

Происхождение элементов

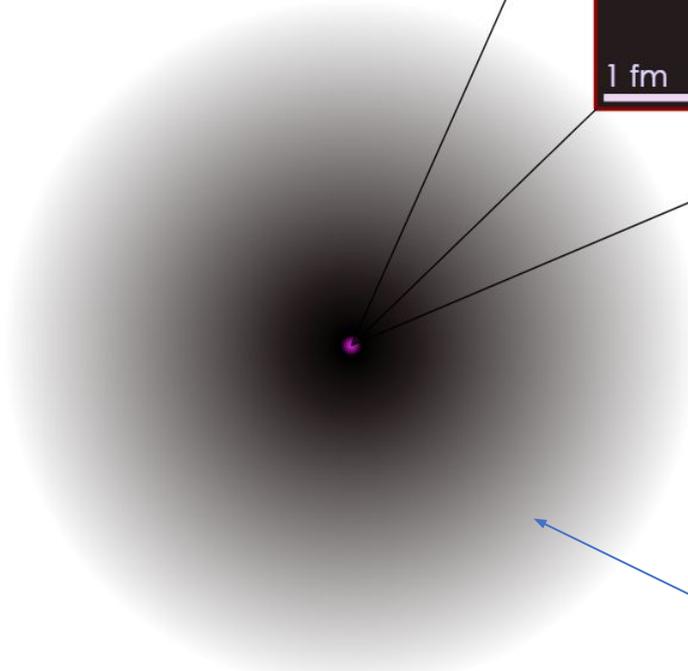
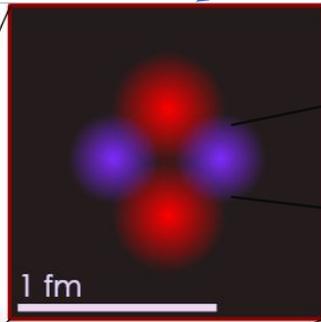
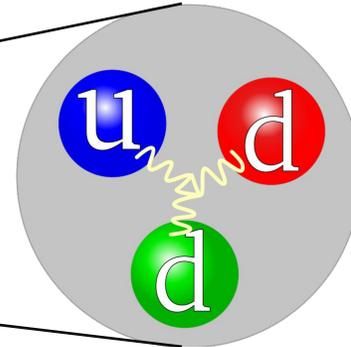
Все мы когда-то были звездами

Важные понятия для начала

- Строение атома
- Элемент
- Фундаментальные взаимодействия:
 - Гравитационное
 - Электромагнитное
 - Сильное
 - (Слабое)

АТОМ

Ядро атома



Частица	Масса	Заряд	Состав
Протон	1,0073 а.е.м.	+1	uud
Нейтрон	1,0087 а.е.м.	0	udd
Электрон	0,0005 а.е.м.	-1	e ⁻

1 Å = 100,000 fm

Здесь можно найти электрон



Элемент

Название для совокупности атомов, в ядре которых совпадает количество **протонов**.

Во Вселенной 10^{80} атомов.

Известно **118** элементов, из них больше **20** созданы человеком

Все атомы данного элемента почти неотличимы химически.

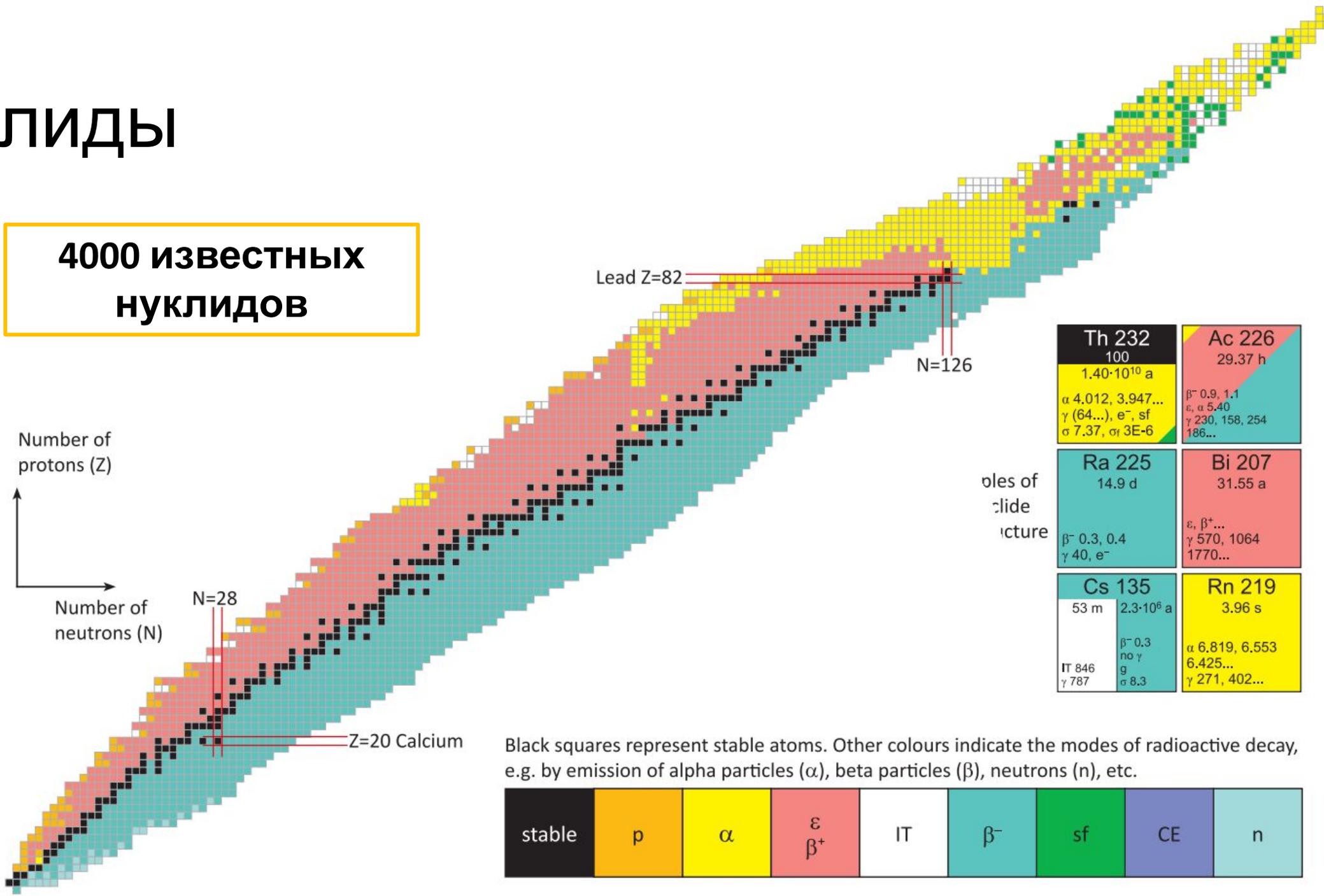
1 H																	2 He
3 Li	4 Be											5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg											13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn
87 Fr	88 Ra		104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Nh	114 Fl	115 Mc	116 Lv	117 Ts	118 Og
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr

А если у двух ядер отличается число **нейтронов**, но совпадает число **протонов**?

Тогда это **изотопы** данного **элемента**.

Нуклиды

4000 ИЗВЕСТНЫХ
НУКЛИДОВ



Number of protons (Z)
Number of neutrons (N)

Lead Z=82

N=126

N=28

Z=20 Calcium

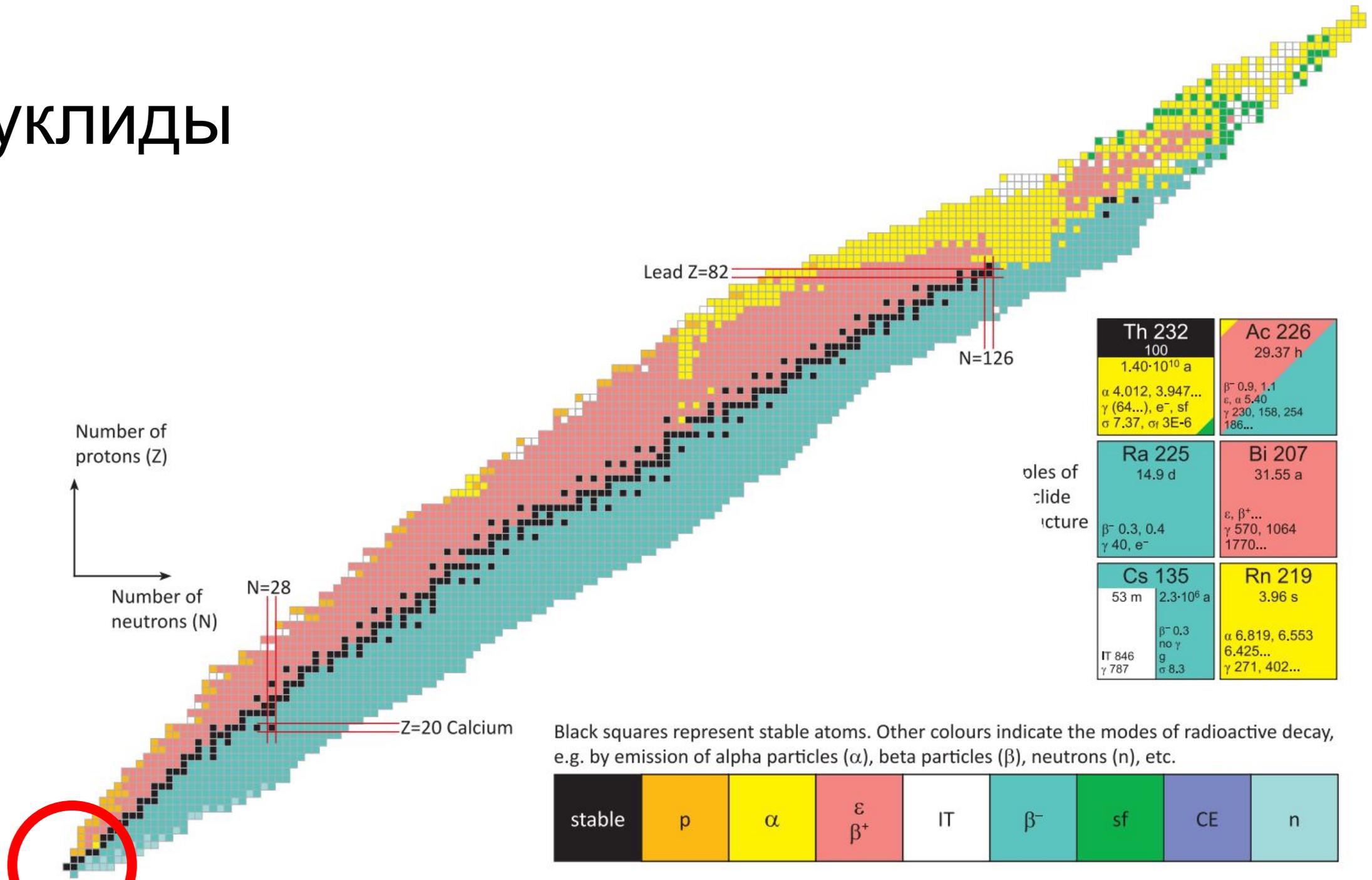
modes of
decay
structure

Th 232 100 1.40·10 ¹⁰ a α 4.012, 3.947... γ (64...), e ⁻ , sf τ 7.37, σ 3E-6	Ac 226 29.37 h β ⁻ 0.9, 1.1 ε, α 5.40 γ 230, 158, 254 186...
Ra 225 14.9 d β ⁻ 0.3, 0.4 γ 40, e ⁻	Bi 207 31.55 a ε, β ⁺ ... γ 570, 1064 1770...
Cs 135 53 m 2.3·10 ⁶ a IT 846 γ 787 β ⁻ 0.3 no γ g σ 8.3	Rn 219 3.96 s α 6.819, 6.553 6.425... g γ 271, 402...

Black squares represent stable atoms. Other colours indicate the modes of radioactive decay, e.g. by emission of alpha particles (α), beta particles (β), neutrons (n), etc.

stable	p	α	ϵ β^+	IT	β^-	sf	CE	n
--------	---	----------	-------------------------	----	-----------	----	----	---

Нуклиды



Th 232 100 1.40·10 ¹⁰ a α 4.012, 3.947... γ (64...), e^- , sf γ 7.37, σ 3E-6	Ac 226 89 29.37 h β^- 0.9, 1.1 ϵ , α 5.40 γ 230, 158, 254 186...
Ra 226 88 14.9 d β^- 0.3, 0.4 γ 40, e^-	Bi 207 83 31.55 a ϵ , β^+ ... γ 570, 1064 1770...
Cs 135 55 53 m IT 846 γ 787 2.3·10 ⁶ a β^- 0.3 no γ g σ 8.3	Rn 219 86 3.96 s α 6.819, 6.553 6.425... g γ 271, 402...

Black squares represent stable atoms. Other colours indicate the modes of radioactive decay, e.g. by emission of alpha particles (α), beta particles (β), neutrons (n), etc.

Нуклиды

Бор

Берилл
ий
Литий

Гелий

Водоро
д

ПРОТОНЫ



Нейтроны

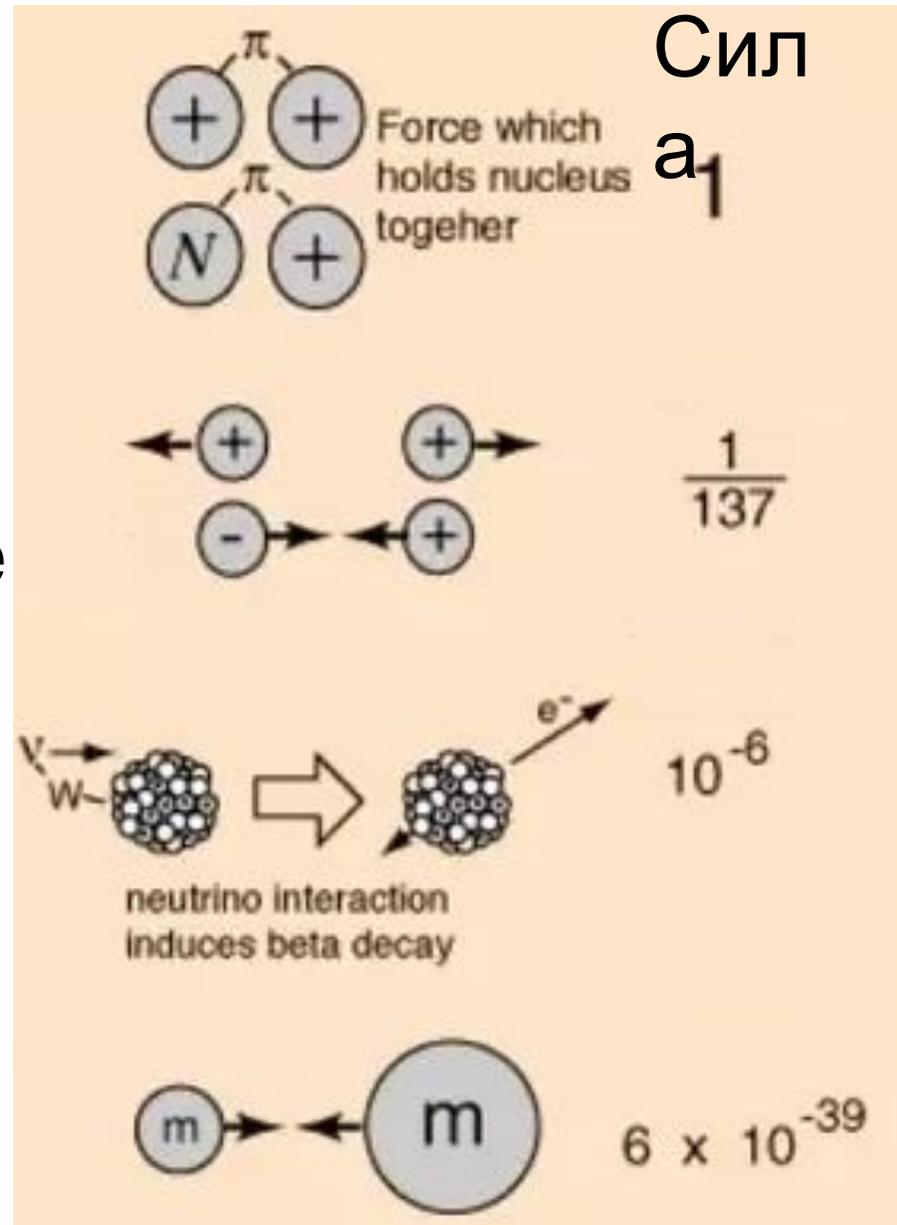
Фундаментальные взаимодействия

Сильное

Электромагнитное

Слабое

Гравитационное



Теперь можно начинать

Сколько и каких атомов есть во Вселенной?

Распространенность элементов

Человек

Земная кора

Вселенная

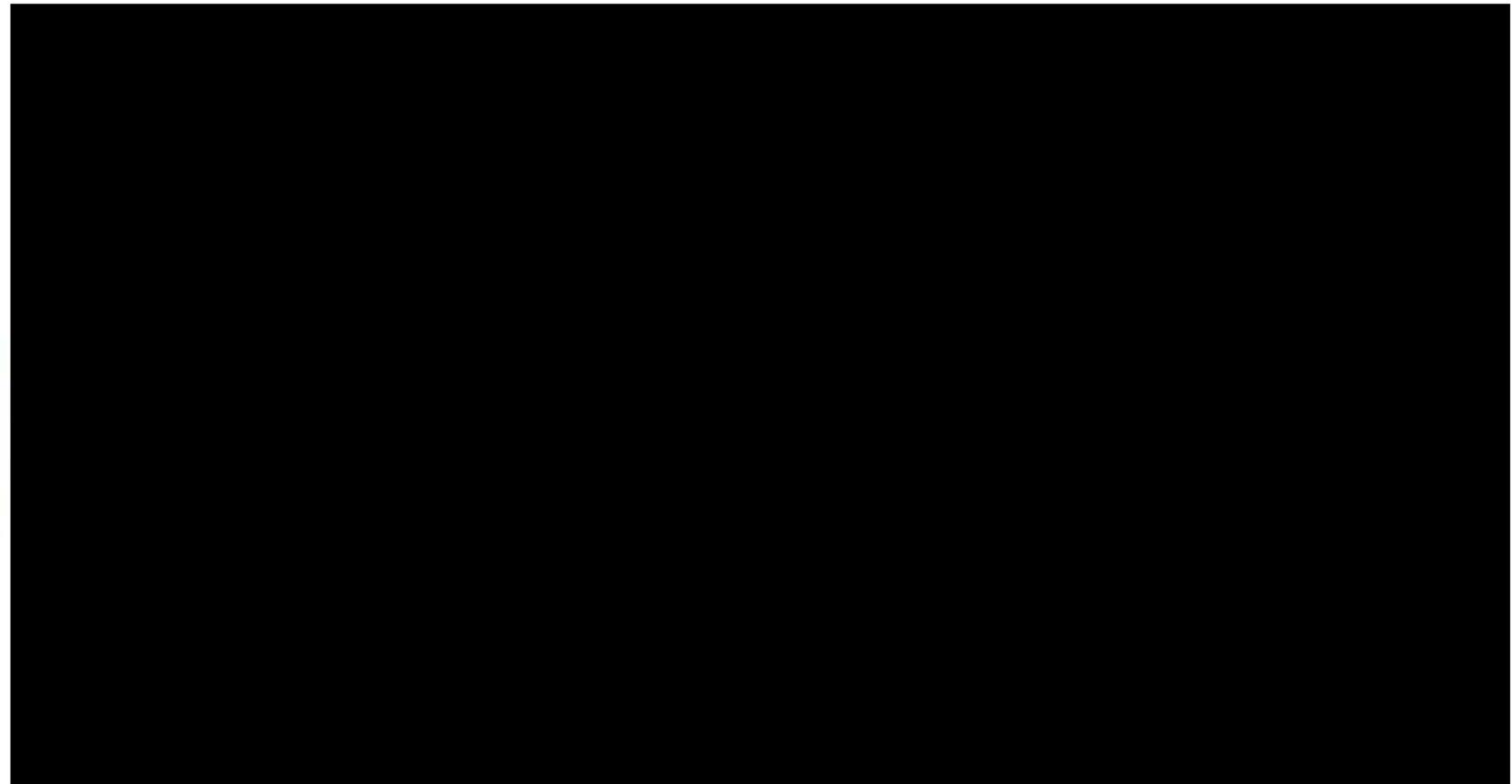
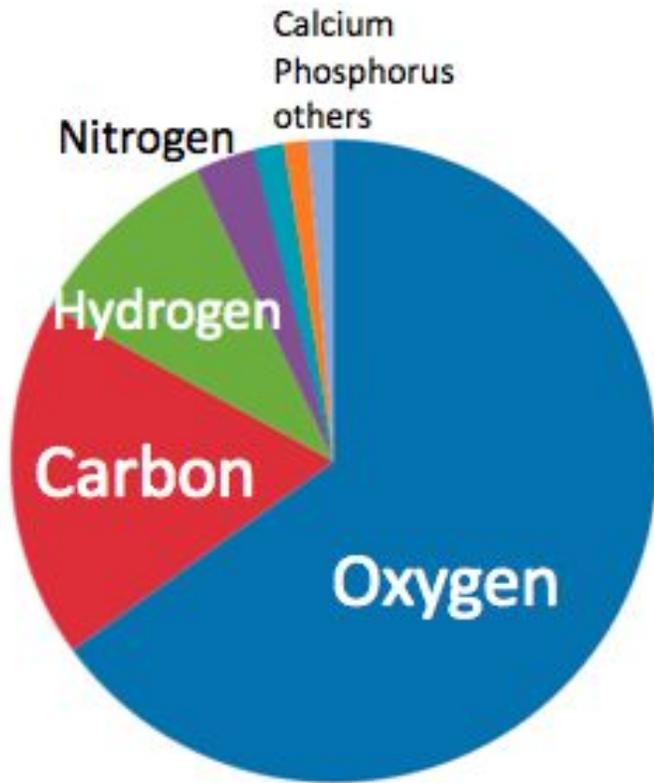


Распространенность элементов

Человек

Земная кора

Вселенная

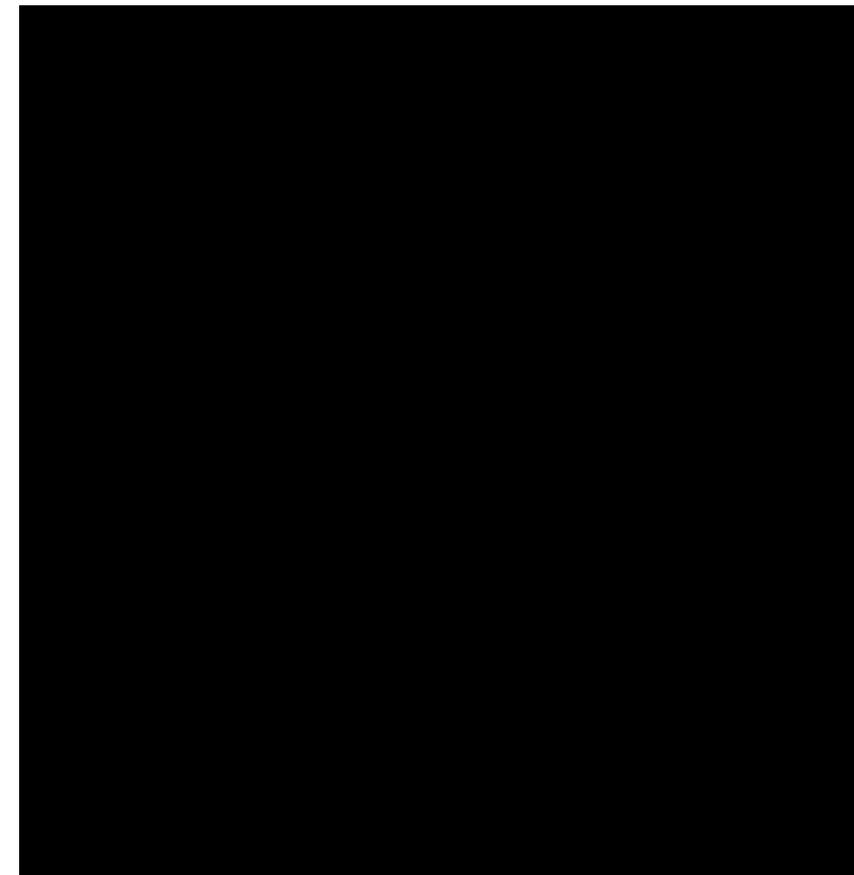
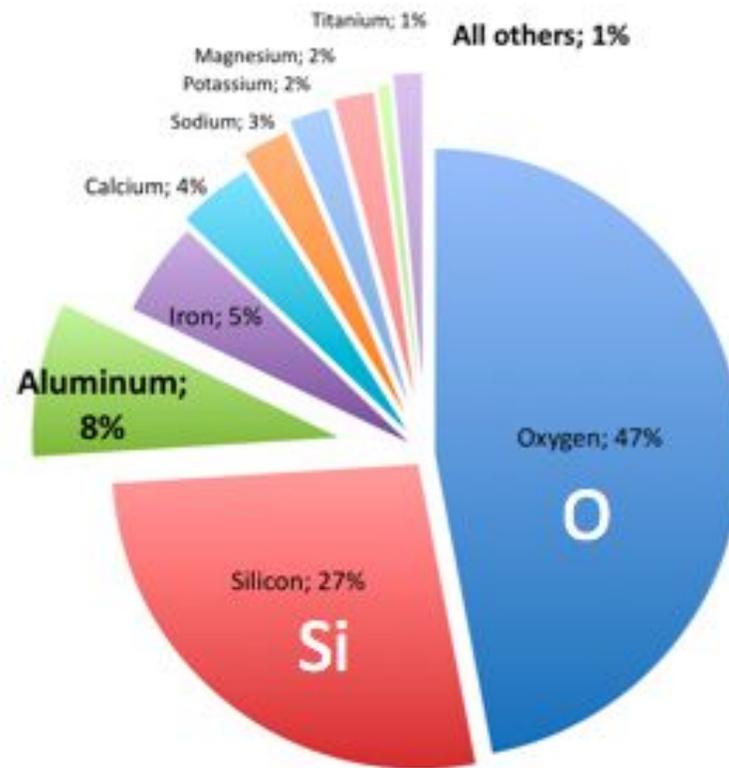
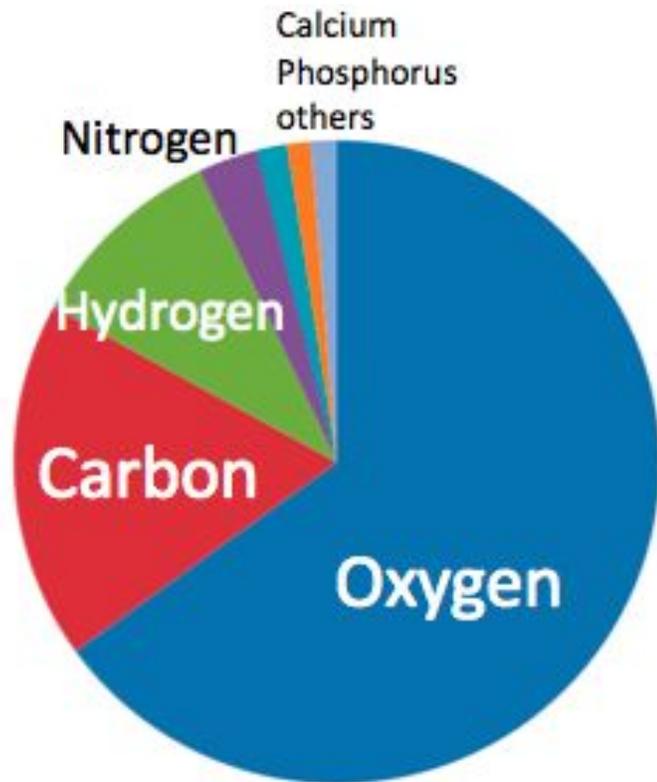


Распространенность элементов

Человек

Земная кора

Вселенная

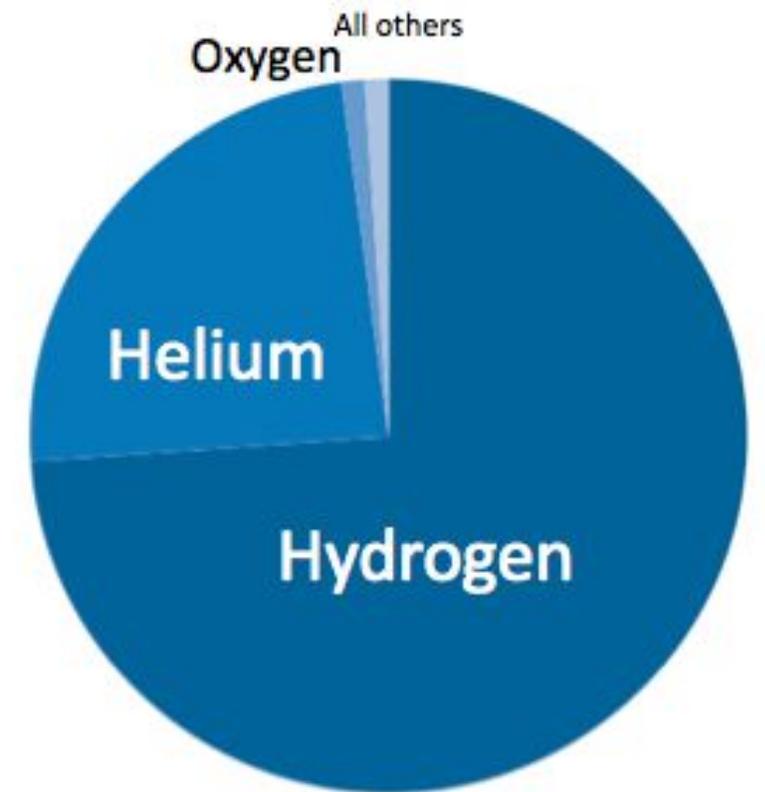
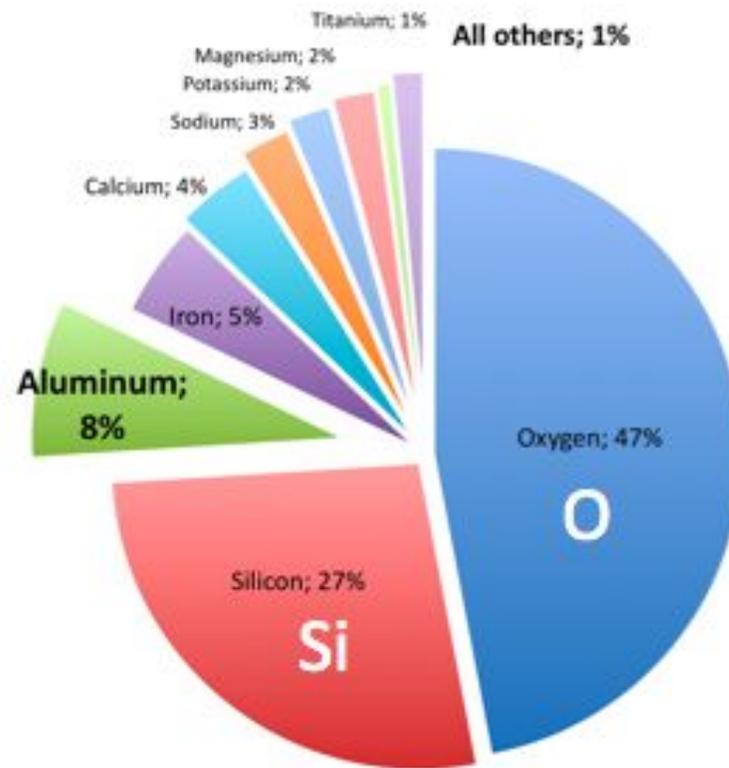
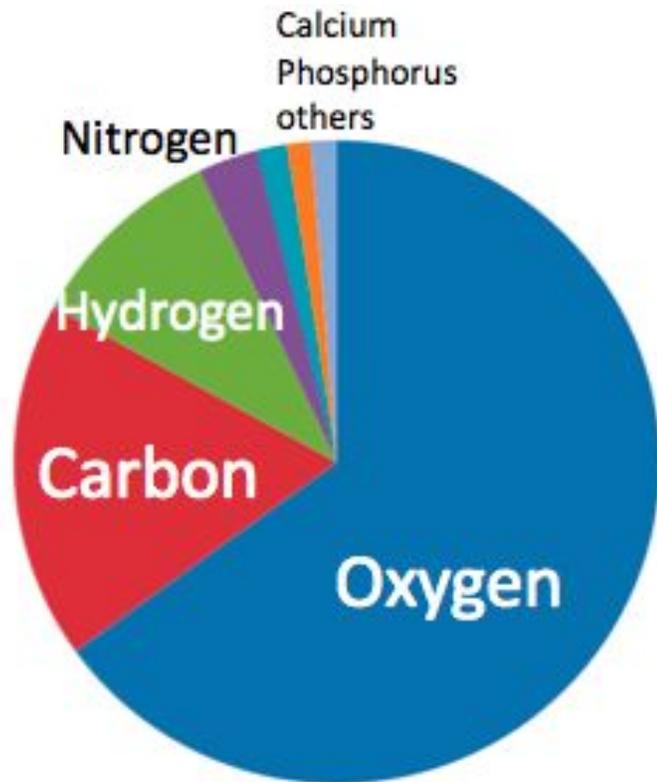


Распространенность элементов

Человек

Земная кора

Вселенная



Нуклеосинт ез

Нуклеус - ядро

Процесс синтеза атомных ядер

Откуда взялся водород?

История первая, несложная

Самая
важная
особенност
ь нейтронов



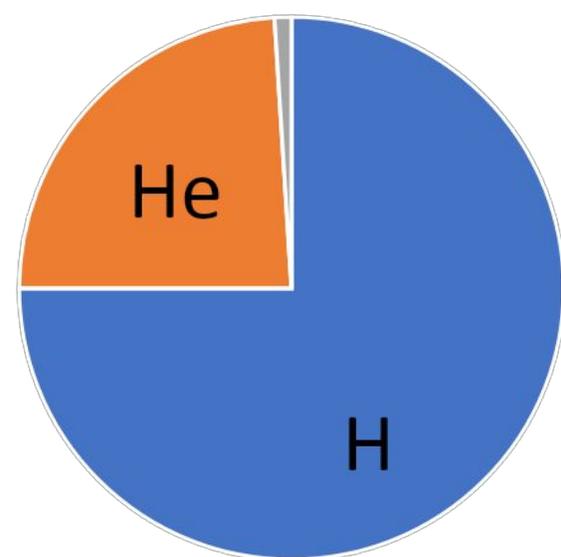
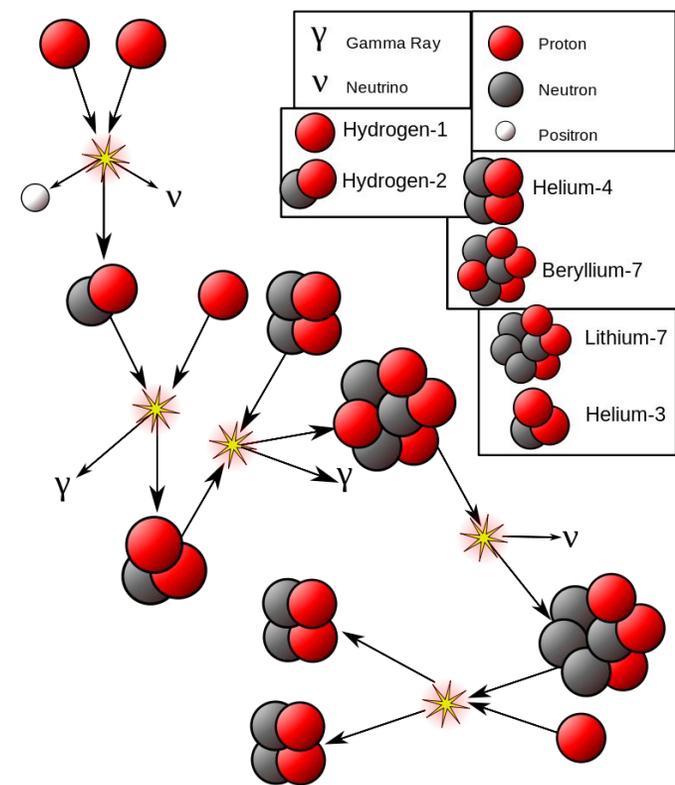
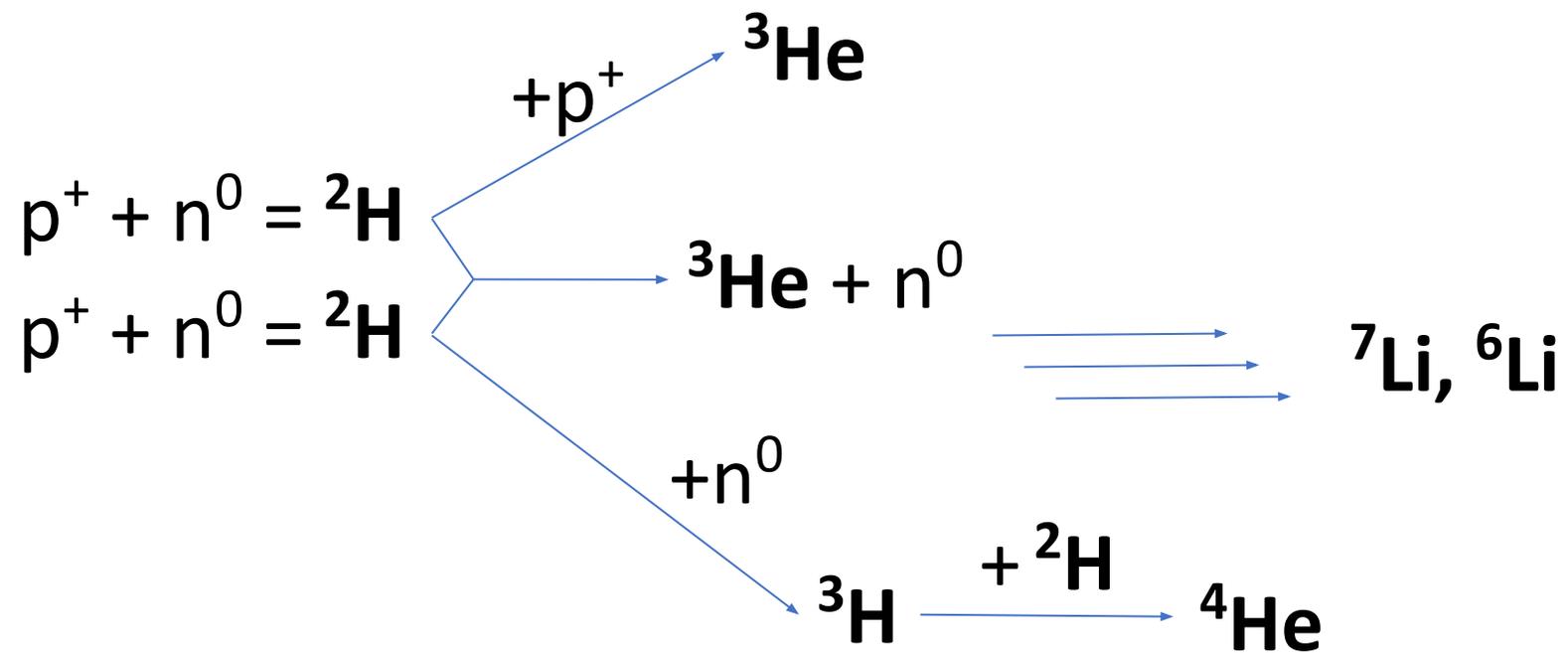
ОТТАЛКИВАЮТСЯ



не

ОТТАЛКИВАЮТСЯ

Цепи столкновений



Почему нуклеосинтез не пошел дальше?

1. Нейтроны в **свободном** виде имеют период полураспада **10 минут**
2. **Нет** стабильных ядер из 5 и 8 нуклонов чтобы наращивать цепь.
(у таких известных ядер $T_{1/2} \ll 10^{-17}$ с)
3. ${}^2\text{H}$, или дейтерий быстро расходуется
4. Тройные столкновения частиц маловероятны
5. Быстрое охлаждение Вселенной — не удается преодолеть отталкивание

$p^+ - p^+$

Нуклиды

Бор

Берилл
ий
Литий

Гелий

Водоро
д

ПРОТОНЫ

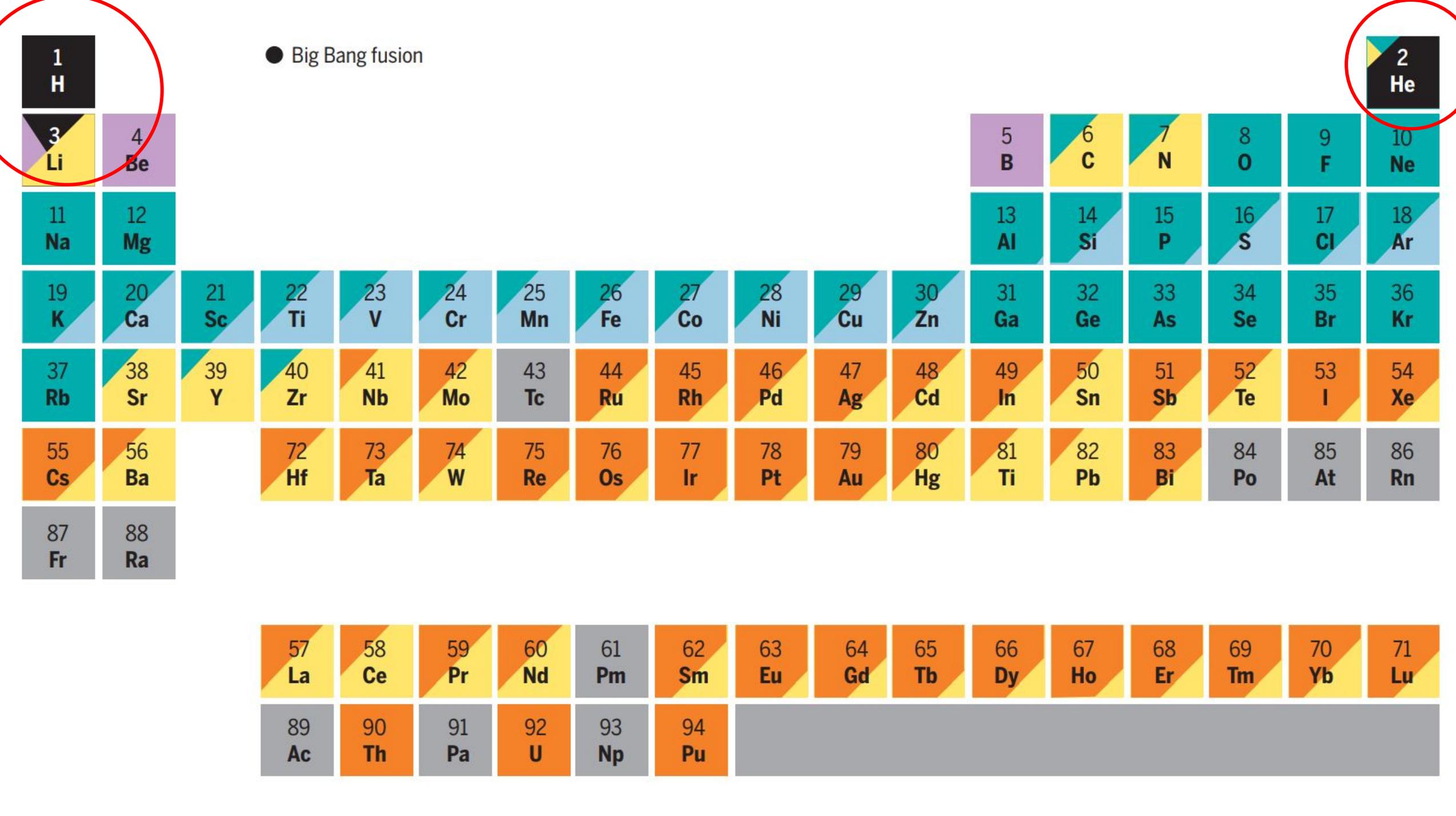


Нейтроны

Почему нуклеосинтез не пошел дальше?

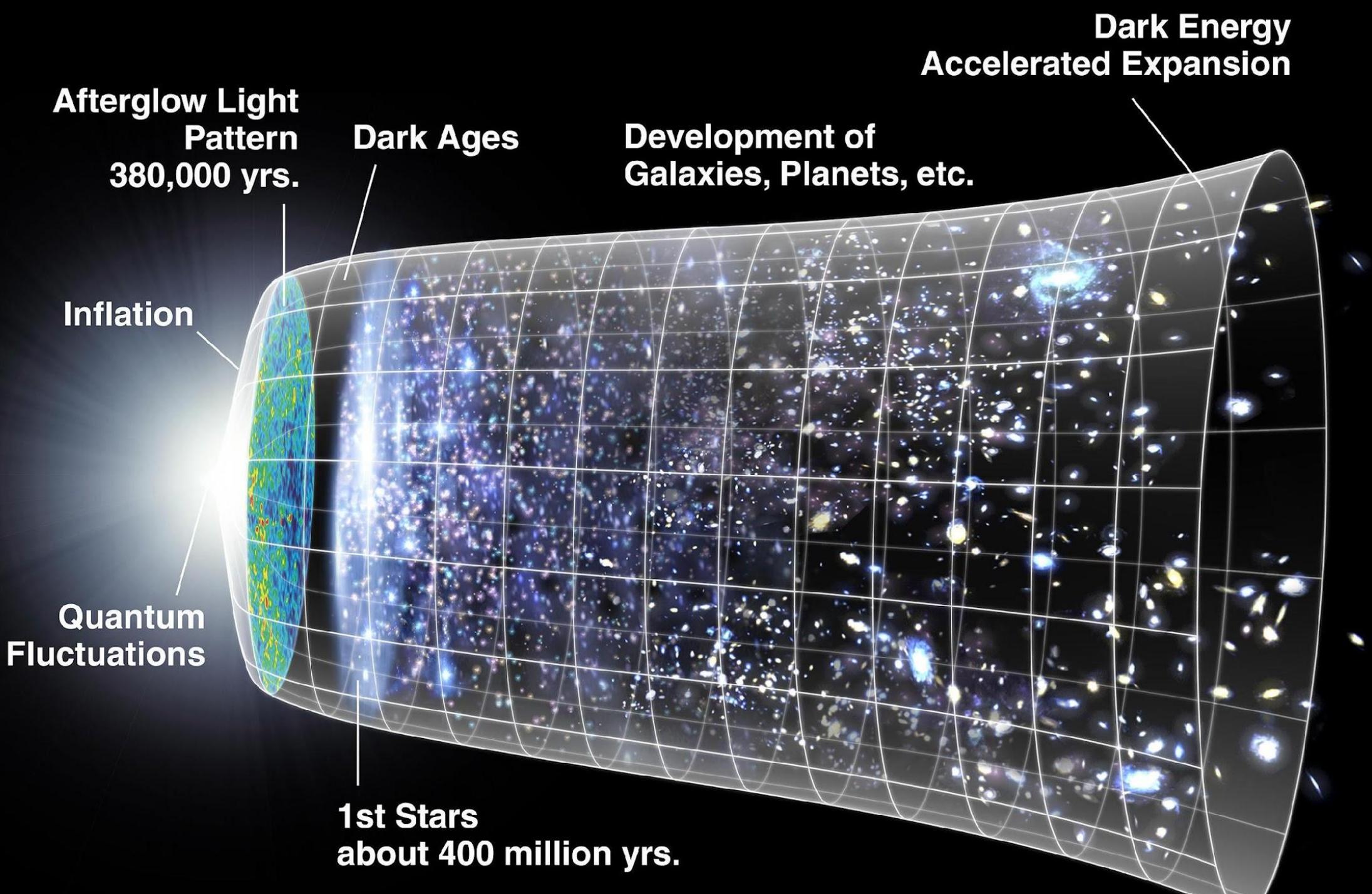
1. Нейтроны в **свободном** виде имеют период полураспада **10 минут**
2. **Нет** стабильных ядер из 5 и 8 нуклонов чтобы наращивать цепь.
(у таких известных ядер $T_{1/2} \ll 10^{-17}$ с)
3. ${}^2\text{H}$, или дейтерий быстро расходуется
4. Тройные столкновения частиц маловероятны
5. Быстрое охлаждение Вселенной — не удается преодолеть отталкивание

$p^+ - p^+$



Первые звезды

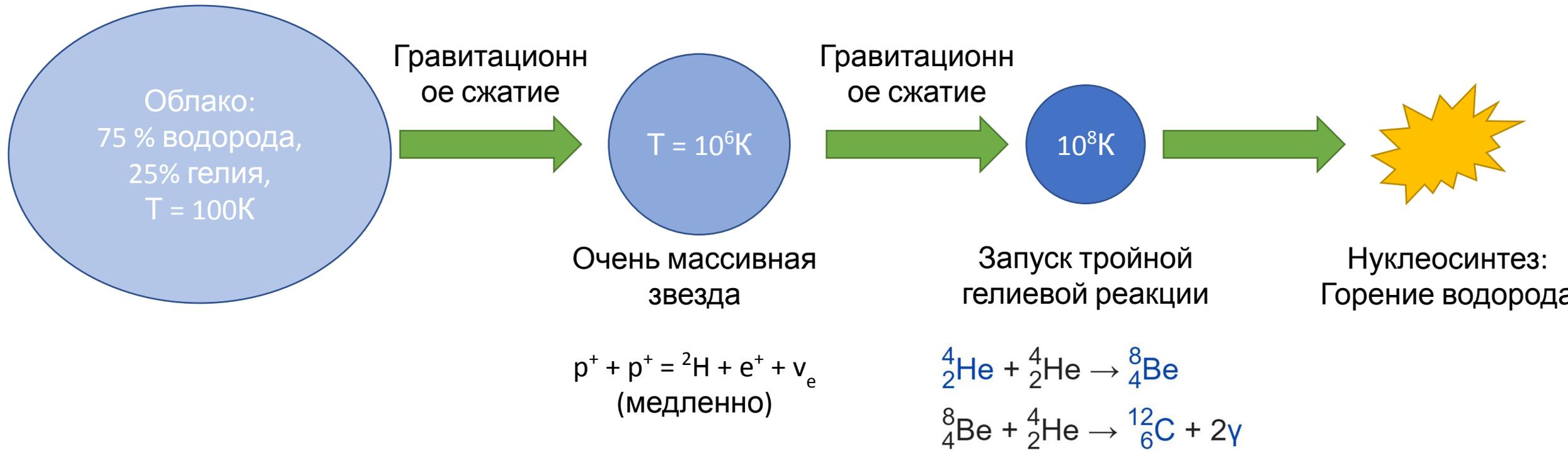
История вторая, светлая



Что
произошло
за 100 млн
лет?

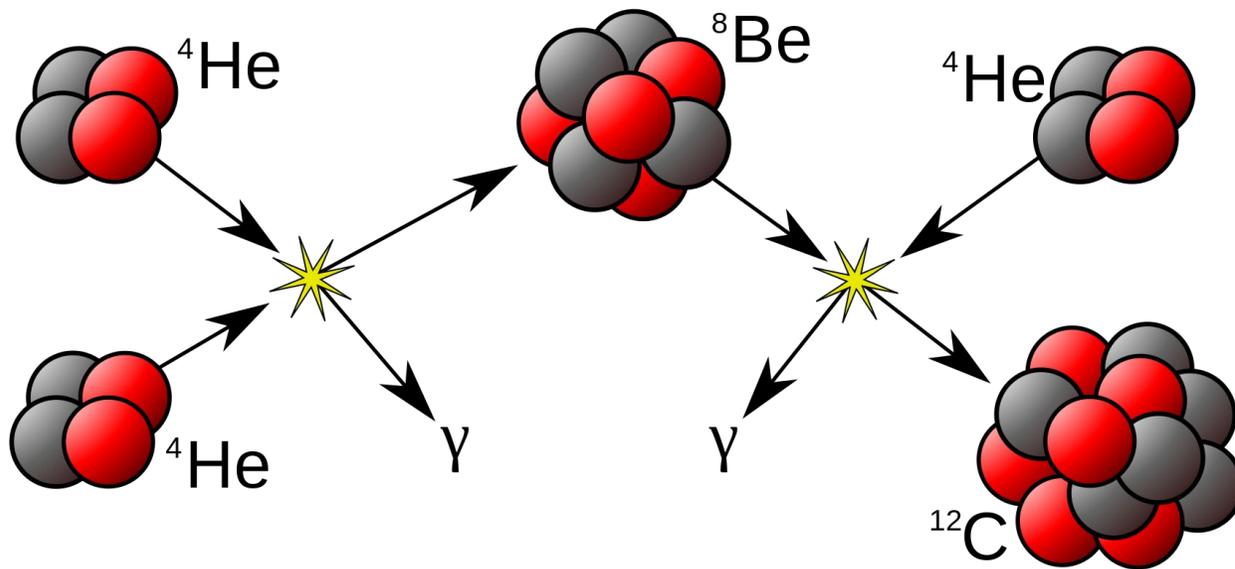
1. Через 380 000 лет после Большого Взрыва Вселенная остыла до 4000 К
2. Образовались первые нейтральные атомы водорода (p^+ и e^- образовали пару, которую не разрывает тепловым движением)
3. Исчезли источники видимого света. Наступили Темные века.
4. За следующие 100-150 млн лет Вселенная остыла до -215°C (~ 60 К)
5. Водород и гелий образует облака, сжимающиеся гравитацией...

Первые звезды во Вселенной



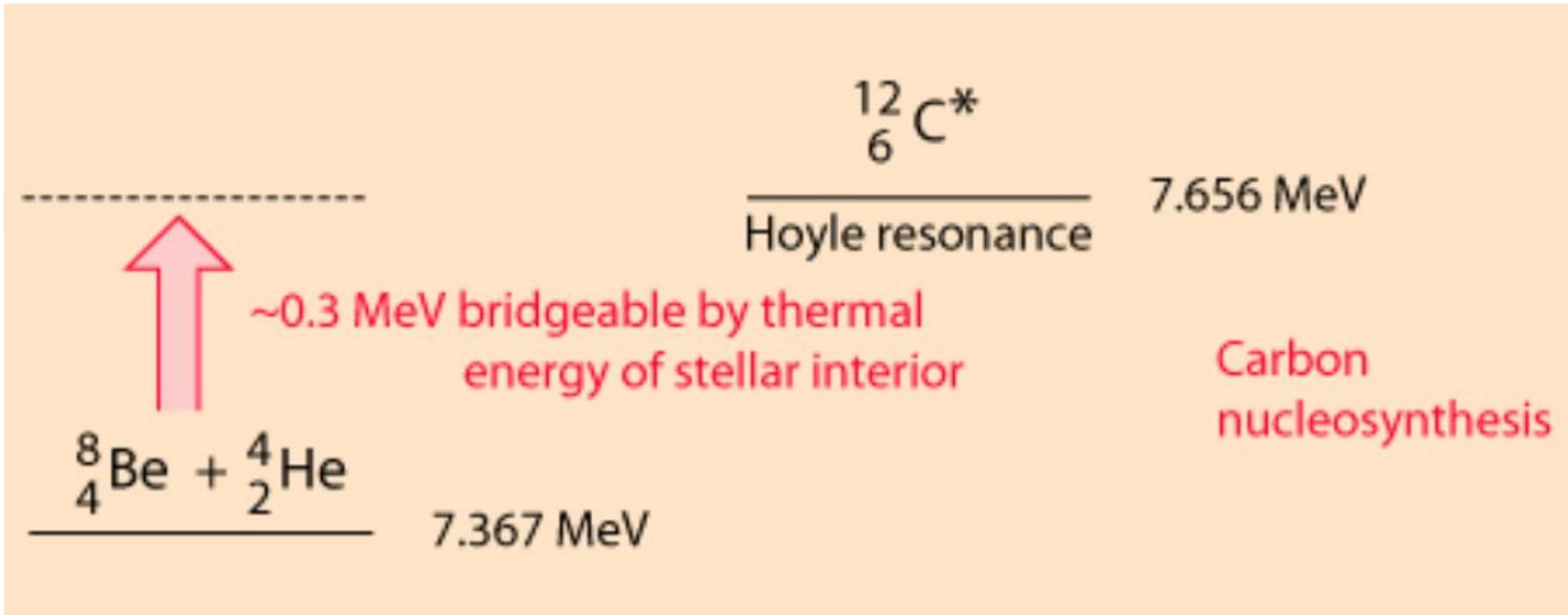
Почему нам очень-очень повезло

$$T_{1/2} = 10^{-17} \text{ с}$$

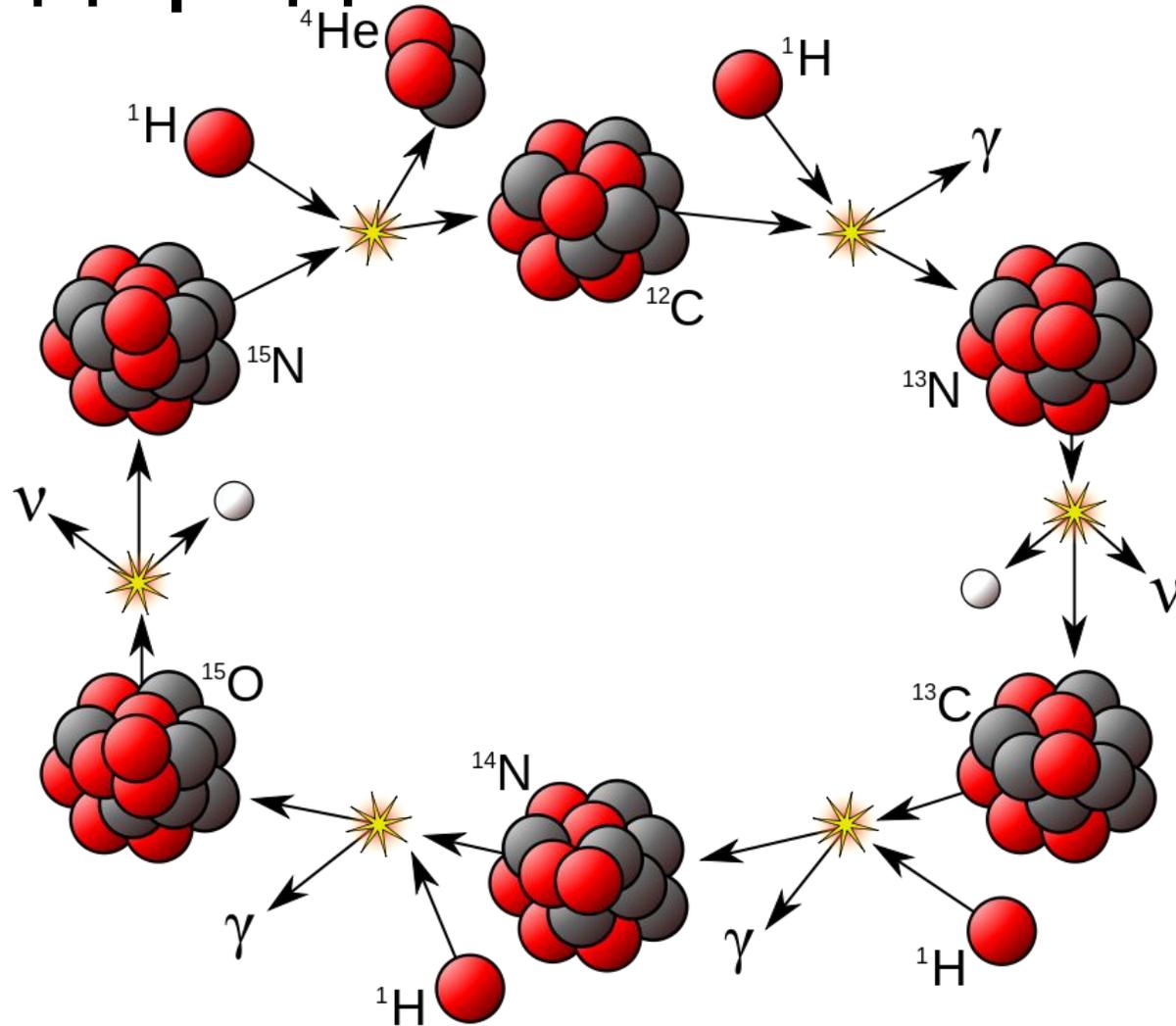


Продукт столкновения ядер бериллия-8 и гелия-4 оказался неотличим от одного из состояний ядра углерода!

Энергетические уровни



Углерод — катализатор горения водорода



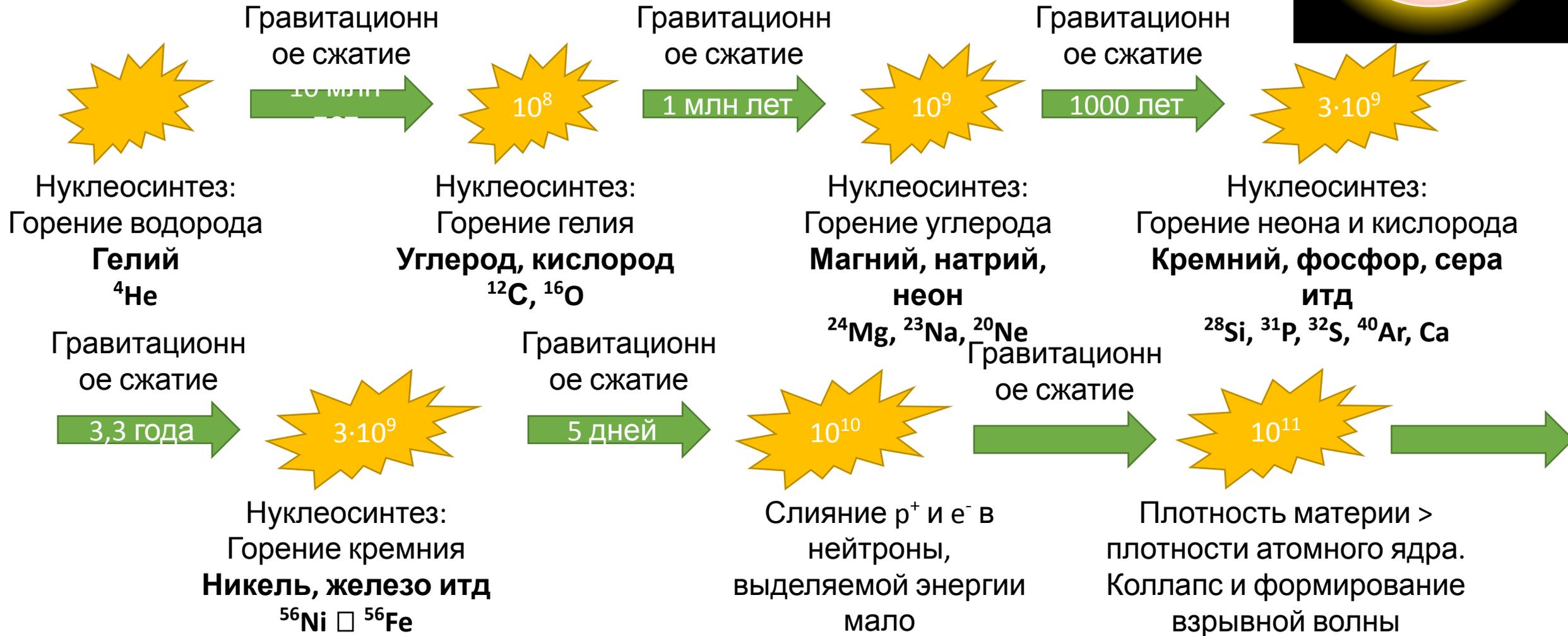
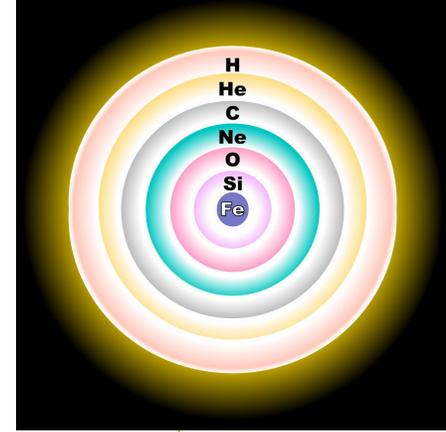
Итого:

$$4\text{p}^+ + 2\text{e}^- = ^4\text{He} + 2\nu_e + 7\gamma + 26,7\text{ МэВ}$$

Тепло разогревает звезду и не дает ей сжиматься дальше, пока не сгорит весь водород

Масса (в M_{\odot})	Срок горения
1	10 000 000 000 лет
10	25 000 000 лет
30	6 000 000 лет

Когда водород кончился





1987



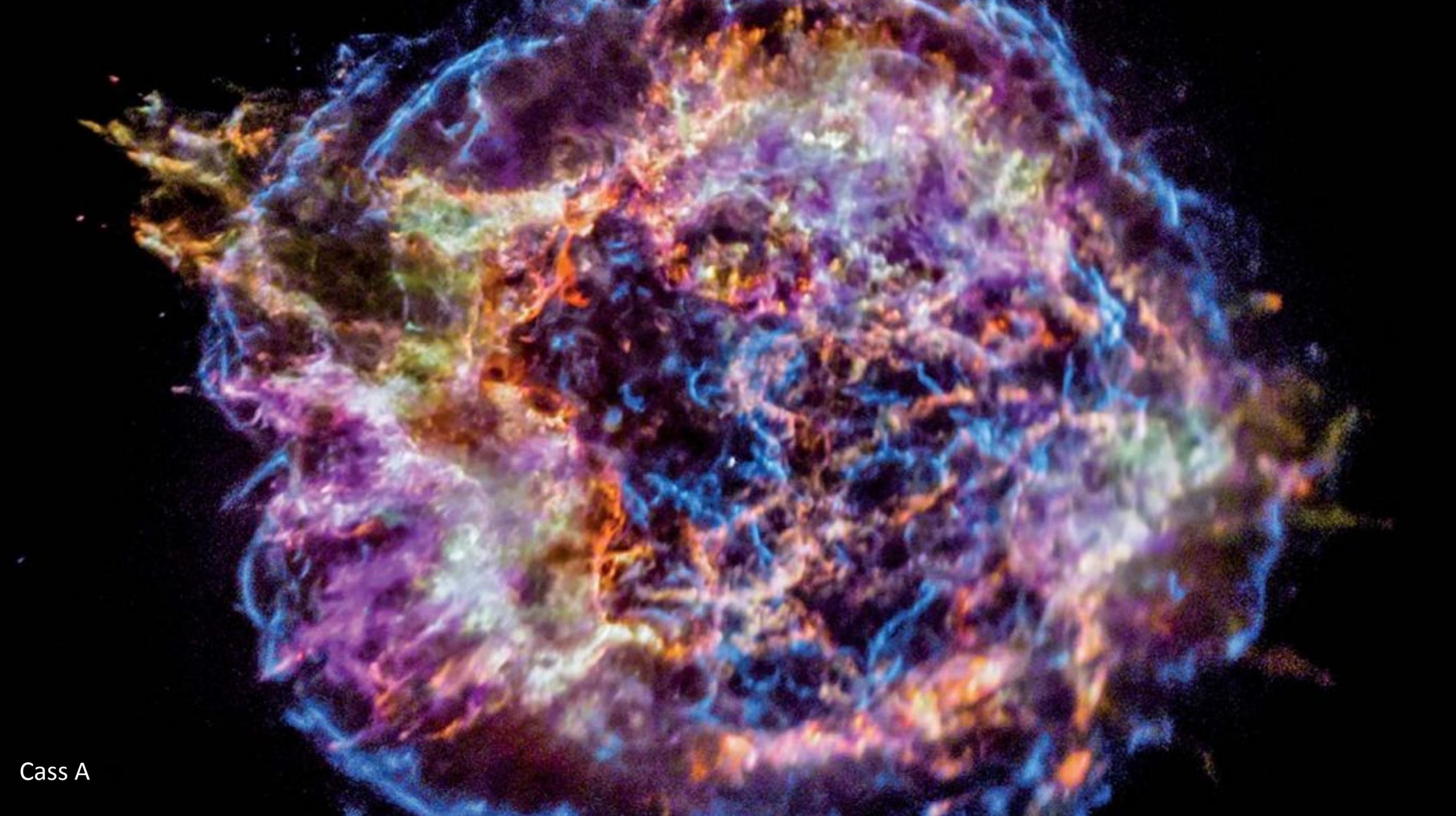
SN 1987a



SNR
G292.0+1.8



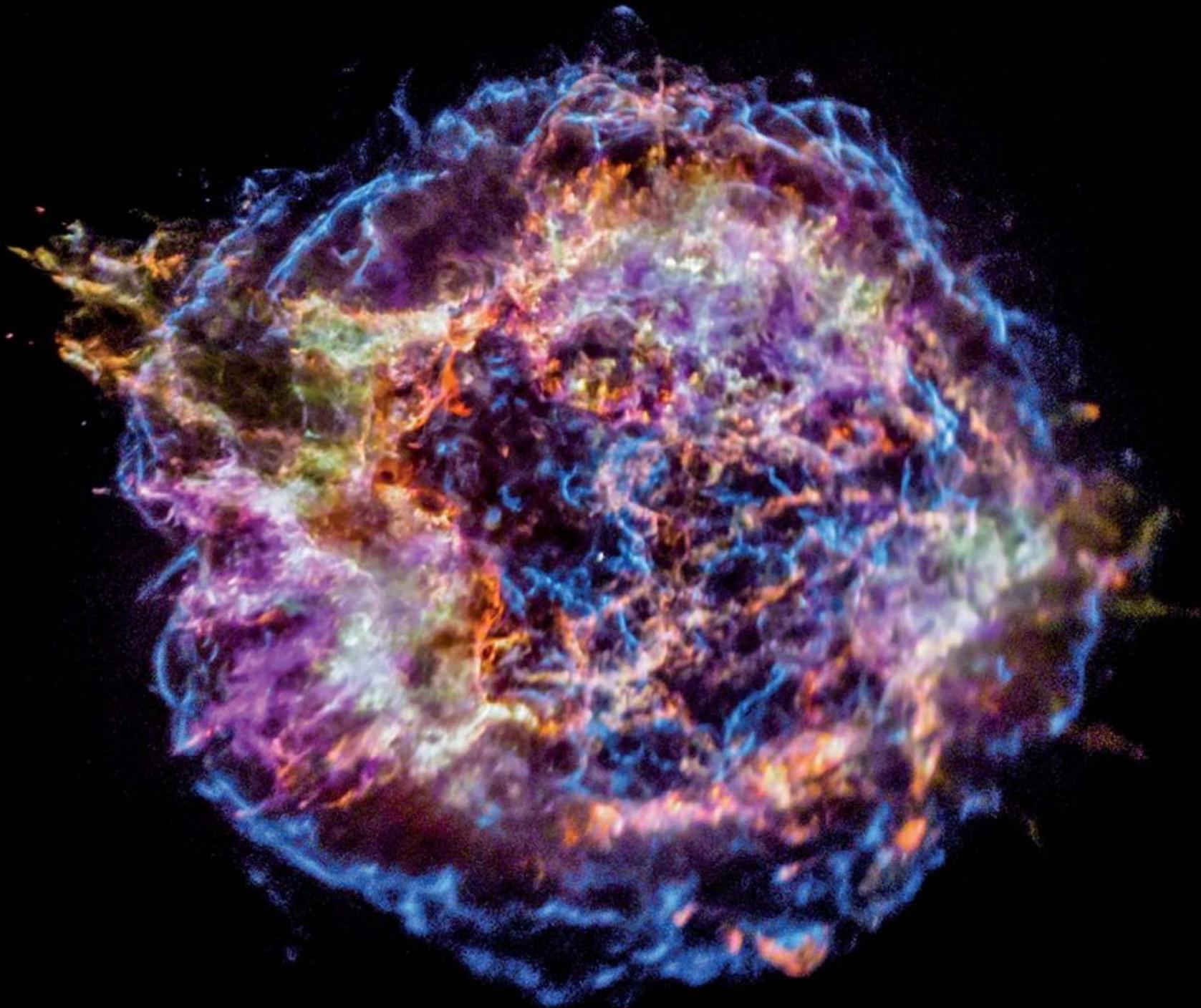
SN 185



Cass A

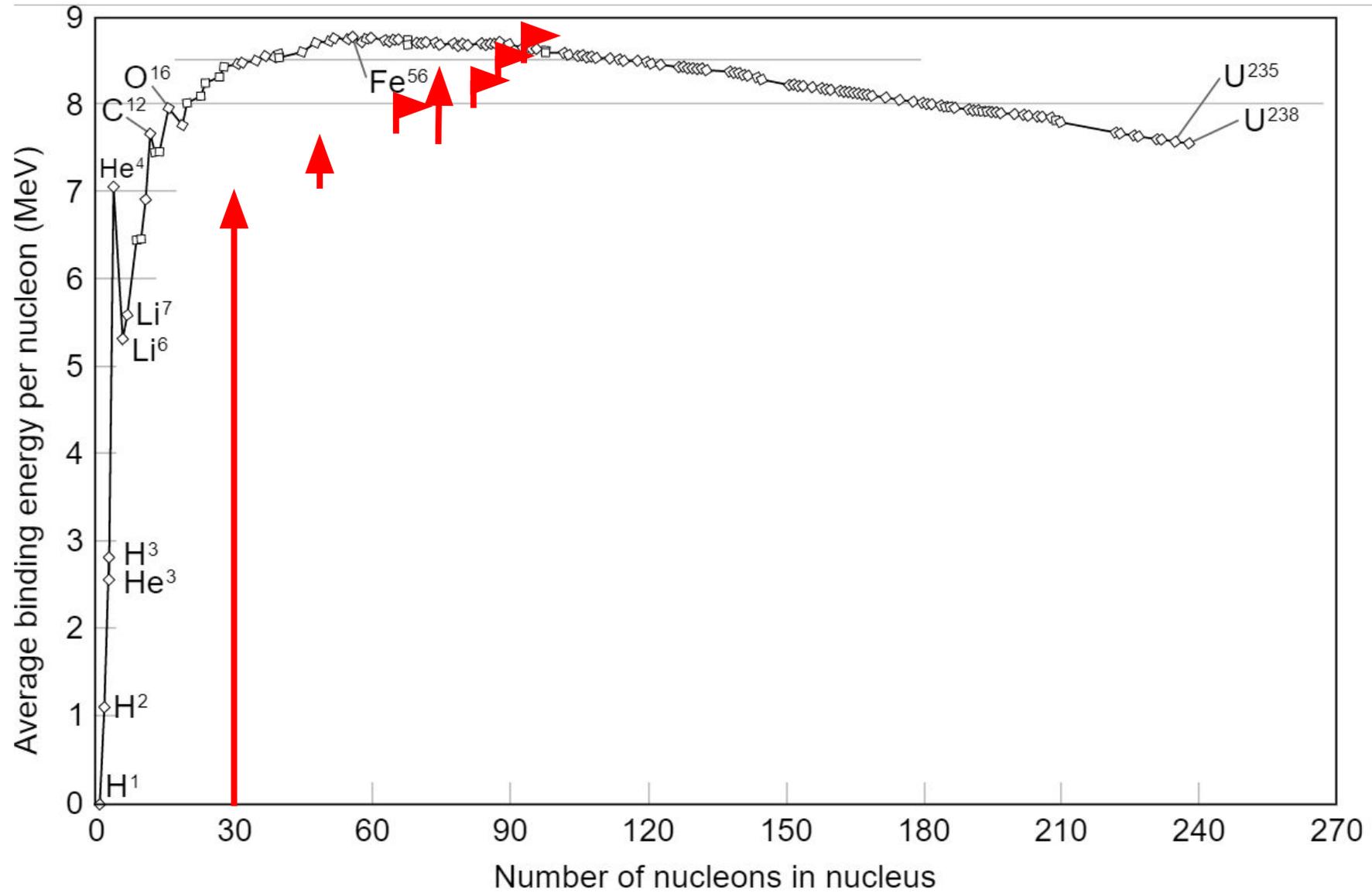
Красный - кремний
Желтый - сера
Зеленый - кальций
Фиолетовый - железо

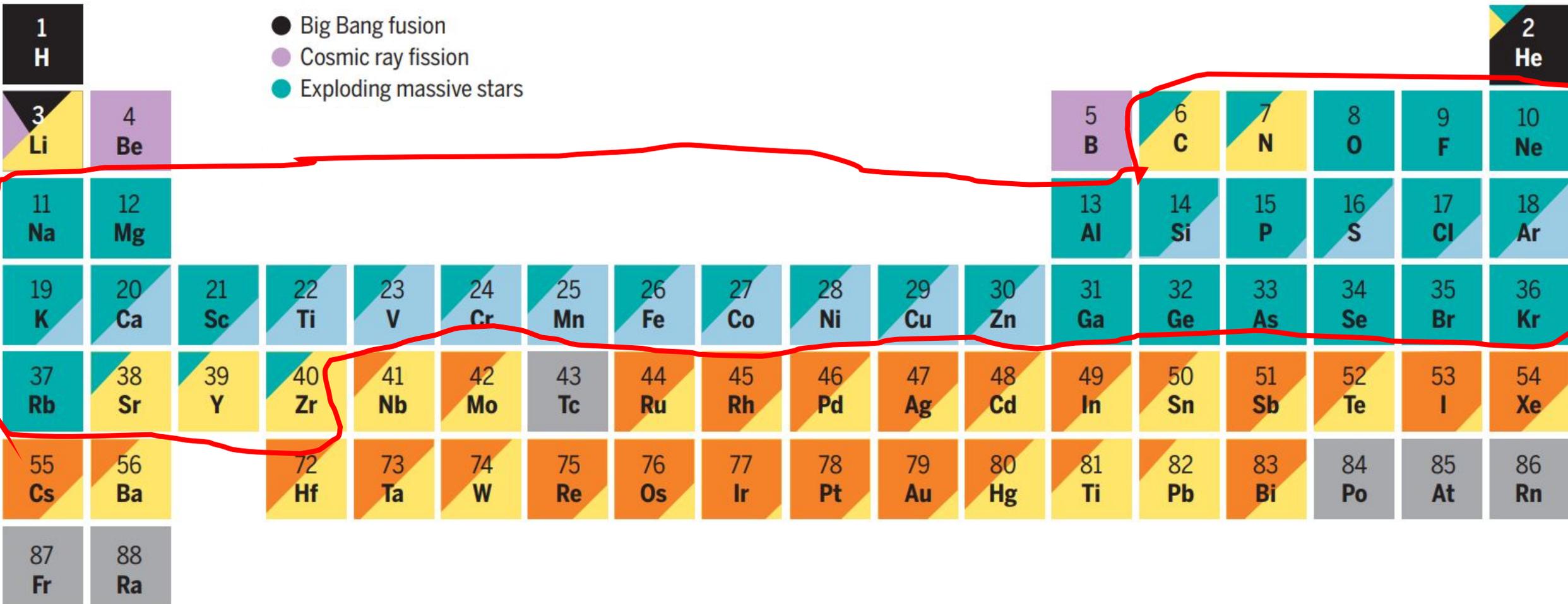
Взрыв высвобождает
массу материи, которой
хватит на **1 000 000**
новых планет типа
Земли



Почему все остановилось на железе?

Горение происходит до тех пор, пока продукты горения дают выигрыш в энергии. Никель-56 — самое выгодное ядро с этой точки зрения, дальше «гореть» некуда. А еще $\frac{1}{2}$ никеля-56 распадается за 6 дней в железо

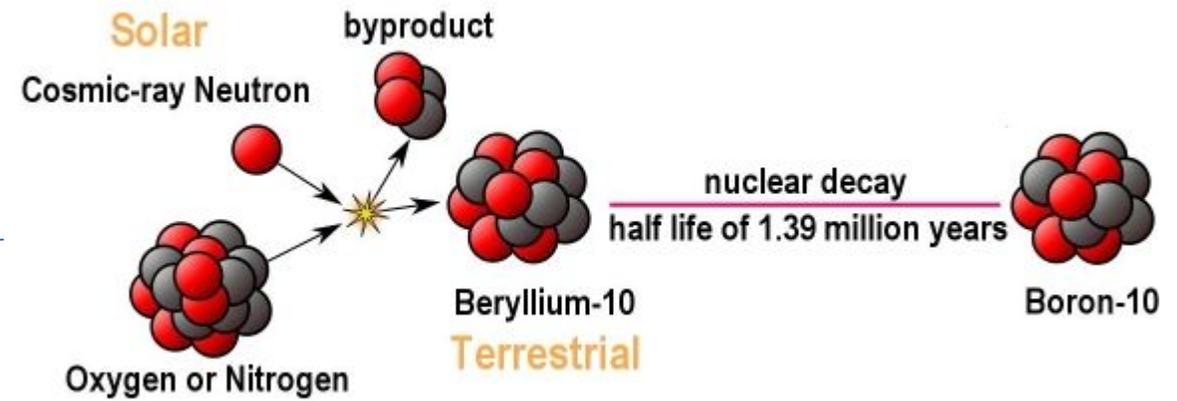
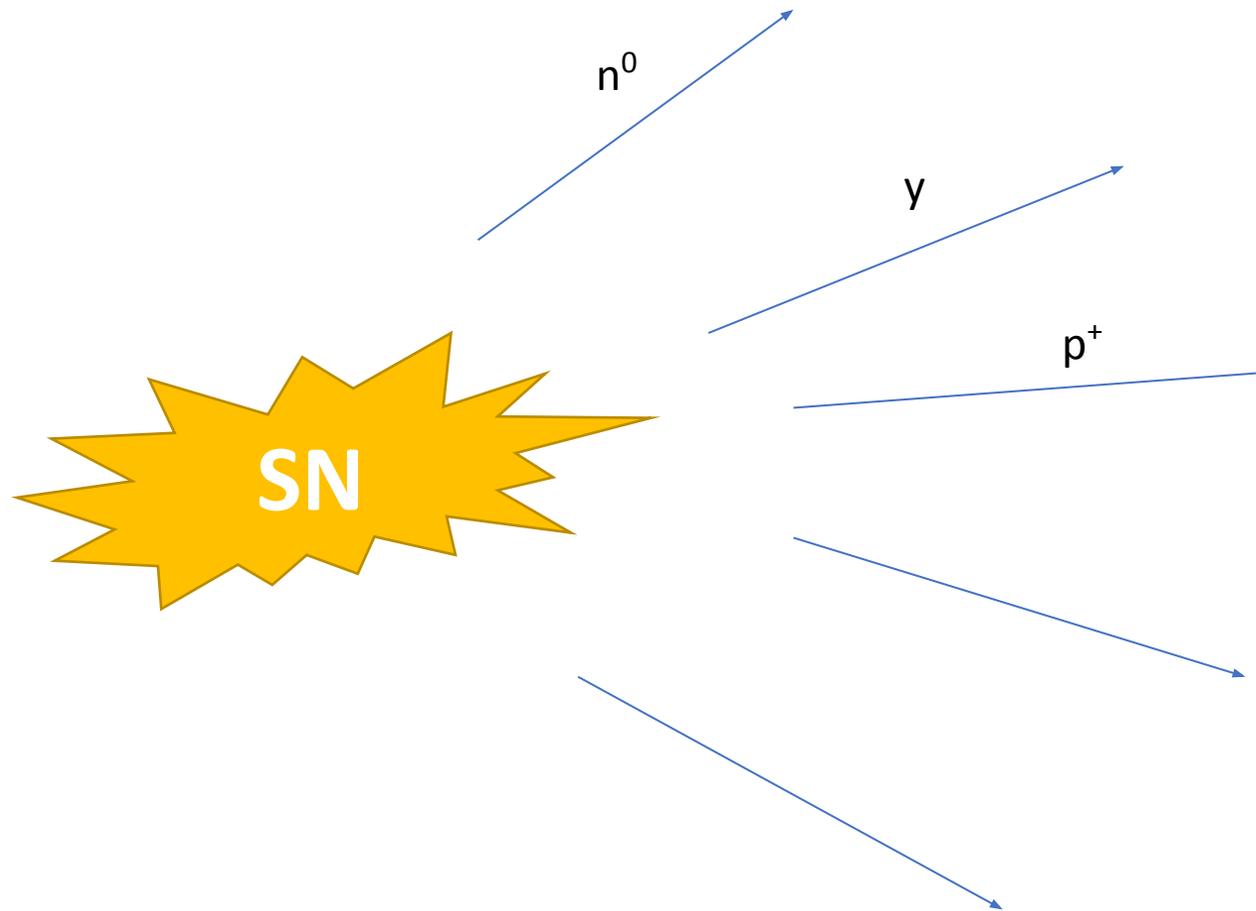


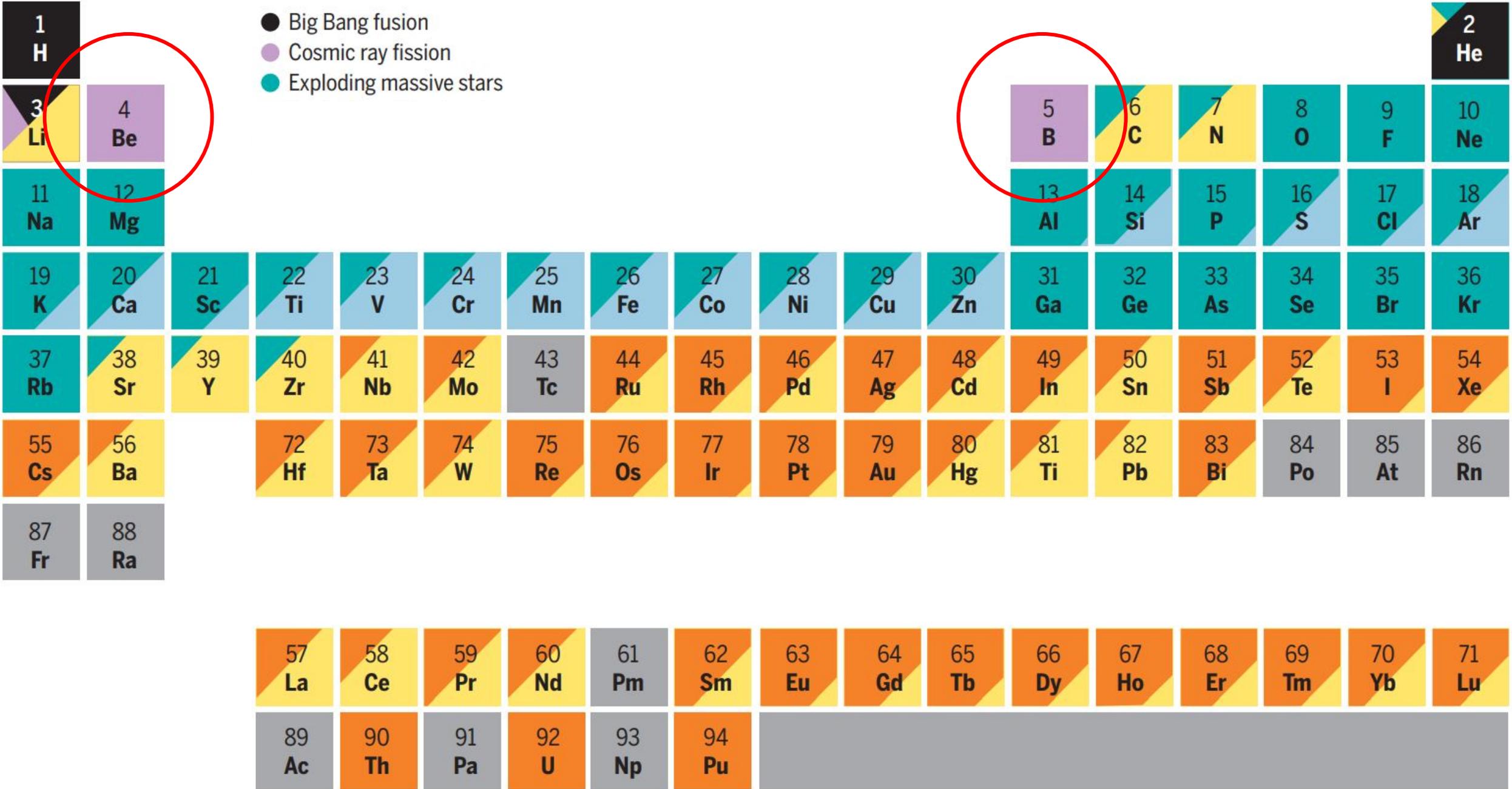


Бериллий и бор

История третья, короткая

Космические лучи

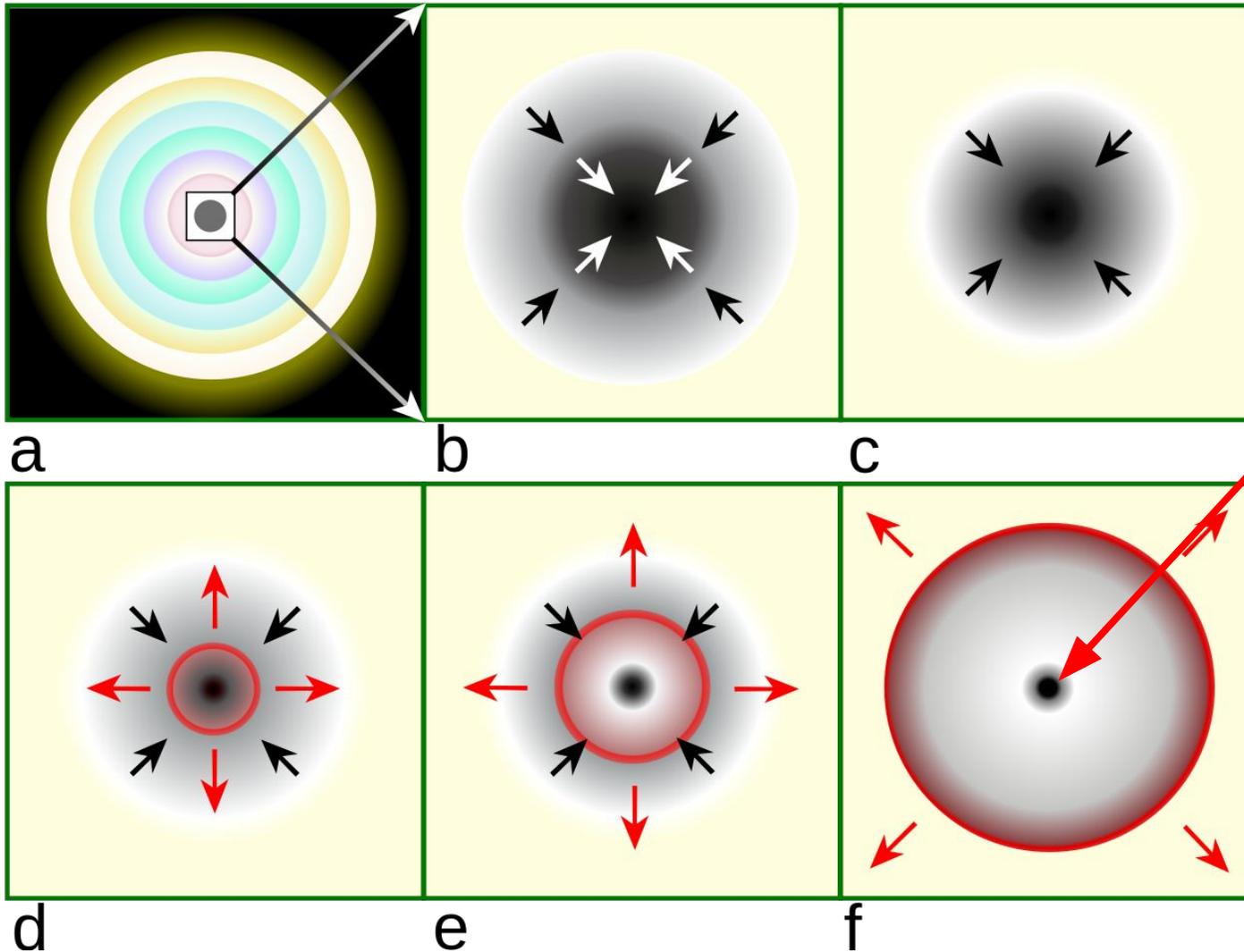




Нейтронные звезды

История четвертая, волнующая

Что происходит при взрыве первых сверхновых?



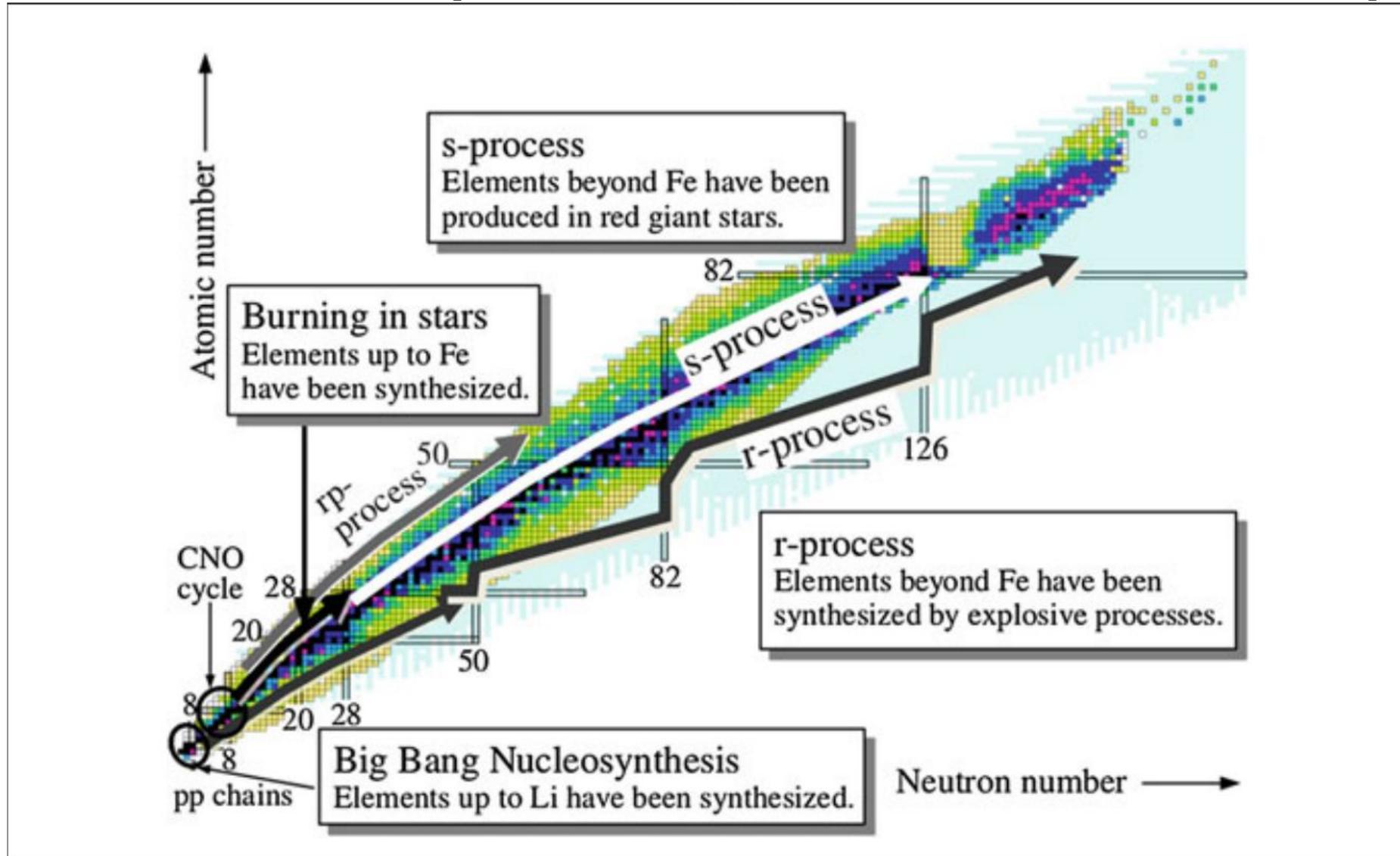
Остаток массивного и ультракомпактного ядра звезды.

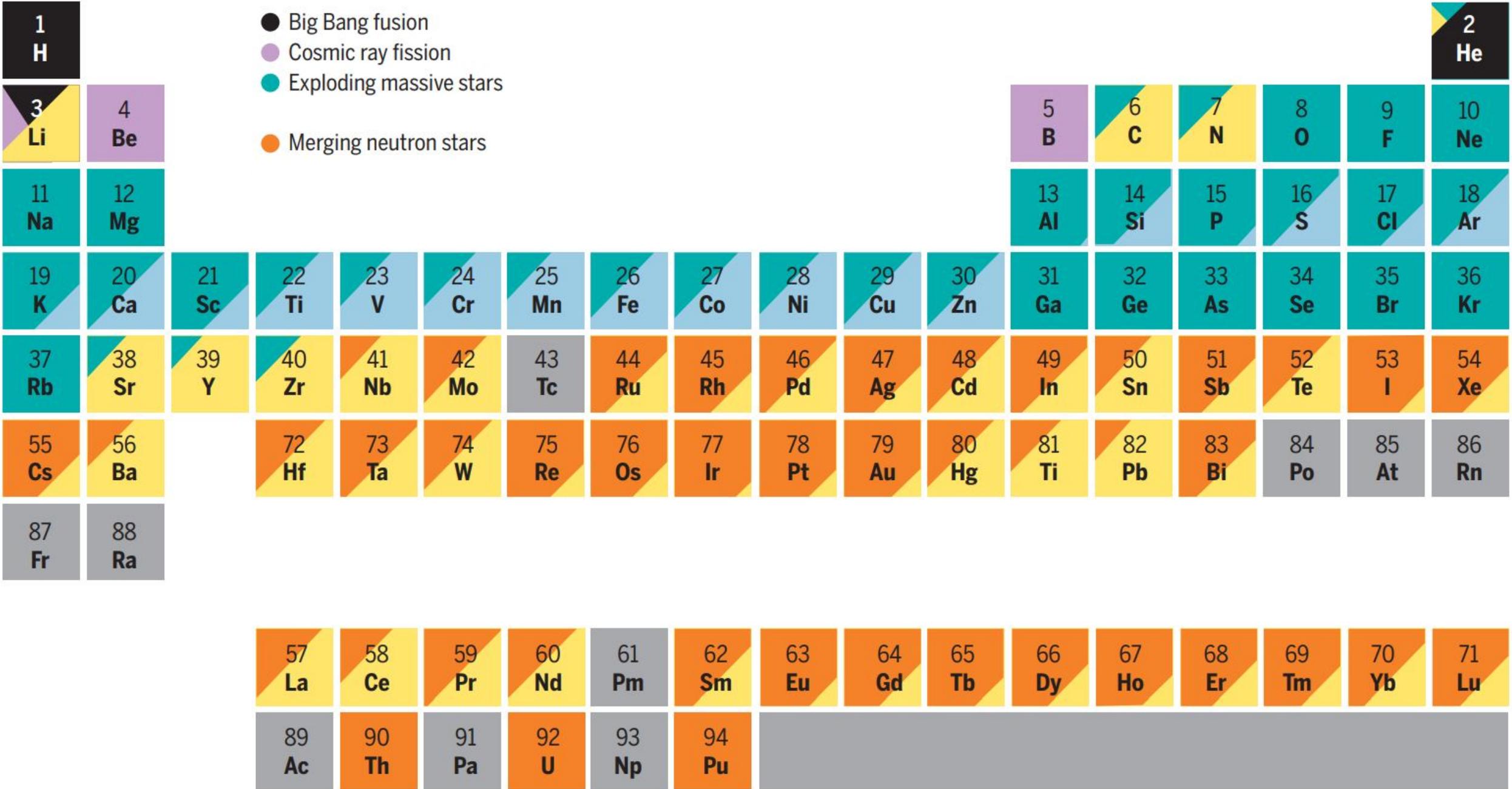
Нейтронная звезда

При коллапсе нейтроны слабее выталкиваются из недр звезды.

Плотность $4 \cdot 10^{17}$ кг/м³

r-процесс. Быстрый (rapid) захват нейтронов





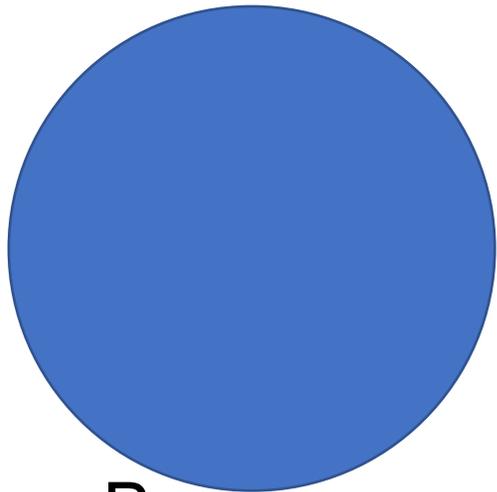
А как же Солнце

История пятая, современная

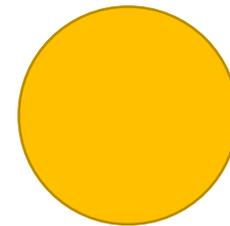
Звезды второго поколения

Как только во Вселенной появился углерод и кислород стало возможно:

1. Образование небольших звезд их холодных облаков
2. CNO процесс в не-супергигантах



Гигант. Время жизни —
миллионы лет



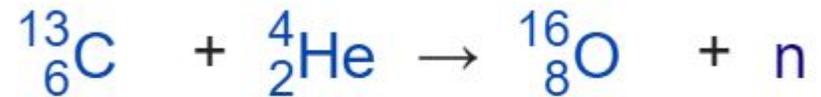
Солнце. Время жизни —
миллларды лет

Звезды малых масс (в.т.ч. Солнце)

Не могут сжигать кислород и кремний — не хватает температуры

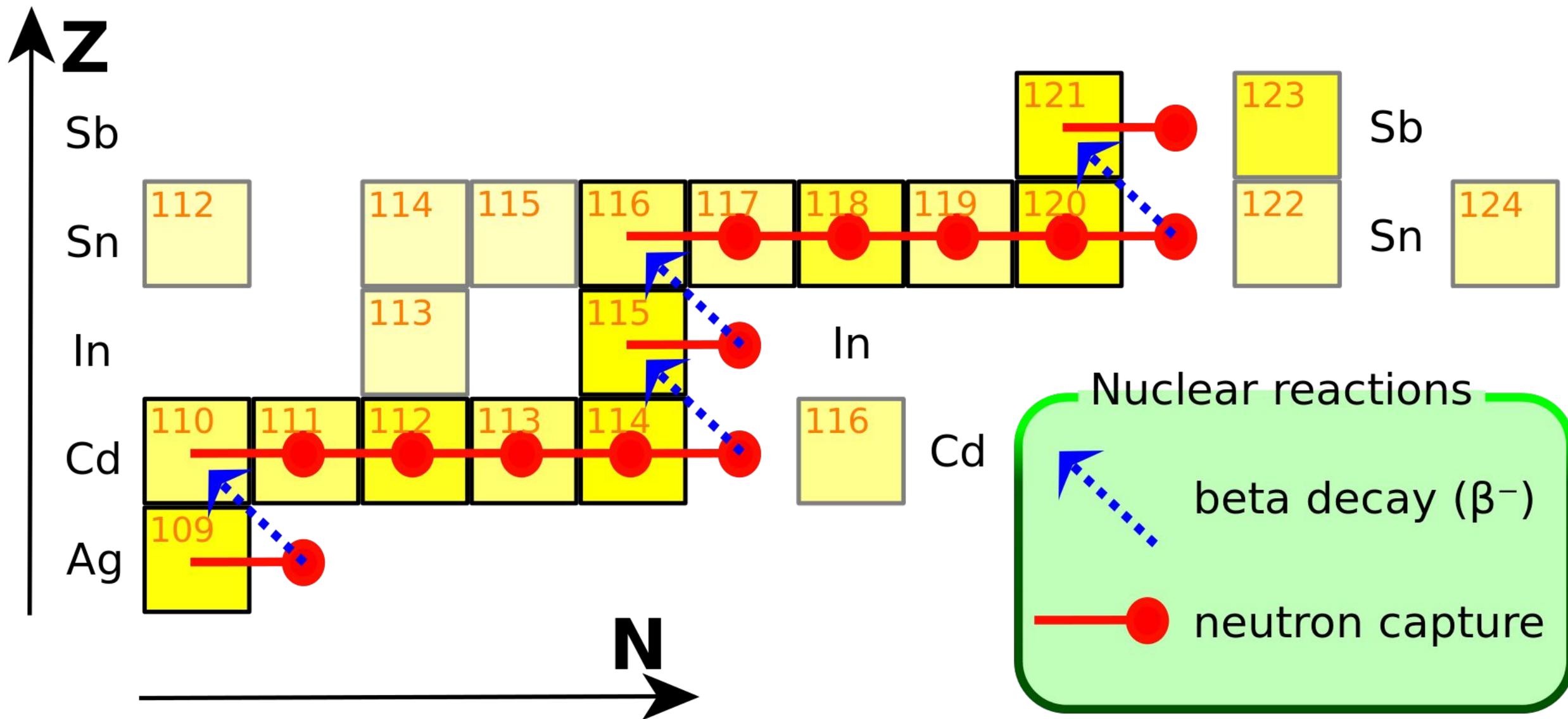
Не образуют нейтроны при слиянии протонов и электронов

Но есть путь проще!

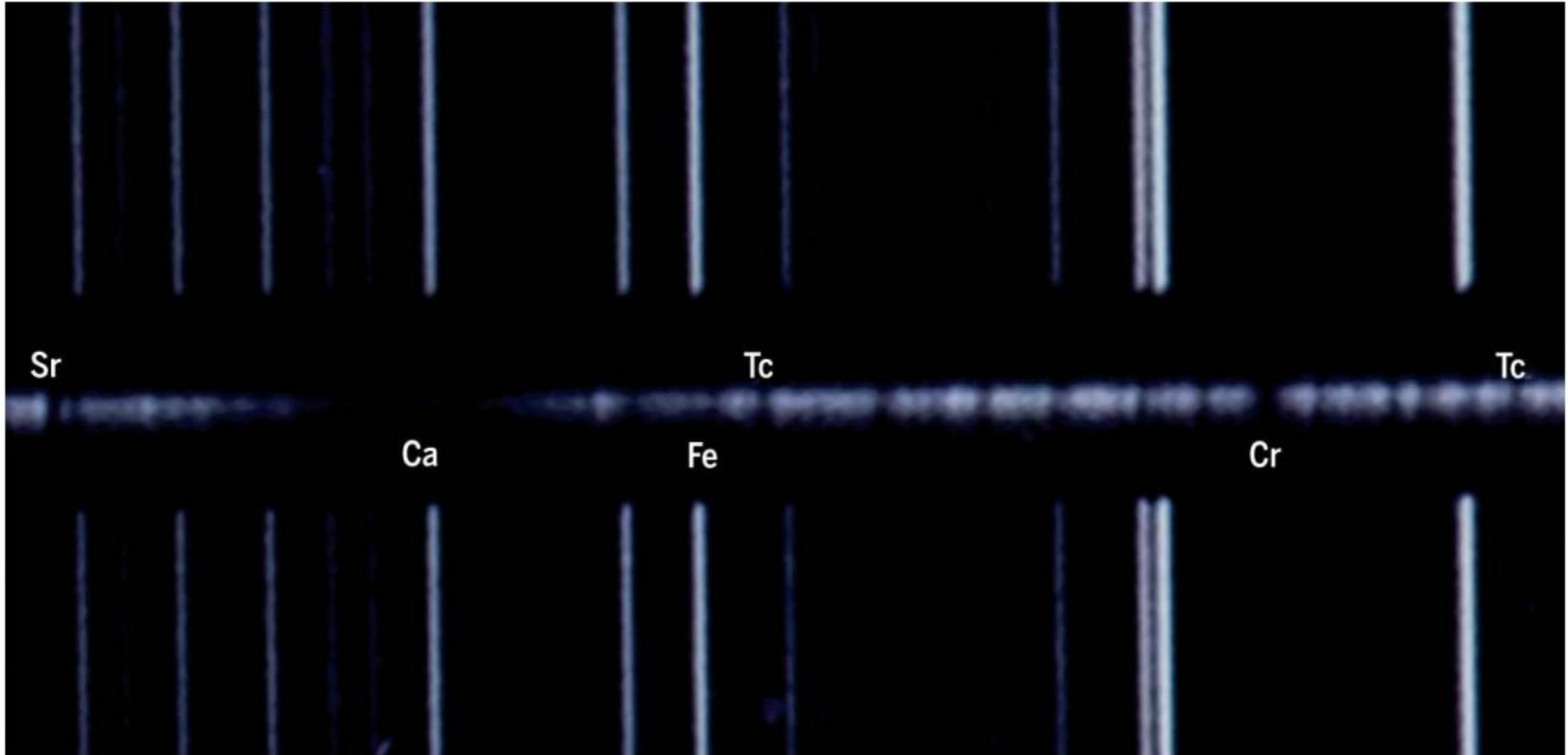


Очень медленно, но мы никуда не торопимся — впереди миллиард лет.

s-процесс (slow)

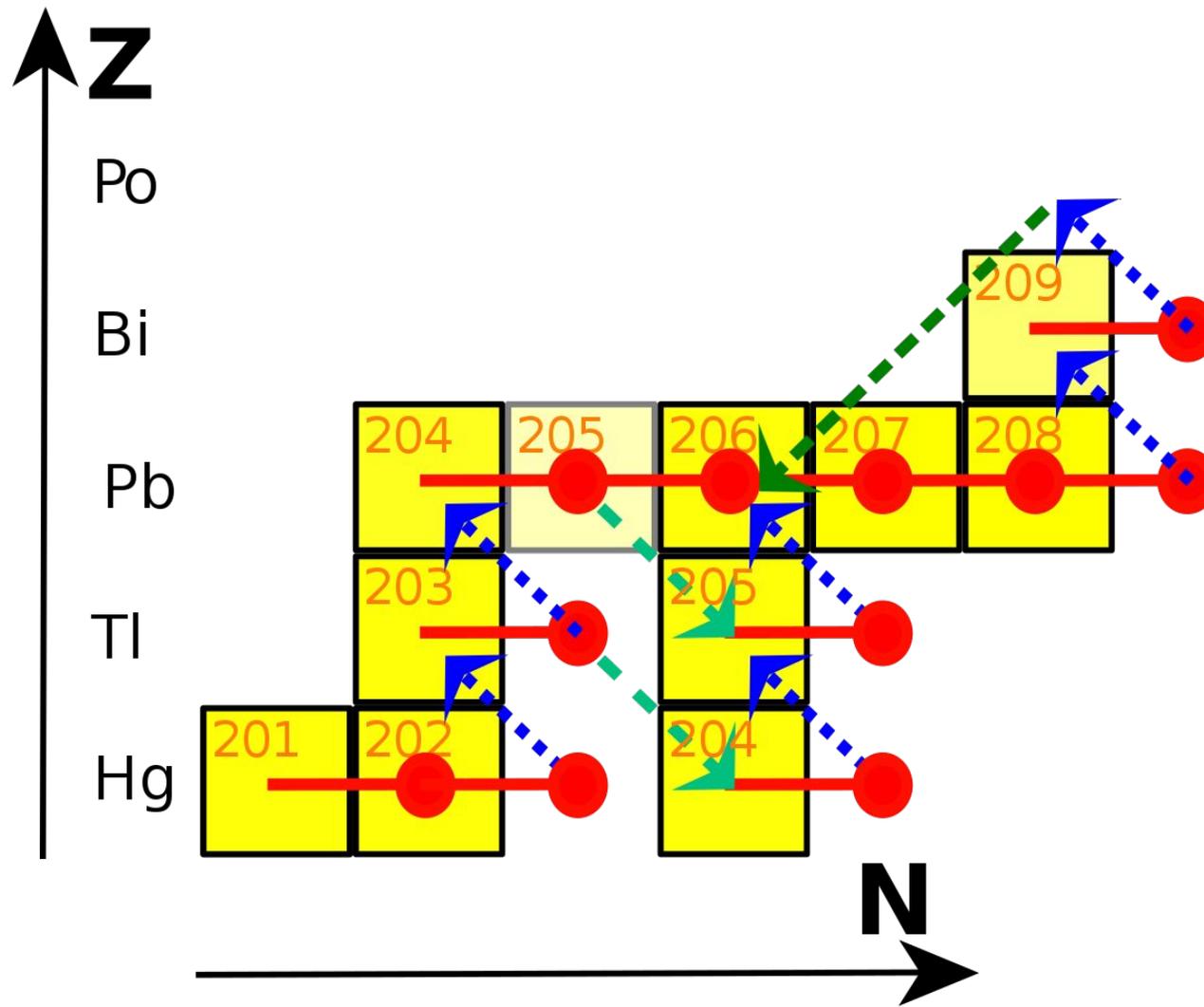


s-процесс (slow)

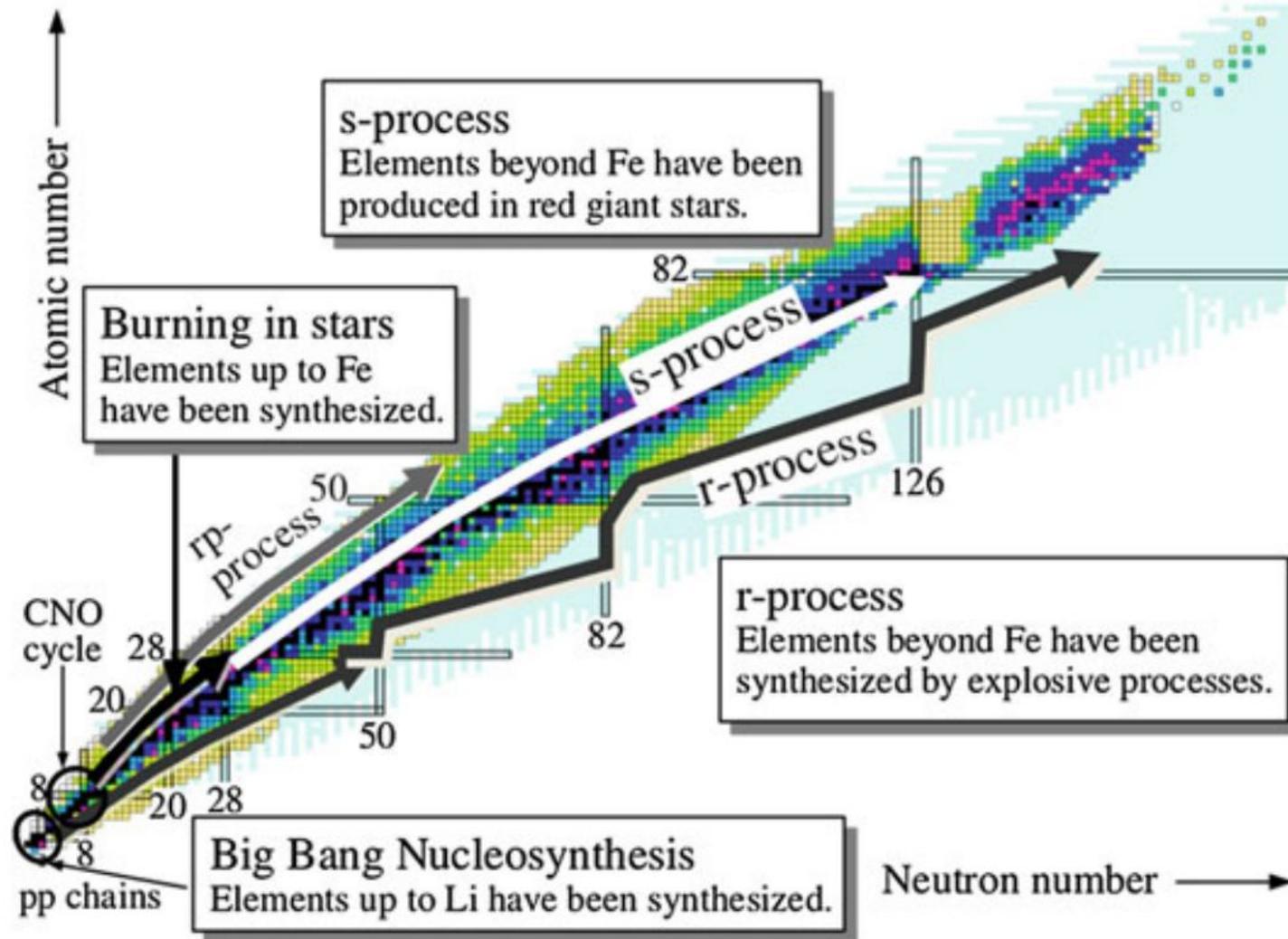


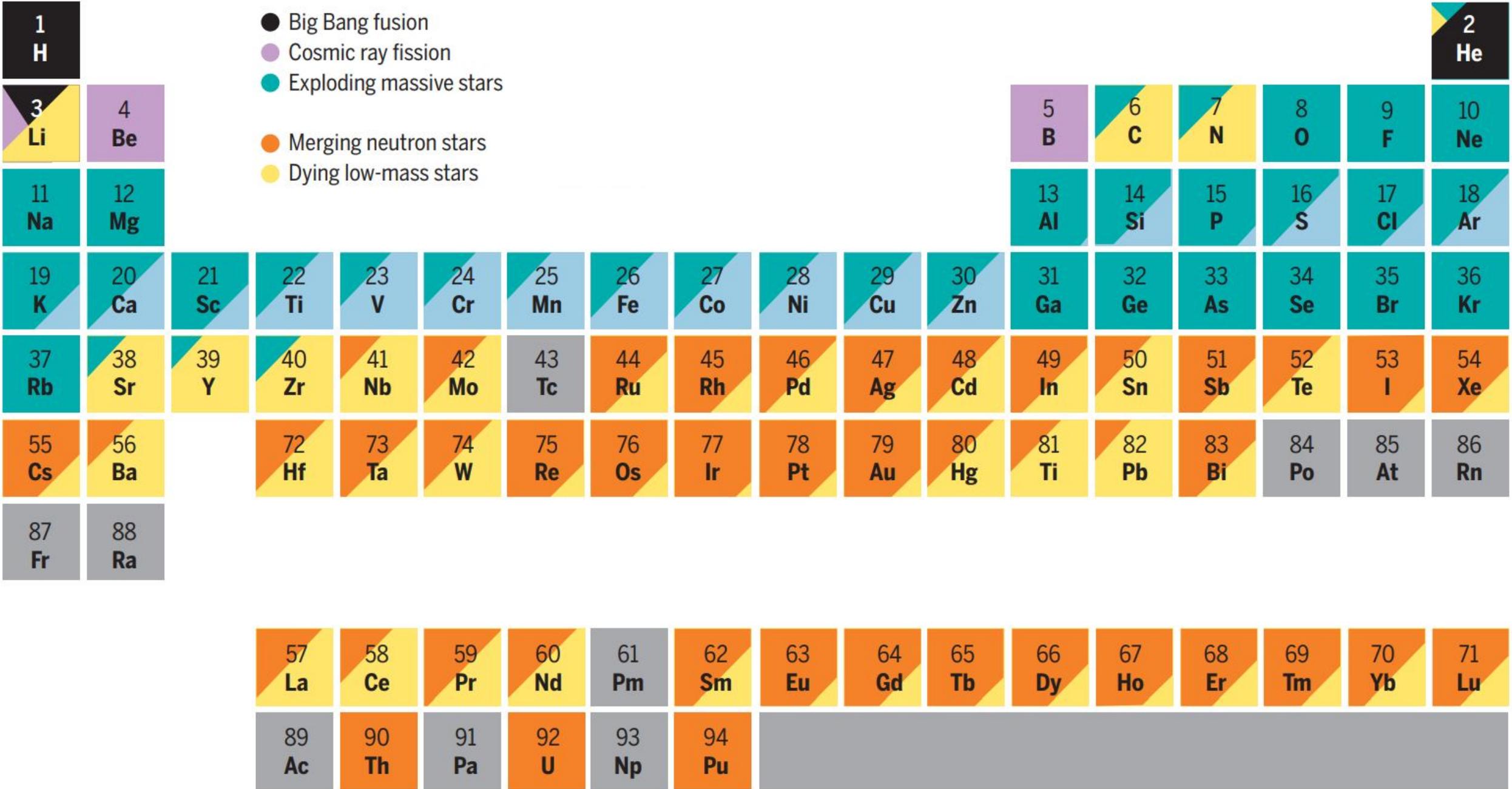
Технеций «живет» лишь 220 тысяч лет! И он есть в звездах небольшой массы!

s-процесс (slow) -- дальше висмута
нельзя!



s-процесс (slow)





Еще немного красивых взрывов

История шестая, предпоследняя

Белые карлики

В начале звезда от 0,5 до 10 M_{\odot}



Сброс внешней оболочки



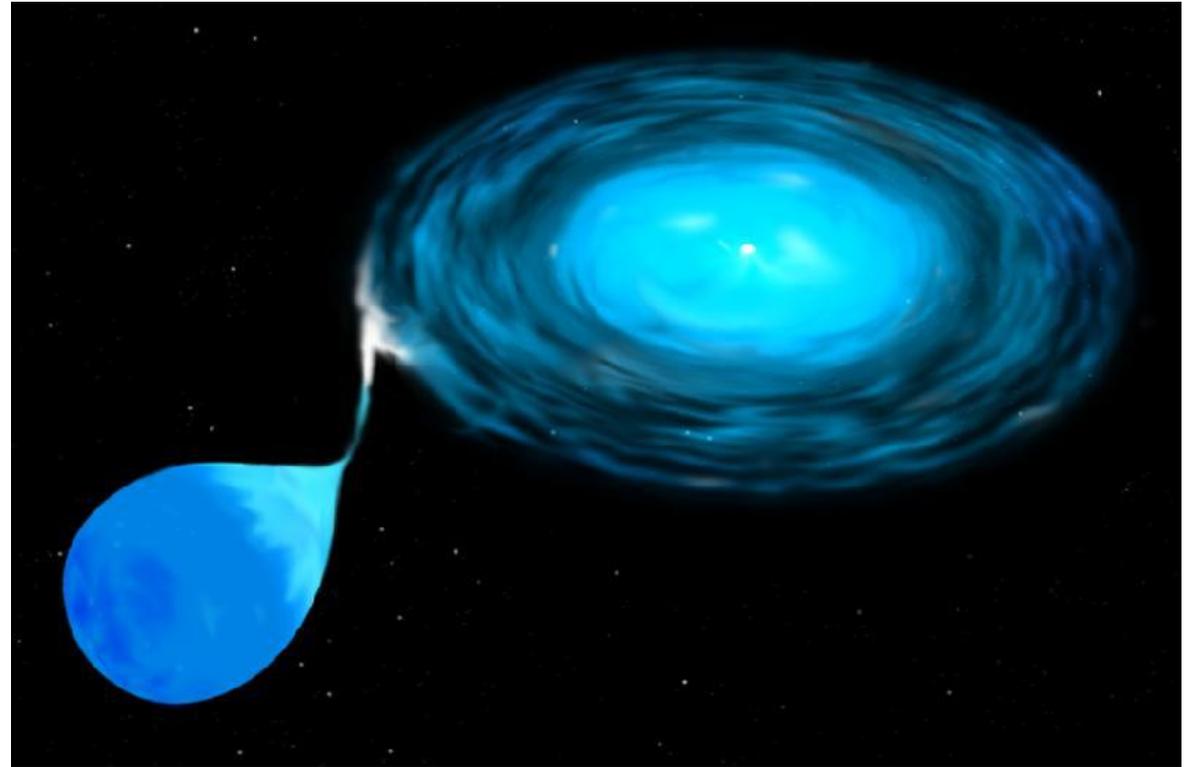
Образование плотного белого
карлика



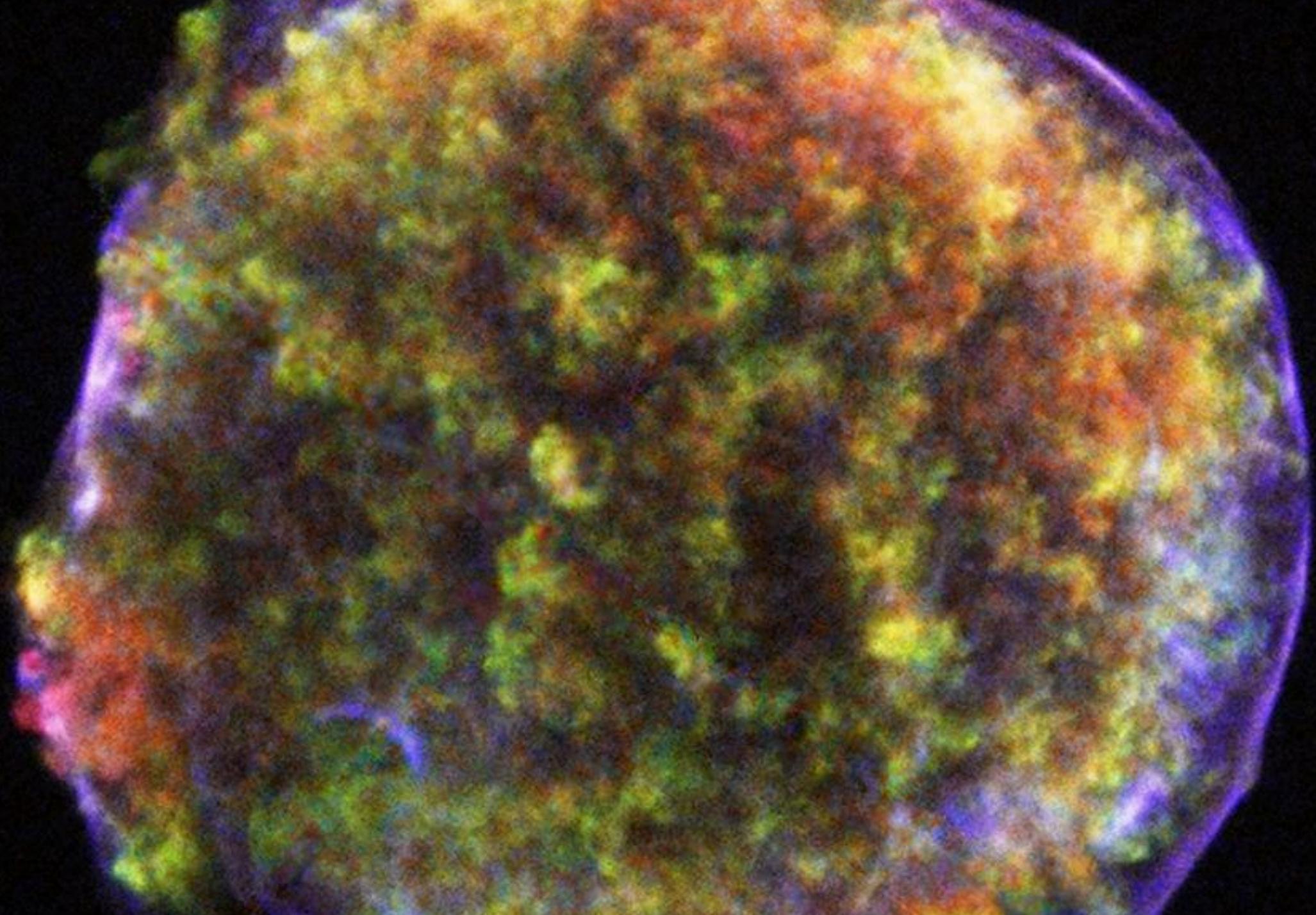
Аккреция (опционально)

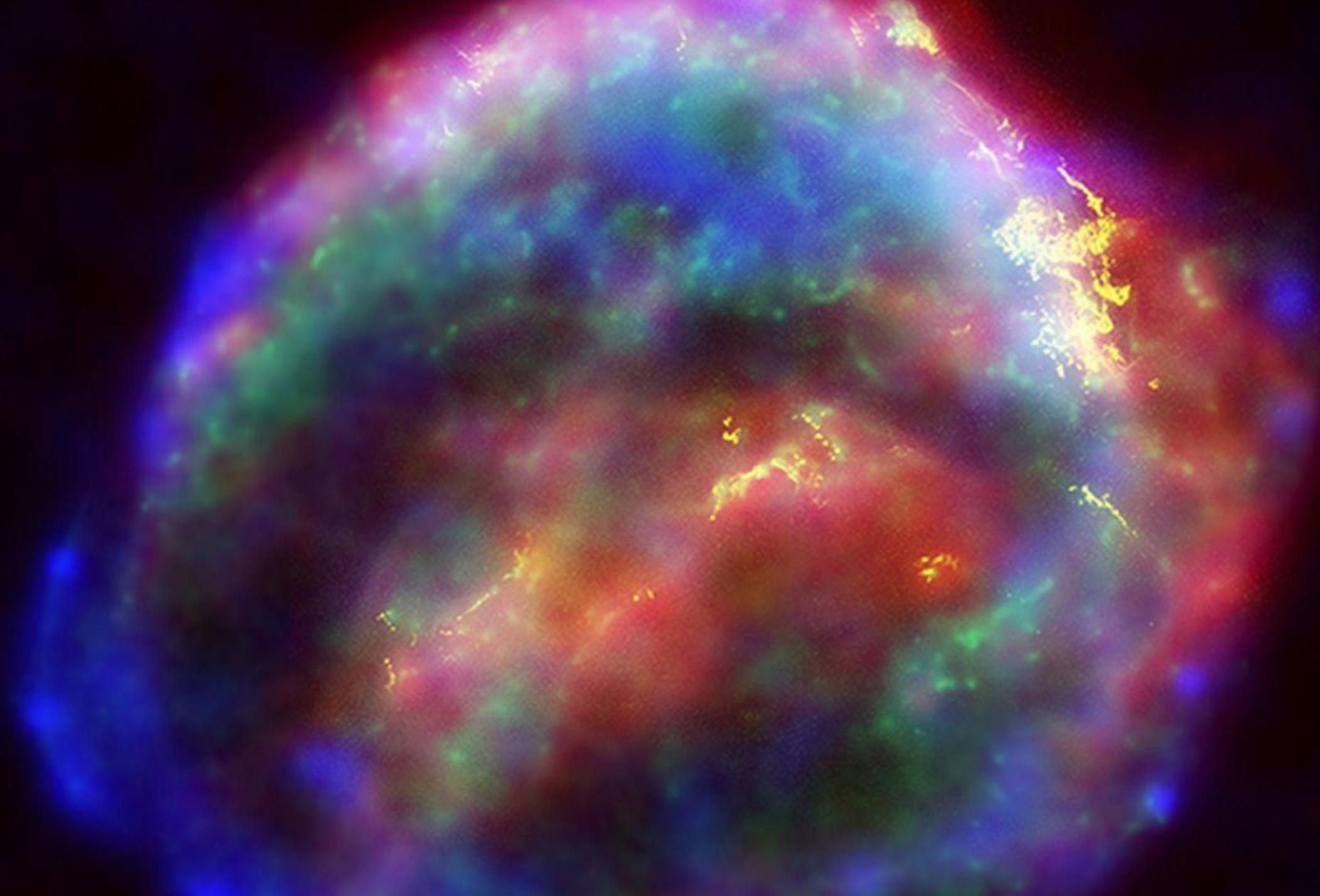


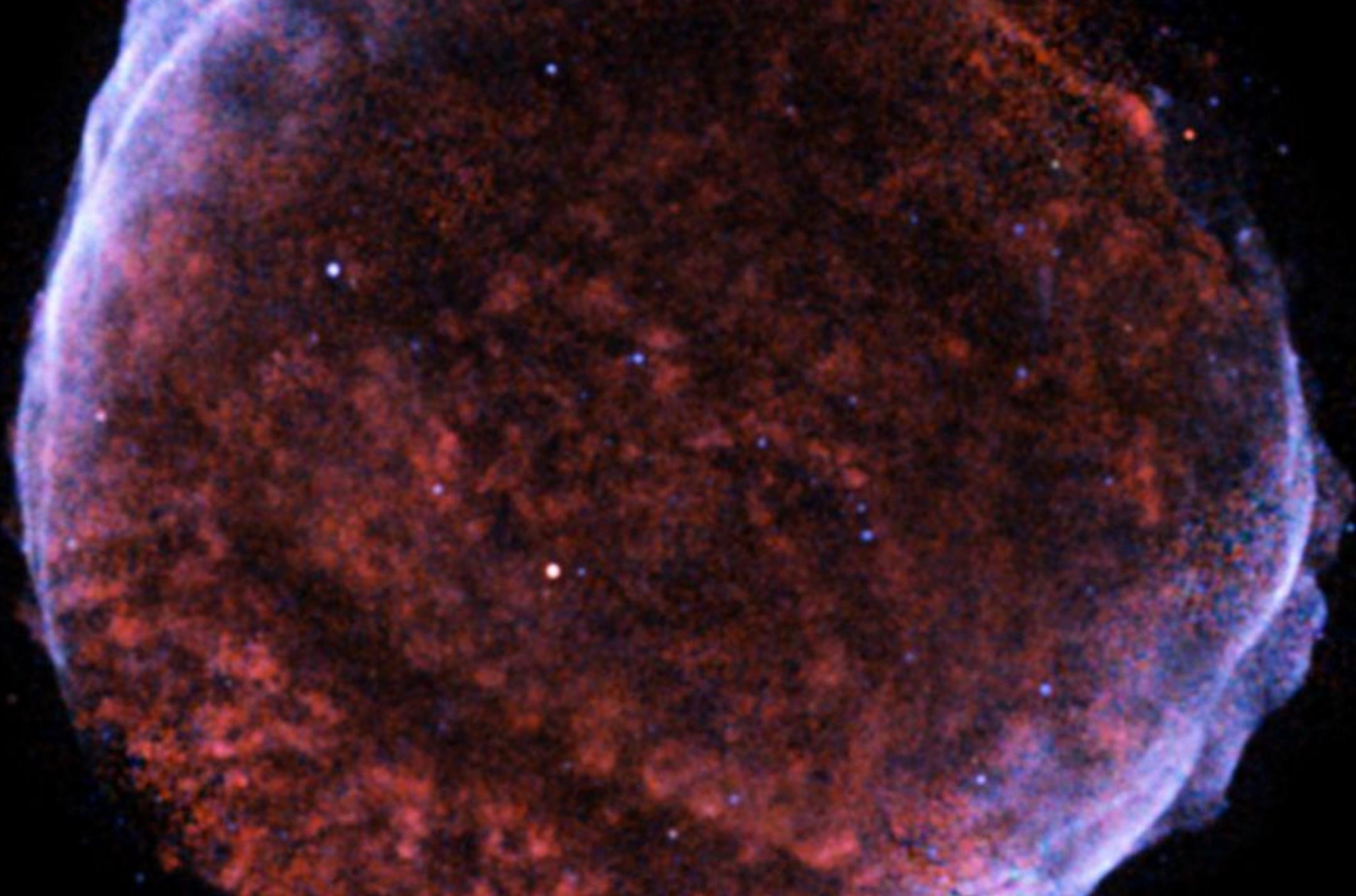
Сверхновая первого типа

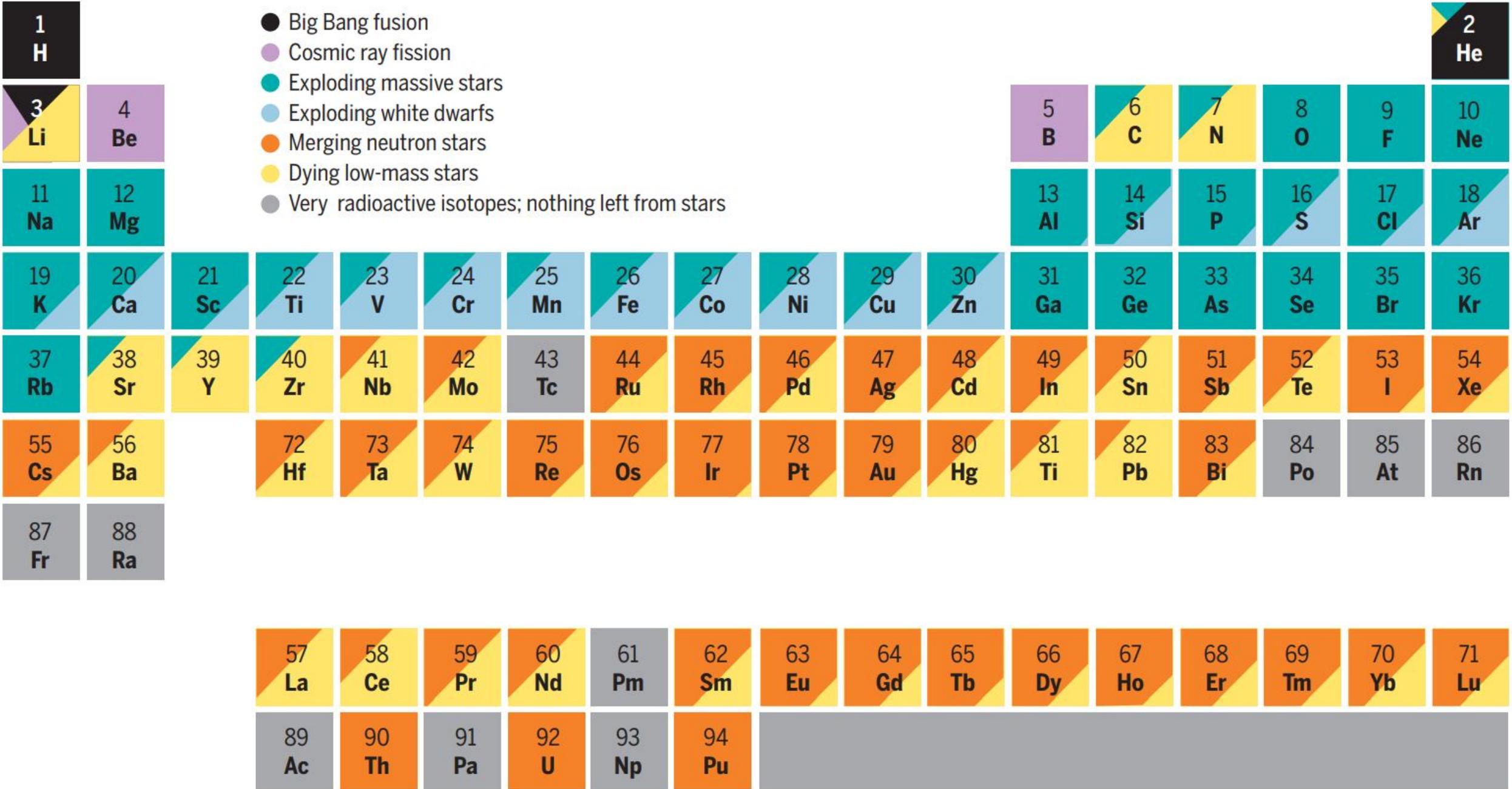












Подведем итоги

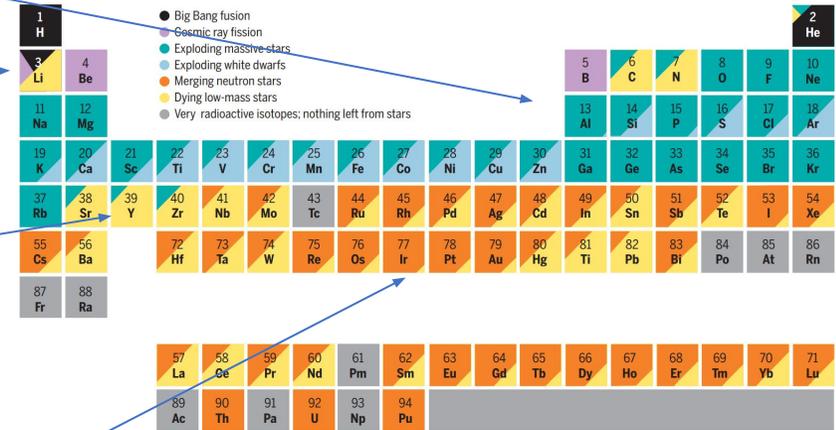
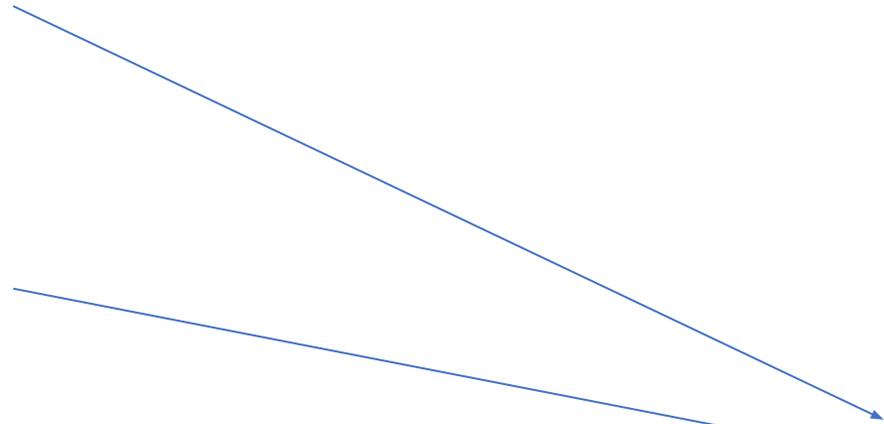
Большой Взрыв

Первые звезды

Космические лучи

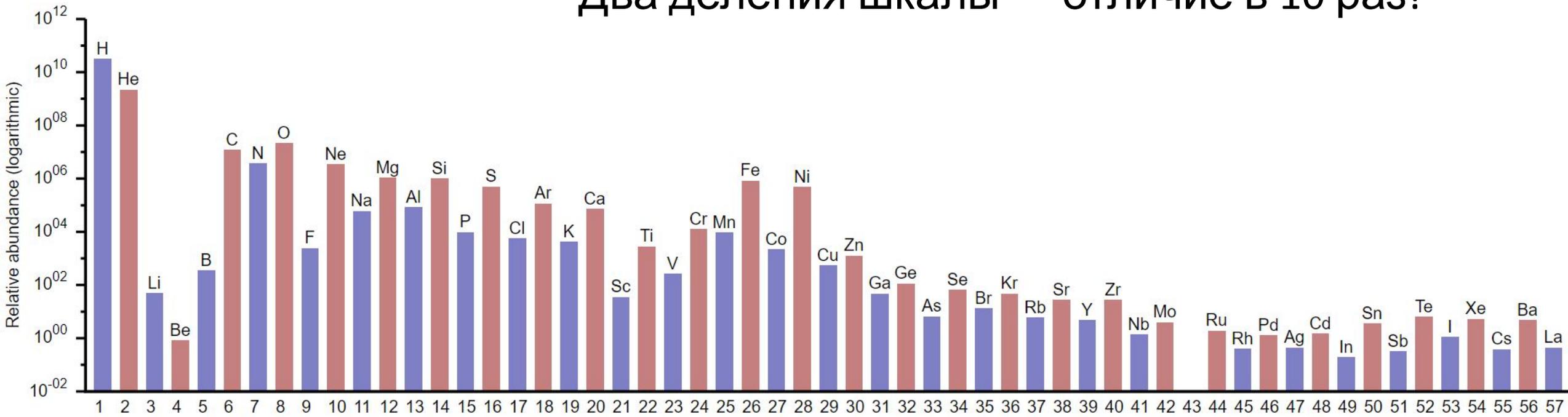
Малые звезды

Столкновения нейтронных звезд



Распространенность элементов в Солнечной системе

Два деления шкалы — отличие в 10 раз!



Пока горят звезды



Мы еще многого не знаем

Что конкретно происходит при взрыве белых карликов?

Сколько и каких элементов образуется при столкновениях нейтронных звезд?

Как часто происходили (происходят) столкновения нейтронных звезд?

Элементы от никеля до циркония — каков вклад различных механизмов?

Лекция подготовлена по материалам обзора

Jennifer A. Johnson, Populating the periodic table: Nucleosynthesis of the elements. *Science*, 2019, **363**, 6426, pp. 474-478

DOI: [10.1126/science.aau9540](https://doi.org/10.1126/science.aau9540)