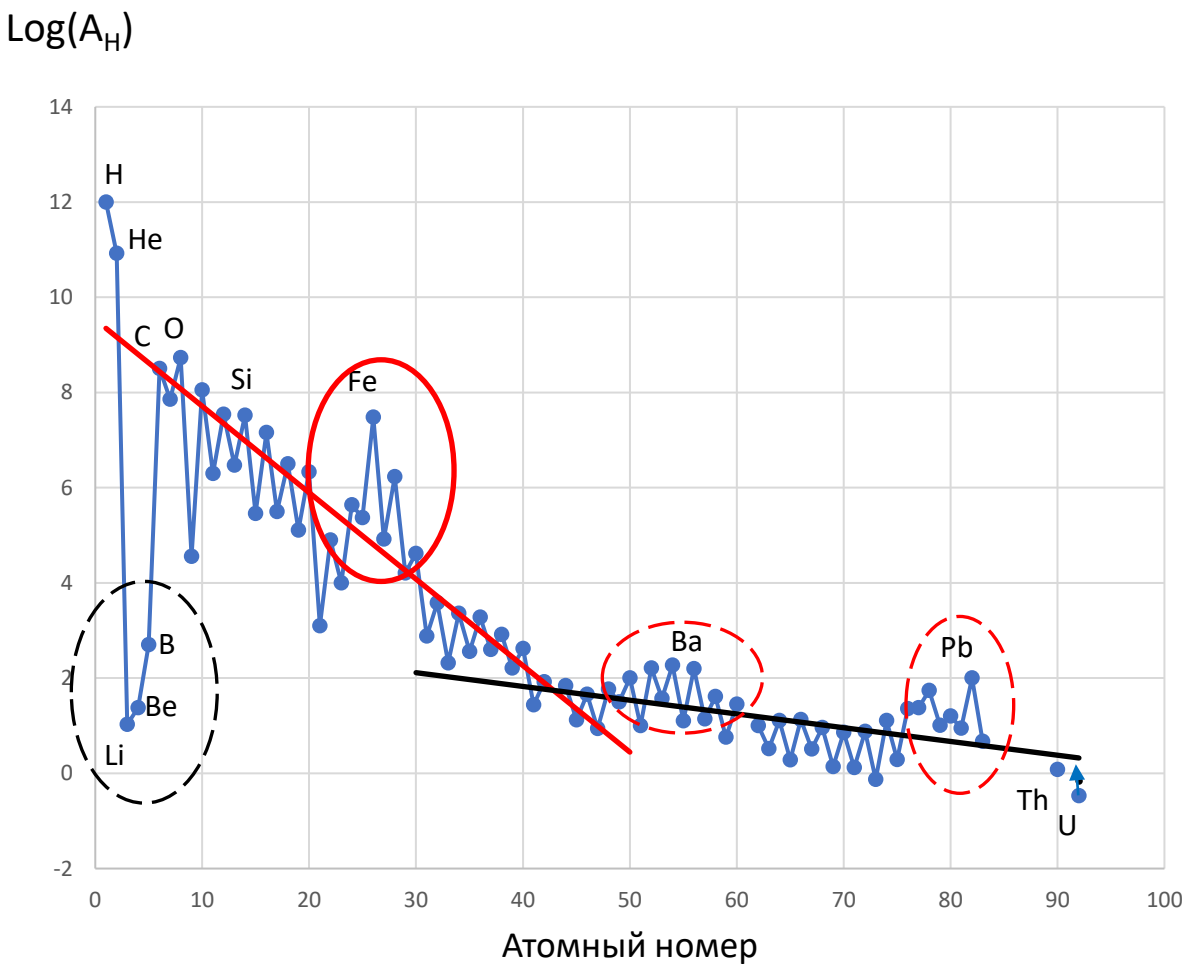
Тема 3. Нуклеосинтез

Нуклеосинтез – совокупность процессов образования ядер элементов тяжелее водорода.

По месту и времени образования новых элементов выделяют:

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

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



<u>Закономерности:</u>

1. “Космическая распространенность” элементов убывает с увеличением атомного номера.

2. Две ветви зависимости от атомного номера: крутая для легких элементов (до N~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).

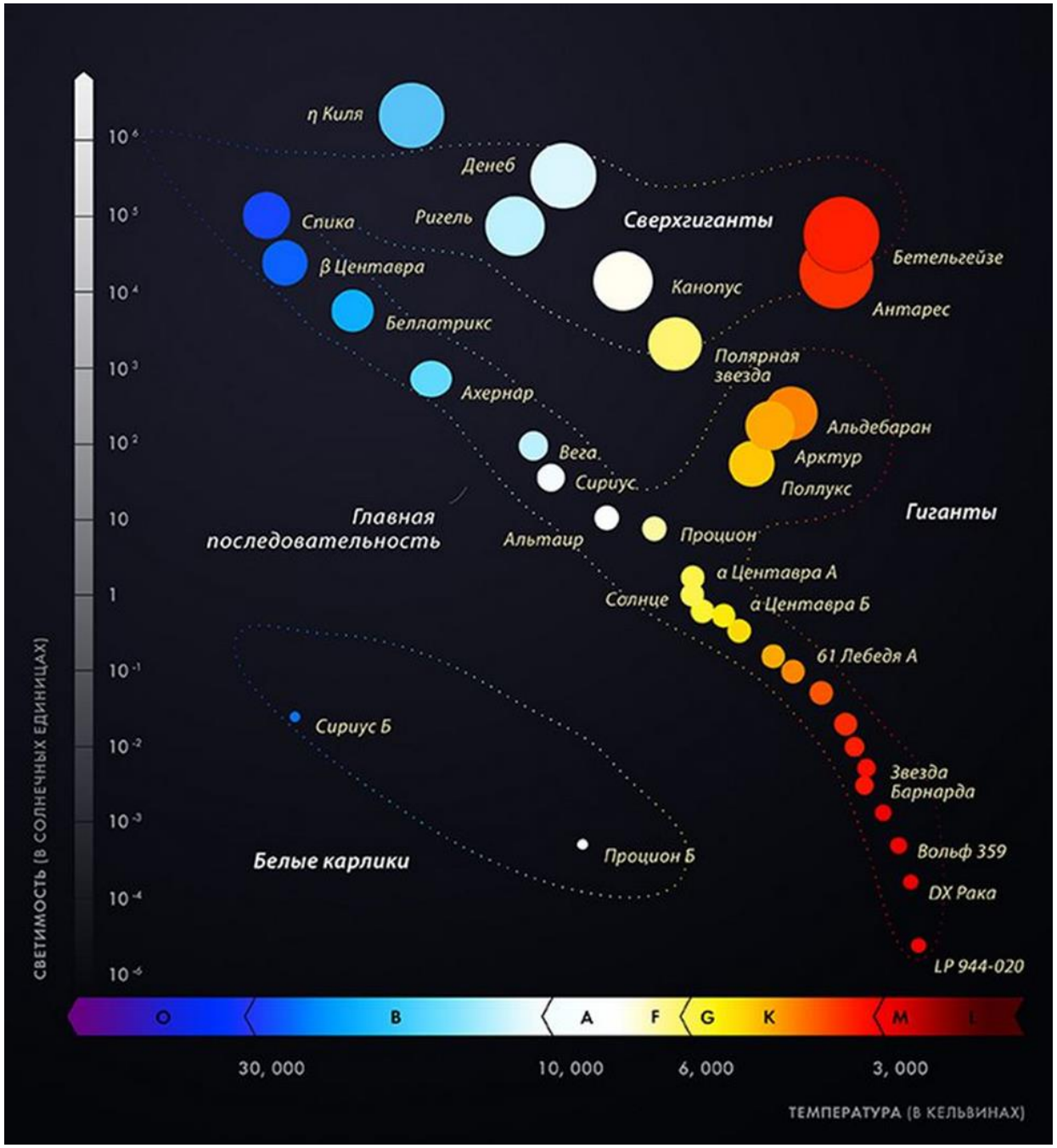
Подтверждение – открытие реликтового излучения – 1965 г.

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

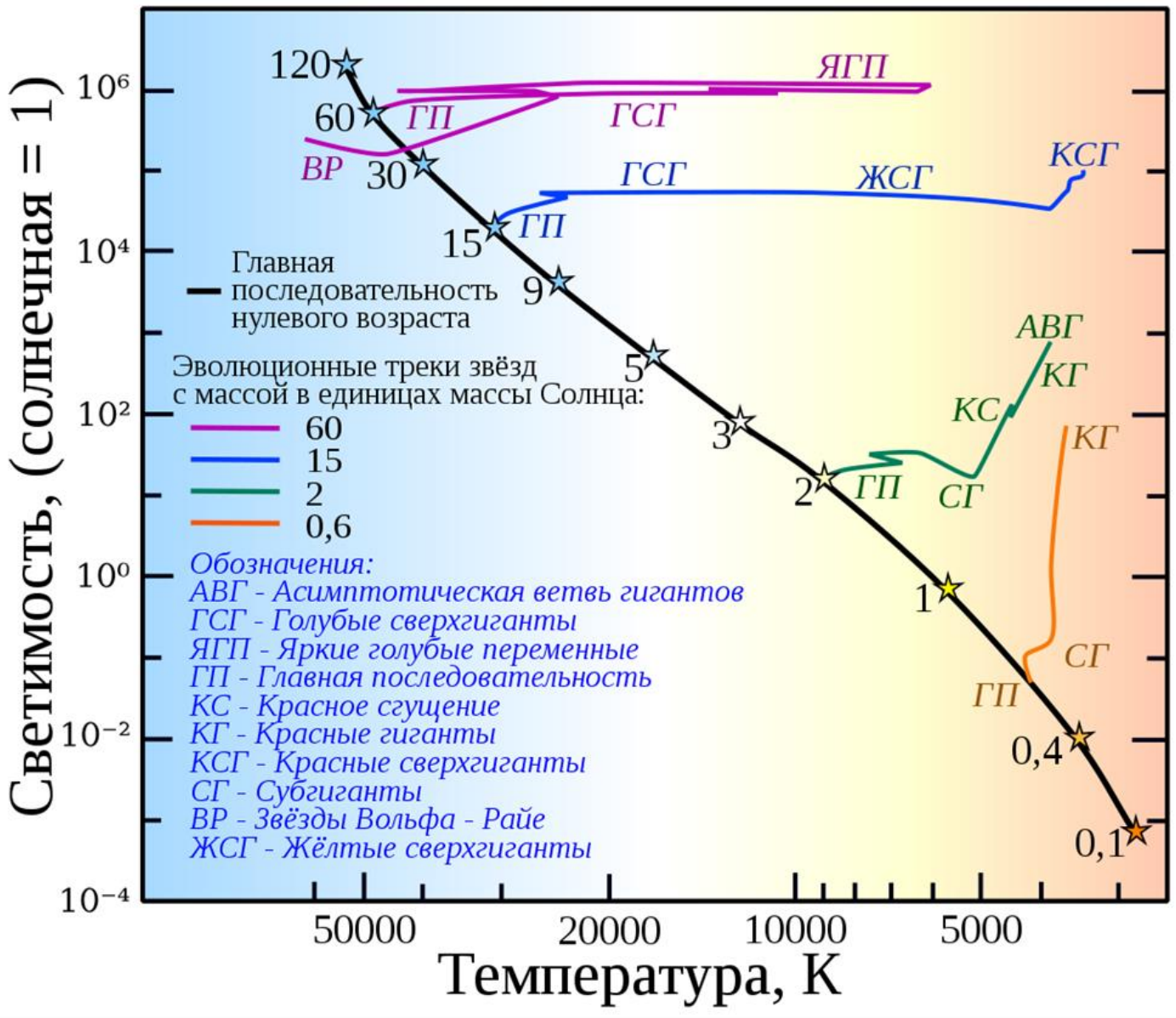
При Большом Взрыве рассчитанный состав Вселенной (совпадает с наблюдениями межгалактического газа):

^{1}H	–	75 %
^{4}He	–	25 %
^{2}H (D)	–	0.003 %
^{3}He	–	0.002 %
^{7}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×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.

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

Расчет дефекта массы для $^{12}_{6}C$:

масса ядра $^{12}_{6}C$	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 $^{12}_{6}C$ 0,09565 а.е.м.

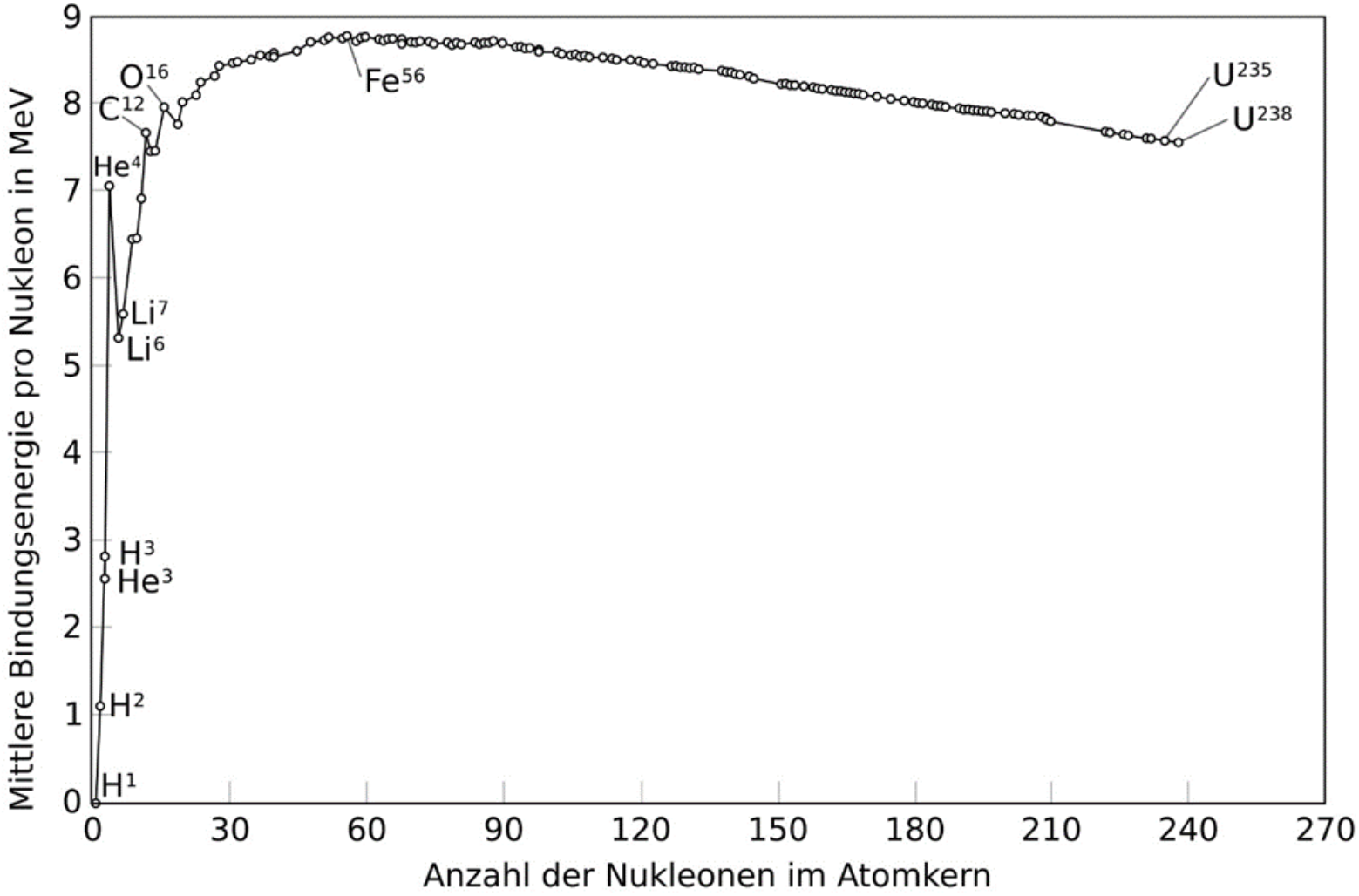
Относительный дефект массы («упаковочный множитель»):

0,09565 / 12 = 0,007971 а.е.м.

$$E = mC^2$$

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

Энергия образования ядра $^{12}_{6}C$ из нуклонов 7,425 МэВ на 1 нуклон



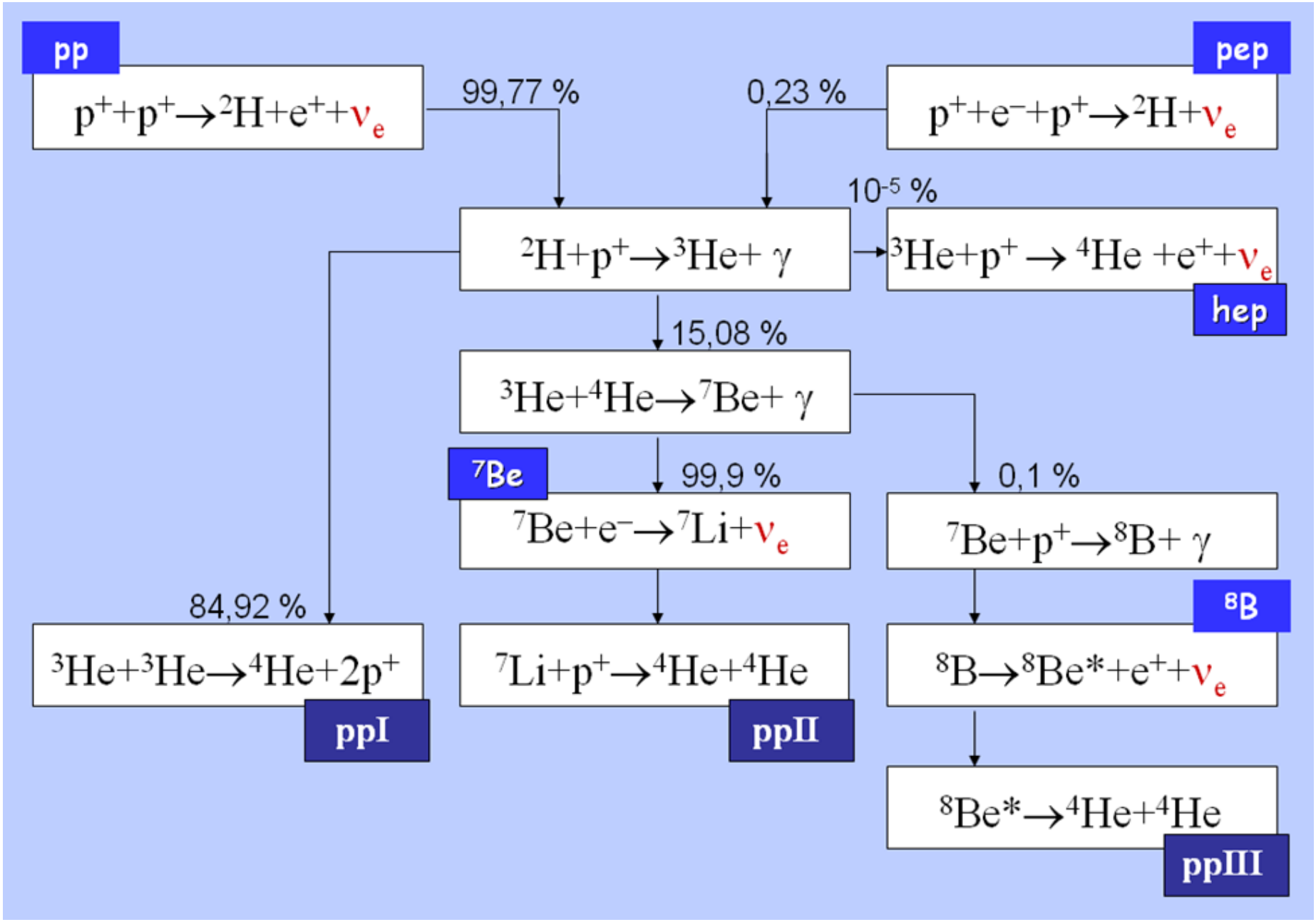
Зависимость относительного дефекта массы от числа нуклонов в ядре атома.

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.

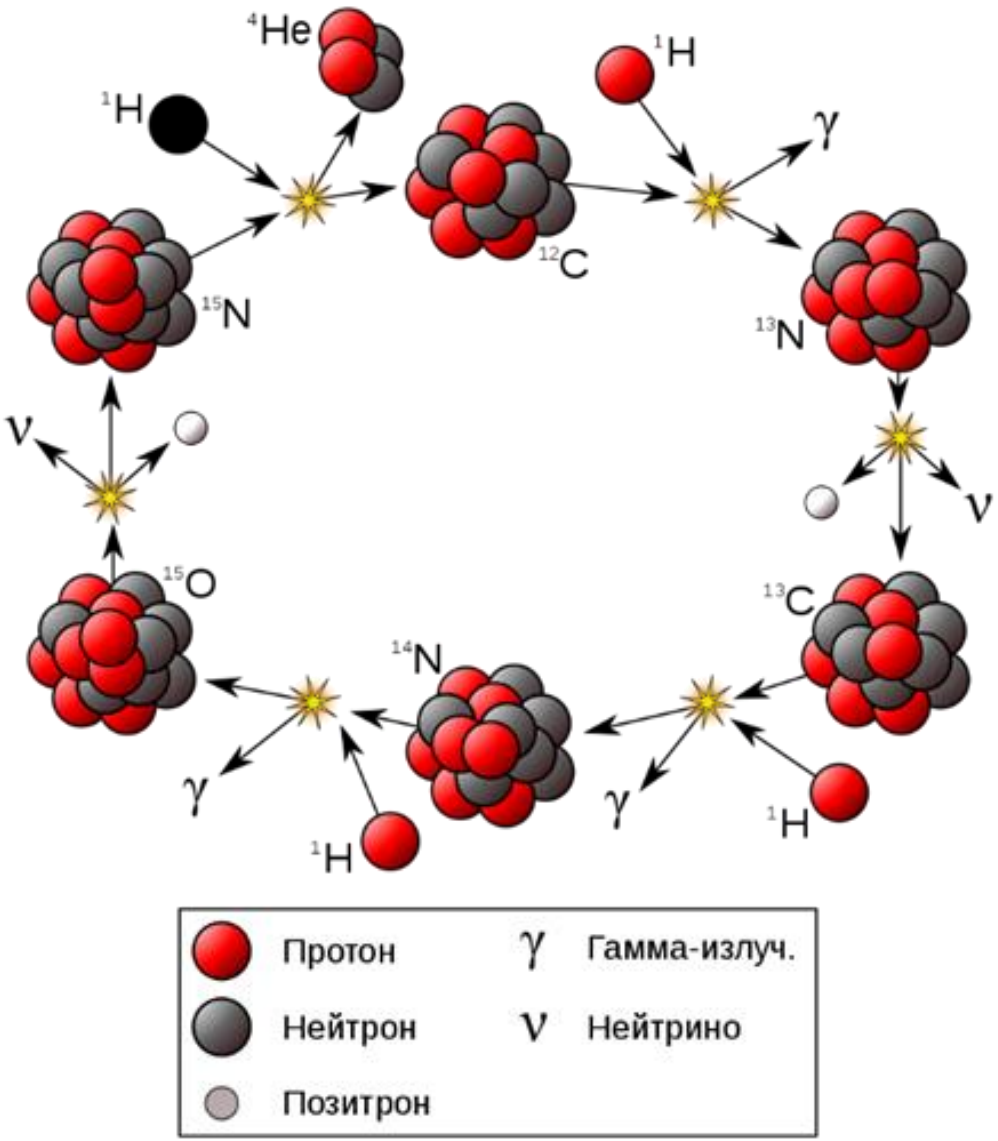
Звездный термоядерный нуклеосинтез
(М.Бэрбидж, Д.Бербидж, Фаулер, Хойл, 1957)

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



Протон-протонный цикл - главный источник энергии Солнца

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



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

$^{12}C + p \rightarrow {}^{13}N + \gamma$ +1,94 МэВ

$^{13}N \rightarrow {}^{13}C + e^+ + \nu_e$ +2,22 МэВ

$^{13}C + p \rightarrow {}^{14}N + \gamma$ +7,55 МэВ

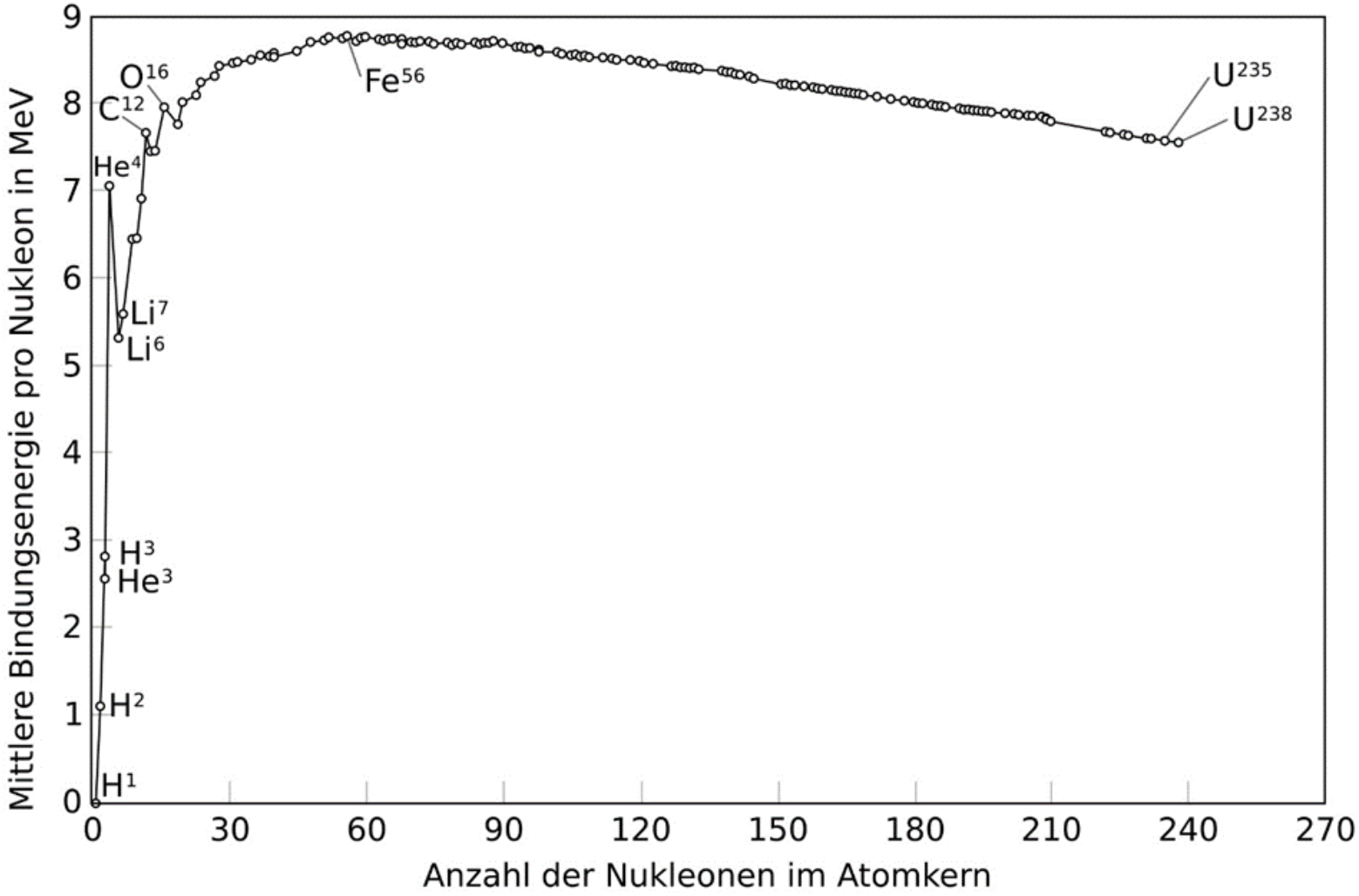
$^{14}N + p \rightarrow {}^{15}O + \gamma$ +7,30 МэВ

$^{15}O \rightarrow {}^{15}N + e^+ + \nu_e$ +2,75 МэВ

$^{15}N + p \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He$ +4,96 МэВ

Звездный термоядерный нуклеосинтез
(М.Бэрбидж, Д.Бербидж, Фаулер, Хойл, 1957)

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



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

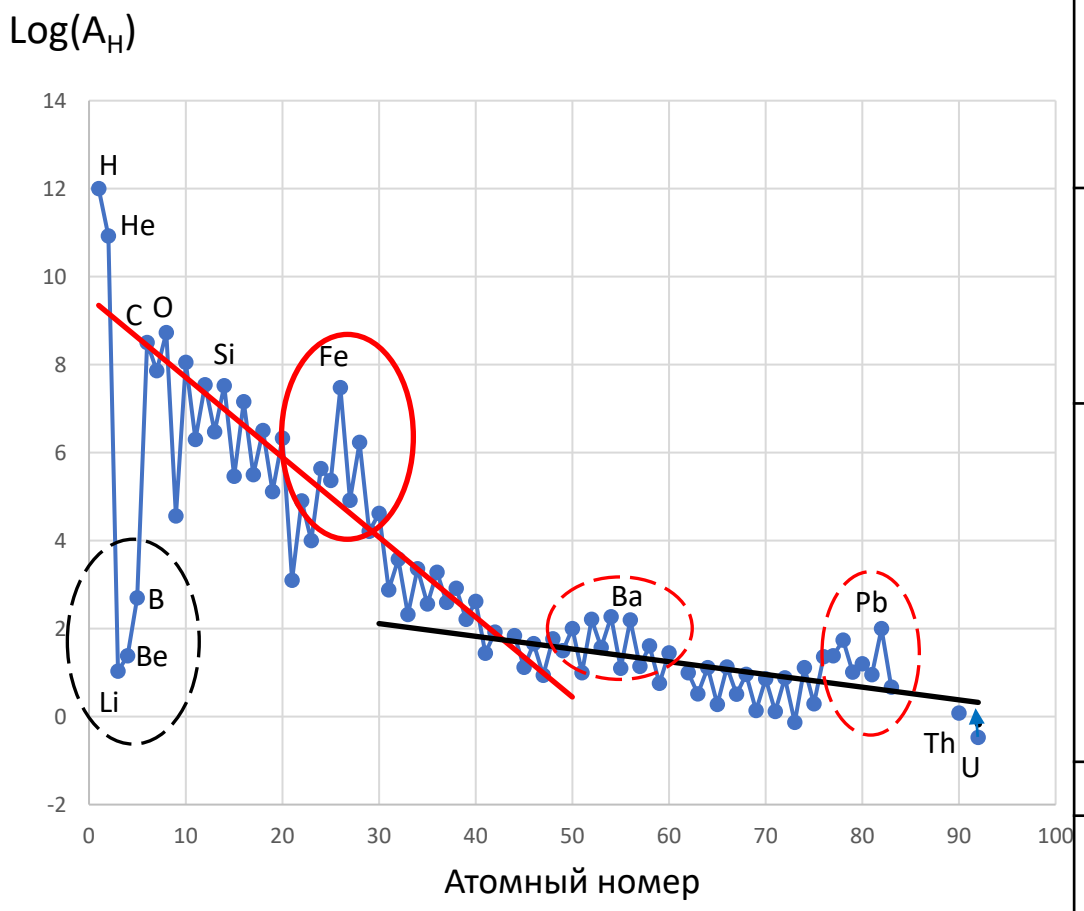
Более тяжелые ядра становятся менее выгодными – синтез из легких ядер прекращается.

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” распространенности элементов



Закономерности	Причины
“Космическая распространенность” 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~40) и пологая для тяжелых элементов.	Разные процессы: легкие ядра “нарабатываются” при эволюции звезд, тяжелые – при взрывах Сверхновых.
Распространенность четных элементов больше, чем их нечетных соседей (правило Оддо-Харкинса). Преобладание изотопов с массами, кратными 4 (правило “4q”)	Синтез легких элементов идет через α-частицы. Четные ядра имеют бóльшие дефекты масс.
Локальные особенности:	
Максимум в области Fe.	Ядро ^{56}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.