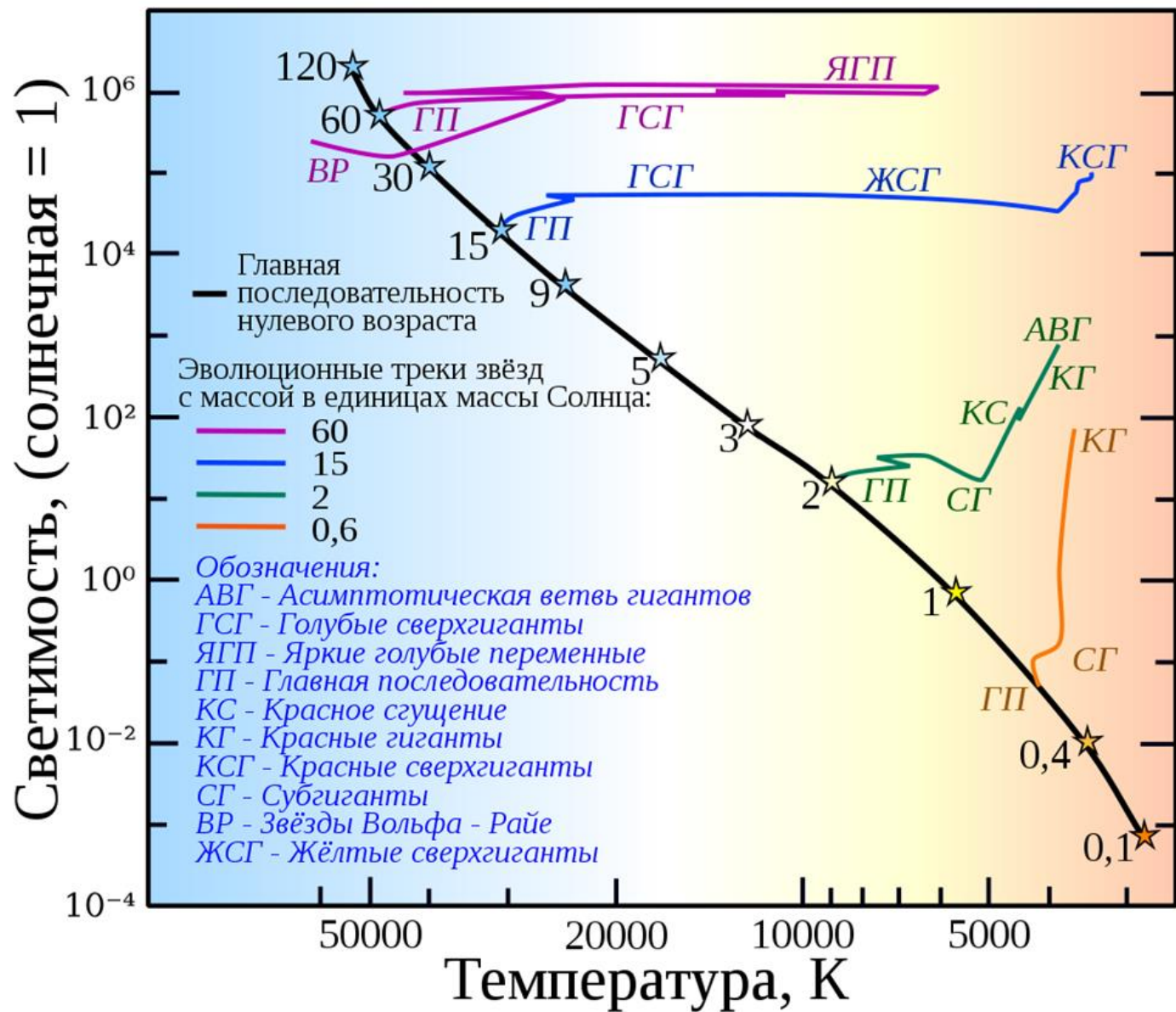
$^3\text{He}$  – 0.002 %

$^7\text{Li}$  – 0.0000001 %

**Вывод: синтез многообразия химических элементов - результат нуклеосинтеза в эволюционирующих звездах.**



Главная последовательность звезд на диаграмме Гершпрунга-Рассела «температура vs светимость»



Показаны треки эволюции звезд разной начальной массы.

Звезды, находящиеся вдали от Главной последовательности (ГР) – *гиганты*, эволюционируют быстро ( $10^4$ - $10^5$  лет), с приближением к ГП эволюция замедляется. При этом «время жизни» звезды на ГП сильно зависит от массы (от  $n \times 10$  млрд. лет для малых звезд до  $n$  млн. лет для крупных).

При «выгорании» термоядерного топлива звезда сжимается, превращаясь в нейтронную («белый карлик»), и затем может испытать взрыв Сверхновой.

Главный тренд эволюции – сжатие и нагрев центральной части звезды.

Источник энергии звезд -  
термоядерный синтез более тяжелых  
элементов из легких.

$$\text{Дефект массы : } \Delta M = Z \times m_p + N \times m_n - M_{\text{ядра}}$$

Расчет дефекта массы для  $^{12}_6\text{C}$ :

масса ядра $^{12}_6\text{C}$	12 а.е.м.
масса протона	1,007276 а.е.м.
масса нейтрона	1,008665 а.е.м.

6 протонов + 6 нейтронов = 12,09565 а.е.м.

Дефект массы  $^{12}_6\text{C}$       0,09565 а.е.м.

Относительный дефект массы («упаковочный множитель»):

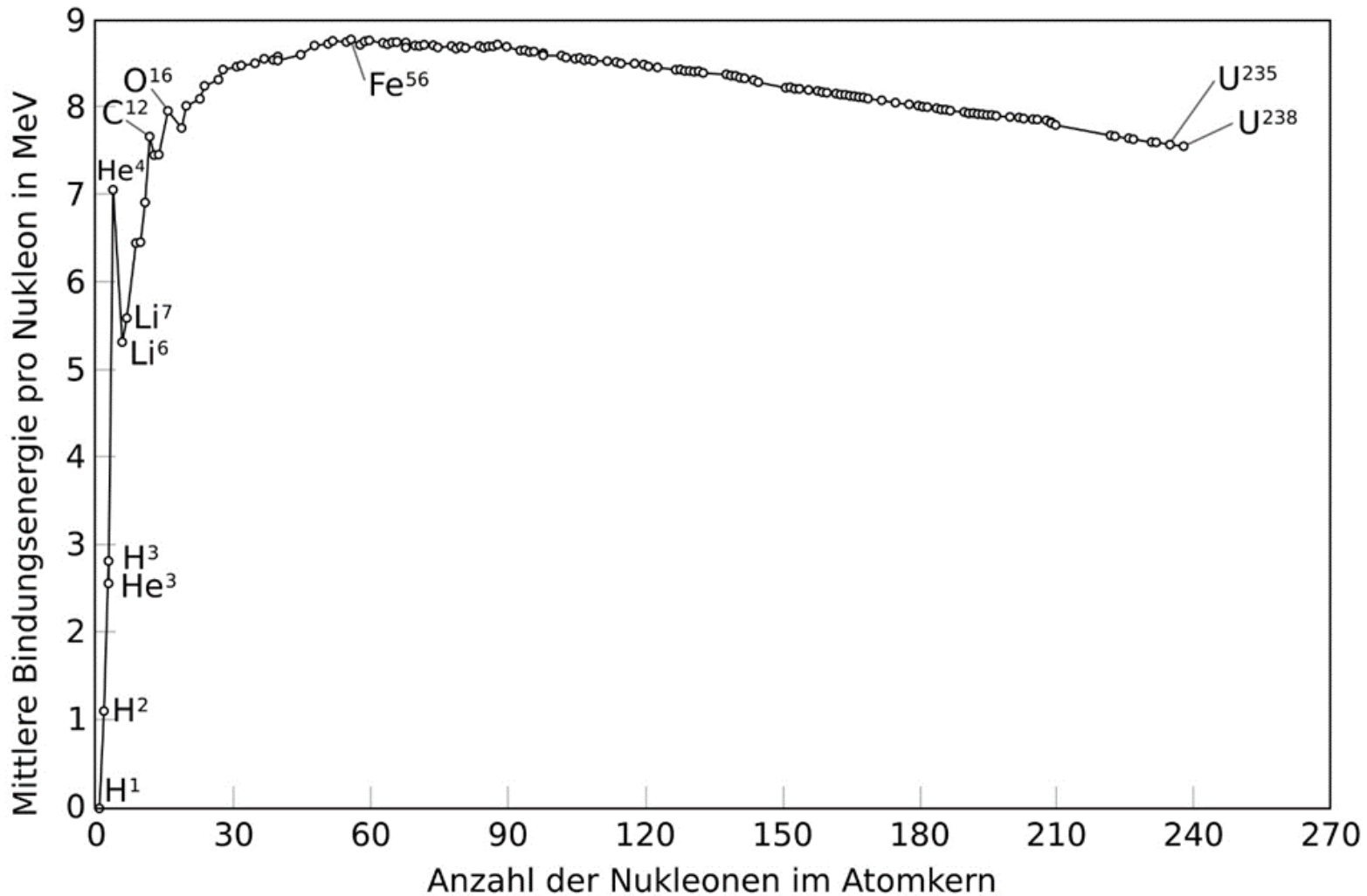
$$0,09565 / 12 = 0,007971 \text{ а.е.м.}$$

$$**E = mc^2**$$

Масса в 1 а.е.м эквивалентна энергии 931,5 МэВ

Энергия образования ядра  $^{12}_6\text{C}$  из нуклонов    7,425 МэВ на 1 нуклон





Зависимость относительного дефекта массы от числа нуклонов в ядре атома.

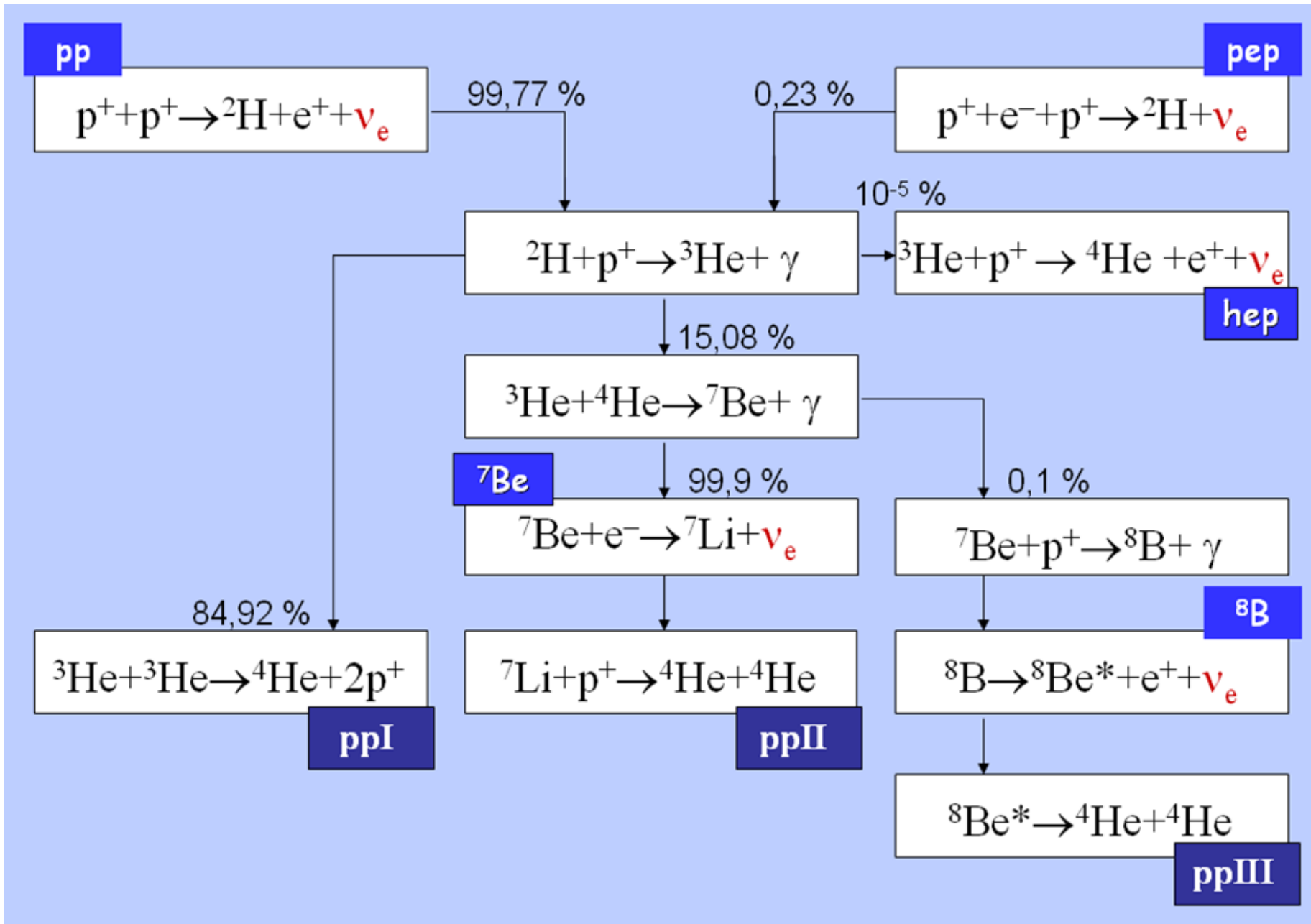
**Чем больше дефект массы, тем больше выделилось энергии при образовании ядра, т.е. тем более оно энергетически выгодно.**

Эта зависимость объясняет выполнение **правила четности** и **правила  $4q$**  в продуктах нуклеосинтеза.

# Звездный термоядерный нуклеосинтез

(М.Бэрбидж, Д.Бербидж, Фаулер, Хойл, 1957)

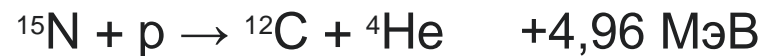
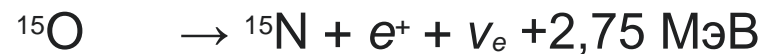
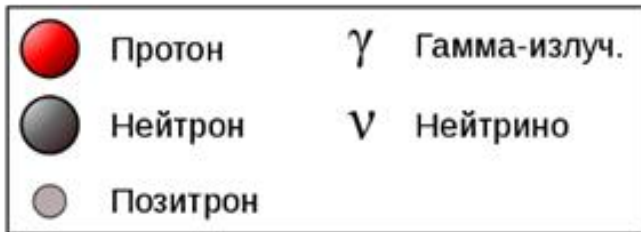
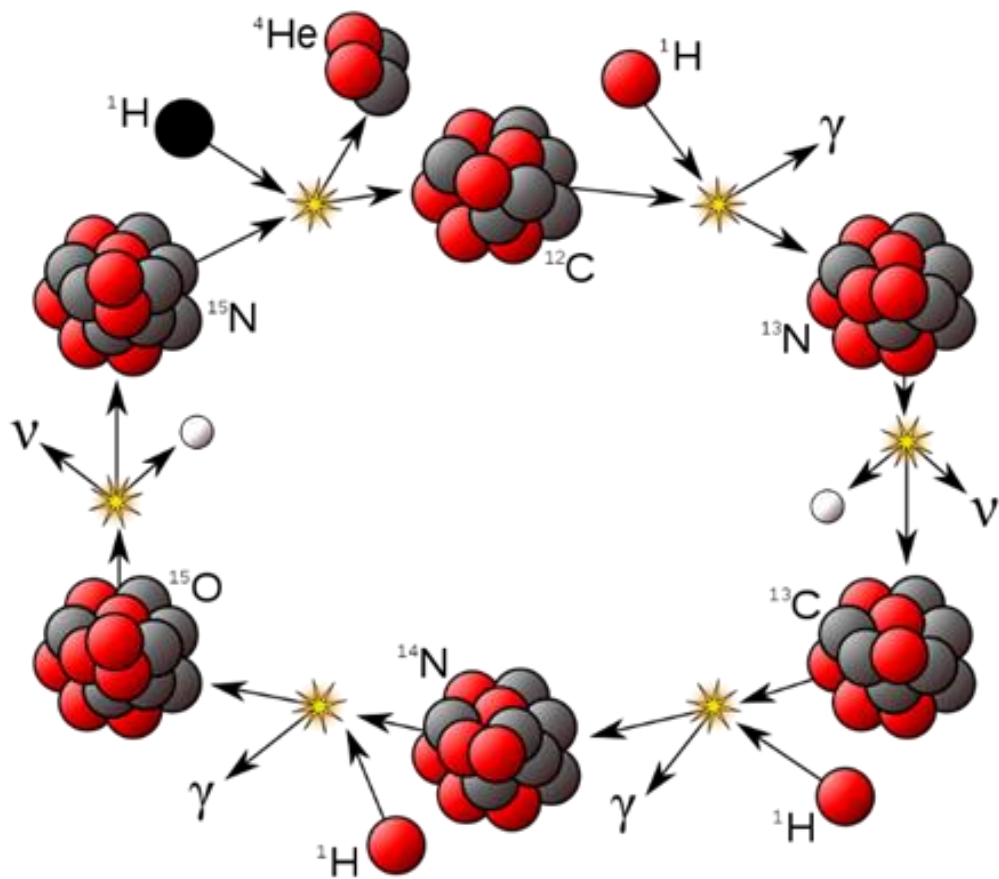
Название	Продукт	T млн. К	Масса относительно Солнца ( $\oplus$ )
Ядерное горение дейтерия	$^3\text{He}$	1	Возможно при малых массах – протозвезды
Протон-протонный цикл CNO-цикл	$^4\text{He}$	10	$\sim 1 \oplus$ $> 5-6 \oplus$
Тройная гелиевая реакция	$^{12}\text{C}$	150	
Ядерное горение углерода	$^{24}\text{Mg}$ и др.	800	$> 5-6 \oplus$
Ядерное горение кислорода	$^{32}\text{S}$ и др.	1500	$> 25 \oplus$
Ядерное горение неона		1200	$> 8 \oplus$
Ядерное горение кремния	до $^{56}\text{Fe}$	2700	$> 8-11 \oplus$
Альфа-процесс	до $^{56}\text{Ni}$		



# Протон-протонный цикл - главный для Солнца

(подтвержден измерениями потока и энергетического спектра «солнечных» нейтрино)

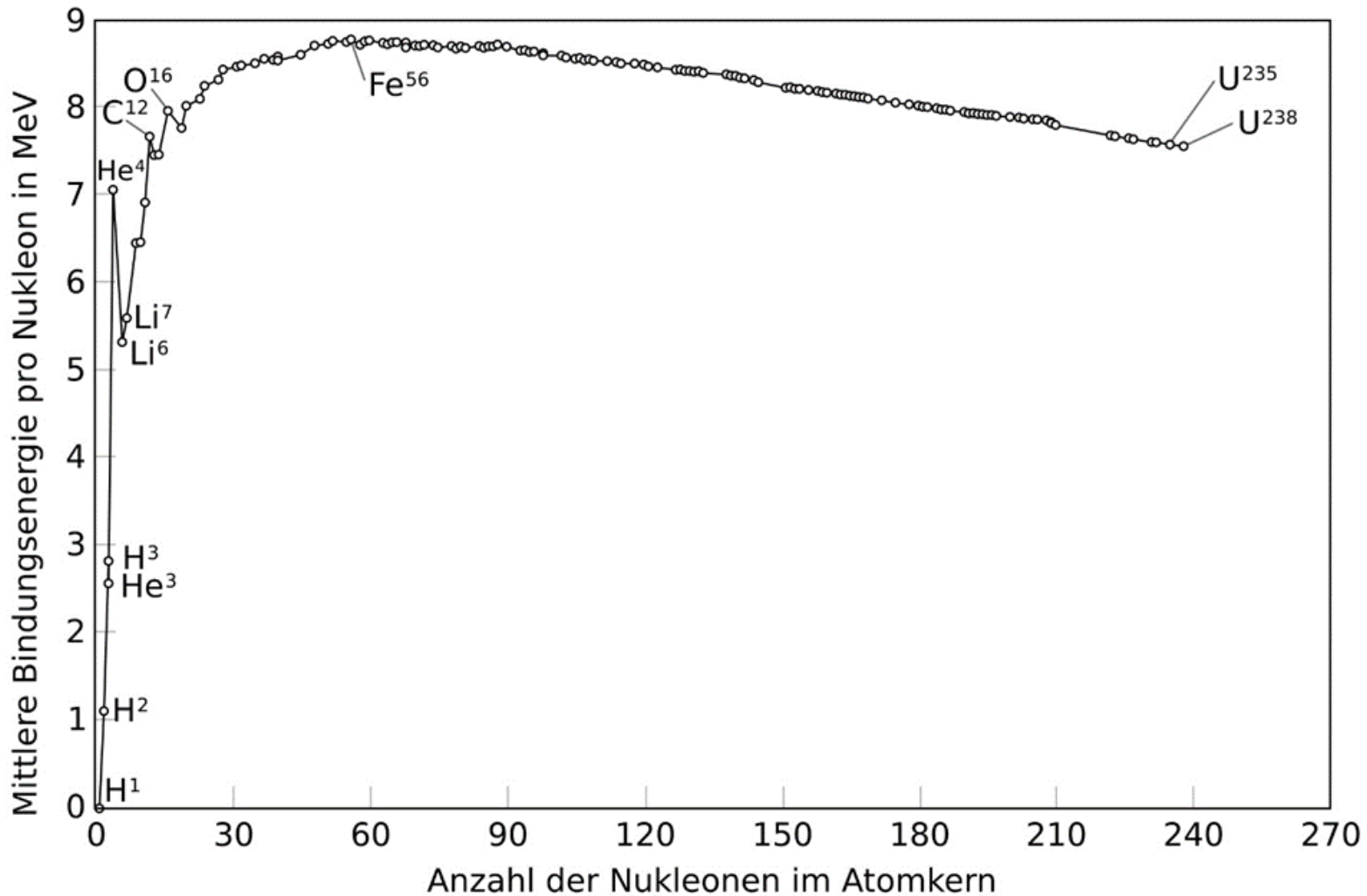
CNO-цикл (цикл Бетэ) -  
главный для массивных звезд



# Звездный термоядерный нуклеосинтез

(М.Бэрбидж, Д.Бербидж, Фаулер, Хойл, 1957)

Название	Продукт	T млн. К	Масса относительно Солнца ( $\oplus$ )
Ядерное горение дейтерия	${}^3\text{He}$	1	Возможно при малых массах – протозвезды
Протон-протонный цикл CNO-цикл	${}^4\text{He}$	10	$\sim 1 \oplus$ $> 5-6 \oplus$
Тройная гелиевая реакция	${}^{12}\text{C}$	150	
Ядерное горение углерода	${}^{24}\text{Mg}$ и др.	800	$> 5-6 \oplus$
Ядерное горение кислорода	${}^{32}\text{S}$ и др.	1500	$> 25 \oplus$
Ядерное горение неона		1200	$> 8 \oplus$
Ядерное горение кремния	до ${}^{56}\text{Fe}$	2700	$> 8-11 \oplus$
Альфа-процесс	до ${}^{56}\text{Ni}$		



«Глобальный» максимум зависимости относительного дефекта массы от числа нуклонов в ядре атома – на ядре  $^{56}\text{Fe}$ .

Более тяжелые ядра становятся менее выгодными – синтез из легких ядер прекращается.

Синтез из ядер легких элементов останавливается на области Fe из-за энергетической невыгодности дальнейшего слияния – преодоления кулоновского отталкивания.

Для более тяжелых элементов нужен другой механизм синтеза, в котором не участвуют заряженные частицы – **нейтронный захват**. Он реализуется **при взрывах нейтронных звезд с образованием Сверхновых**.

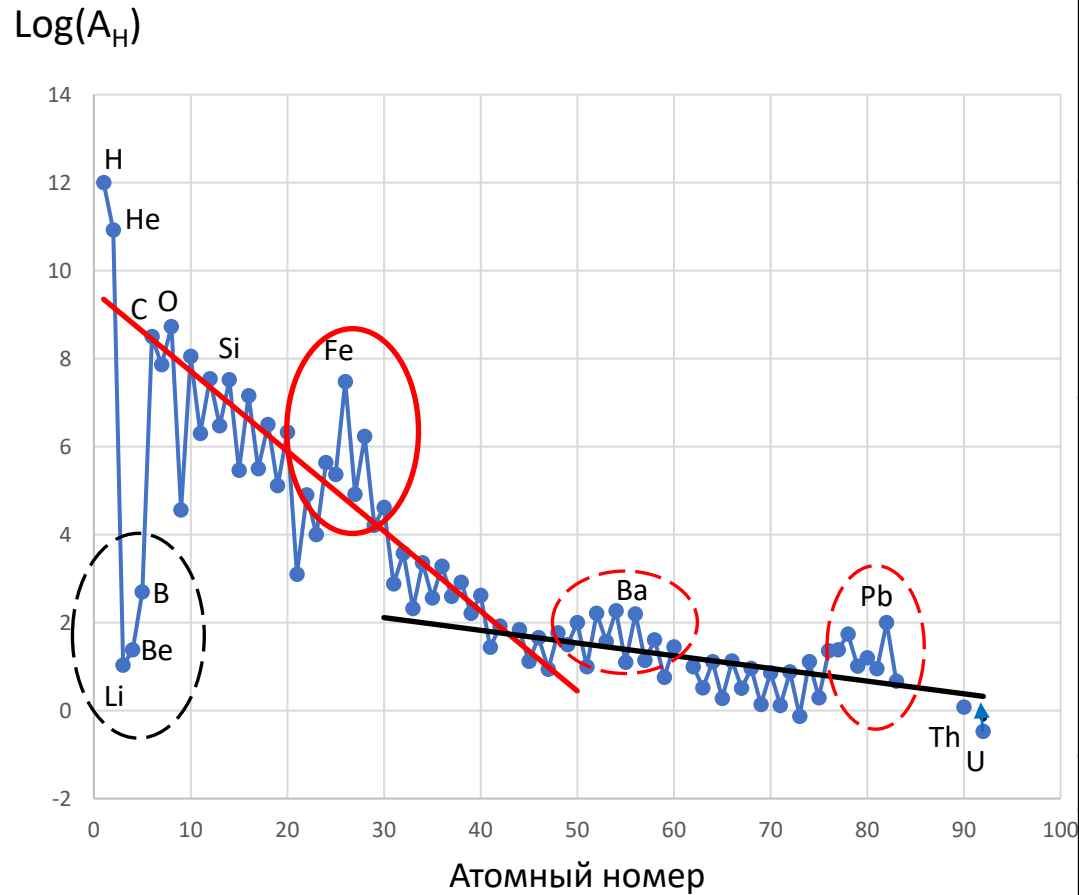
Синтез элементов во время вспышек Сверхновых звезд по двум механизмам:

*s*-процесс: *n*-захват → распад неустойчивого изотопа → *n*-захват

*r*-процесс: *n*-захват → *n*-захват → *n*-захват → ... → распад неустойчивого изотопа

Присутствие в составе Солнечной системы тяжелых элементов – признак того, что часть ее вещества прошла через взрыв Сверхновой.

# Природа закономерностей “космической” распространённости элементов



Закономерности	Причины
“Космическая распространённость” элементов убывает с увеличением атомного номера.	Многоступенчатый процесс. Для синтеза более тяжелых ядер нужна более высокая температура.
Две ветви зависимости от атомного номера: крутая для легких элементов (до $N \sim 40$ ) и пологая для тяжелых элементов.	Разные процессы: легкие ядра “нарабатываются” при эволюции звезд, тяжелые — при взрывах Сверхновых.
Распространённость четных элементов больше, чем их нечетных соседей (правило Оддо-Харкинса). Преобладание изотопов с массами, кратными 4 (правило “4q”)	Синтез легких элементов идет через $\alpha$ -частицы. Четные ядра имеют большие дефекты масс.
Локальные особенности:	
Максимум в области Fe.	Ядро $^{56}\text{Fe}$ — самое энергетически выгодное, на нем заканчивается синтез из легких ядер.
Дефицитные легкие элементы Li, Be, B.	Эти элементы выгорают в ядрах звезд при термоядерном синтезе.



Вывод: Солнце – звезда третьего поколения, содержащая продукты взрыва Сверхновой.

Этот взрыв – старт эволюции Солнечной системы.

