

Тема 1. Космическая распространенность элементов. Нуклеосинтез.

“Космическая распространенность” элементов =
= средний состав Солнечной системы

Спектроскопия Солнца

Интенсивность спектральных линий:

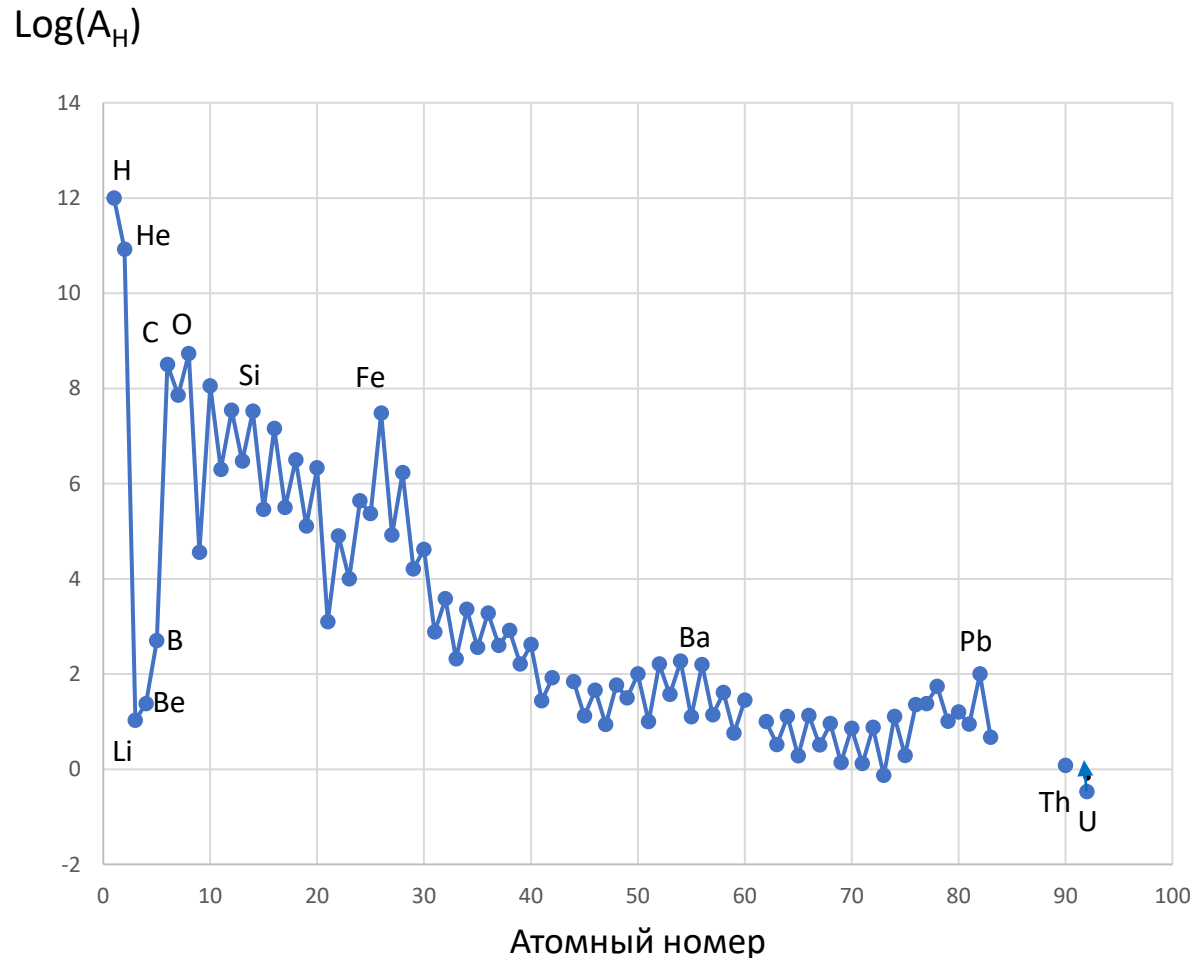
$$I = KN e^{-\frac{E_n}{RT}} h\nu \Rightarrow I = K'K_e N,$$

где K' – коэффициент, зависящий от условий съемки и температуры плазмы,
 K_e – коэффициент, зависящий от свойств элемента,
 N – концентрация (атомная) элемента в солнечной плазме.

Следствие:
$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{K_{e1}}{K_{e2}} \times \frac{N_{e1}}{N_{e2}}$$

В качестве «референсного» элемента e_2 использовались Mg, Si, H.

“Космическая распространенность” элементов



1 закономерность:

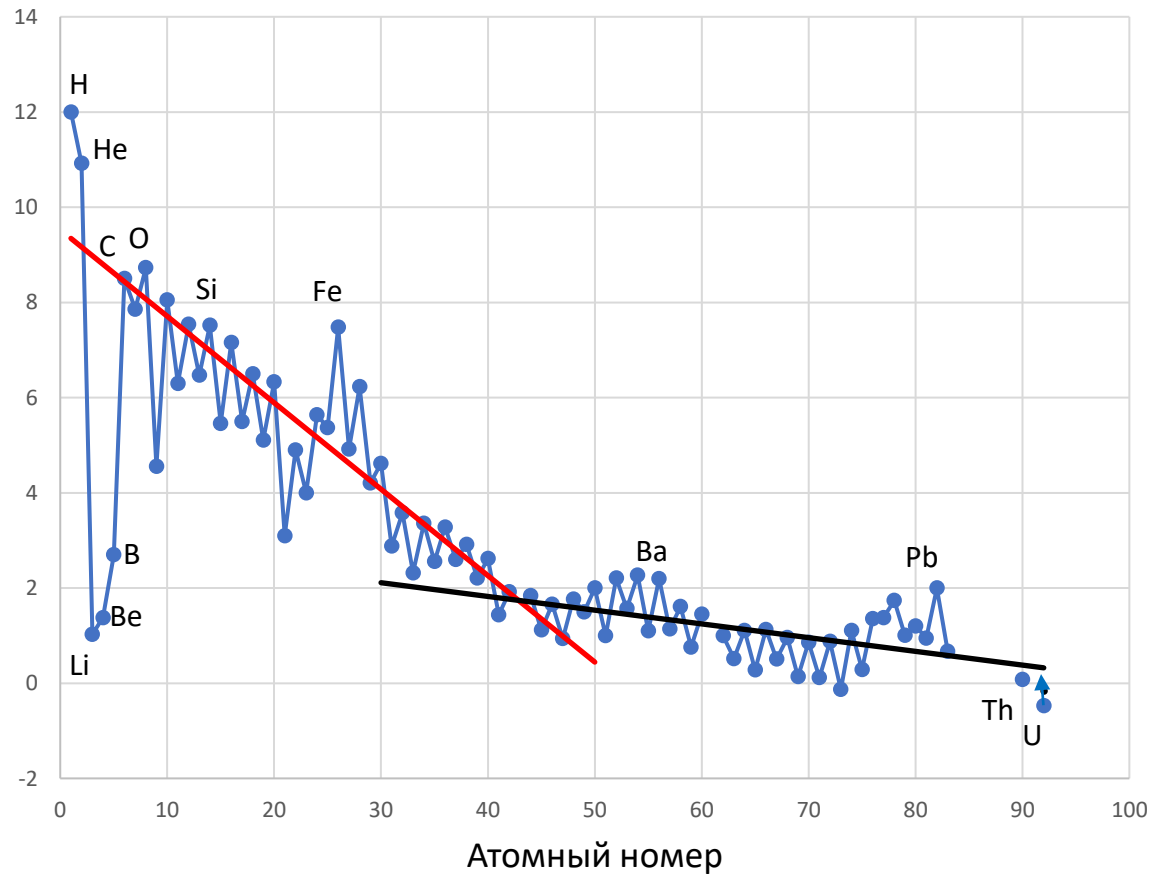
“Космическая распространенность” элементов убывает с увеличением атомного номера.

A_H – атомные распространенности на 10^{12} атомов водорода.

(По данным Palme et al., 2013)

“Космическая распространенность” элементов

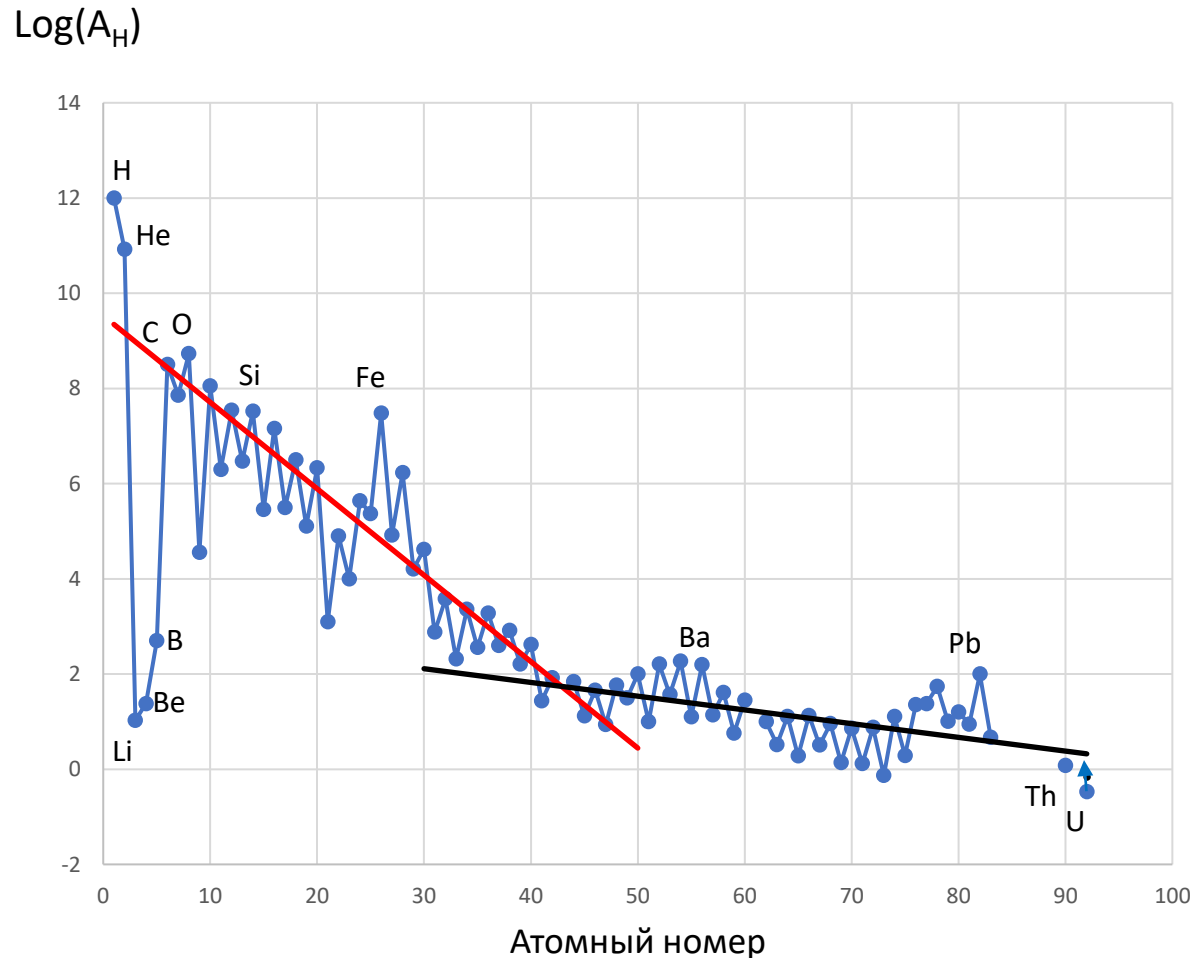
$\text{Log}(A_H)$



2 закономерность:

Выделяются две ветви:
крутая для легких
элементов (до $N \sim 40$) и
пологая для тяжелых
элементов.

“Космическая распространенность” элементов



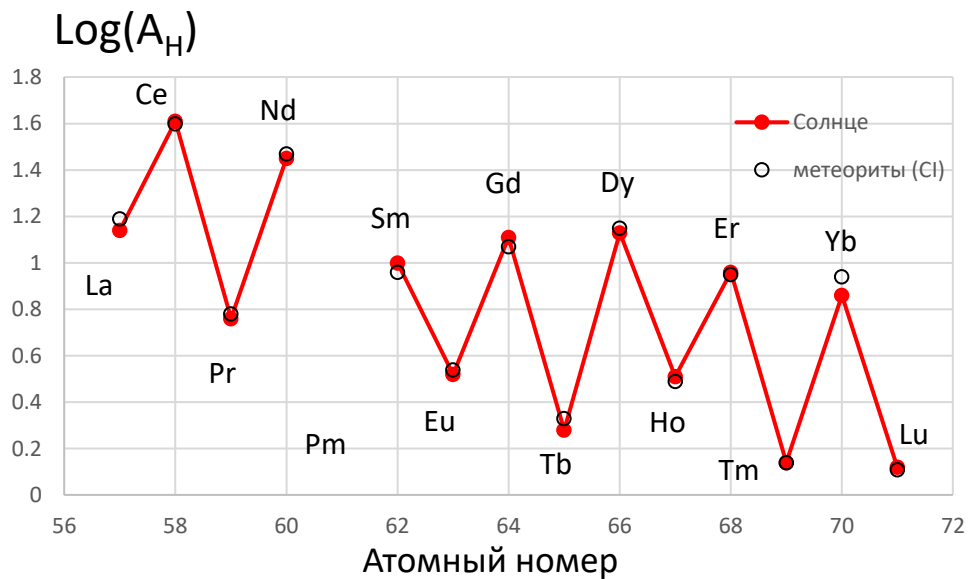
3 закономерность:

(зубчатый характер
графика)

Правило Оддо-Харкинса:

Распространенность
четных элементов
больше, чем их нечетных
соседей.

“Космическая распространенность” элементов

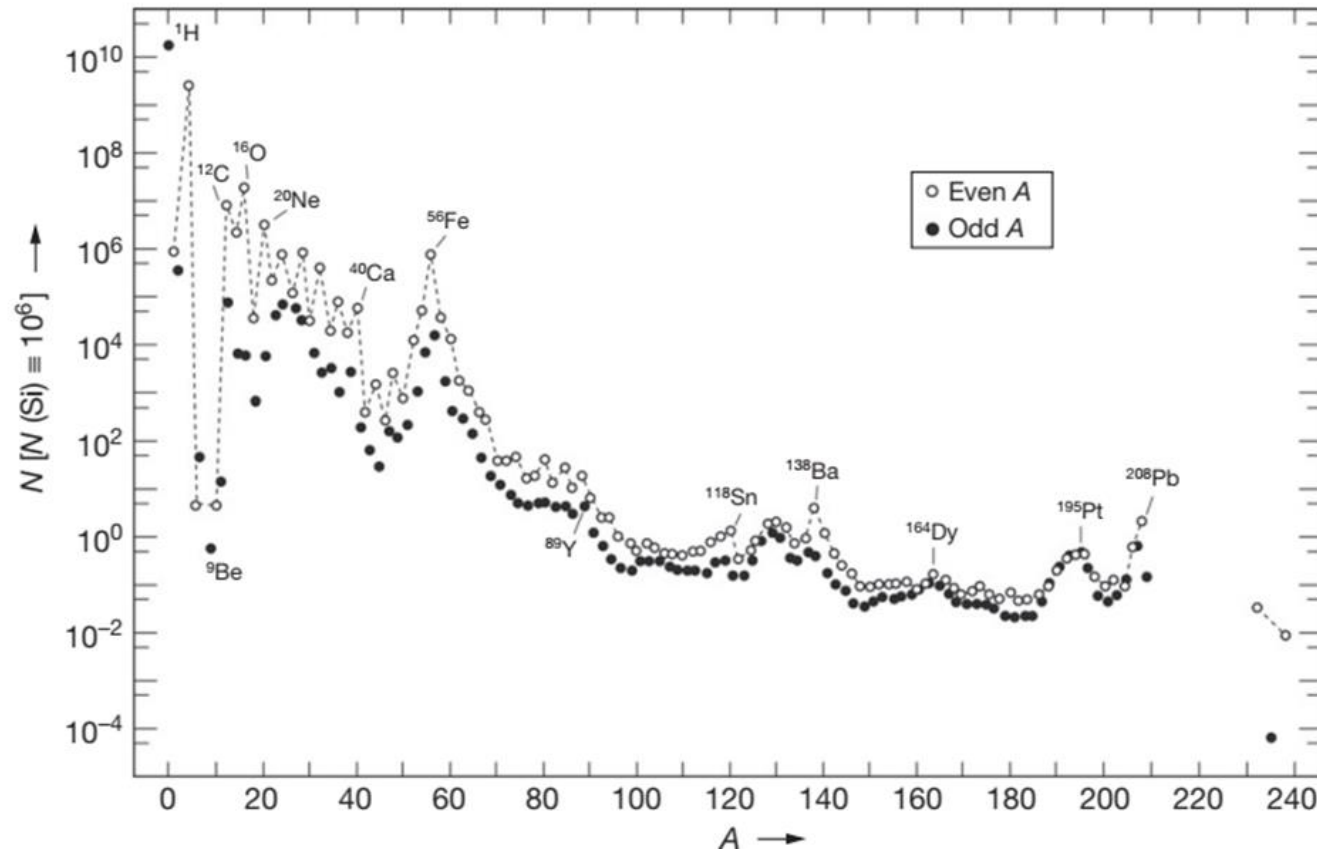


Правило Оддо-Харкинса на примере распространённости редкоземельных элементов (РЗЭ).

Для сравнения приведена распространённость РЗЭ в метеоритах (перенормированная по Si)

(По данным Palme et al., 2013)

“Космическая распространенность” элементов

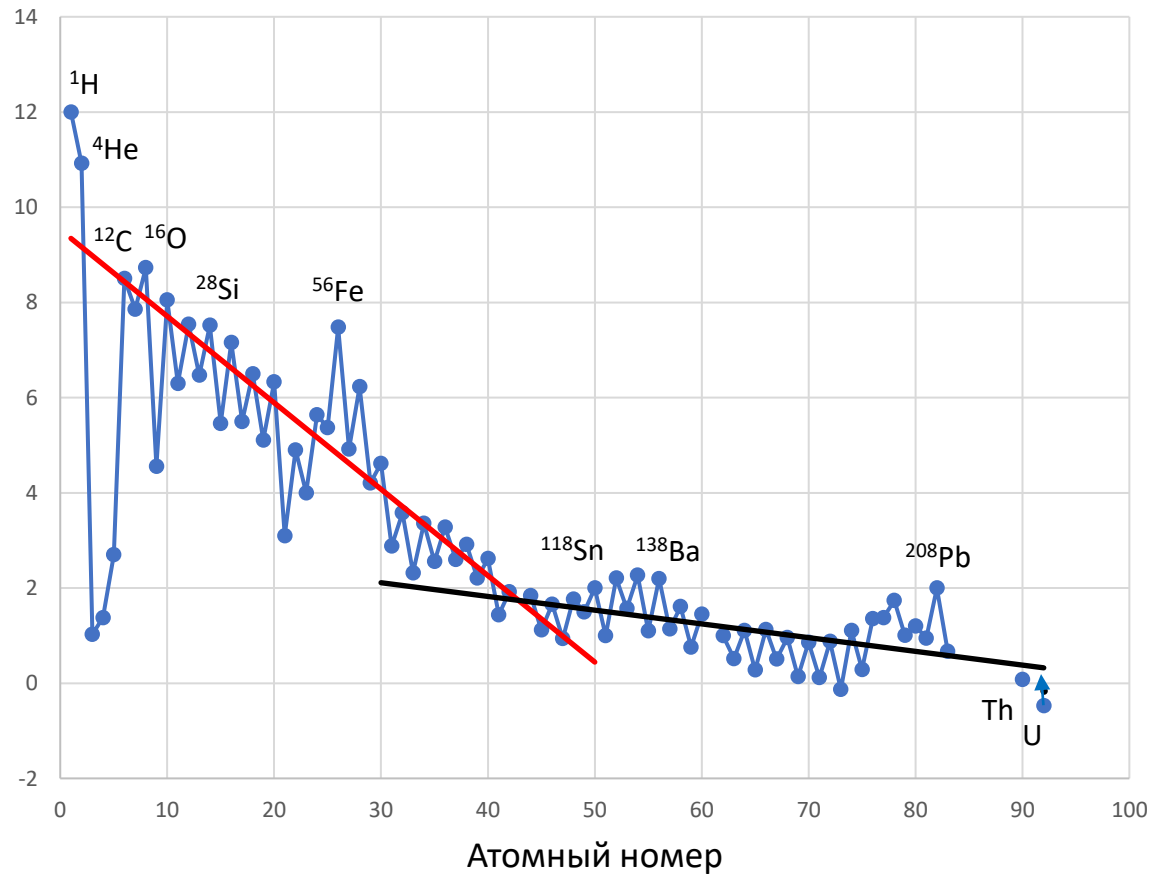


Правило Оддо-Харкинса
применительно к
изотопам элементов.

Нормировано на 10^6 атомов Si.
(Palme et al., 2013)

“Космическая распространенность” элементов

$\text{Log}(A_H)$



4 закономерность:

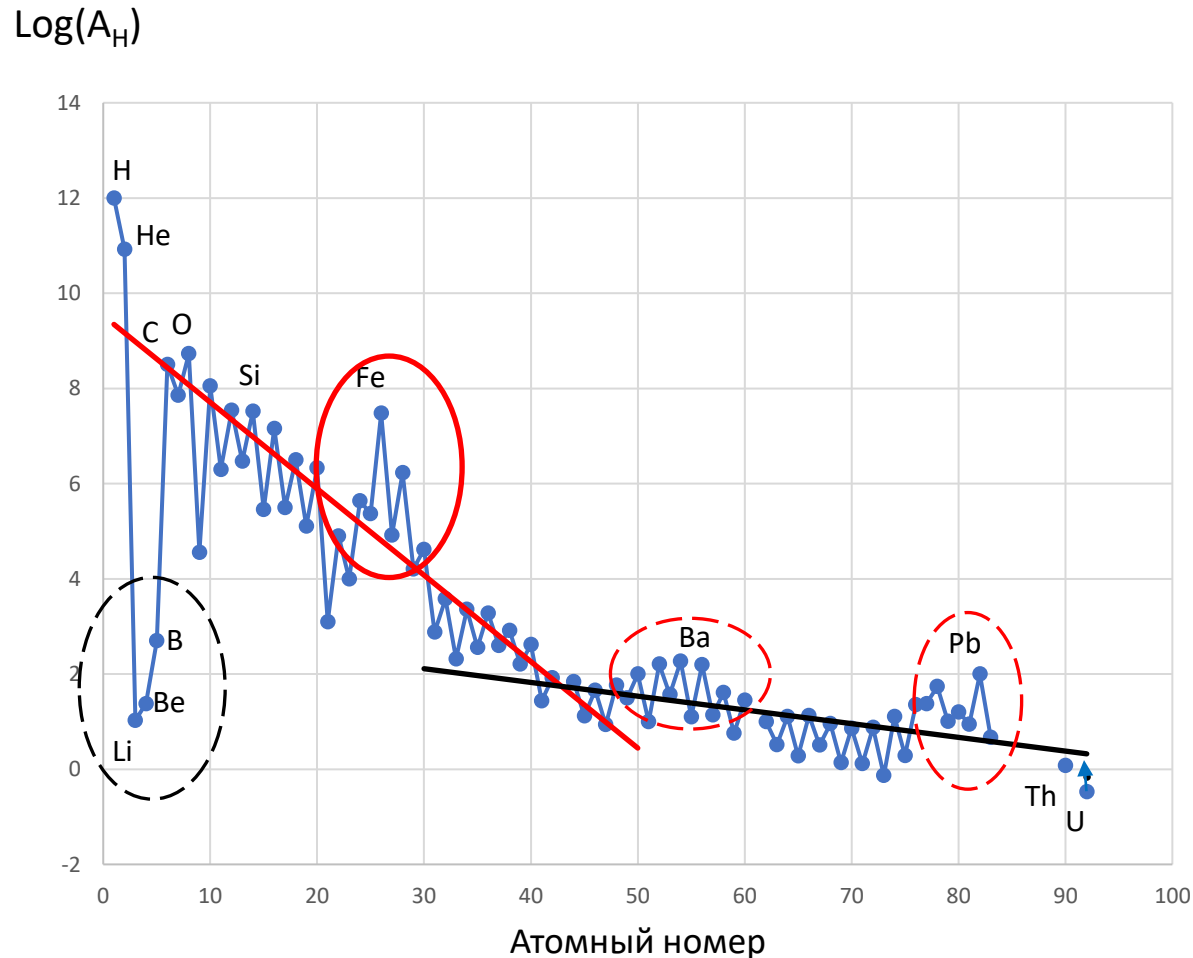
Преобладание изотопов с массами, кратными 4 (правило “4q” Ферсмана)

В Солнечной системе преобладают изотопы с массами, кратными 4 – четным числом протонов и четным числом нейтронов (исключение – ^1H):

^4_2He , $^{12}_6\text{C}$, $^{16}_8\text{O}$, $^{20}_{10}\text{Ne}$, $^{24}_{12}\text{Mg}$, $^{28}_{14}\text{Si}$, $^{32}_{16}\text{S}$, $^{40}_{20}\text{Ca}$, $^{56}_{26}\text{Fe}$.

(Правило перестает работать для тяжелых элементов)

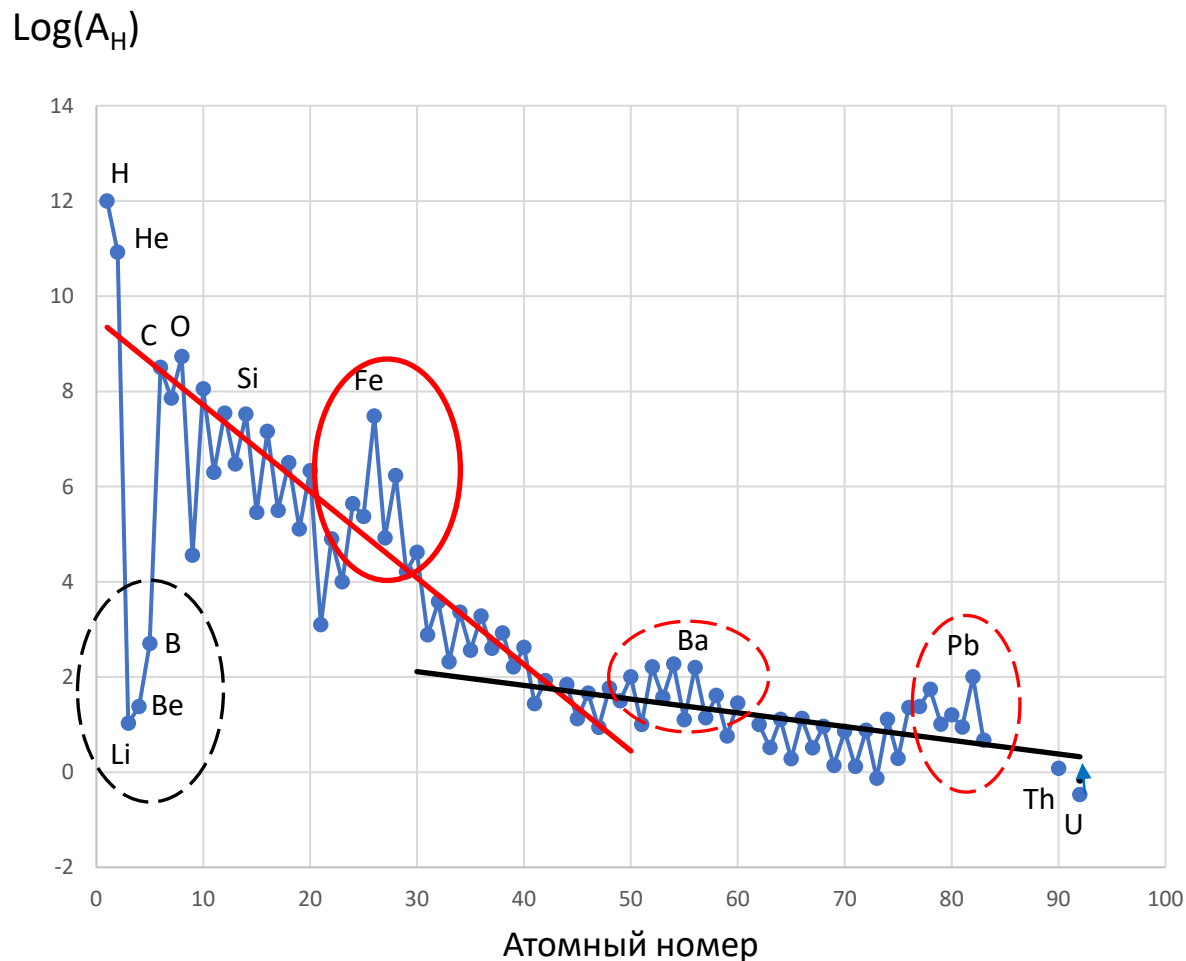
“Космическая распространенность” элементов



Локальные особенности:

1. Максимум в области Fe.
2. Дефицитные легкие элементы Li, Be, B.
3. Слабо выраженные максимумы в области ^{138}Ba и ^{208}Pb .

“Космическая распространенность” элементов

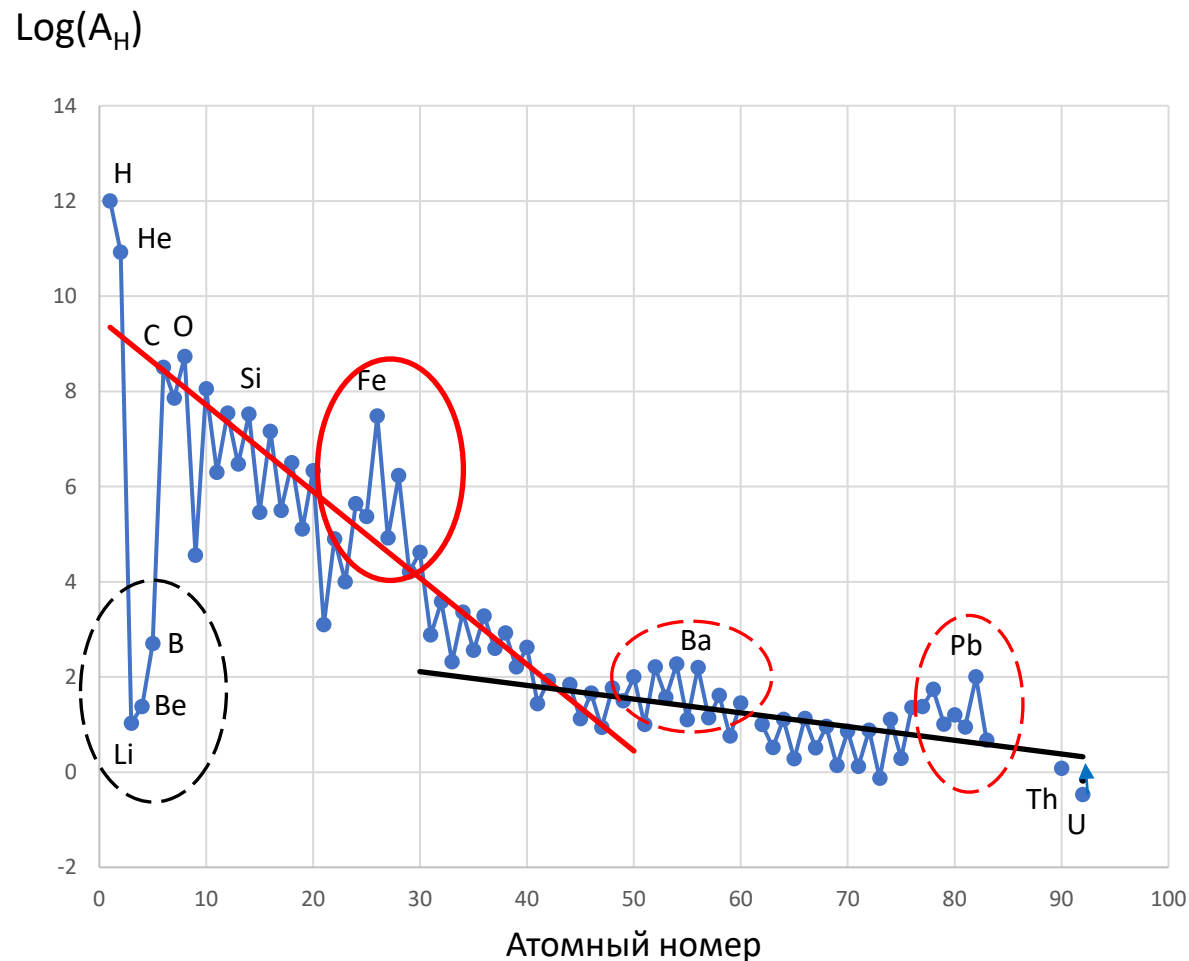


Глобальный характер закономерностей «космической распространенности» элементов и изотопов указывает на общий источник вещества Солнечной системы.

Следствия:

1. Закономерности «космической распространенности» несут в себе отпечаток процессов образования вещества Солнечной системы.
2. Отклонения от «космической распространенности» используются для расшифровки геологических (=химических) процессов дифференциации вещества в планетных телах.
3. Отклонения от «космической распространенности» могут быть использованы для поиска вне-Солнечного вещества.

“Космическая распространенность” элементов



Глобальный характер закономерностей «космической распространенности» элементов и изотопов указывает на общий источник вещества Солнечной системы.

Следствия:

Аналогия закономерностей распространенности между фотосферой Солнца и наименее дифференцированными метеоритами – углистыми хондритами позволяет дополнить оценку первичного состава протосолнечного облака данными по метеоритам для тяжелых микроэлементов, которые плохо определяются по солнечным спектрам (Se, Br, Te, Ta, Re, Bi и др.), а также по изотопным отношениям для малых изотопов.

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)

«БОЛЬШОЙ ВЗРЫВ»

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

Линейный характер расширения Вселенной – закон Хаббла (1929).

1948 – модель «горячей Вселенной» (Гамов, 1948).

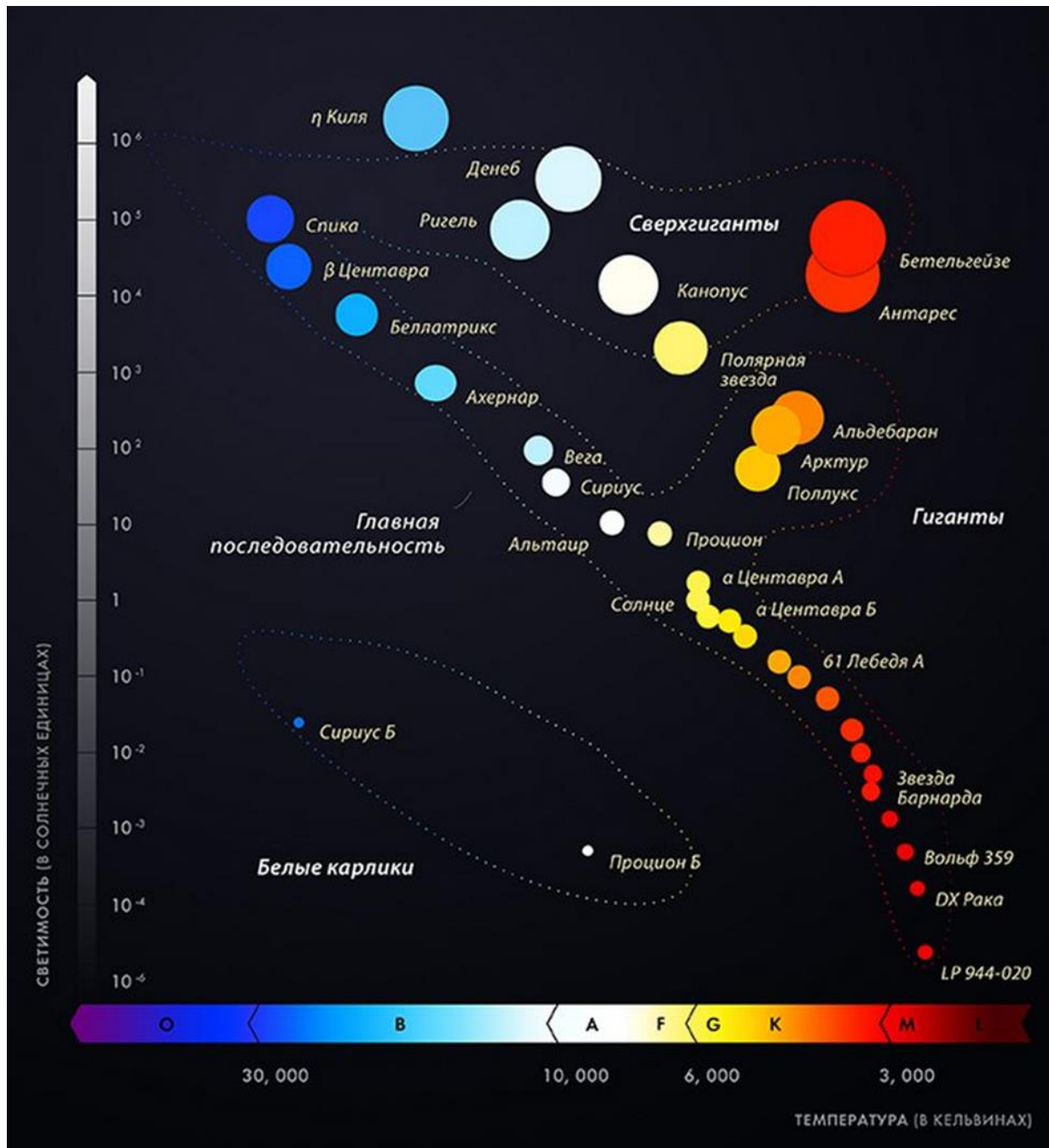
Подтверждение – открытие реликтового излучения – 1964 г.

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

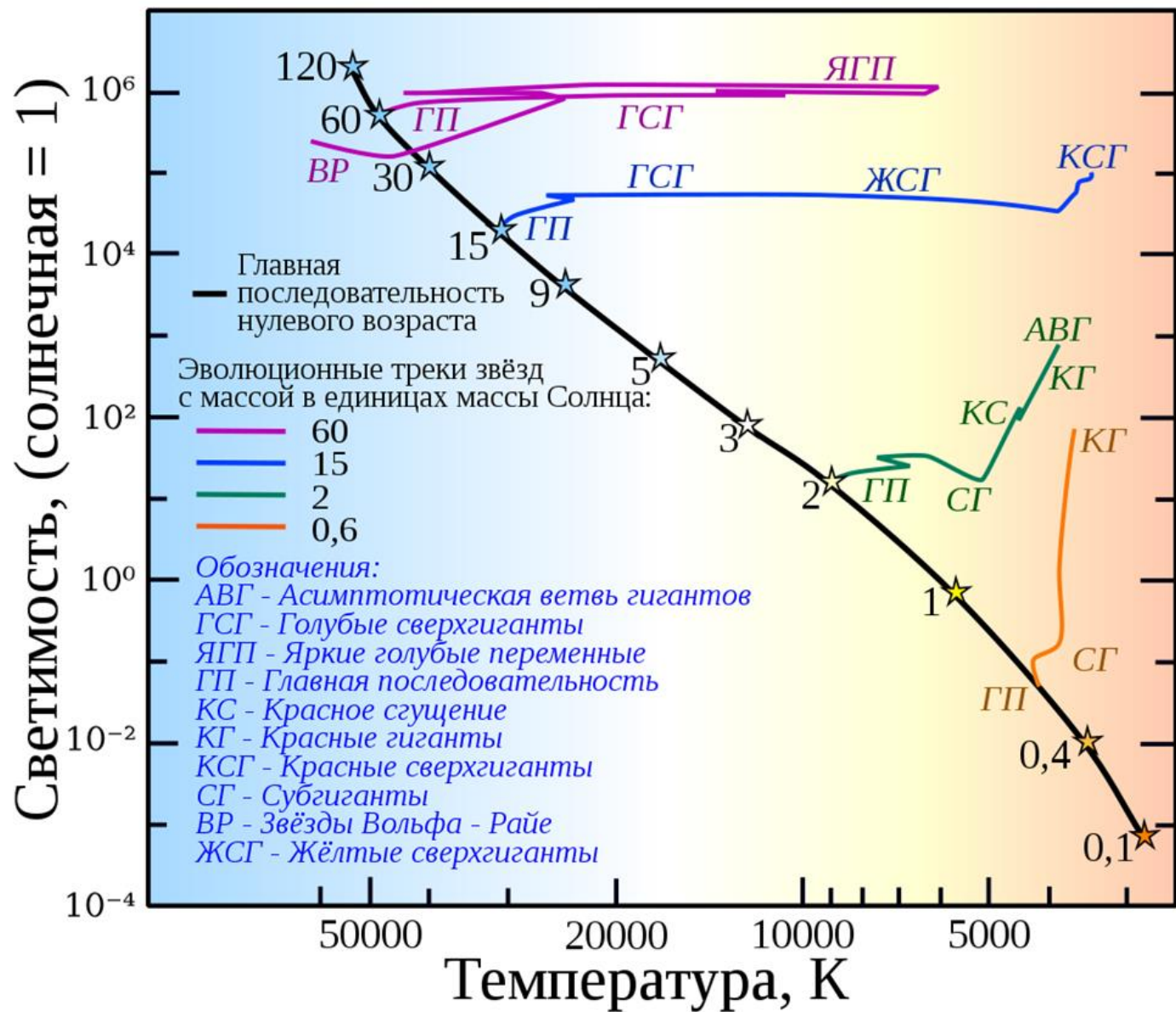
При Большом Взрыве рассчитанный состав Вселенной (совпадает с наблюдениями межгалактического газа):

^1H	75 %
^4He	25 %
$^2\text{H (D)}$	0.003 %
^3He	0.002 %
^7Li	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.

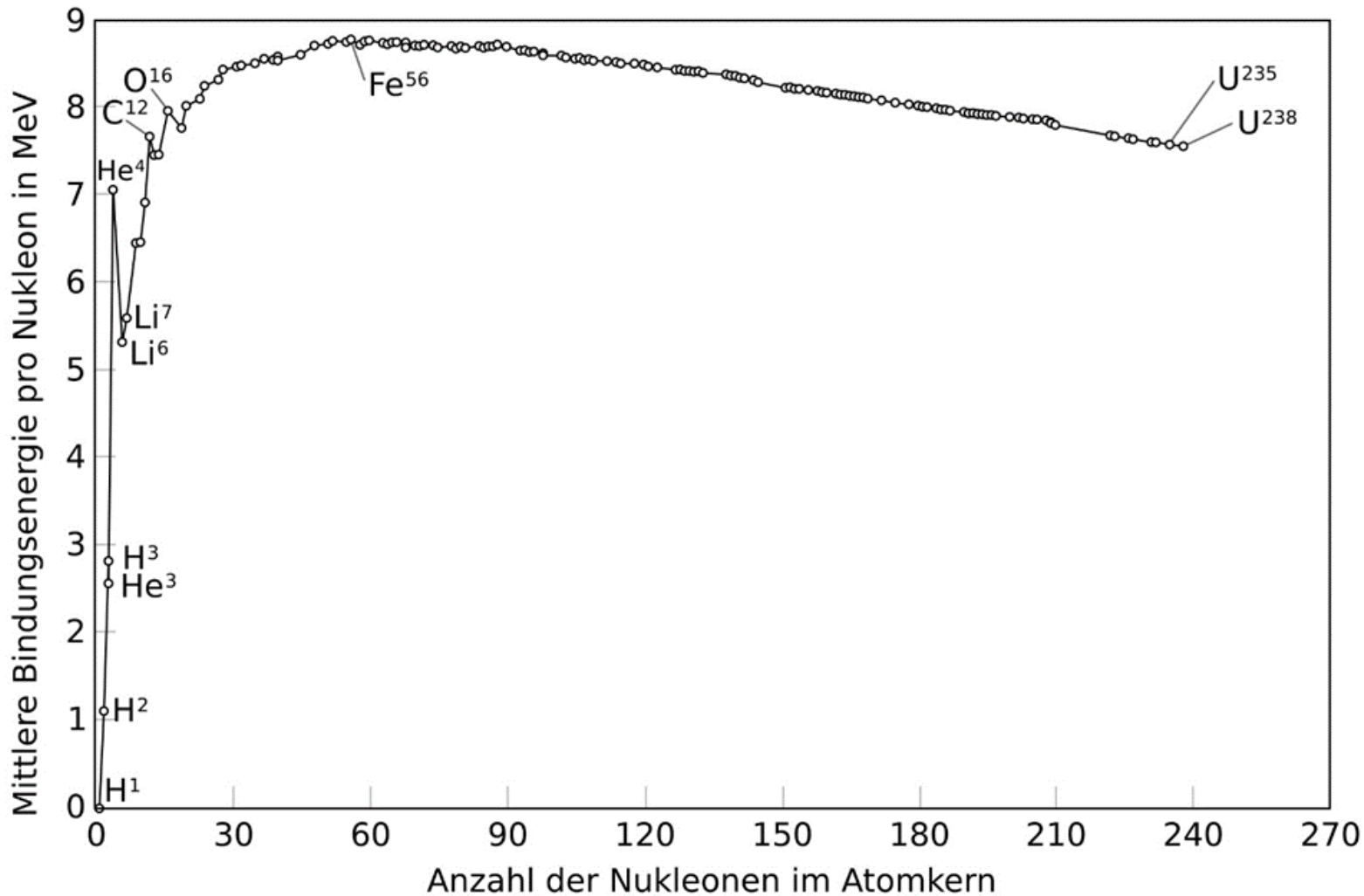
Относительный дефект массы («упаковочный множитель»):

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

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

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 и более устойчиво.

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

Звездный термоядерный нуклеосинтез

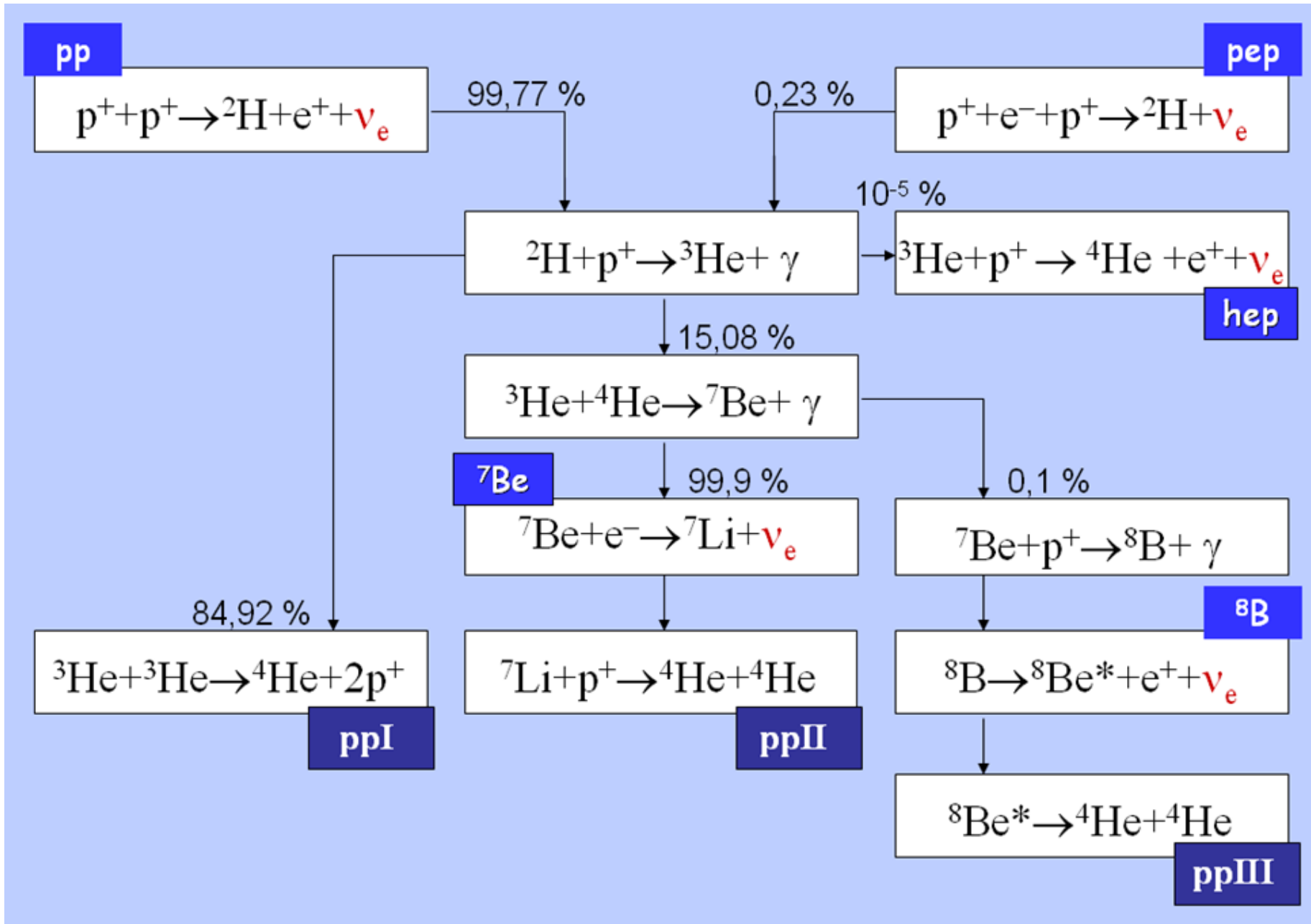
(М.Бэрбидж, Д.Бербидж, Фаулер, Хойл, 1957)

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

Звездный термоядерный нуклеосинтез

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

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



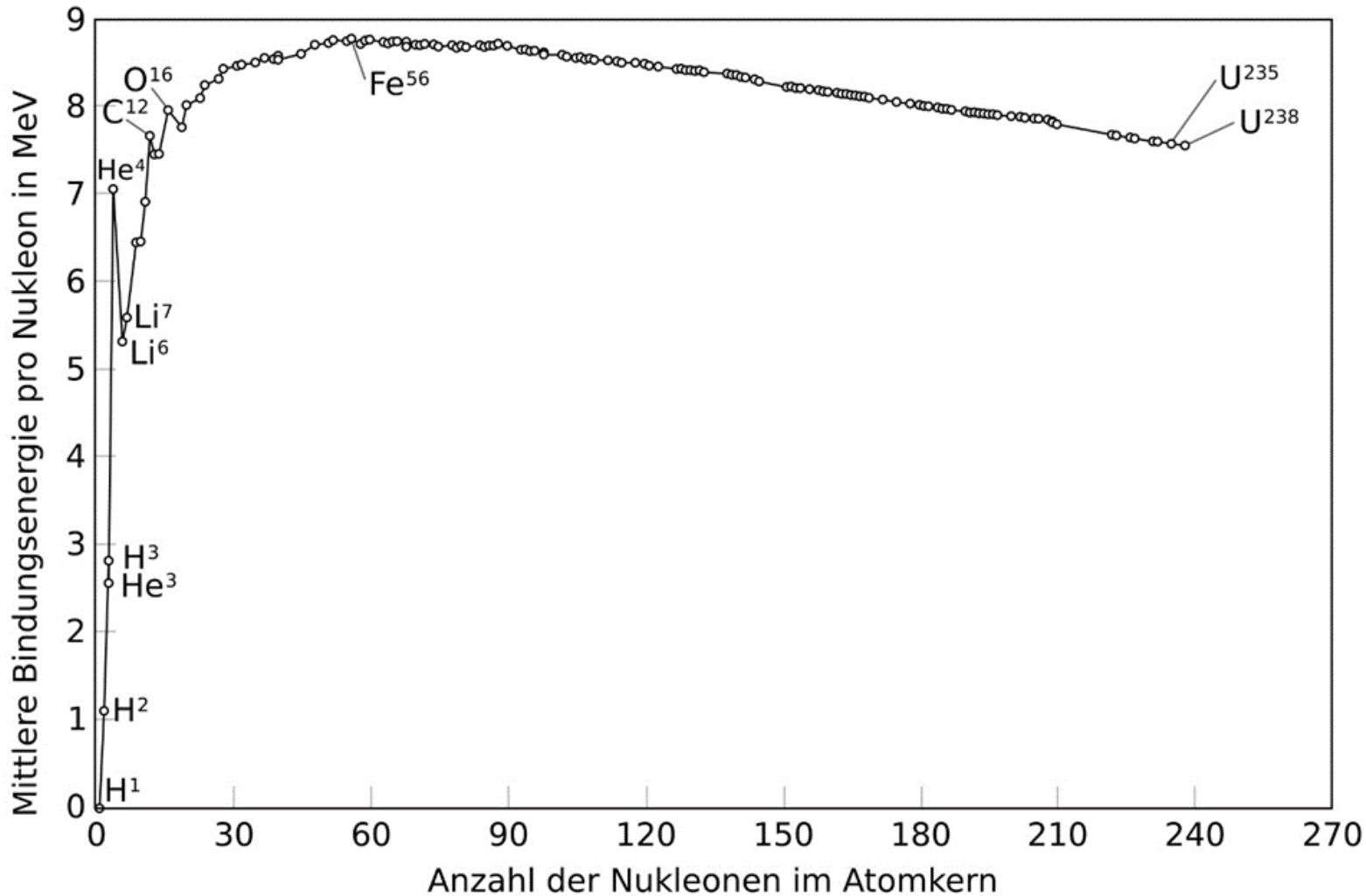
Протон-протонный цикл - главный для Солнца

(подтвержден измерениями потока «солнечных» нейтрино)

Звездный термоядерный нуклеосинтез

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

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



«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**.

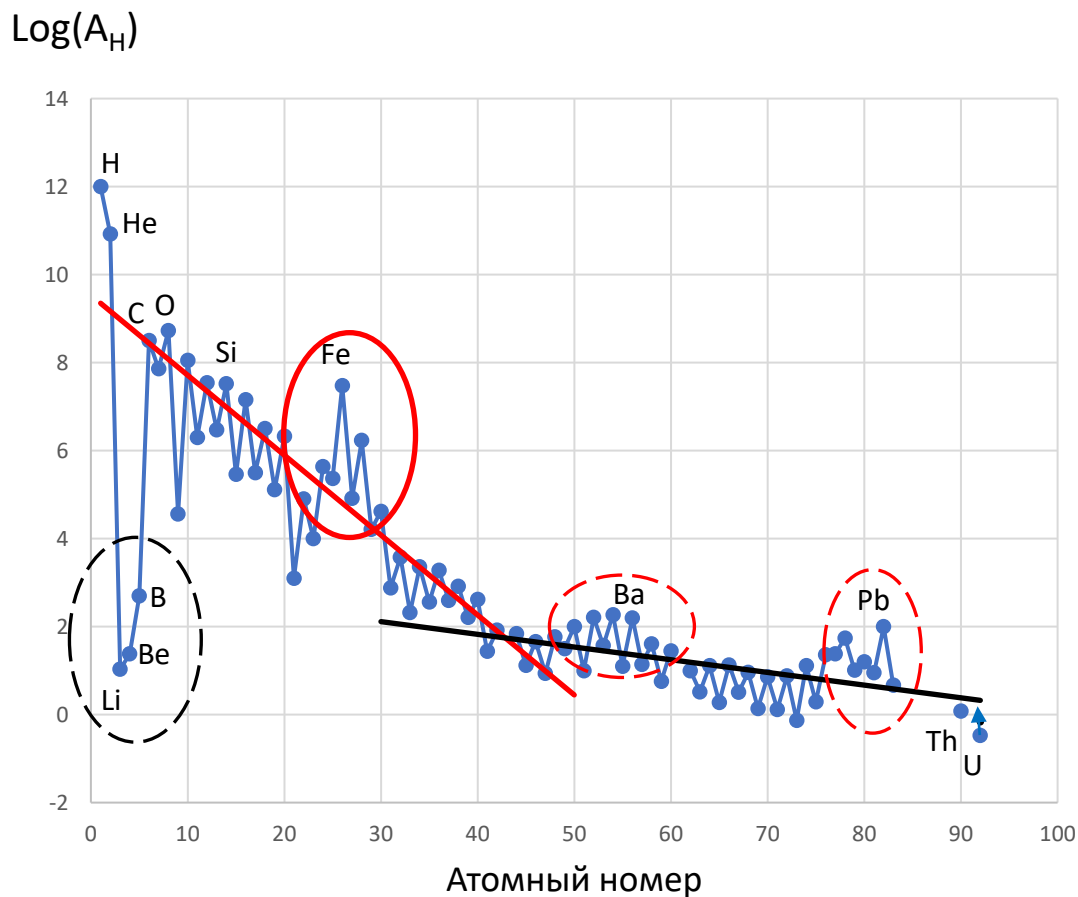
Синтез элементов во время вспышек Сверхновых звезд по двум механизмам:

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” 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 α -частицы. Четные ядра имеют большие 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 дал старт эволюции наблюдаемой Солнечной системы.

