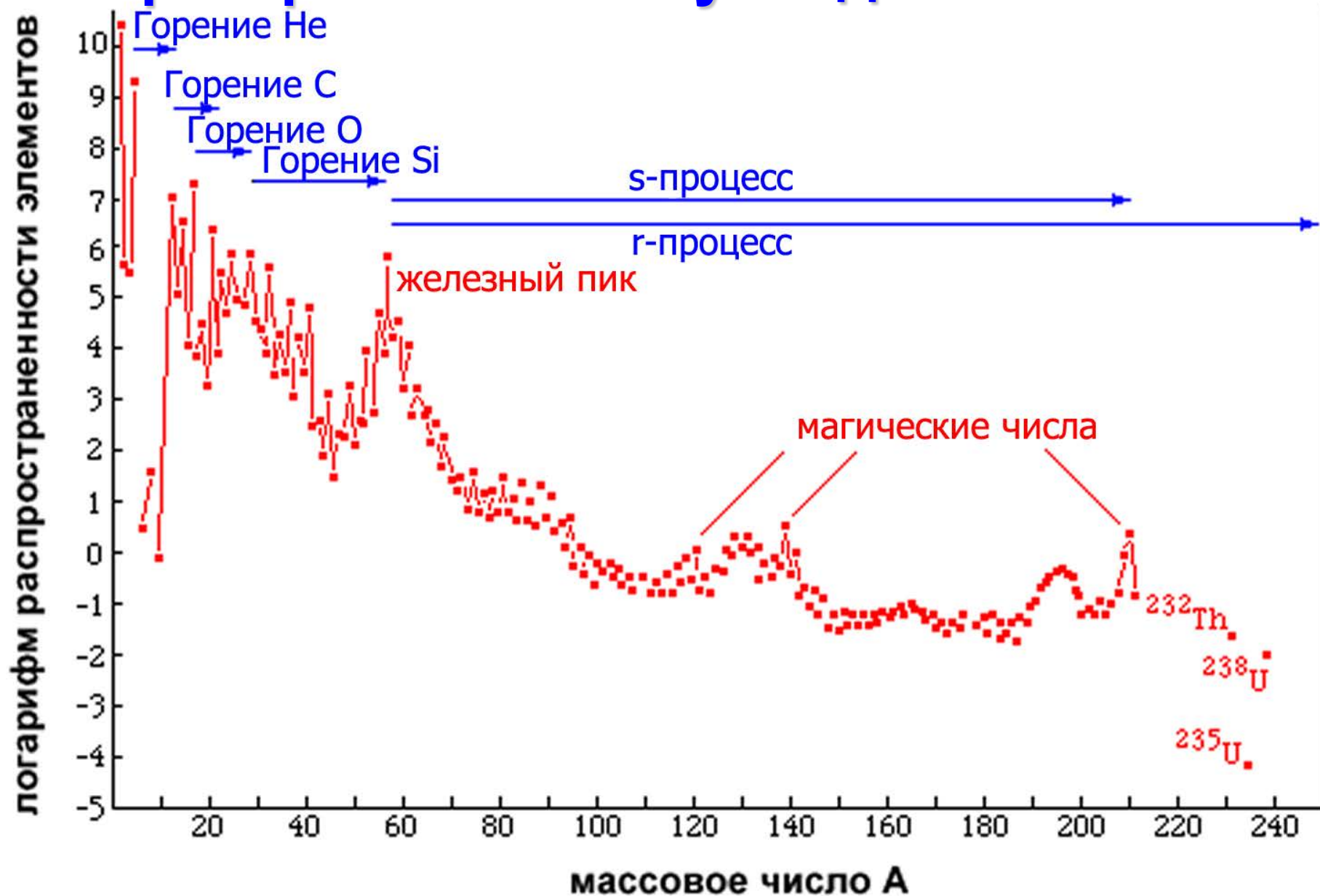


НУКЛЕОСИНТЕЗ

Характеристики Вселенной

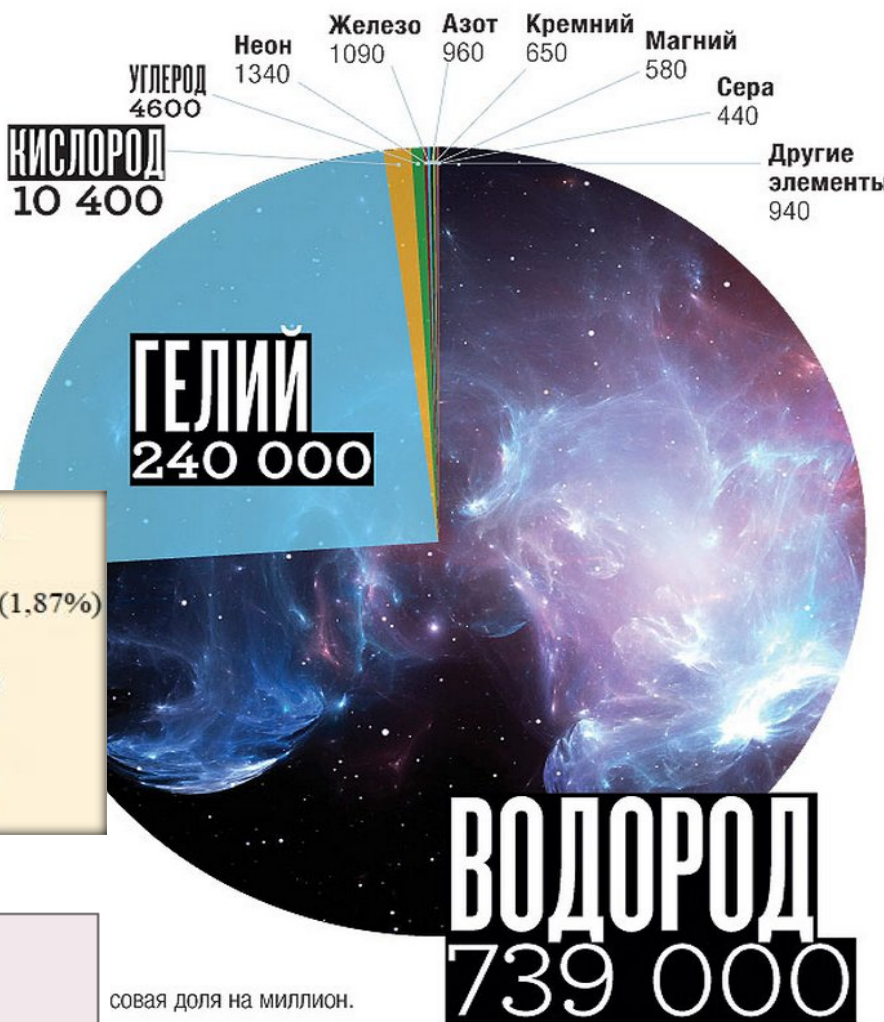
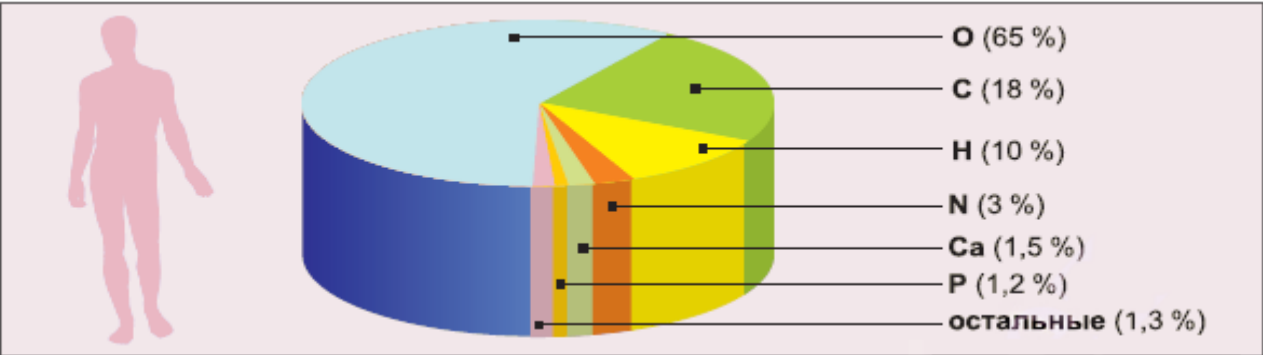
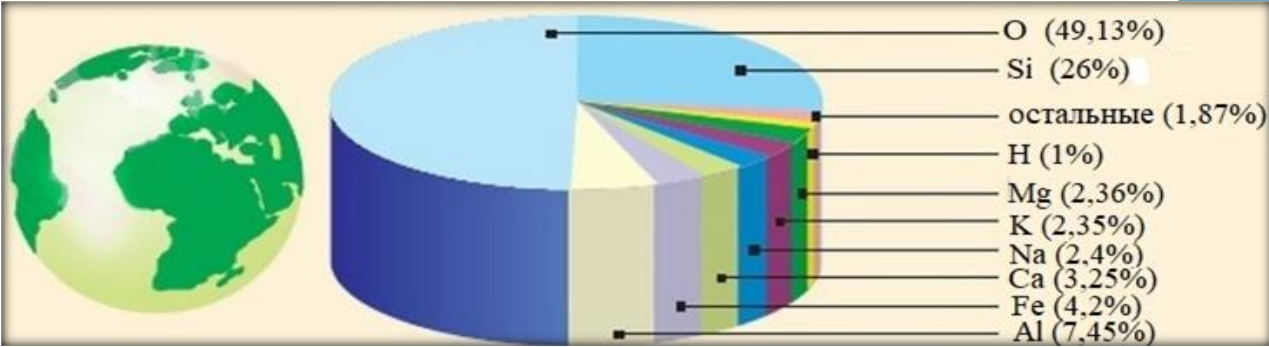
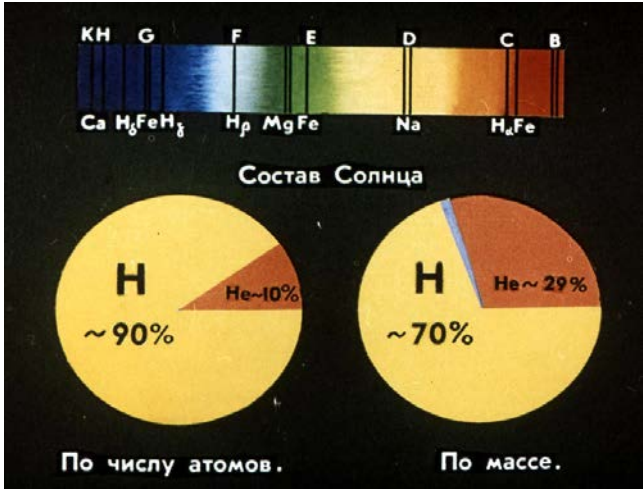
Возраст t_0	13,7 млрд. лет	
Радиус наблюдаемой части Вселенной (<i>горизонт видимости</i>) $R_0 = ct_0$	10^{28} см	
Полное количество вещества и энергии	10^{56} г	
Средняя плотность вещества и энергии	10^{-29} г/см ³	
Полное барионное число (число нуклонов)	10^{78}	
Доля антивещества	$< 10^{-4}$	
Постоянная Хаббла H	71±4 км/с·Мпк	
Температура реликтового (фонового) излучения	2.73 К	
Плотность реликтовых фотонов	411 см ⁻³	
Энергетическая плотность реликтовых фотонов	0.26 эВ/см ³ = 4.6·10 ⁻³⁴ г/см ³	
Отношение числа реликтовых фотонов к числу барионов n_γ/n_b	(10 ⁹ –10 ¹⁰):1	
Распространённость ядер:	по числу	по массе
водород	91%	70.7%
гелий	8.9%	27.4%
остальные ядра	<0.2%	1.9%

Распространенность нуклидов во Вселенной



Распространенность *Si* принята равной 10^6 .

Распространенность химических элементов: Вселенная, Солнце, Земля, Человек



Вселенная

Эволюция Вселенной

$$t = 0$$

Большой взрыв. Рождение Вселенной

$$\rho(\text{г/см}^3) = \frac{5 \cdot 10^5}{t^2(\text{с})}, \quad T(\text{К}) = \frac{10^{10}}{\sqrt{t(\text{с})}}$$

$$t = 10^{-43} \text{ с}$$

Эра квантовой гравитации. Струны

$$\rho = 10^{90} \text{ г/см}^3, \quad T = 10^{32} \text{ К}$$

$$t = 10^{-35} \text{ с}$$

Кварк-глюонная среда

$$\rho = 10^{75} \text{ г/см}^3, \quad T = 10^{28} \text{ К}$$

$$t = 1 \text{ мкс}$$

Кварки объединяются в нейтроны и протоны

$$\rho = 10^{17} \text{ г/см}^3, \quad T = 6 \cdot 10^{12} \text{ К}$$

$$t = 100 \text{ с}$$

Образование дозвездного ^4He

$$\rho = 50 \text{ г/см}^3, \quad T = 10^9 \text{ К}$$

$$t = 380 \text{ тыс. лет}$$

Образование нейтральных атомов

$$\rho = 0,5 \cdot 10^{-20} \text{ г/см}^3, \quad T = 3 \cdot 10^3 \text{ К}$$

Дозвездный нуклеосинтез

Протоны и нейтроны ранней Вселенной явились тем материалом, из которого в дальнейшем возникли атомные ядра различных химических элементов.

$$T > 10^{10} \text{ К:}$$

$$p + e^- \leftrightarrow n + \nu_e,$$

$$n + e^+ \leftrightarrow p + \bar{\nu}_e$$

$$p + \bar{\nu}_e \leftrightarrow n + e^+,$$

$$n \leftrightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e,$$

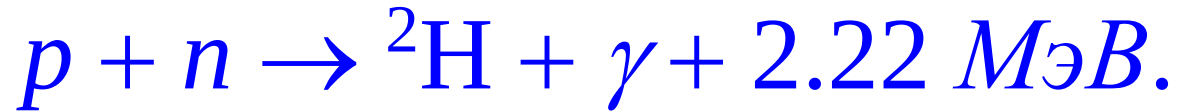
$$W = Ae^{-E/kT}.$$

В условиях термодинамического равновесия соотношение между числом нейтронов и протонов будет определяться температурой среды T , разностью масс нейтрона и протона $m_n - m_p$:

$$\frac{N_n}{N_p} = \frac{e^{-E_n/kT}}{e^{-E_p/kT}} = e^{-(m_n - m_p)c^2/kT} = \frac{1}{6}$$

Образование дейтерия. $T = 10^9 \text{ K}$

Стартовой реакцией первичного нуклеосинтеза является реакция образования дейтерия

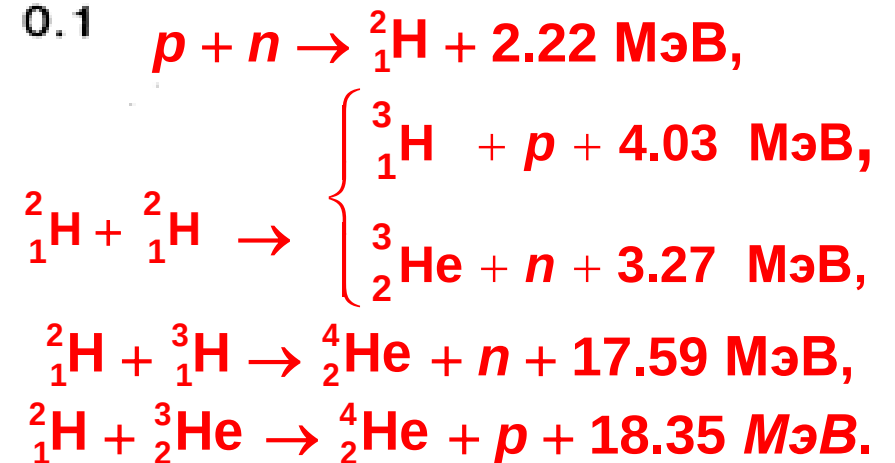
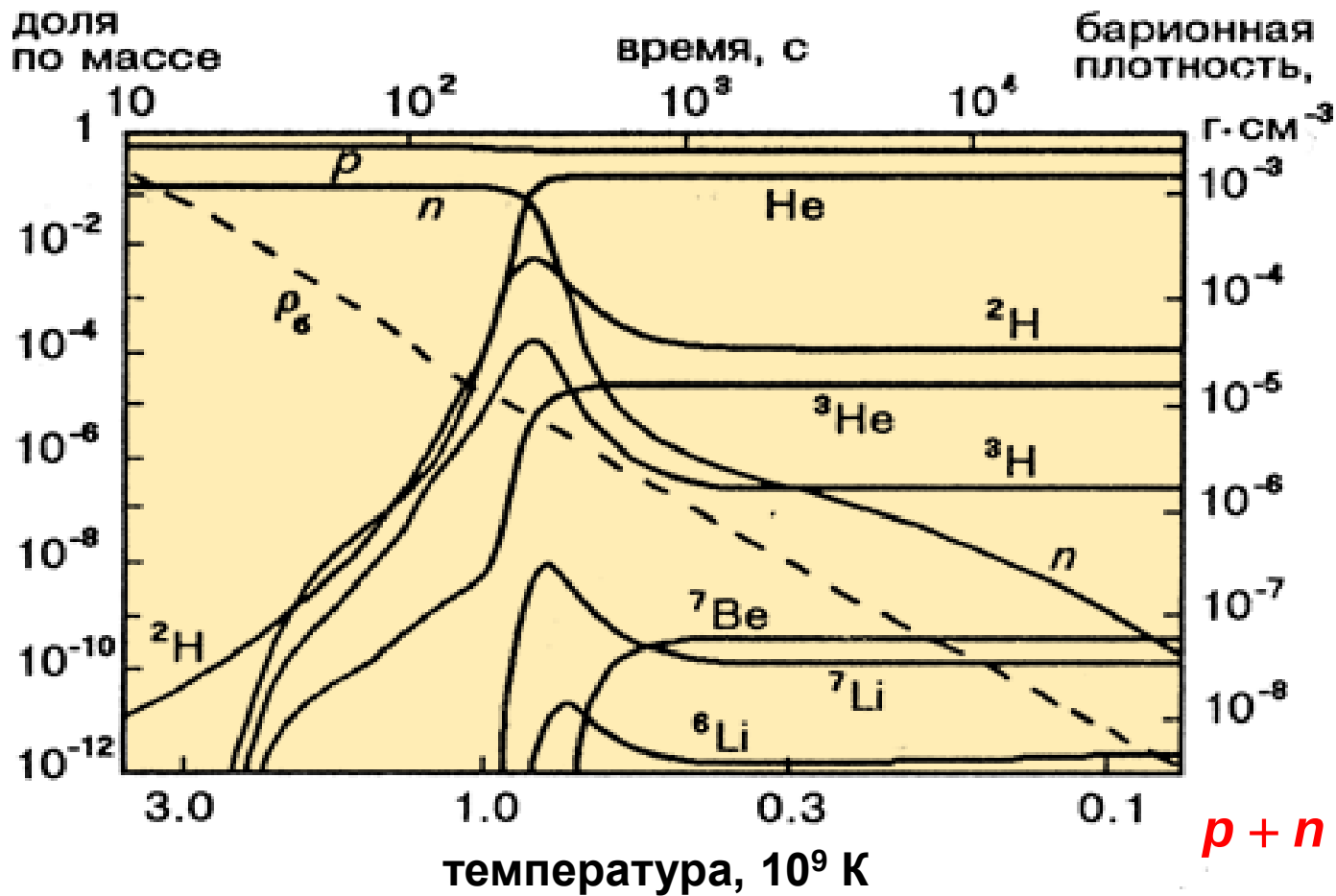


Накоплению дейтерия за счёт этой реакции на первых порах препятствует интенсивное разрушение дейтерия фотонами в обратном процессе фотодиссоциации. Отношение числа фотонов n_γ к числу барионов n_b :

$$n_\gamma / n_b \approx 10^9 \div 10^{10}.$$

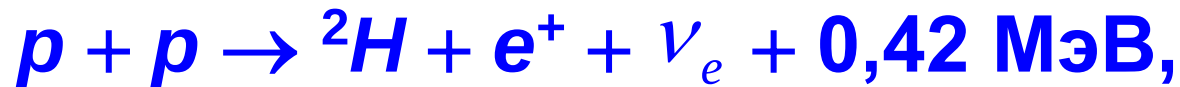
Поэтому начало синтеза дейтерия и всей цепочки первичного нуклеосинтеза задерживается примерно до 100-й секунды после Большого Взрыва, когда средняя кинетическая энергия частиц уменьшается до 0.1 МэВ. Вселенная к этому времени остывает до 10^9 K .

Дозвездный нуклеосинтез. Образование легчайших ядер



Протозвезда. Горение дейтерия. $T = 10^6 \text{ K}$

Когда масса вещества протозвезды в результате аккреции достигает 0.1 массы Солнца, температура в центре протозвезды возрастает до 1 млн. К, в жизни протозвезды начинается новый этап – **реакции термоядерного синтеза**. Однако эти термоядерные реакции отличаются от реакций, протекающих в звёздах, находящихся в стационарном состоянии, типа Солнца. Протекающая на Солнце реакция синтеза



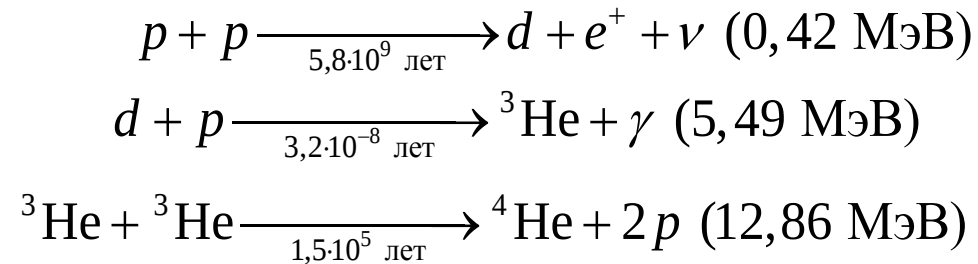
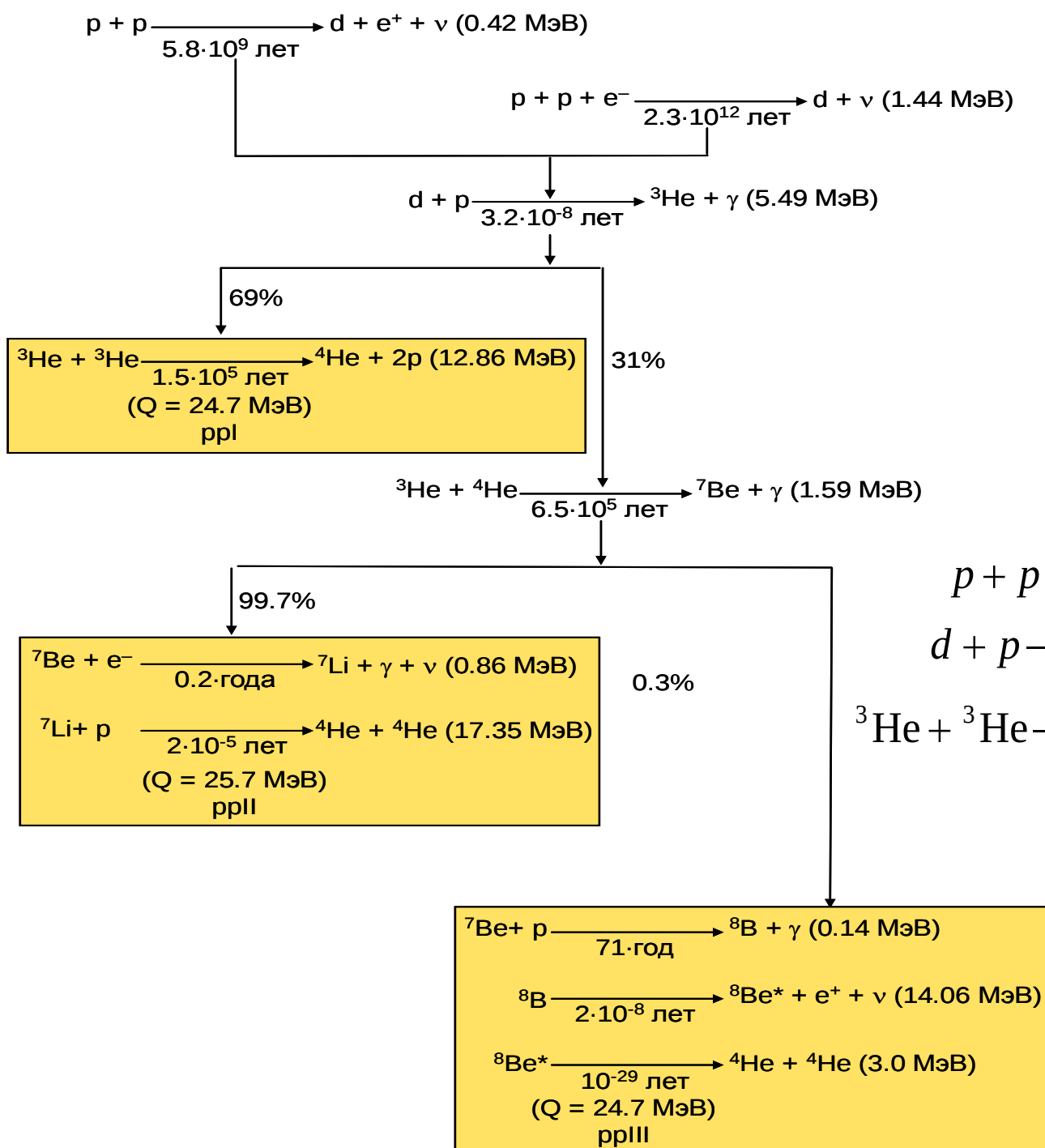
требует более высокой температуры (≈ 10 млн. К). Температура же в центре протозвезды составляет всего 1 млн. К. При такой температуре эффективно протекает реакция слияния ядра дейтерия



Дейтерий, как и ${}^4\text{He}$, образуется на дозвёздной стадии эволюции Вселенной и его содержание в протозвезде 10^{-4} - 10^{-5} от содержания протонов. Однако этого количества дейтерия достаточно для появления в центре протозвезды эффективного источника энергии.

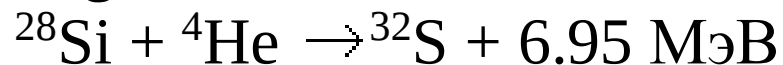
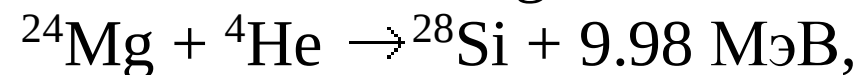
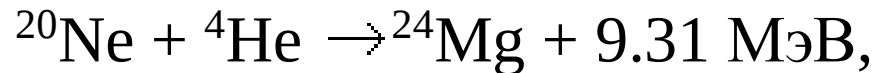
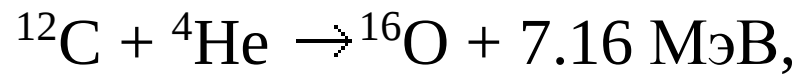
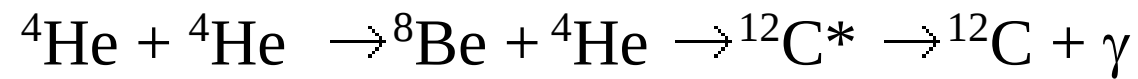
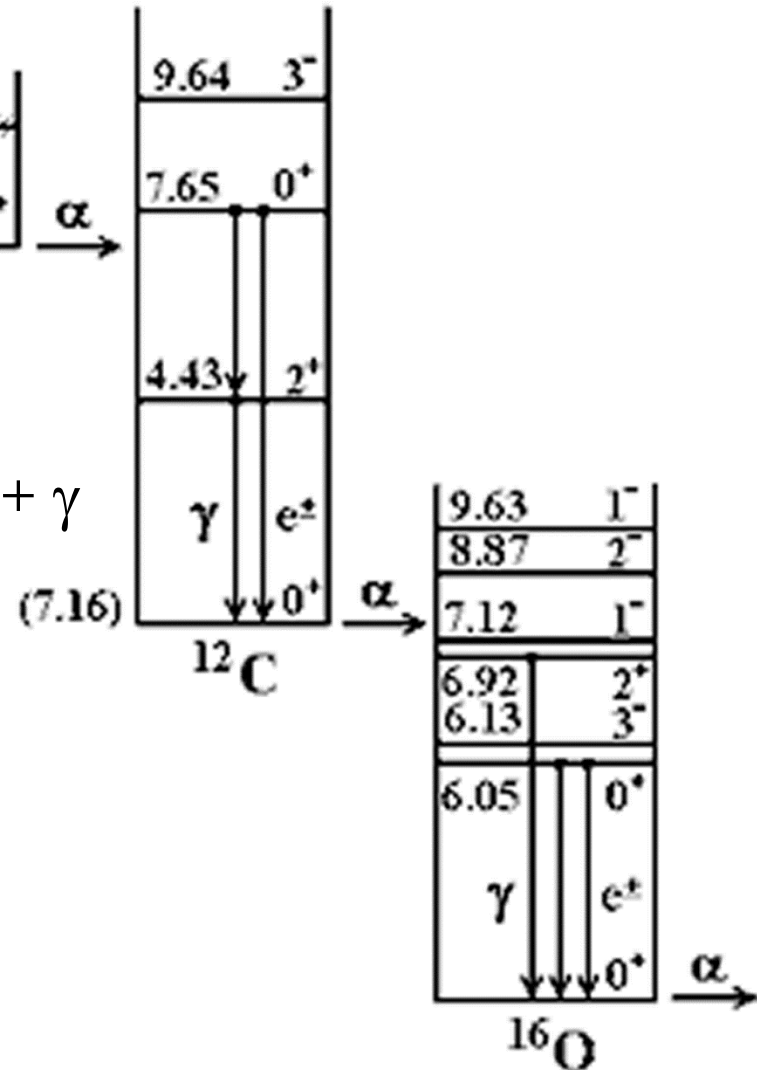
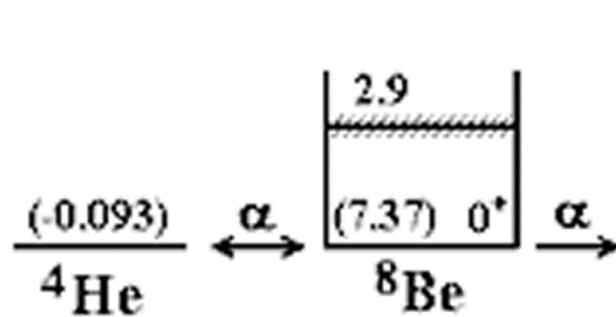
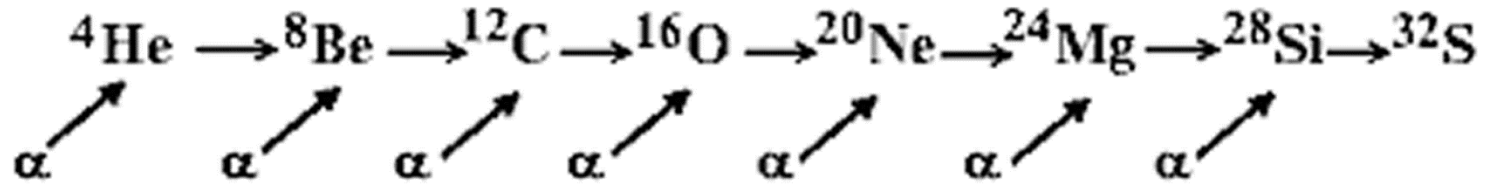
Горение водорода

$$T = 10^7 \text{ К}$$



α -процесс в звездах

$T > 10^8 \text{ K}$



Горение углерода, кислорода, кремния

$$T = 10^9\text{-}10^{10} \text{ К}$$

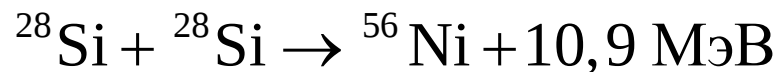
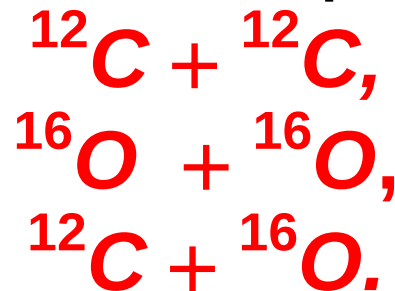
$$\rho = 10^5\text{-}10^7 \text{ г/см}^3$$



Если звезда массивная ($> 10M_{\odot}$), то в результате термоядерного горения в ней последовательно образуются всё более тяжелые ядра в результате последовательного захвата ядер гелия с образованием α -частичных ядер



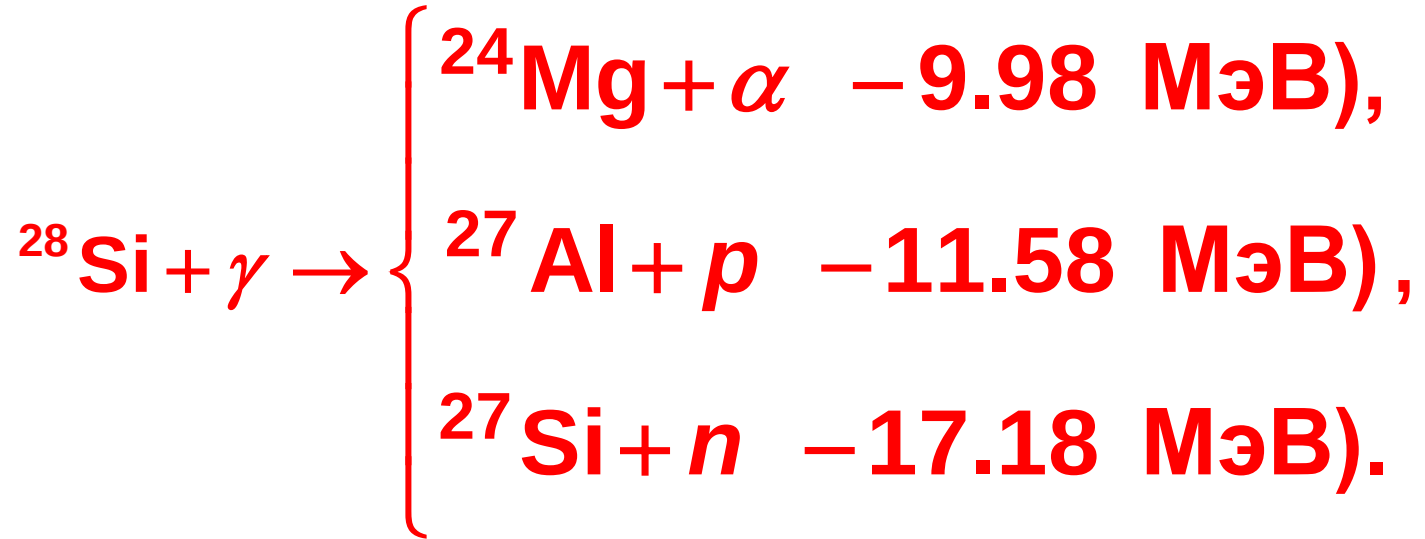
и реакции слияния углерода и кислорода



Фотоядерные реакции в звездах $T > 10^9$ К

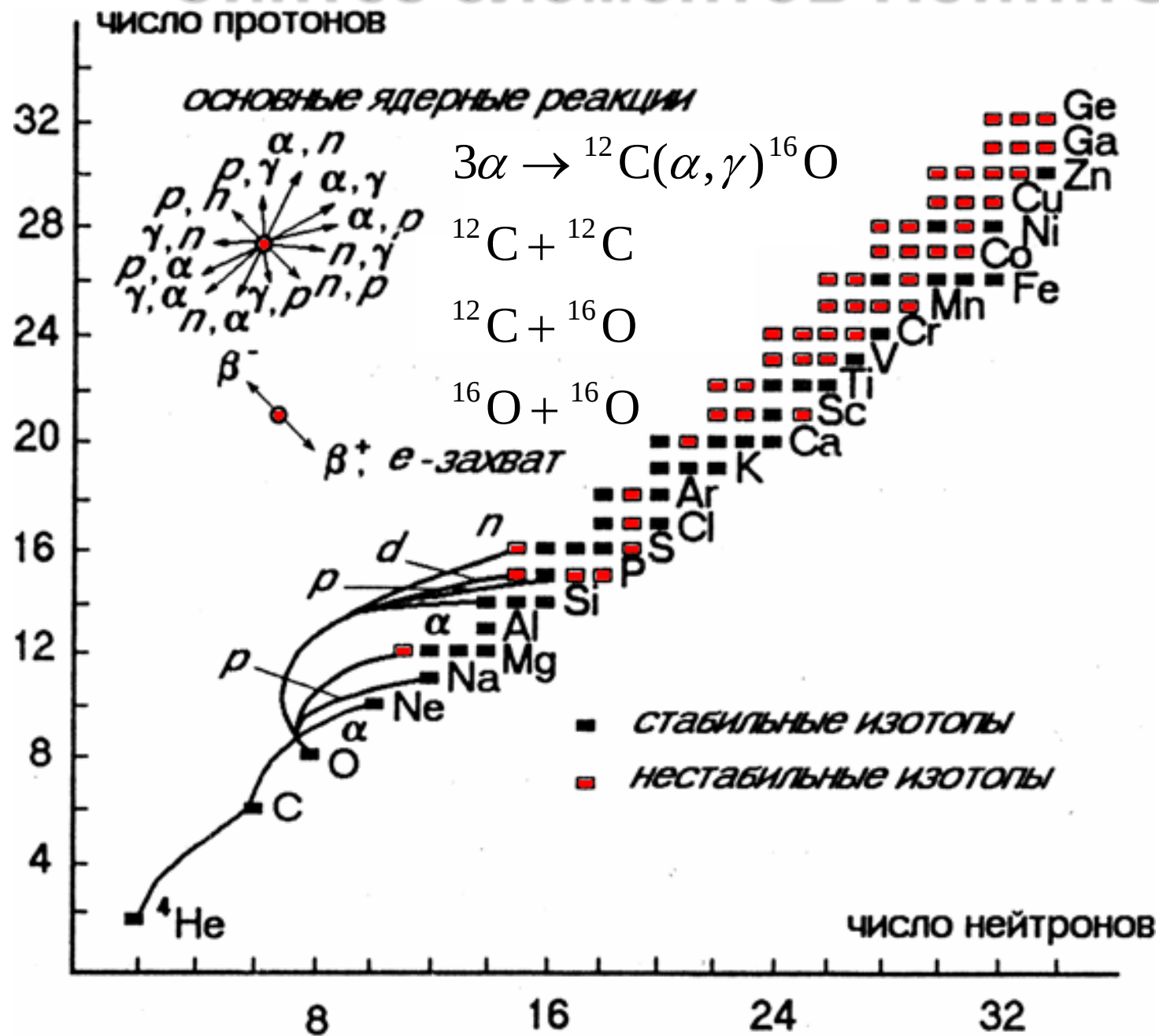
$T \sim 10^9$ К. Существенную роль начинают играть электромагнитные процессы – реакции под действием γ -квантов и электронов. Наряду с ростом энергии фотонов с увеличением температуры ($E_\gamma \sim T$) растёт их число ($N_\gamma \sim T^4$).

Реакции фоторасщепления кремния:

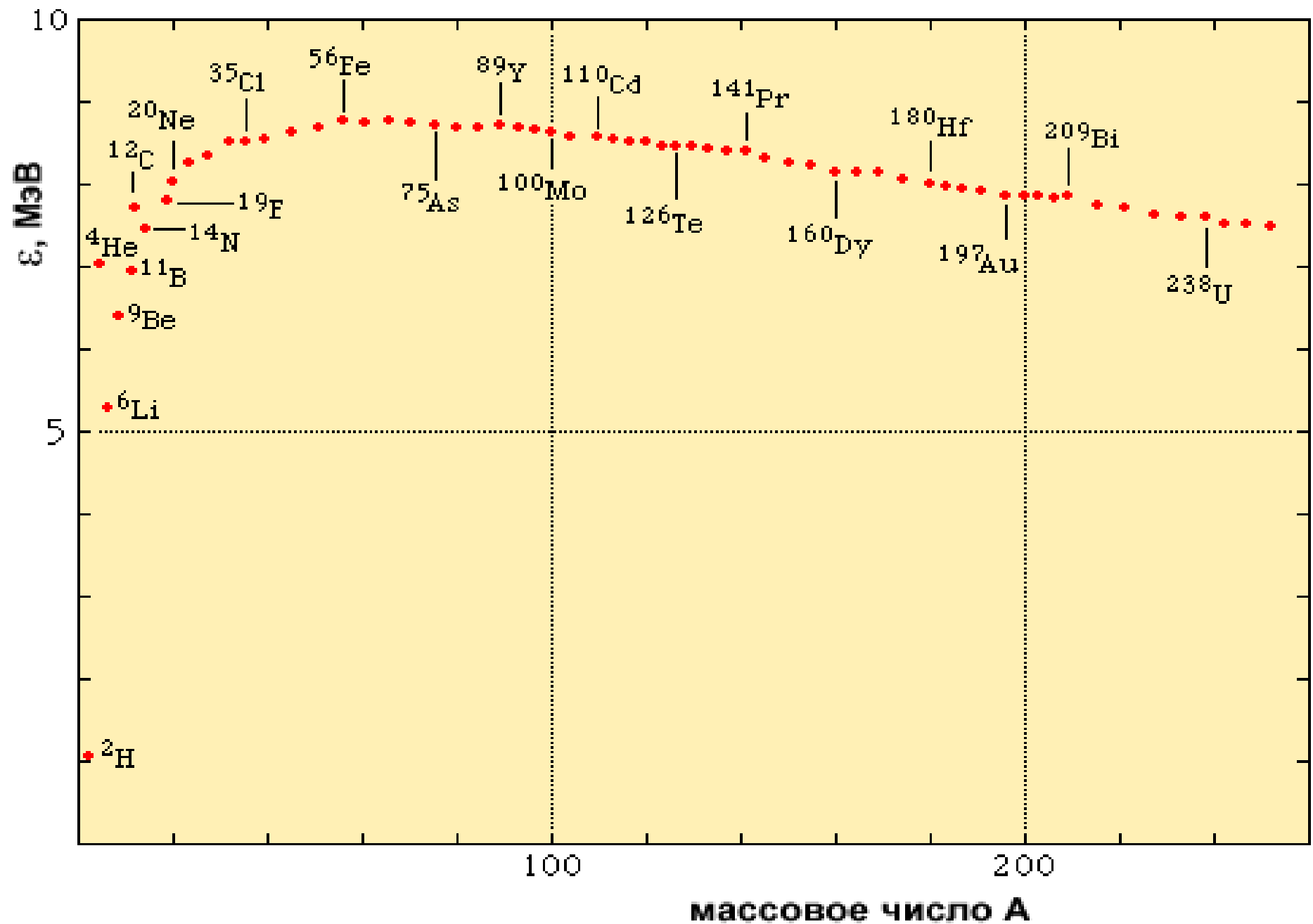


В результате появляется большое количество n , p и α -частиц и их роль в горении кремния увеличивается. ^{28}Si и образующиеся продукты с большим Z , облучаясь в потоках n , p , α и γ , в термодинамическом равновесии формируют большинство элементов в районе железного максимума.

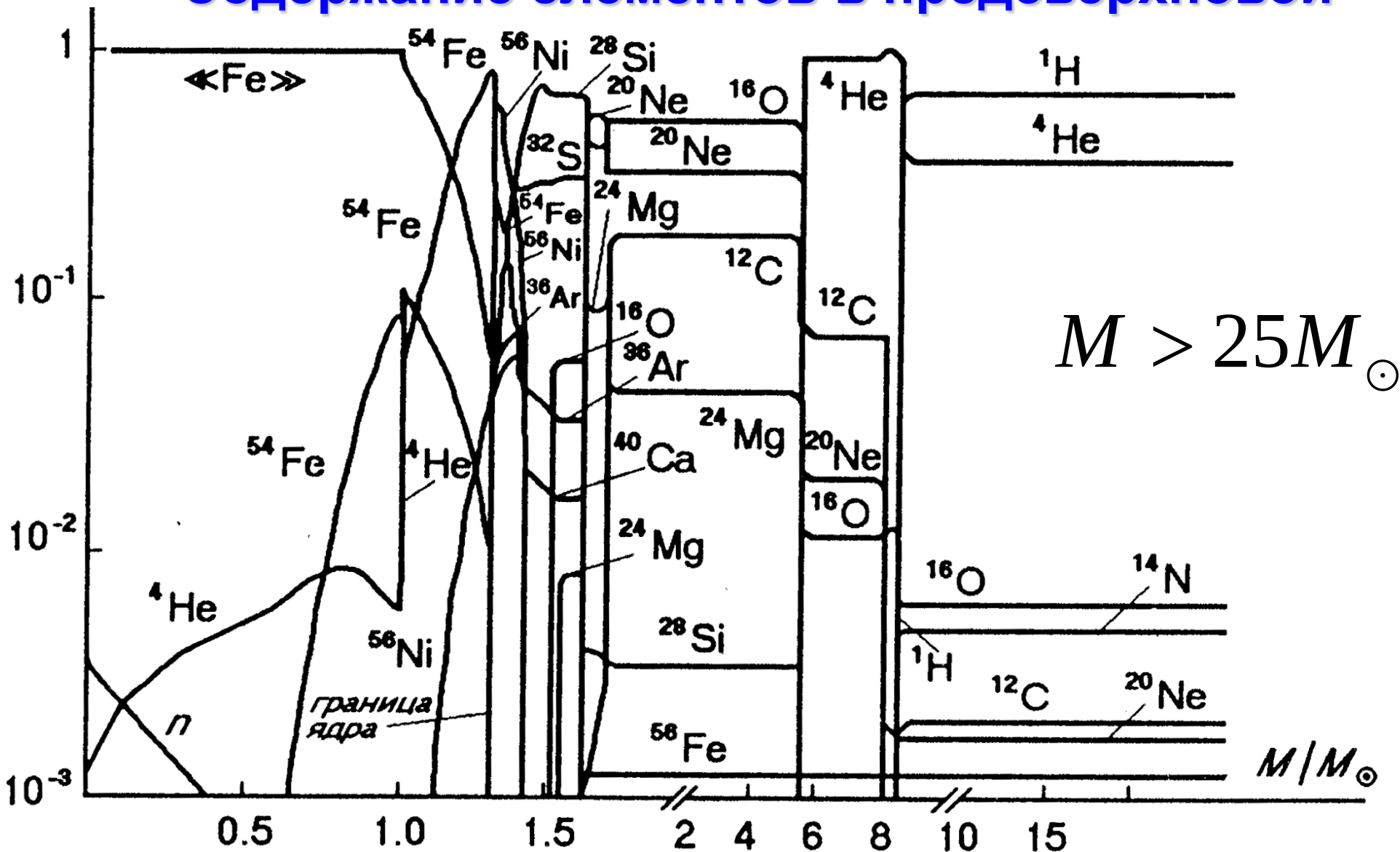
Синтез элементов He.....Ge



Удельная энергия связи ядра $\epsilon(A, Z)$



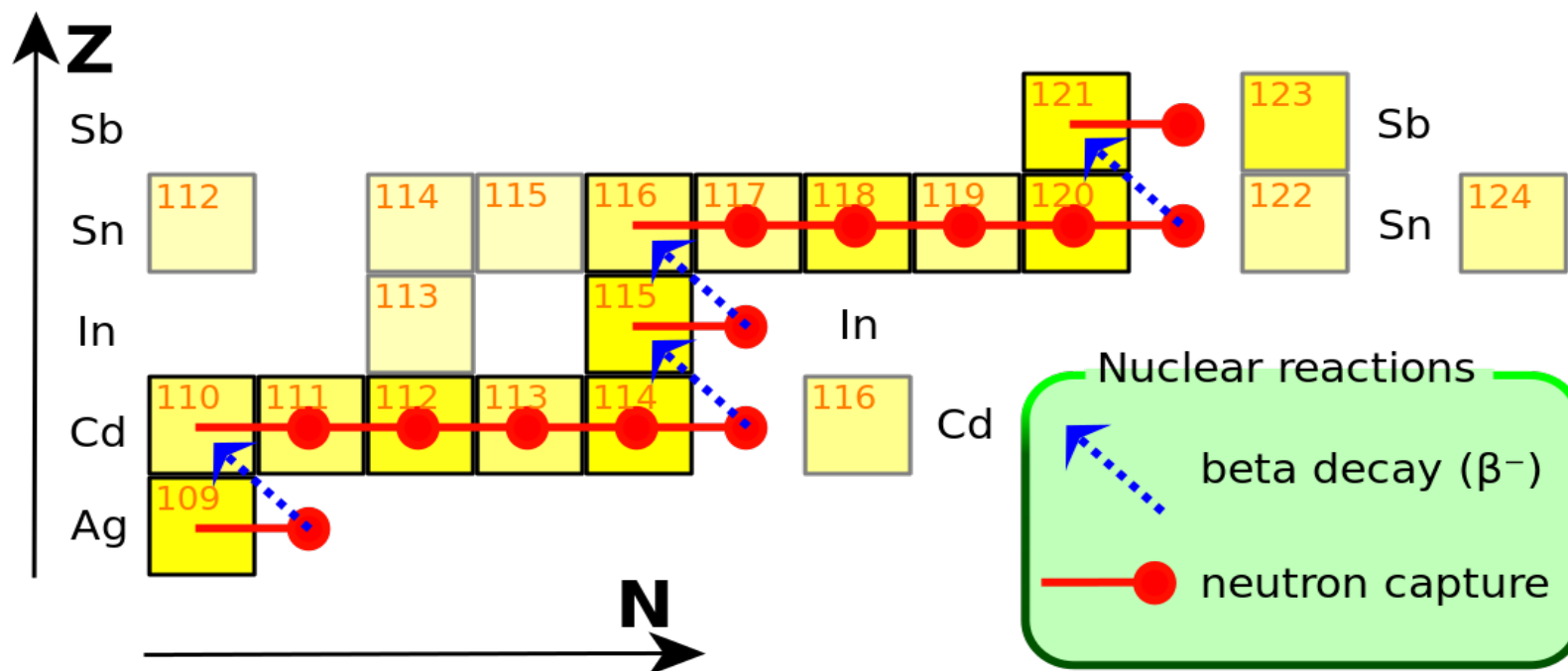
Содержание элементов в предсверхновой



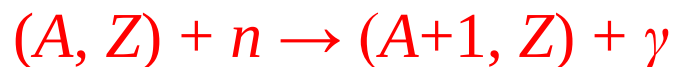
Распределение элементов соответствует стадии предсверхновой, когда с фоторасщепления железа под действием γ -квантов начинается охлаждение и сжатие центральной части звезды с последующим взрывом сверхновой.

S (slow) – процесс

- медленный захват нейтронов
- шкала времени: годы
- Красные гиганты



Захват нейтронов:



β^- -распад:



$$\tau_{n\gamma} \gg \tau_{\beta},$$

$\tau_{n\gamma}$ — время жизни ядра до захвата нейтрона.

Нейтроны для s - процесса

Подходящие условия для образования ядер в s-процессе существуют в красных гигантах. Источником нейтронов для s-процесса являются реакции

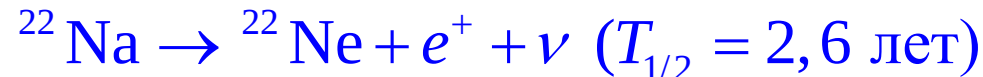
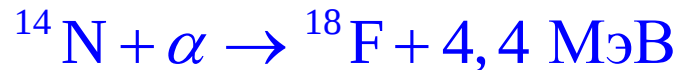


Для первой реакции требуются условия, при которых происходит совместное горение водорода и гелия. В качестве механизма, создающего такие условия, рассматривается соприкосновение конвективной оболочки звезды, в которой происходит горение гелия, с богатой водородом внешней оболочкой. Образование нейтронов происходит в следующей цепочке реакций:

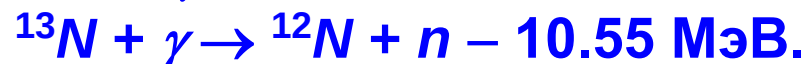


Реакция $^{13}\text{C} + \alpha \rightarrow ^{16}\text{O} + n$ эффективно происходит при $T > 10^8 \text{ К}$.

Образование нейтронов в реакции $^{22}\text{Ne} + \alpha \rightarrow ^{25}\text{Mg} + n$ ($Q = -0.48 \text{ МэВ}$) зависит от наличия ^{14}N в зоне горения гелия. Источником ядер ^{14}N является CNO-цикл.



Ещё одним источником нейтронов с необходимой плотностью при $T \approx 10^8 \text{ К}$ могут быть фотонейтронные реакции:

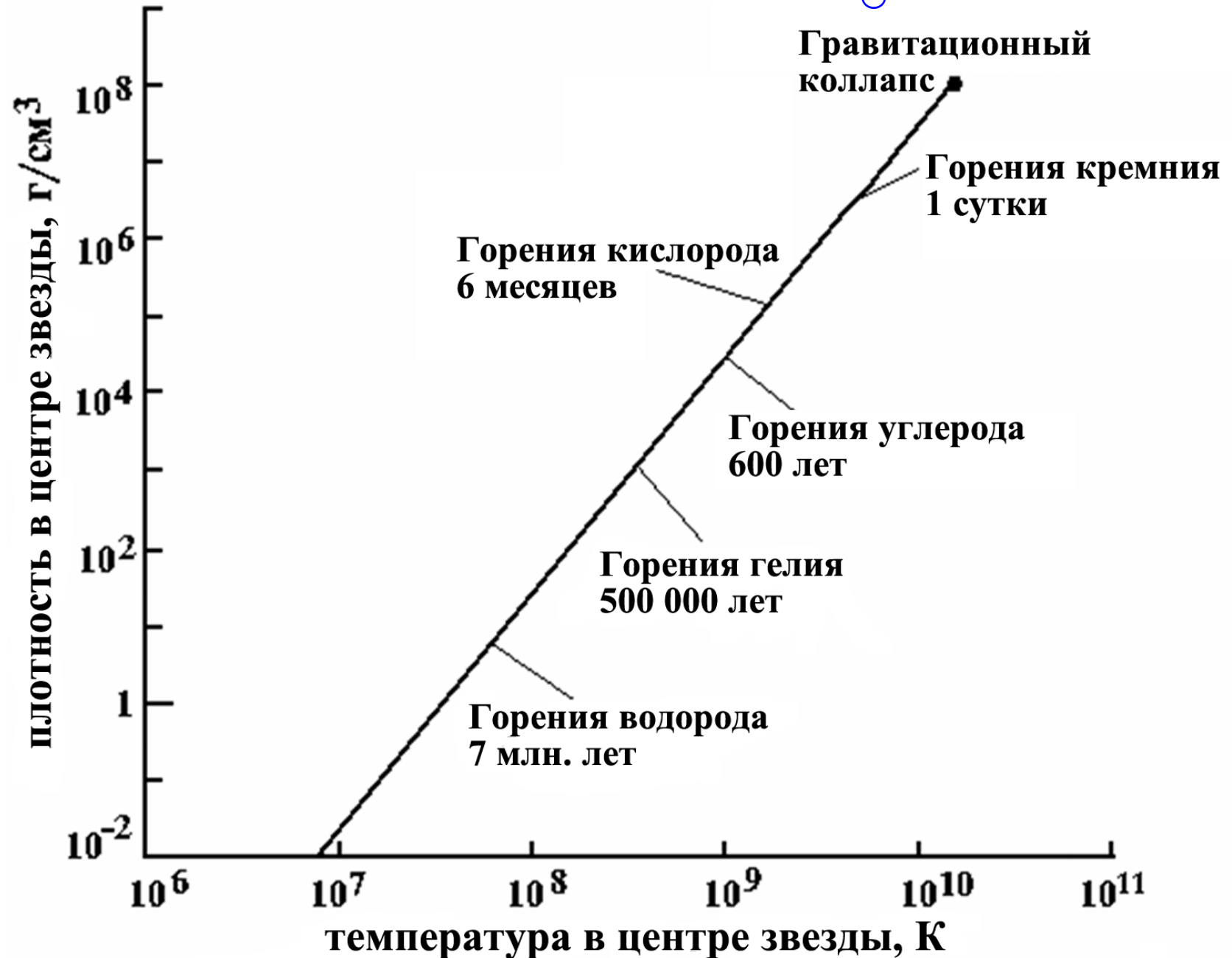


Роль фотонейтронных реакций растёт с увеличением температуры.

Ядерные реакции синтеза в звёздах различной массы

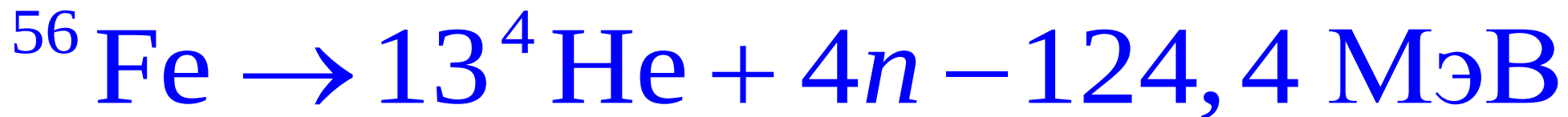
Масса, $M_{\odot}$	Возможные ядерные реакции
0.08	Нет
0.3	Горение водорода
0.7	Горение водорода и гелия
5.0	Горение водорода, гелия, углерода
25.0	Все реакции синтеза с выделением энергии

Эволюция массивной звезды $M > 25M_{\odot}$



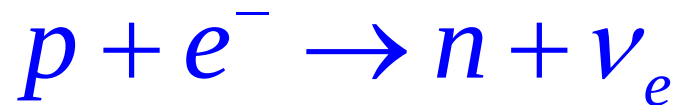
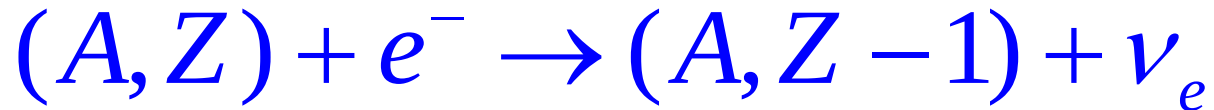
Фоторасщепление железа

При температуре $5 \cdot 10^9$ К существенную роль начинают играть реакции фоторасщепления железа на нейтроны, протоны и ядра гелия. Эти реакции протекают с поглощением энергии. Начинается охлаждение центральной части звезды.



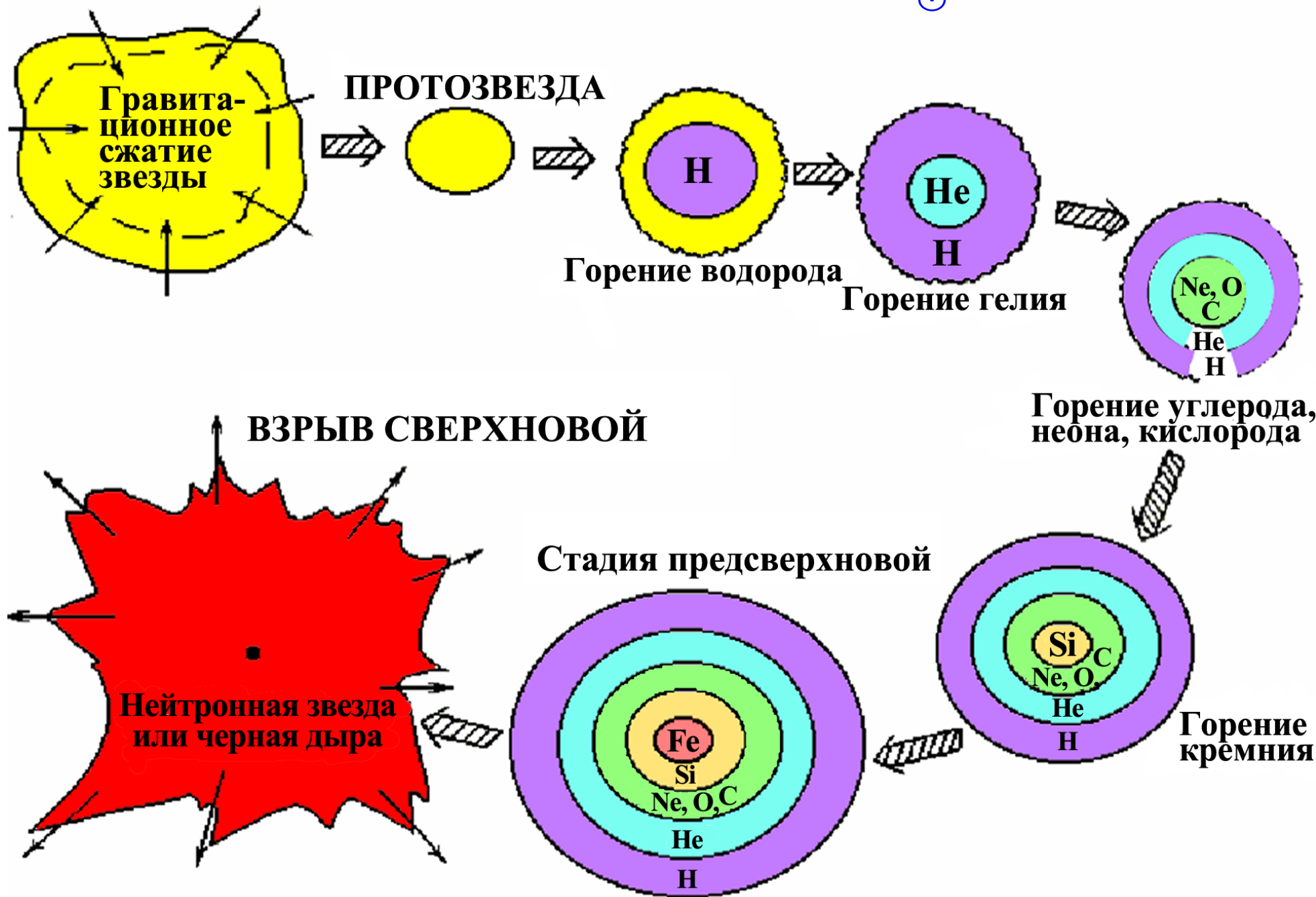
Нейтронизация вещества

Наряду с процессом фоторасщепления железа существенную роль начинают играть процессы, происходящие в результате слабого взаимодействия, которые также приводят к охлаждению центральной части звезды. Энергию из центральной части звезды уносят **нейтрино**:

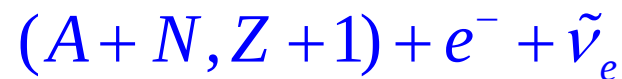
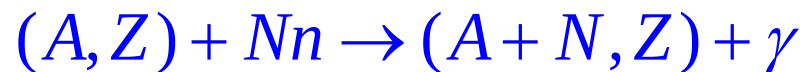
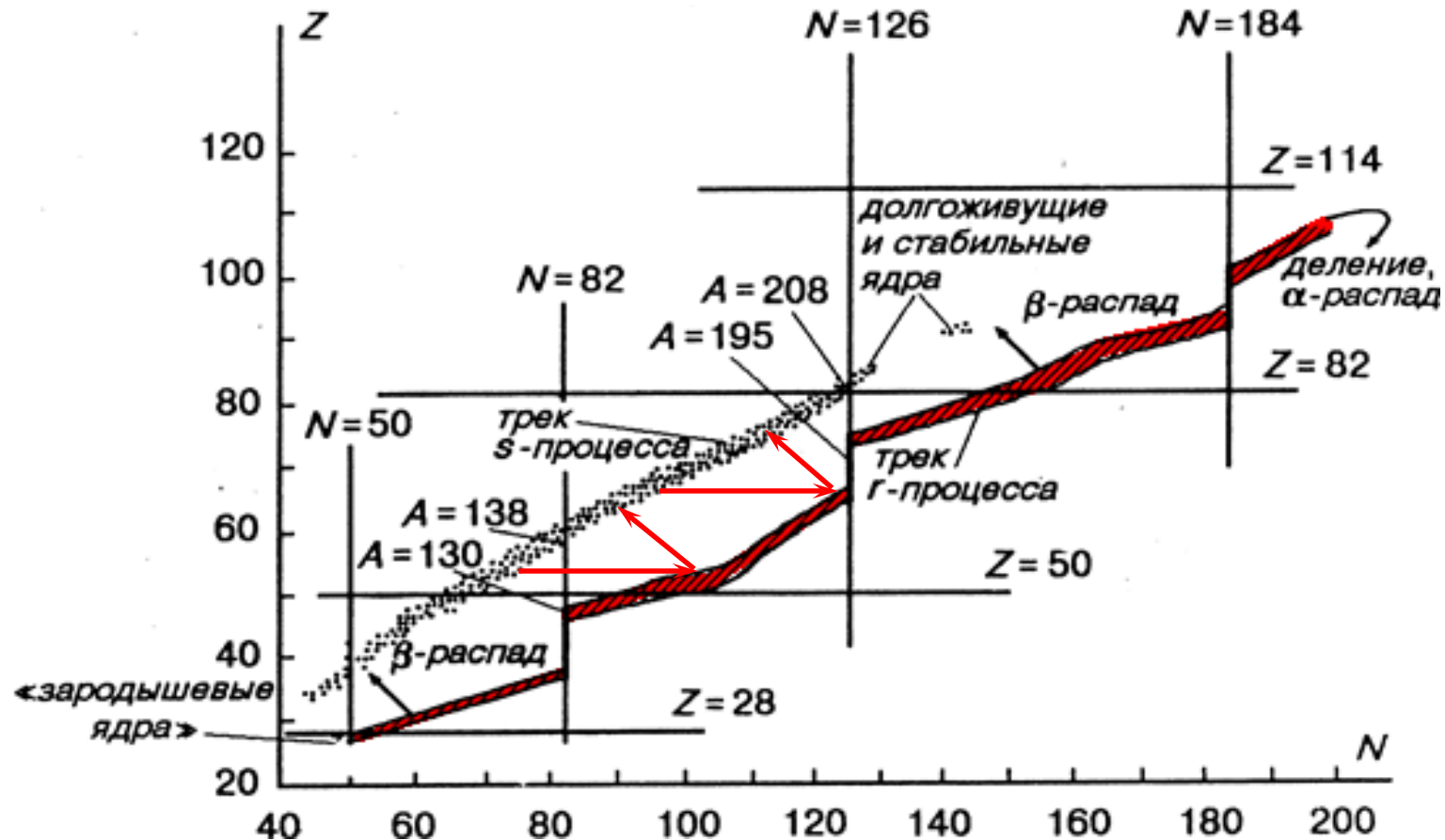


Происходит обогащение элементов центральной части звезды нейтронами. Этот процесс называется нейтронизацией вещества.

Эволюция массивной звезды $M > 25M_{\odot}$



Образование тяжелых элементов. r-процесс



долина стабильности

r - процесс

Если плотности нейтронов ρ_n достигают значений 10^{19} - 10^{20} см⁻³, то время жизни ядра до захвата нейтрона $\tau_{n\gamma}$ снижается до $\approx 10^{-3}$ с

$$1 / \tau_{n\gamma} = \rho_n \cdot v_n \cdot \sigma_{n\gamma}.$$

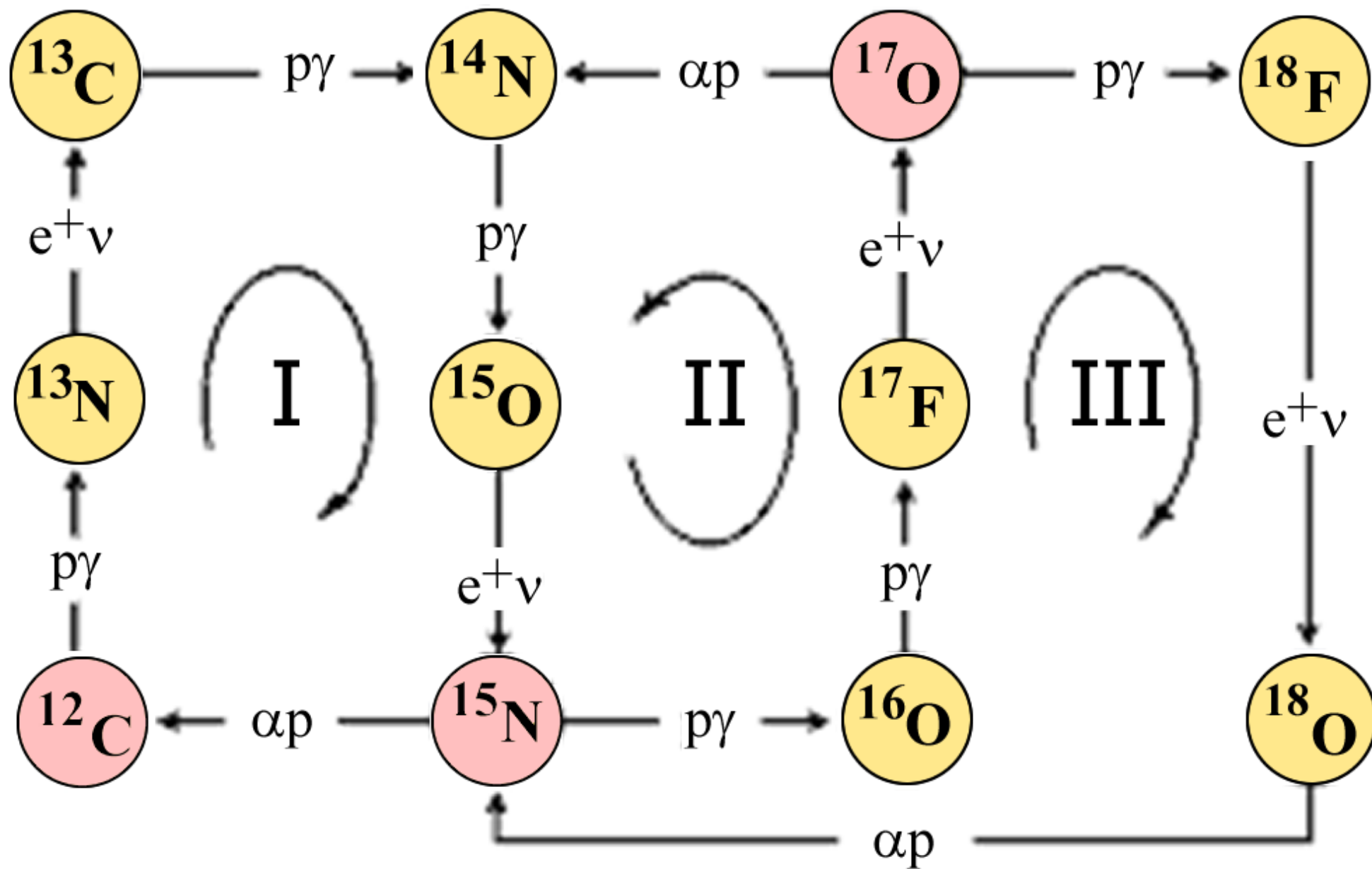
Выполняется условие

$$\tau_{n\gamma} \ll \tau_{\beta}.$$

Скорость захвата ядром нейтрона во много раз превышает скорость его β -распада. Захват нейтронов происходит до тех пор, пока скорость реакции (n, γ) не станет меньше скорости β -распада изотопа. При этом ядро успевает захватить 10-20 нейтронов прежде чем испытает β -распад. Такой процесс называют **быстрым** или **r-процессом** (от англ. *rapid*).

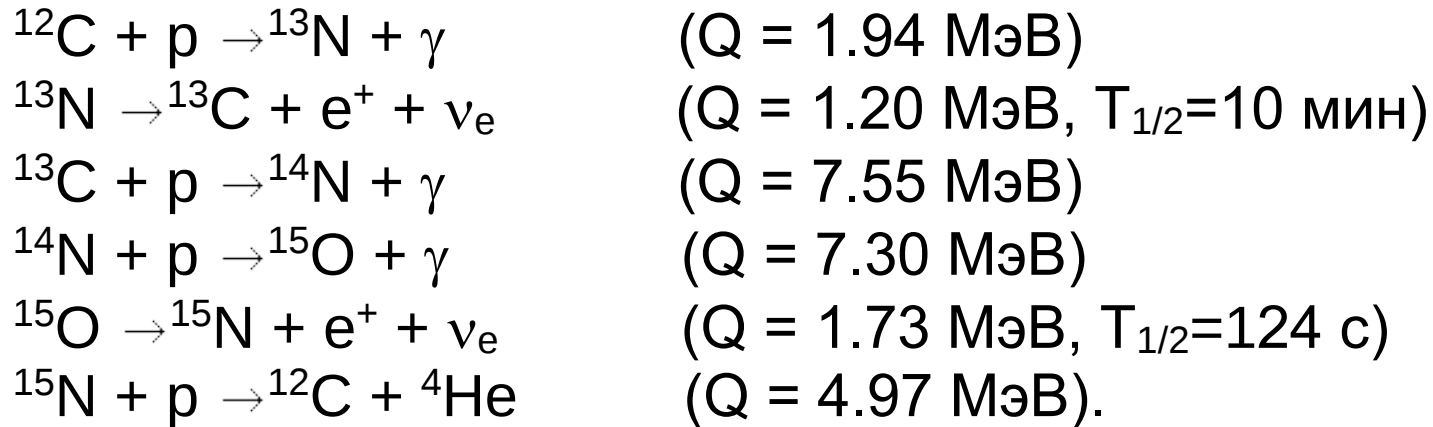
Необходимые для r-процесса плотности нейтронов возникают при взрывах Сверхновых. Расходящаяся ударная волна примерно за 0.5 с создаёт в оболочке горения гелия условия для интенсивного протекания реакции генерации нейтронов $^{22}\text{Ne}(\alpha, n)^{25}\text{Mg}$ и тем самым запускает r-процесс. Этот механизм образования элементов называют **взрывным нуклеосинтезом**. r-процесс может протекать и в насыщенных нейтронами ядрах Сверхновых. В этом случае вынос образованных элементов в поверхностные слои звезды, осуществляется за счёт разогретых нейтрино участков звезды.

CNO - цикл $T > 10^7$ К

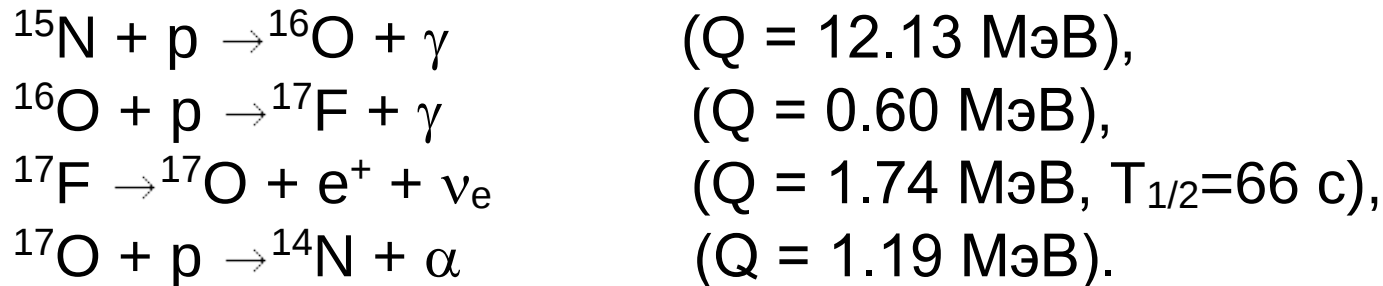


CNO - цикл

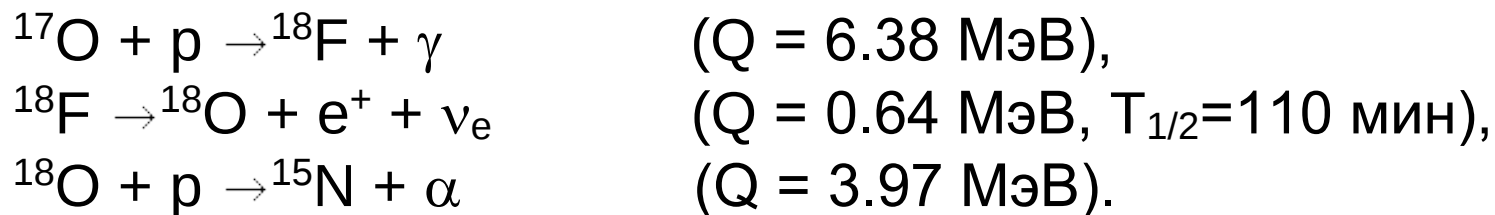
Цепочка реакций I



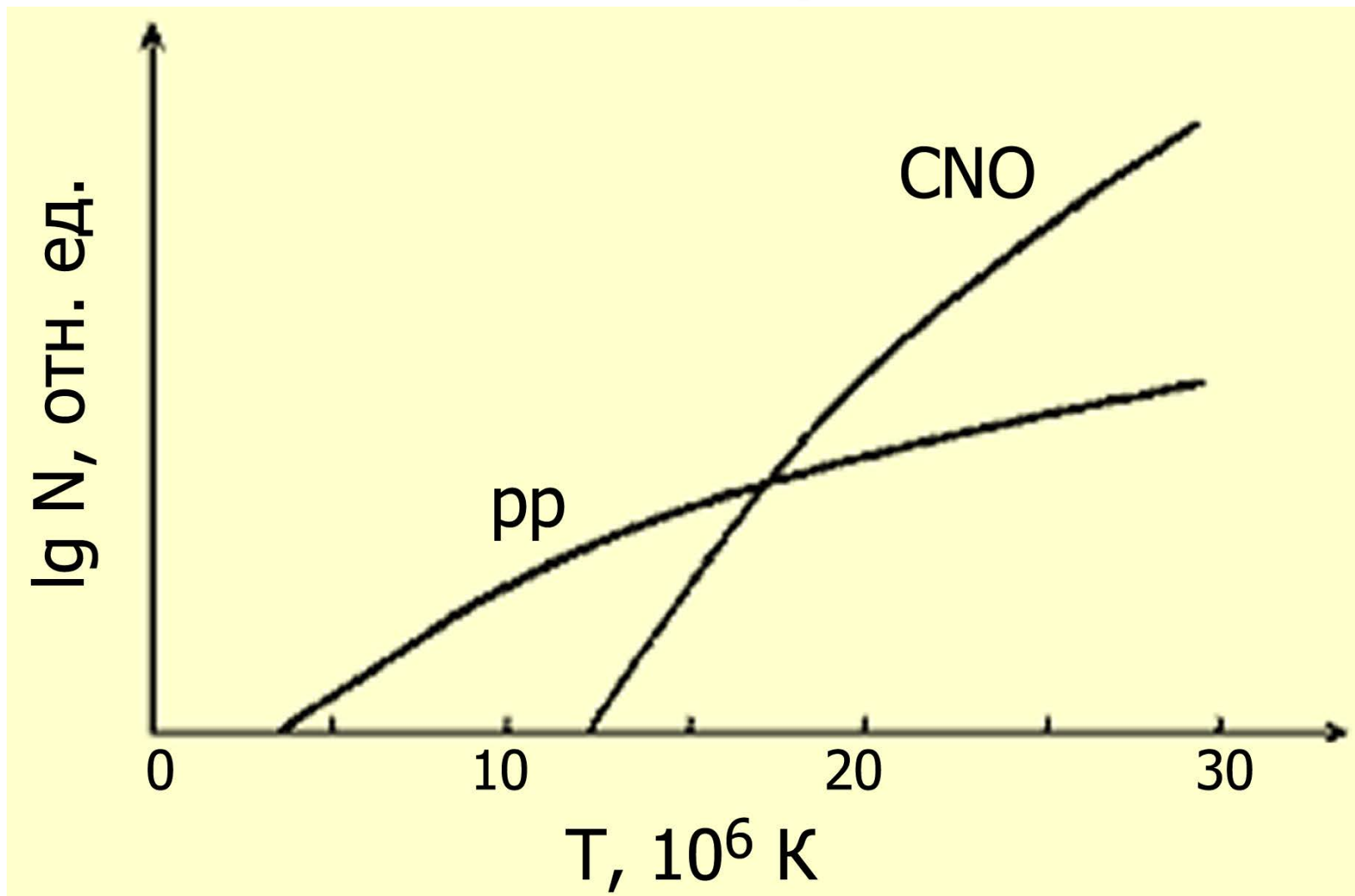
Цепочка реакций II



Цепочка реакций III

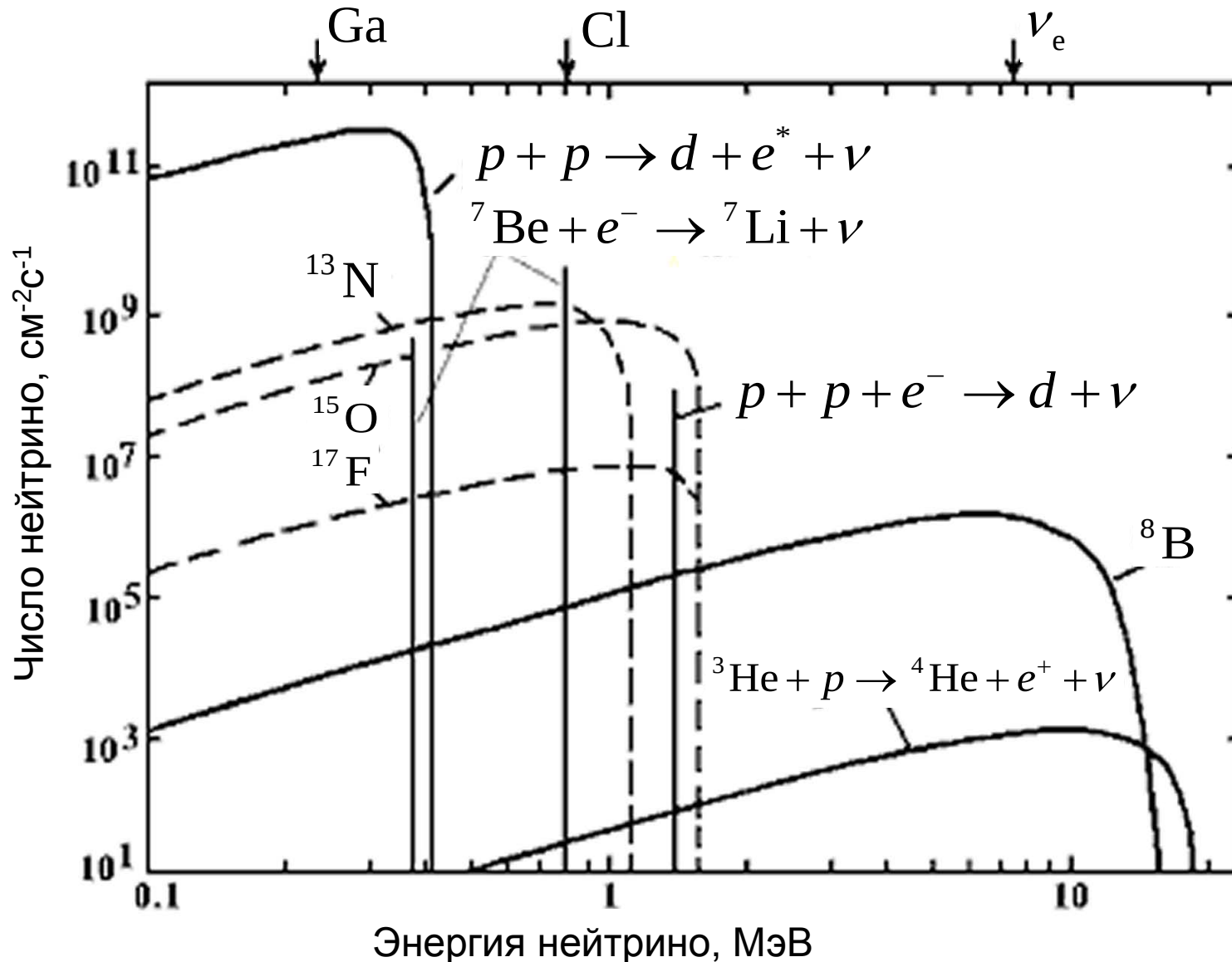


pp и CNO-циклы



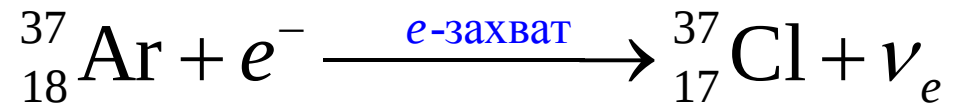
Температура в недрах Солнца $\sim 13 \cdot 10^6$ К, поэтому оно светит в основном за счет энергии, выделяющейся в водородном цикле.

Солнечные нейтрино



Спектр нейтрино, образующихся на Солнце в результате горения водорода в реакции $4p \rightarrow \alpha$ и в CNO-цикле.

Детектор Дэвиса



$$T_{1/2} \left({}_{18}^{37}\text{Ar} \right) = 35 \text{ дней}$$

Для регистрации солнечных нейтрино Дэвисом был сконструирован детектор, содержащий 380 тыс. литров раствора четыреххлористого углерода.

Проблема солнечных нейтрино

Поток нейтрино от Солнца оказался примерно вдвое меньше, чем предсказывала Стандартная солнечная модель!!!

Осцилляции нейтрино

$$\nu_e \longleftrightarrow \nu_\mu$$

$$\nu_e \longleftrightarrow \nu_\tau$$

$$\nu_\mu \longleftrightarrow \nu_\tau$$

$$m(\nu_{e,\mu,\tau}) \neq 0$$

Диаграмма Герцшпрунга-Рассела



Конечные этапы эволюции звезд

Белый карлик

$$R = 5 \cdot 10^3 \text{ км}$$

Предел Чандрасекара

$$M < 1,4M_{\odot}$$

Электронный газ

$$\rho \sim 5 \text{ тонн/см}^3$$

Нейтронная звезда

$$R \approx 10 \text{ км}$$

$$1,4M_{\odot} < M < 3M_{\odot}$$

Нейтронный газ

$$\rho = 10^9 \text{ тонн/см}^3$$

Черная дыра

$$R \approx 30 \text{ км}$$

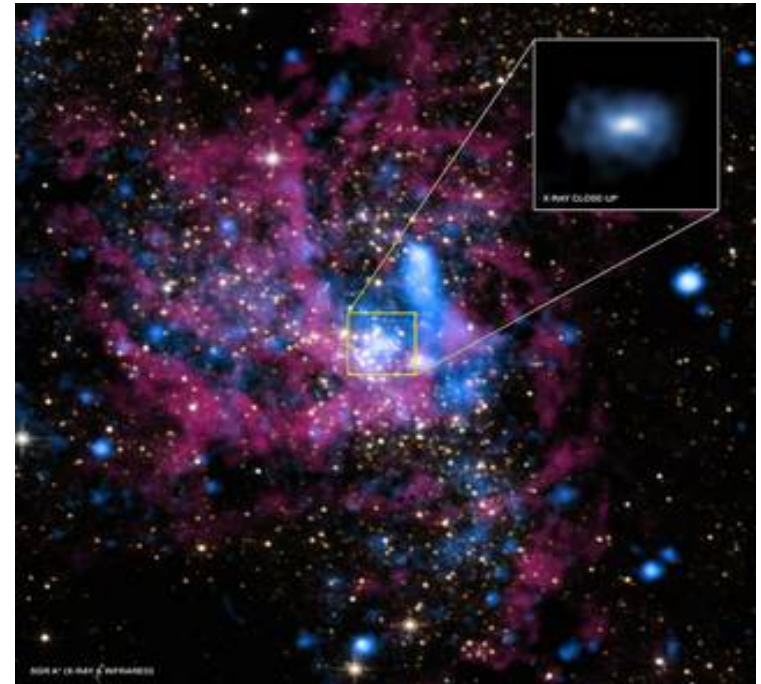
$$M > 3M_{\odot}$$

Горизонт событий

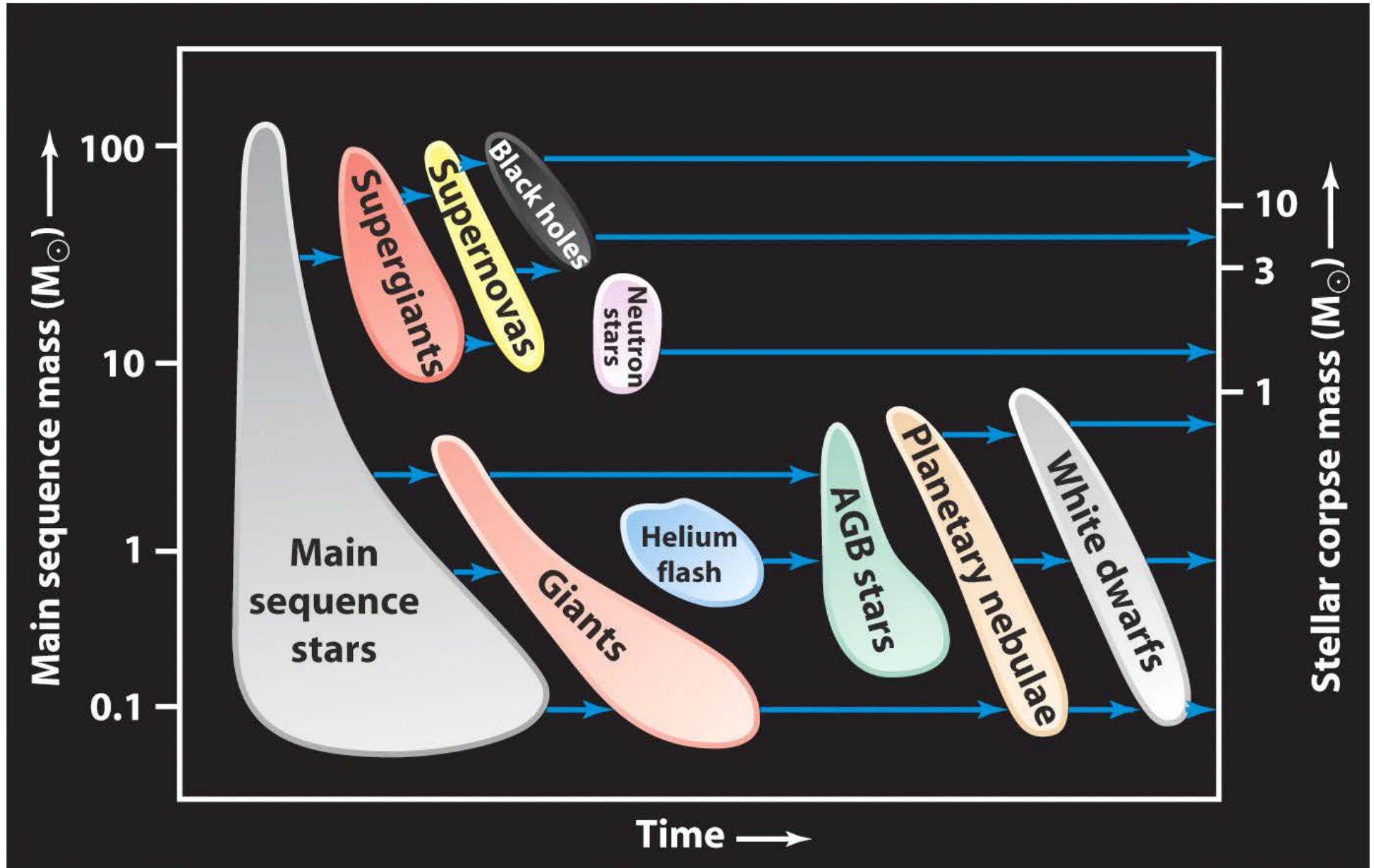
$$r_g = 2GM/c^2$$



Черная дыра в центре
галактики Млечный путь

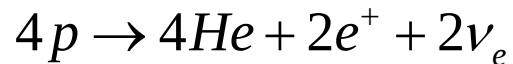


Конечные этапы эволюции звезд

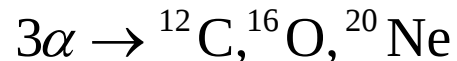


Ядерные реакции в звездах

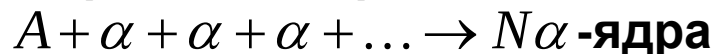
- Горение водорода. CNO-цикл



- Горение гелия.

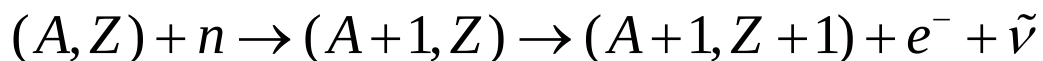


- α -процесс. Образование α -частичных ядер

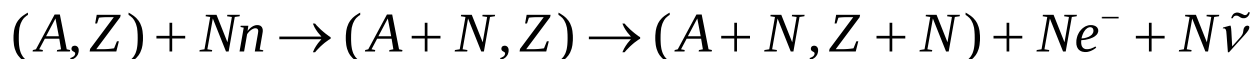


- E-процесс. Образование ядер в районе железного максимума в условиях термодинамического равновесия.

- s-процесс. Захват нейтронов происходит медленнее (slow), чем β -распад в последовательности процессов

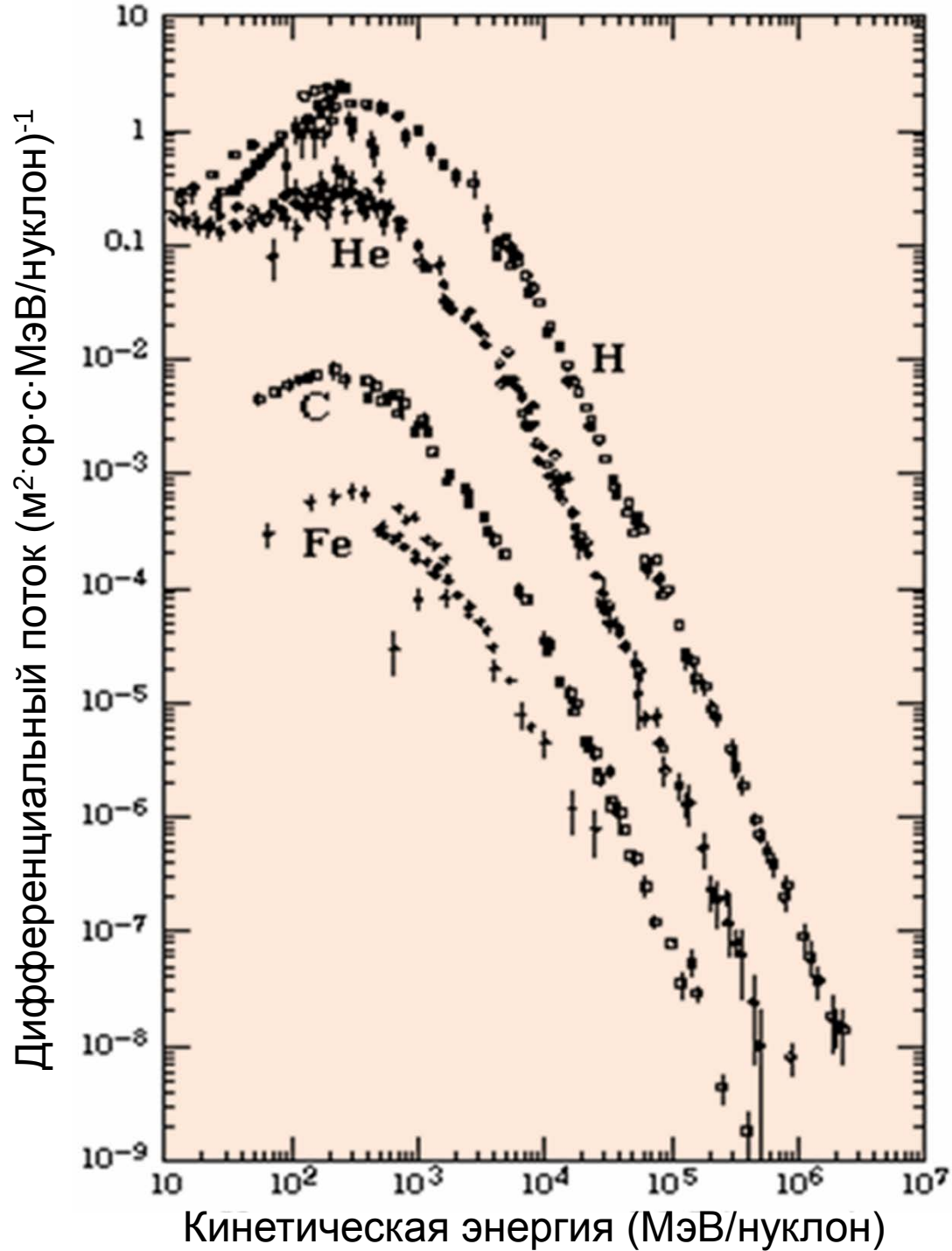


- r-процесс. . Захват нейтронов происходит быстрее (rapid), чем β -распад в последовательности процессов



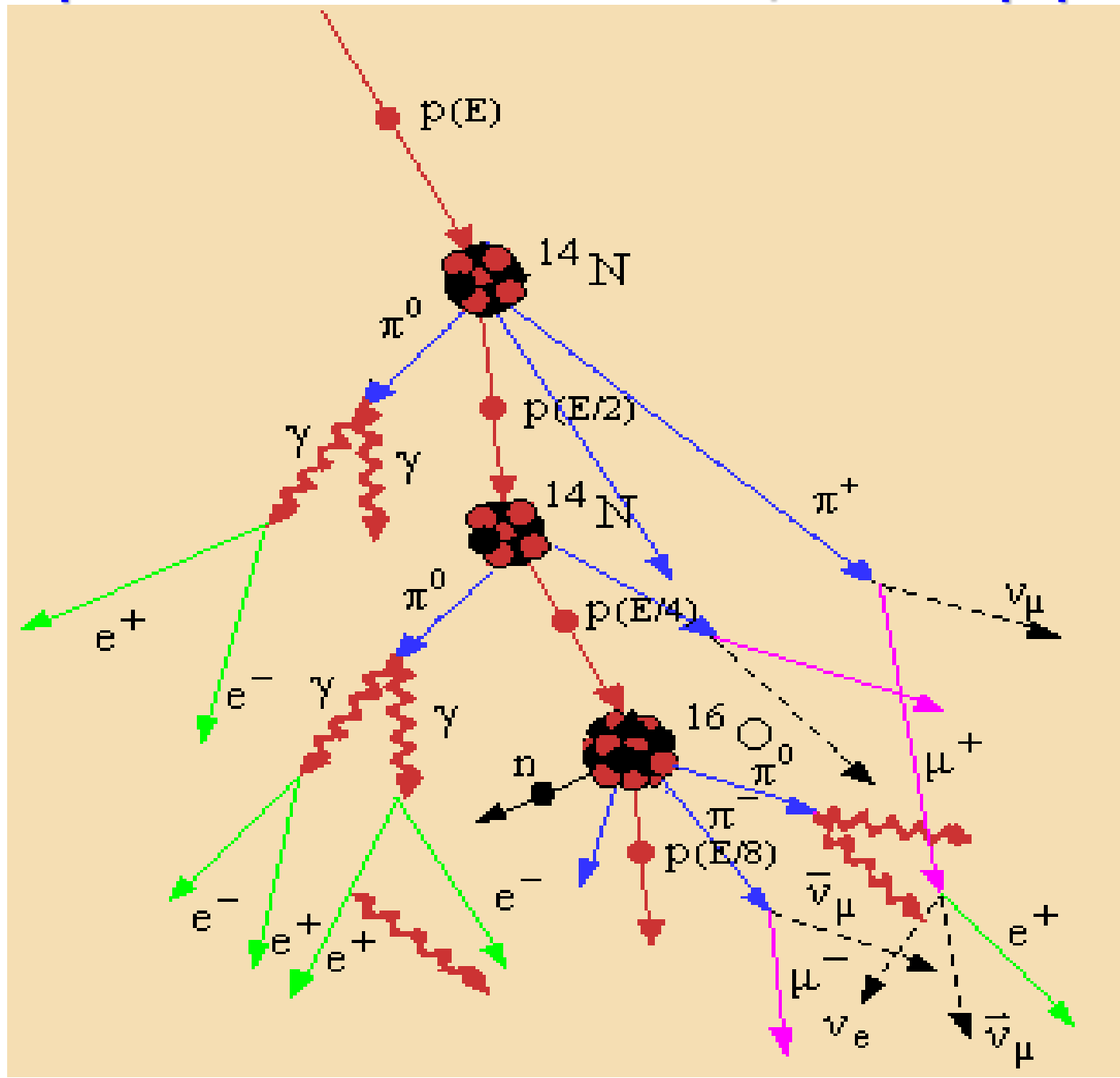
- p-процесс. Реакции образования лёгких изотопов химического элемента в реакциях (p, n) (p, γ) (γ, n) $(\gamma, 2n)$

- x-процесс. Реакции под действием космических лучей. Образование изотопов Li, Be, B.

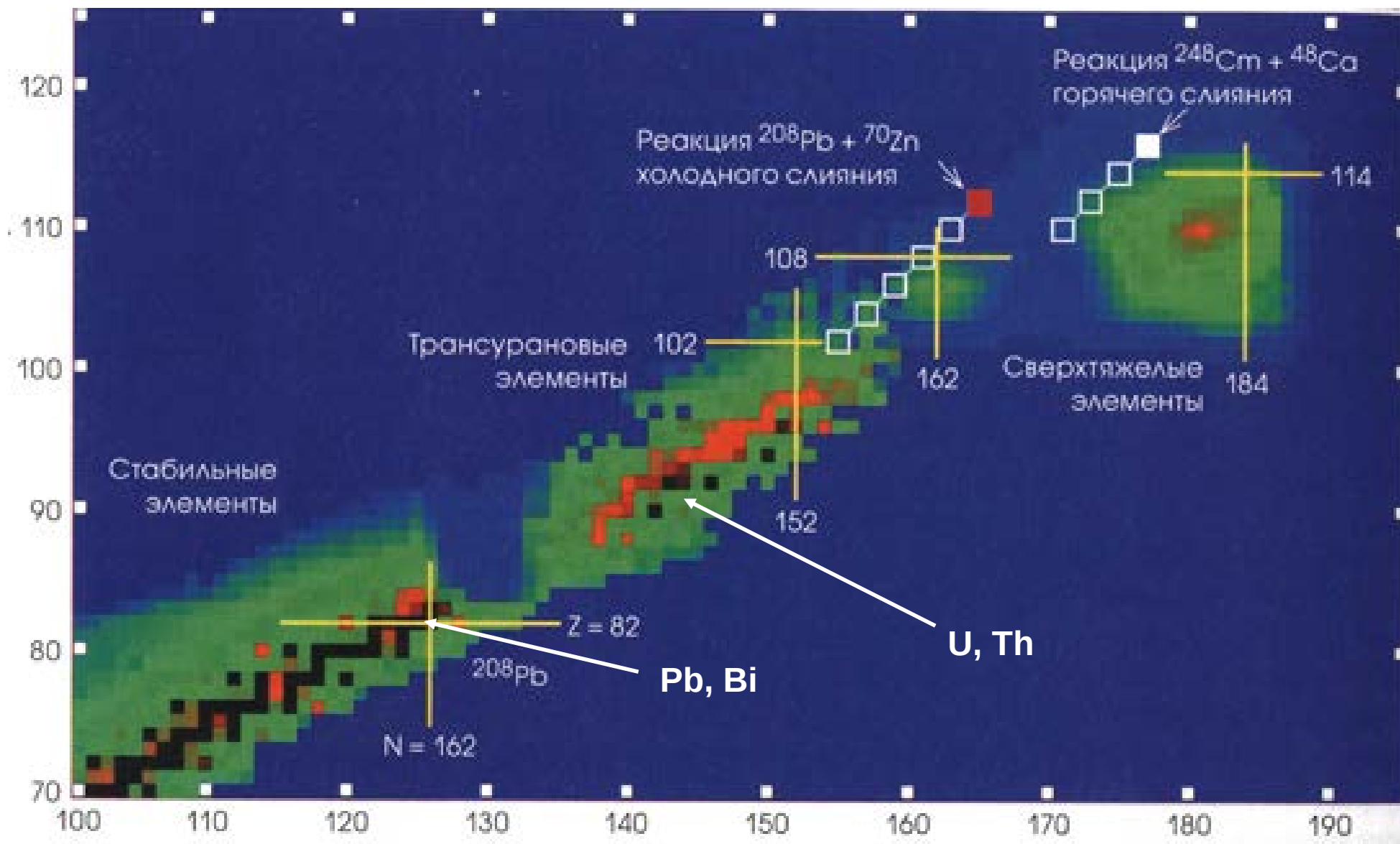


**Основные компоненты
первичных космических
лучей**

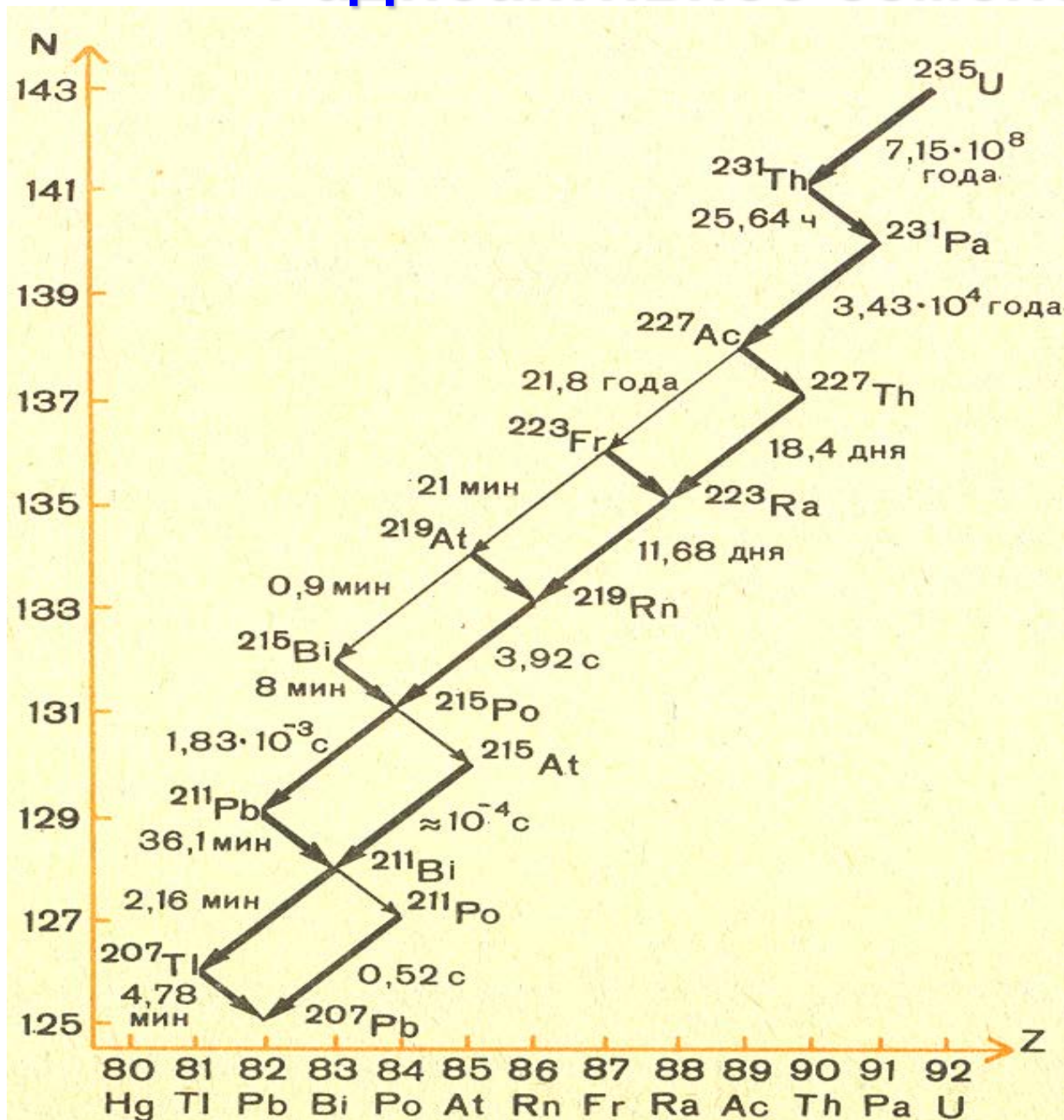
Каскад вторичных космических частиц в атмосфере Земли



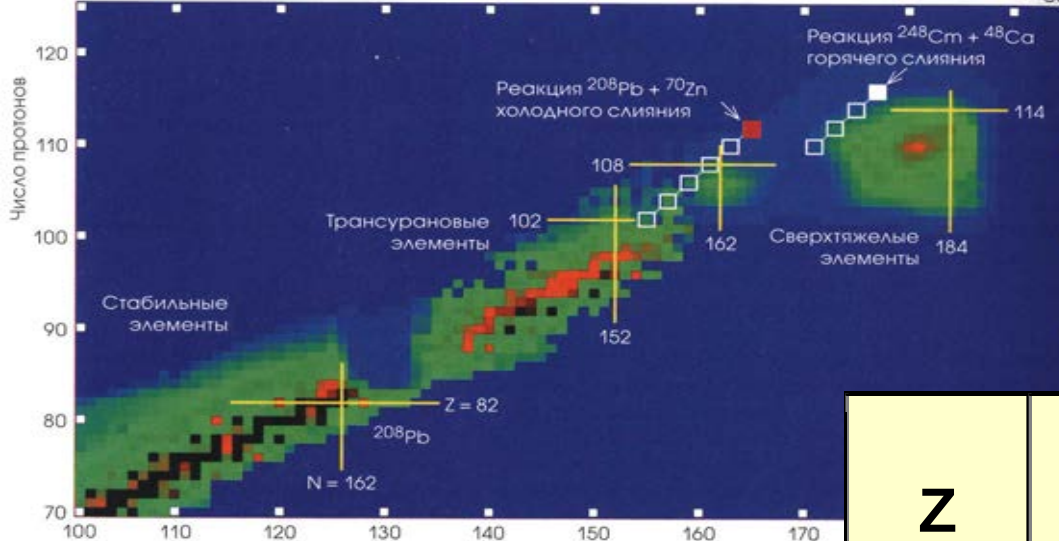
Изотопы Pb, Bi, U, Th



Радиоактивное семейство ^{235}U



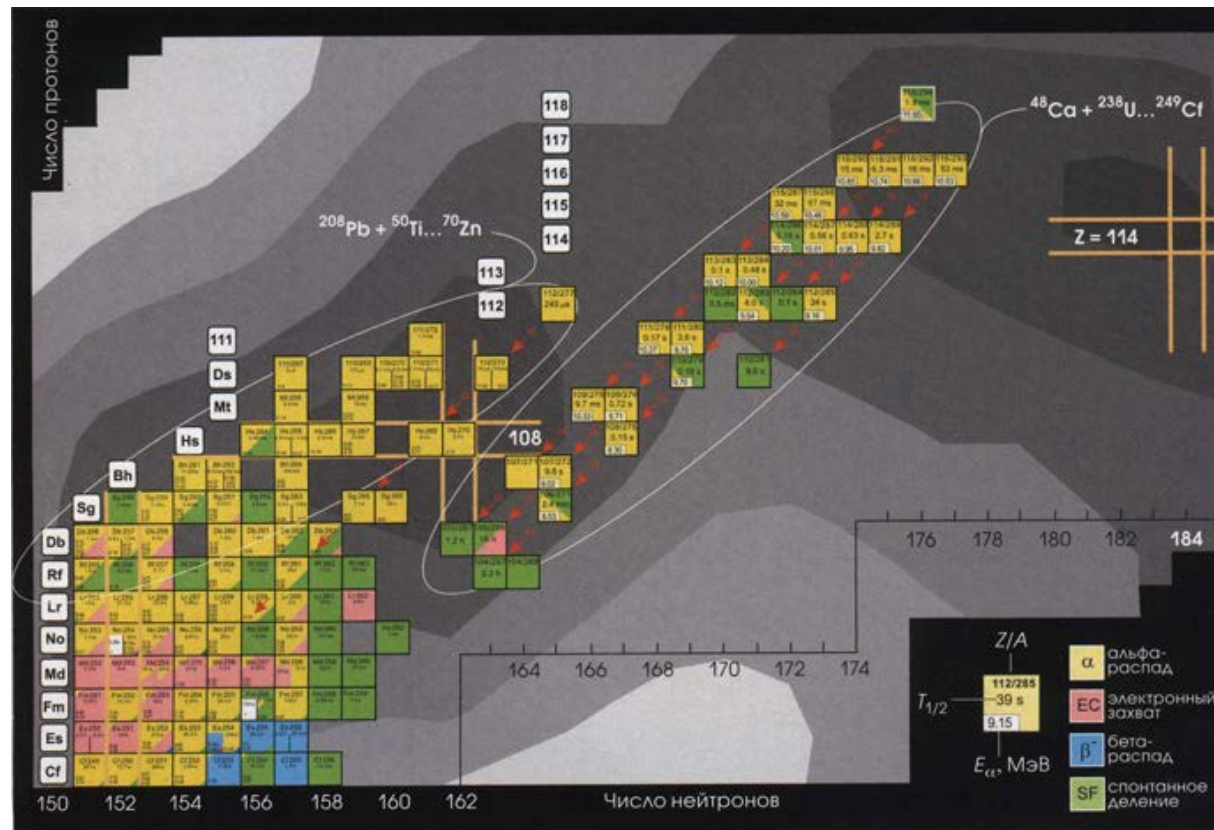
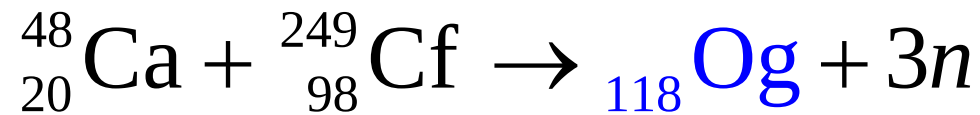
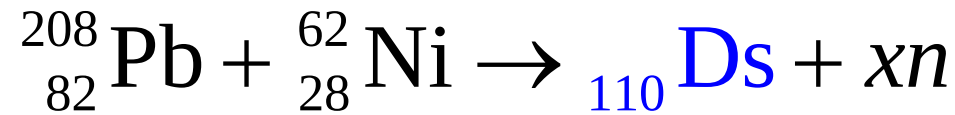
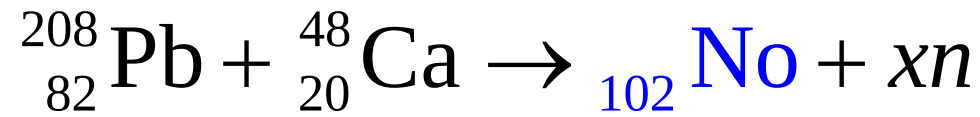
α -распад β -распад



Трансурановые элементы

Z	Реакции, в которых были впервые обнаружены изотопы Z=93÷101
93, 94	${}_{92}^{238}\text{U} + n \rightarrow {}_{92}^{239}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} {}_{93}^{239}\text{Np} \xrightarrow{\beta^-} {}_{94}^{239}\text{Pu}$
95	${}_{92}^{238}\text{U} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{94}^{241}\text{Pu} + n, {}_{94}^{241}\text{Pu} \rightarrow {}_{95}^{241}\text{Am} + e^- + \bar{\nu}_e$
96	${}_{94}^{239}\text{Pu} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{96}^{242}\text{Cm} + n$
97	${}_{95}^{241}\text{Am} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{97}^{243}\text{Bk} + 2n$
98	${}_{96}^{242}\text{Cm} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{98}^{245}\text{Cf} + n$
99	${}_{92}^{238}\text{U} + 15n \rightarrow {}_{92}^{253}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} {}_{93}^{253}\text{Np} \dots \xrightarrow{\beta^-} {}_{99}^{253}\text{Es}$
100	${}_{92}^{238}\text{U} + 17n \rightarrow {}_{92}^{255}\text{U} \xrightarrow{\beta^-} {}_{93}^{255}\text{Np} \dots \xrightarrow{\beta^-} {}_{100}^{255}\text{Fm}$
101	${}_{99}^{253}\text{Es} + {}_2^4\text{He} \rightarrow {}_{101}^{256}\text{Md} + n$

Сверхтяжелые элементы

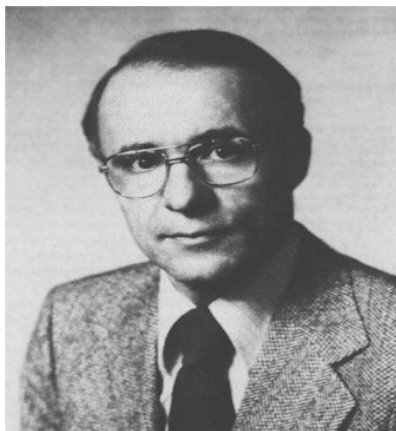


Крупномасштабная структура Вселенной

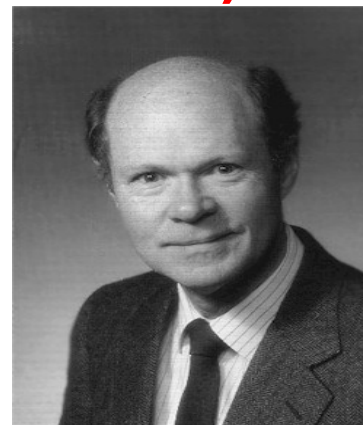


Каждой галактике соответствует одна точка ячеистой сетчатой структуры с характерных размером ячейки 100 млн. световых лет.

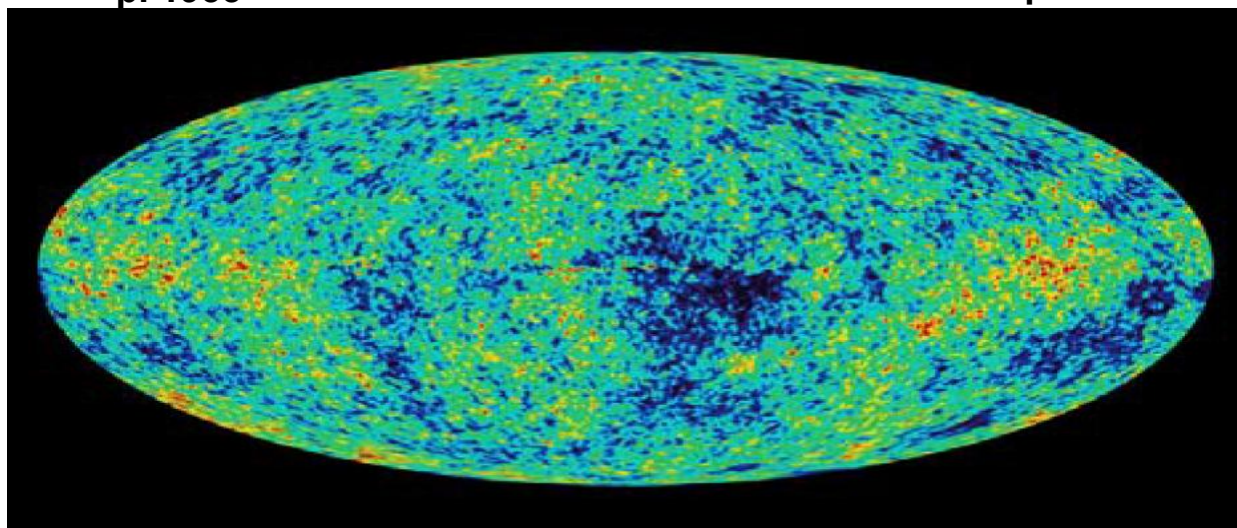
Микроволновое фоновое (реликтовое) излучение



Арно Пензиас
(Arno Allan Penzias)
р. 1933



Роберт Вудро Вильсон
(Robert Woodrow Wilson)
р. 1936



Нобелевская премия по физике

1978 г. — А. Пензиас и Р. В. Вильсон

За открытие космического микроволнового фонового излучения

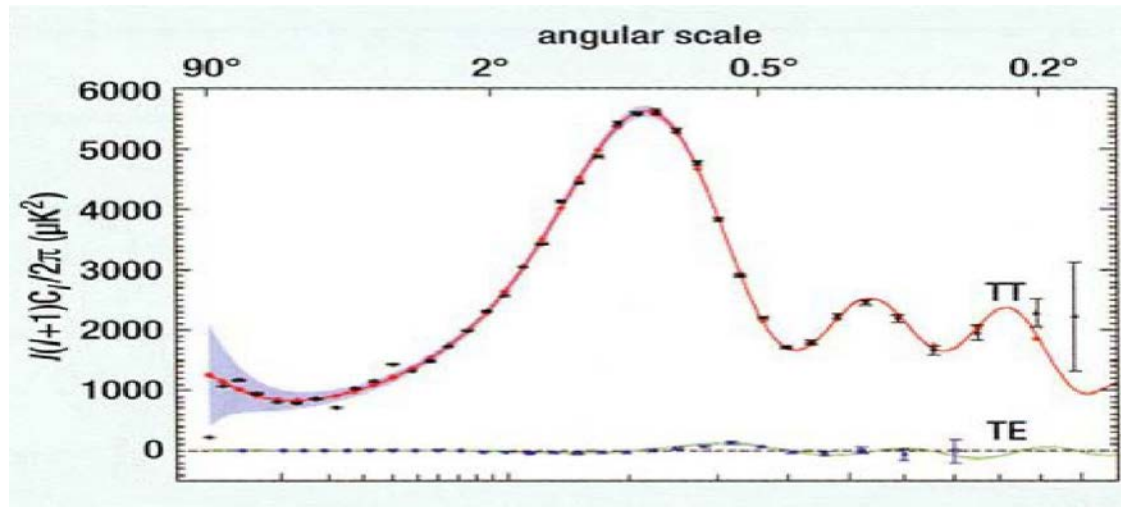
Микроволновое фоновое (реликтовое) излучение



John C. Mather
р. 1946



George F. Smoot
р. 1945



Нобелевская премия по физике

2006 г. — Дж. Матер и Дж. Смут

За открытие чернотельной формы и анизотропии космического микроволнового фонового излучения

Эдвин Хаббл (1889-1953)



1924

туманность Андромеда – другая
галактика

1929

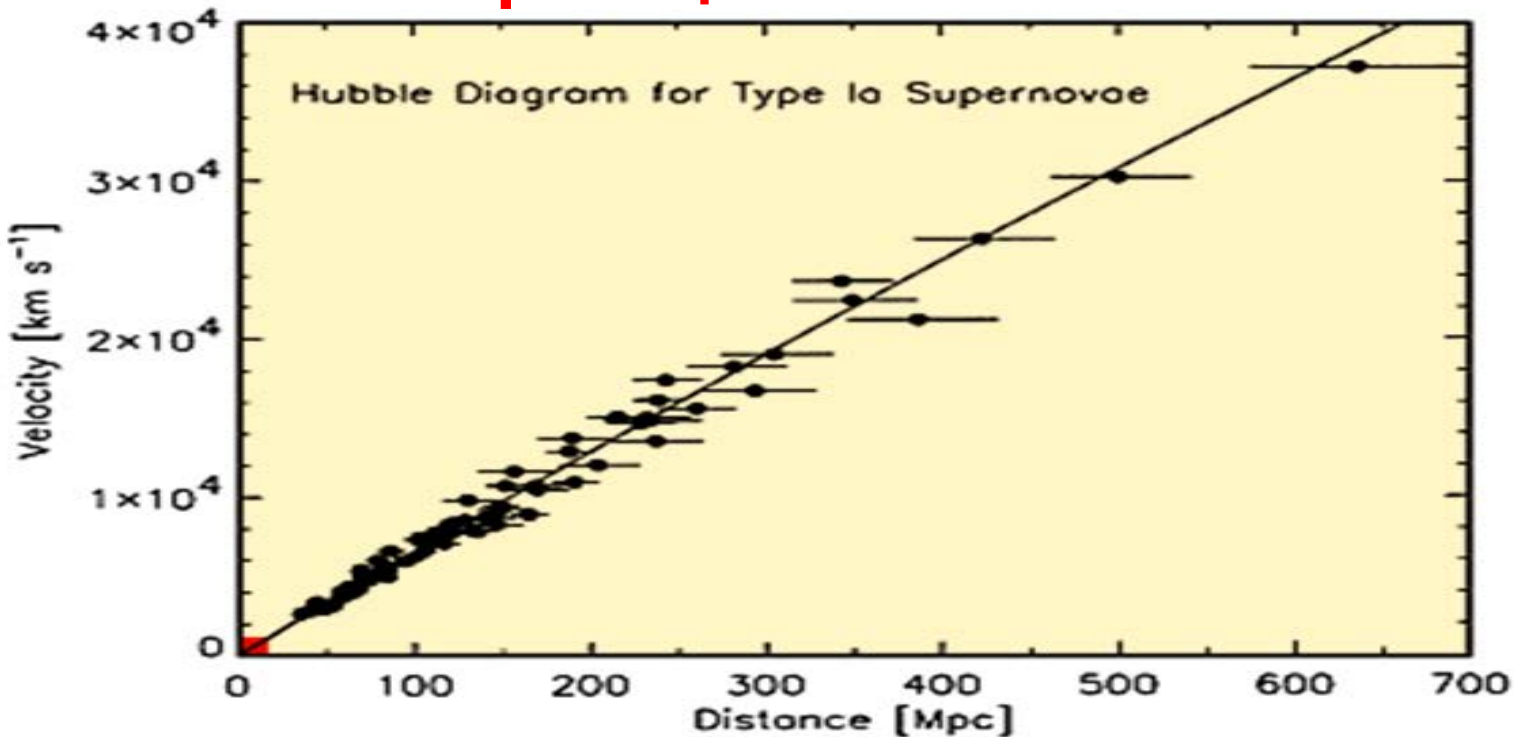
красное смещение, разбегание галактик

1990

запуск телескопа Хаббл



Расширяющаяся Вселенная



В 1929 г. Э. Хаббл установил, что Вселенная расширяется, обнаружив красное смещение видимого излучения галактик за счет эффекта Доплера. Скорость разлёта v двух галактик и расстояние R между ними связаны законом Хаббла

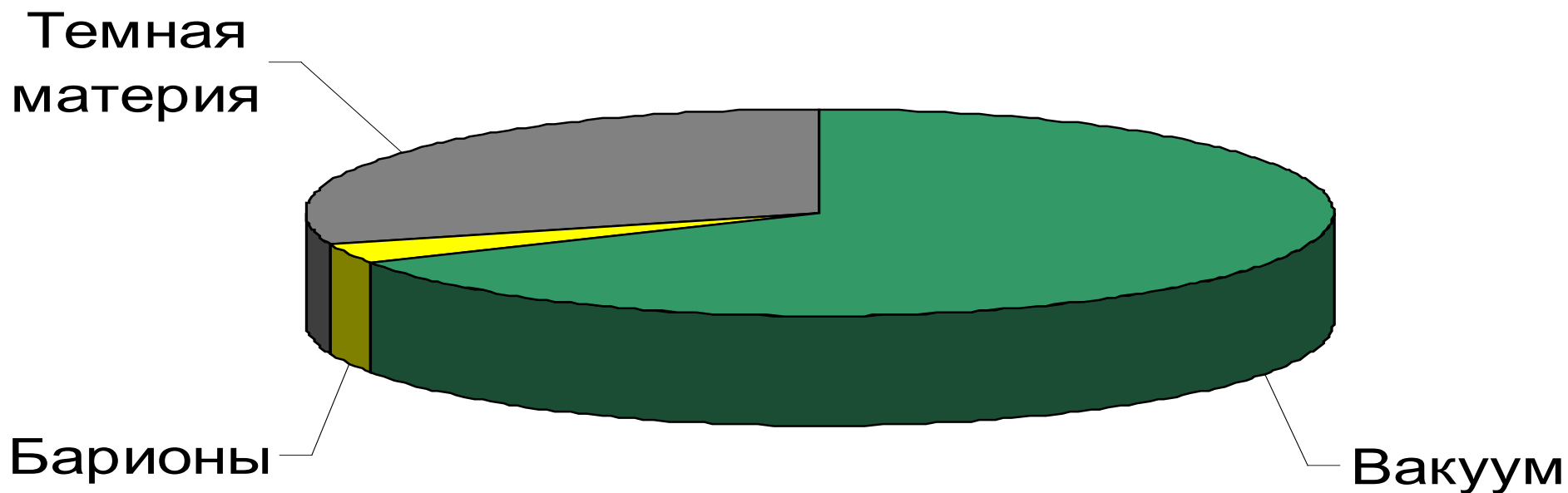
$$v = HR,$$

постоянная Хаббла $H = 71 \pm 4 \frac{\text{км}}{\text{сек} \cdot \text{мегапарсек}}$.

Согласно космологической модели Большого Взрыва Вселенная образовалась около 15 млрд. лет назад. «Осколки» этого Взрыва представляют собой разлетающиеся галактики. Вселенная продолжает расширяться и в настоящую эпоху.

Характеристики Вселенной

БАРИОНЫ	0.02-0.05
в том числе, ЗВЁЗДЫ:	0.002-0.003
ФОТОНЫ	$4.9 \cdot 10^{-5}$
НЕЙТРИНО	$3.3 \cdot 10^{-5}$
ТЁМНАЯ МАТЕРИЯ	0.2-0.4
ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ (ВАКУУМ)	0.6-0.8
ПОЛНАЯ ПЛОТНОСТЬ ВЕЩЕСТВА-ЭНЕРГИИ	1.02 ± 0.02



Темная материя

1933 г. Ф. Цвики

Откуда следует существование темной материи

- Линзирование
- Большие скорости галактик
- Горячие газовые облака
- Эффект Доплера

Возможные источники

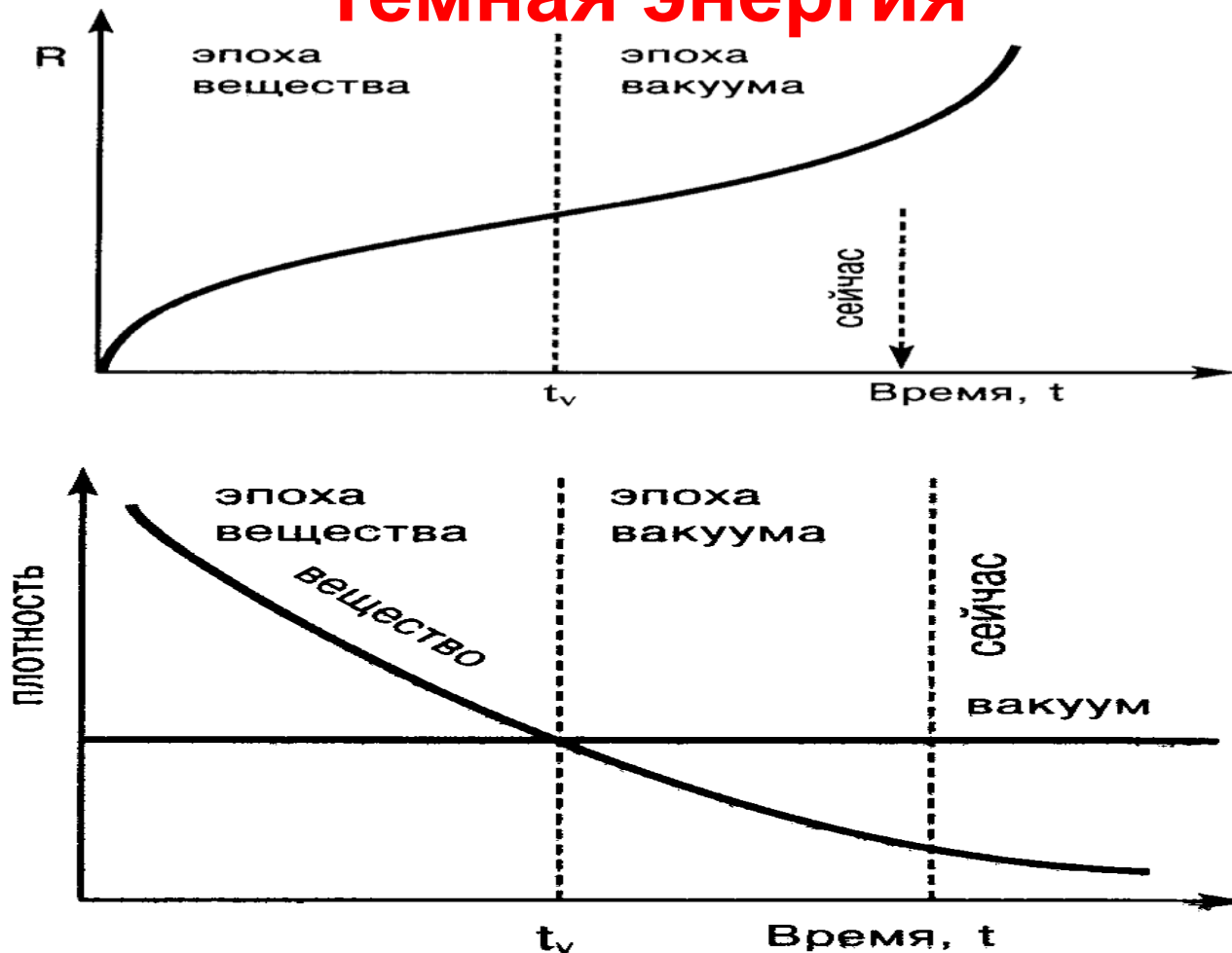
I MACHOs – Massive Astrophysical Compact Halo Objects

Массивные астрофизические объекты в гало галактики

- Черные дыры
- Старые нейтронные звезды
- Коричневые карлики

II WIMPs – Weakly Interacting Massive Particles

Темная энергия



В начале 1998 г. было сделано открытие. Оказалось, что последние пять млрд лет расширение Вселенной не замедлялось, как следует из модели Большого Взрыва, а ускорялось. Этот вывод получен в результате анализа спектров излучения взрывающихся Сверхновых, расположенных от Земли на расстоянии 5-10 млрд световых лет. Таким образом, было доказано наличие в космосе гравитационного отталкивания, присущего физическому вакууму.

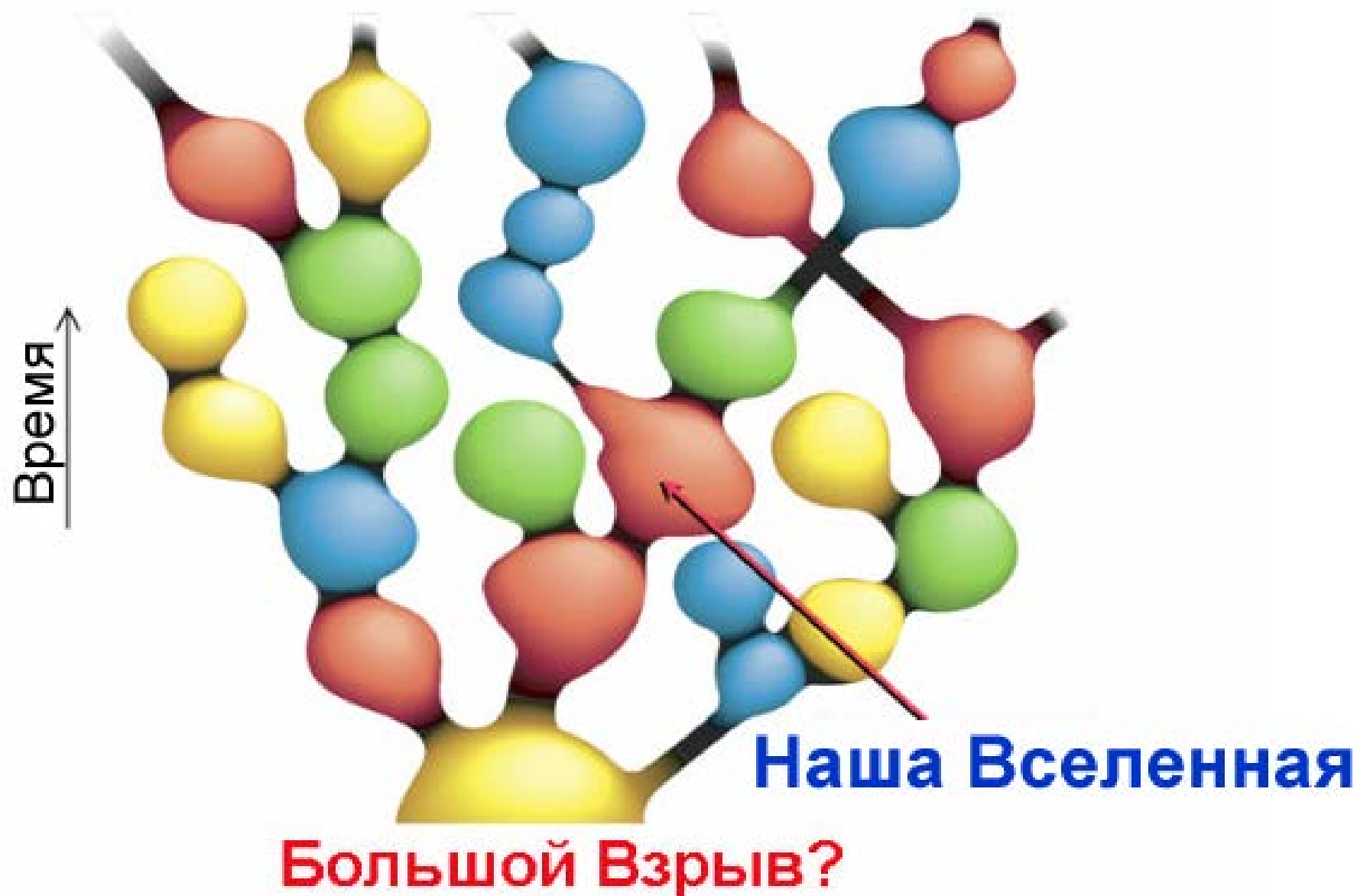
Проблемы современной модели Вселенной

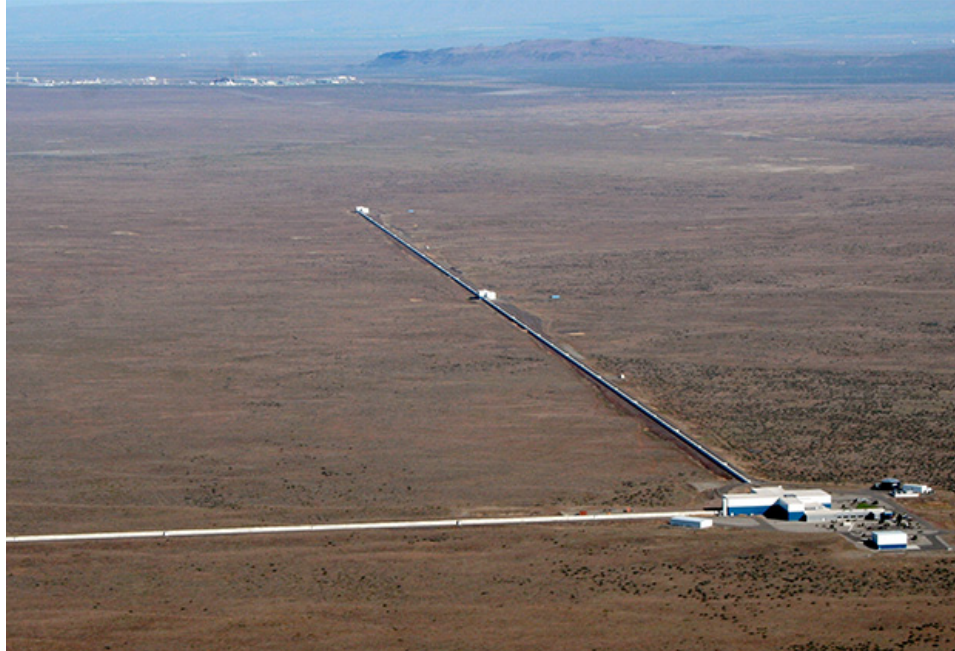


Проблемы современной модели Вселенной

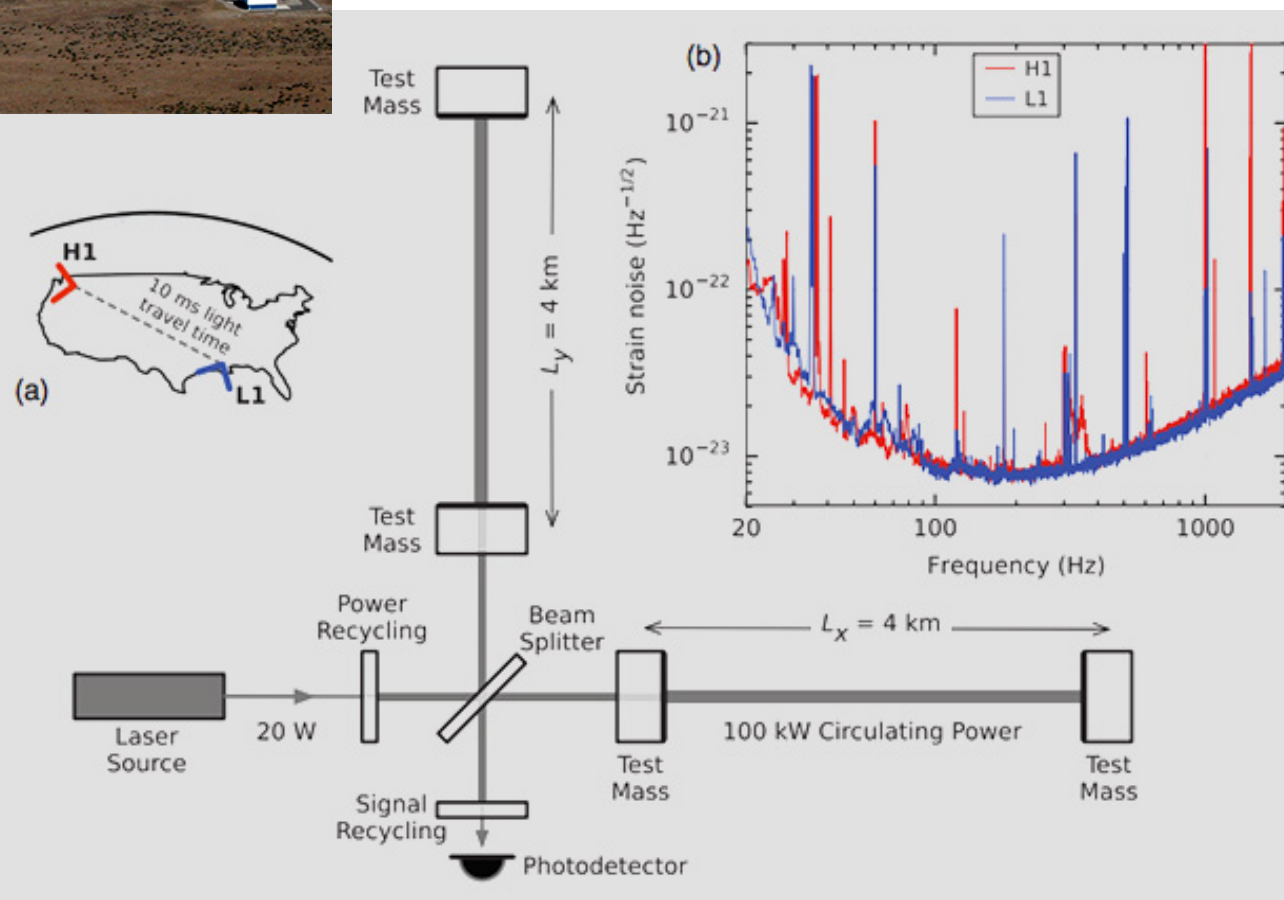
1. Природа темной материи
2. Природа темной энергии
3. Стабильность протона
4. Асимметрия вещество-антивещество
5. Почему существуют три поколения фундаментальных частиц, состоящих из пары кварков и лептонов?
6. Существуют ли четвертое, пятое, ... поколения фундаментальных частиц?
7. Почему существуют кварки и лептоны, и чем вызвано различие между ними?
8. Почему фундаментальными частицами вещества являются фермионы, в то время как фундаментальными переносчиками взаимодействия — бозоны?
9. Почему разные фундаментальные частицы имеют разные массы?
10. Почему различаются пространственная и временная степени свободы?
11. Живем ли мы в четырехмерном пространстве-времени, или оно имеет большее число измерений?
12. Существуют ли кванты пространства и времени?

Параллельные Вселенные





Интерферометр LIGO



Эволюция Вселенной

Время после Большого взрыва	Характерные температуры, К	Этап/Событие
$< 10^{-43}$ с	$> 10^{32}$	Квантовый хаос. Суперсимметрия (объединение всех взаимодействий)
10^{-43} с	10^{32}	Планковский момент. Отделение гравитационного взаимодействия
$10^{-43} - 10^{-36}$ с	$10^{32} - 10^{28}$	Великое объединение электро-слабого и сильного взаимодействий
10^{-36} с	10^{28}	Конец Великого объединения. Разделение сильного и электро-слабого взаимодействий
10^{-35} с	10^{28}	Окончание инфляционной стадии расширения Вселенной
10^{-10} с	10^{15}	Конец электрослабого объединения
10^{-6} с	10^{13}	Кварк-адронный фазовый переход
$10^{-10} - 10^{-4}$ с	$10^{15} - 10^{12}$	Адронная эра. Рождение и аннигиляция адронов и лептонов
$10^{-4} - 10$ с	$10^{12} - 10^{10}$	Лептонная эра. Рождение и аннигиляция лептонов
$0.1 - 1$ с	$2 \cdot 10^{10}$	Отделение нейтрино. Вселенная становится прозрачной для нейтрино (антинейтрино)
$10^2 - 10^3$ с	$\approx 10^9$	Дозвёздный синтез гелия
10 с – 40 000 лет	$10^{10} - 10^4$	Радиационная эра. Доминирование излучения над веществом
40 000 лет	10^4	Начало эры вещества. Вещество начинает доминировать над излучением
400 000 лет	$3 \cdot 10^3$	Образование атомов. Разделение вещества и излучения (Вселенная прозрачна для излучения)
1 млрд. лет	20	Образование галактик
3 млрд. лет	10	Образование тяжелых ядер при взрывах звезд
10 – 15 млрд. лет	3	Появление планет и разумной жизни
10^{14} лет	10^{-2}	Прекращение процесса рождения звезд
10^{37} лет	10^{-18}	Прекращение выделения энергии в звездах
10^{40} лет	10^{-20}	Испарение черных дыр и рождение элементарных частиц
10^{100} лет	$10^{-60} - 10^{-40}$	Завершение испарения всех черных дыр

Антропный принцип

Слабый антропный принцип. Наше положение во Вселенной с необходимостью является привилегированным в том смысле, что оно должно быть совместимо с нашим существованием как наблюдателей.

Сильный антропный принцип. Вселенная и, следовательно, фундаментальные параметры, от которых она зависит, должна быть такой, чтобы в ней на некотором этапе эволюции допускалось существование наблюдателей.

Соотношение между физическими константами необходимые для существования жизни. Если бы эти константы отличались от наблюдаемых значений на небольшую величину, разумная жизнь не могла бы образоваться.

1. Значение масс электрона, протона и нейтрона.
 2. Размерность пространства-времени.
 3. Величина энергии связи дейтрона.
 4. Резонанс в ядре ^{12}C при энергии 7,65 МэВ.
 5. Величины скорости света и постоянной Планка.
 6. Величина заряда электрона
- и др.



И. Босх
(1450 — 1516)

«Странник»



Рембрандт
(1606 — 1669)

«Возвращение
блудного сына»