

# Мир атомных ядер

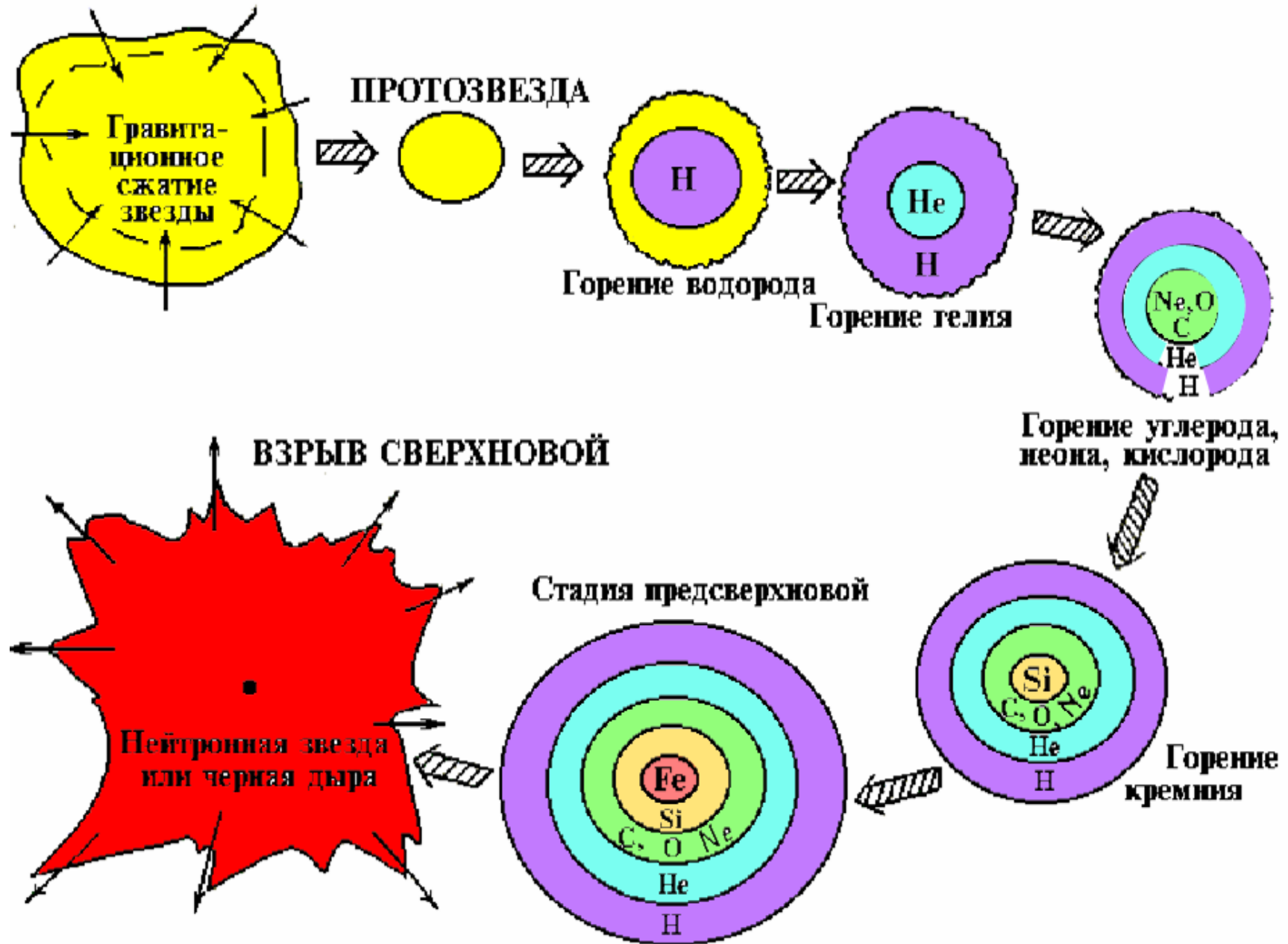
# **ЗВЕЗДНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ**

**Образование тяжелых элементов**

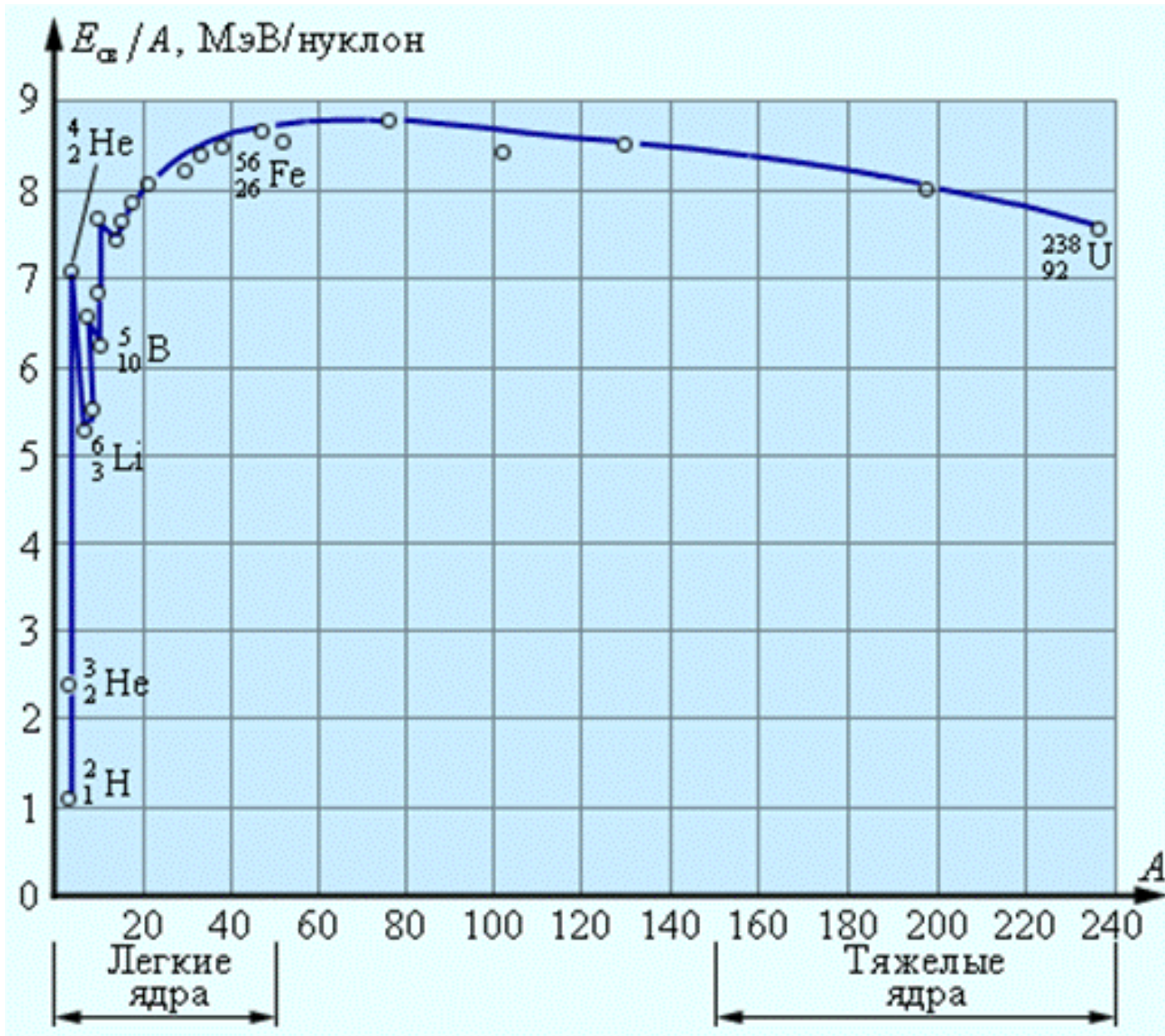
## Ядерные реакции синтеза в звёздах различной массы

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 $M > 25 M_{\odot}$

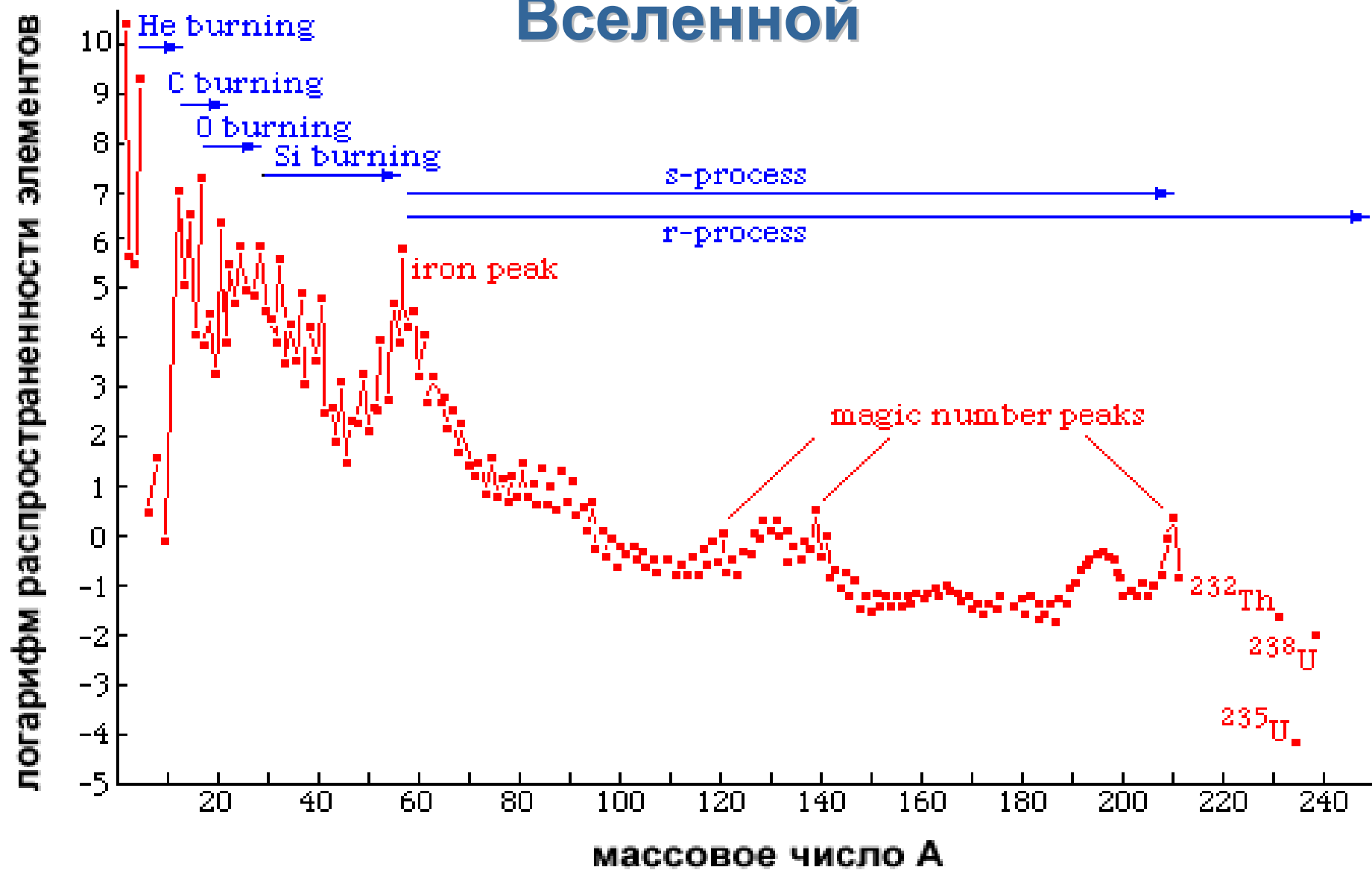


# Предел термоядерного синтеза



удельная  
энергия  
связи  
атомных  
ядер

# Распространенность нуклидов во Вселенной



Распространенность Si принята равной  $10^6$ .

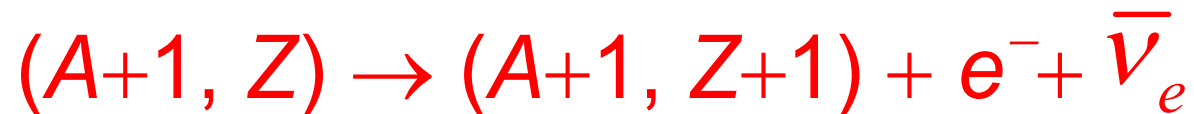
**s – процесс**

# s – процесс

Для образования тяжёлых элементов решающую роль играет захват ядрами нейтронов – реакция  $(n, \gamma)$ :



Если образовавшееся в результате захвата нейтрона ядро  $(A+1, Z)$  нестабильно, то при малых плотностях нейтронов  $\beta^-$ -распад этого ядра



более вероятен, чем захват им следующего нейтрона.

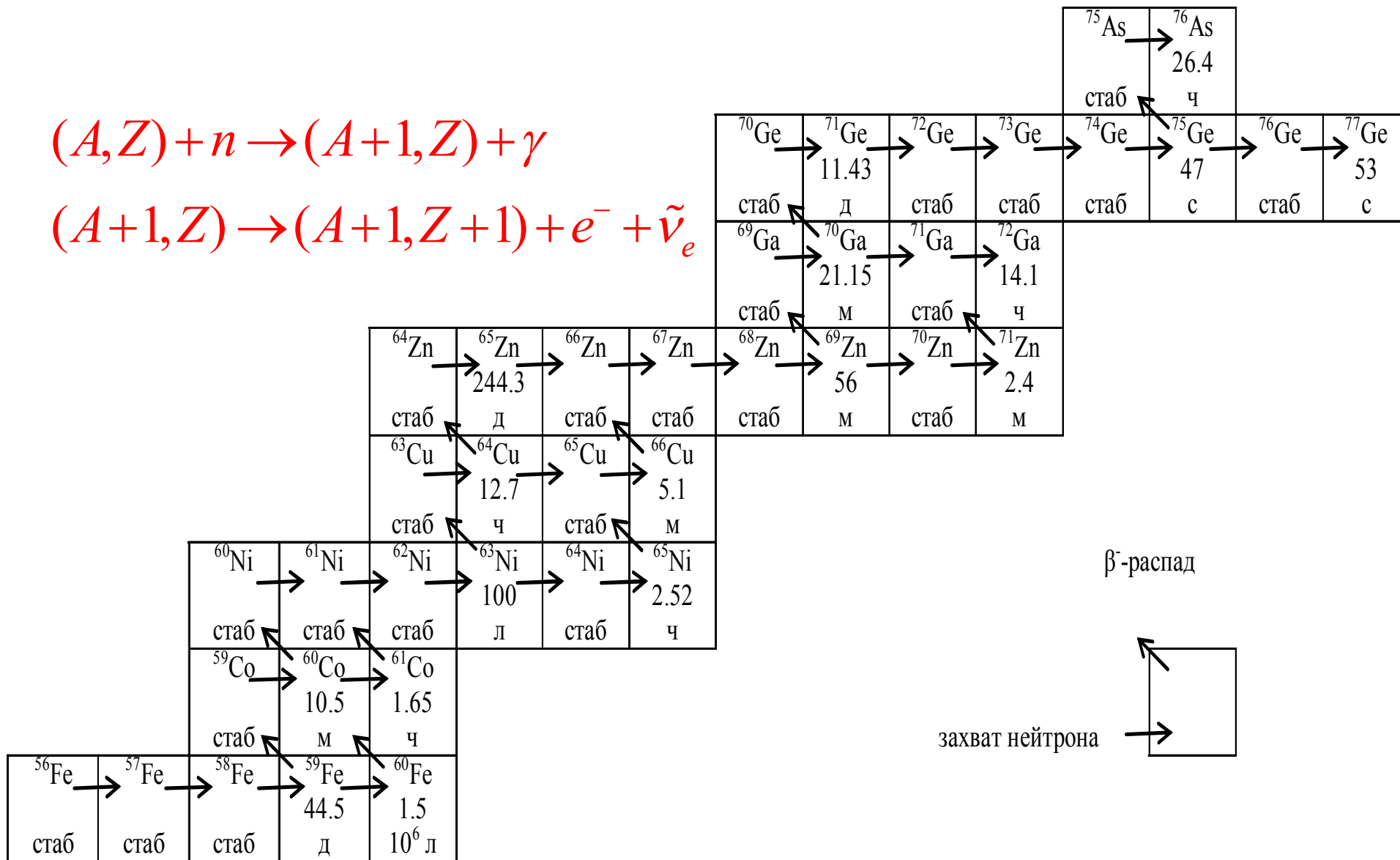
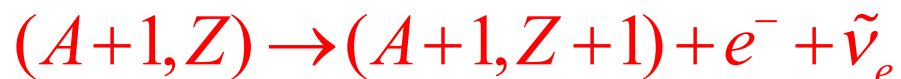
$$\tau_{n\gamma} \gg \tau_{\beta},$$

$\tau_{n\gamma}$  — время жизни ядра до захвата нейтрона. Такой процесс называют *медленным* или *s-процессом* (от англ. *slow*).

Характерные значения  $\tau_{n\gamma}$  – годы.



# s – процесс



## Нейтроны для s - процесса

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



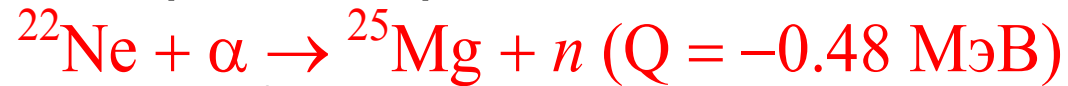
Для первой реакции требуются условия, при которых происходит совместное горение водорода и гелия. В качестве механизма, создающего такие условия, рассматривается соприкосновение конвективной оболочки звезды, в которой происходит горение гелия, с богатой водородом внешней оболочкой. Образование нейтронов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



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

# Нейтроны для s - процесса

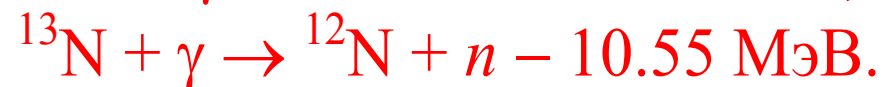
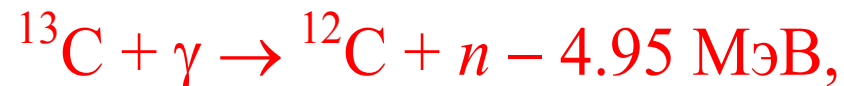
Образование нейтронов в реакции



зависит от наличия  $^{14}\text{N}$  в зоне горения гелия. Источником ядер  $^{14}\text{N}$  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.

**r – процесс**

# r - процесс

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

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

Выполняется условие

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

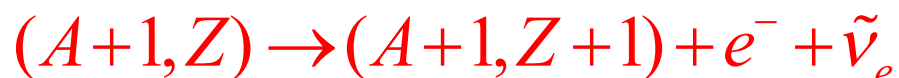
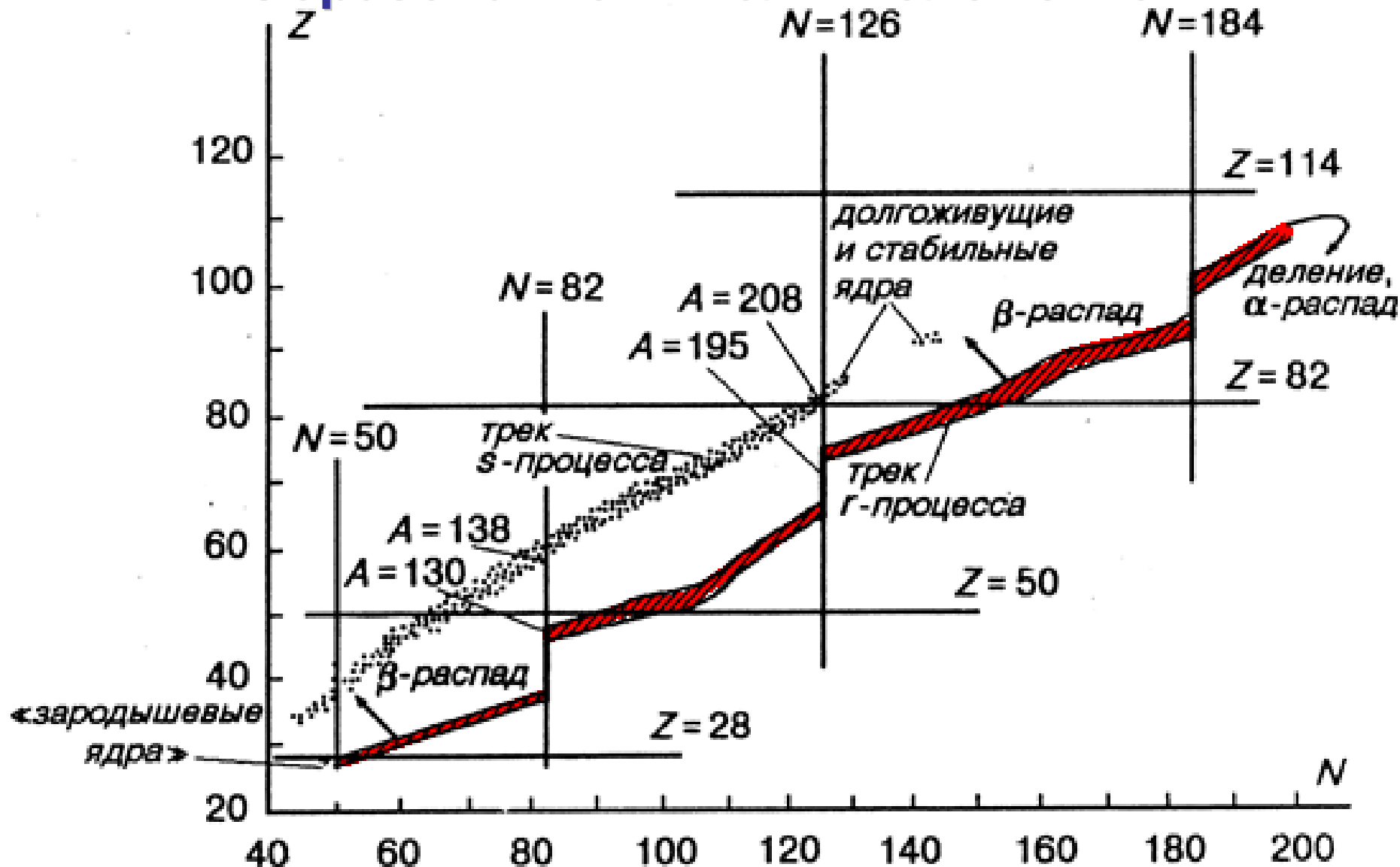
Скорость захвата ядром нейтрона во много раз превышает скорость его  $\beta$ -распада. Захват нейтронов происходит до тех пор, пока скорость реакции  $(n, \gamma)$  не станет меньше скорости  $\beta$ -распада изотопа. При этом ядро успевает захватить 10-20 нейтронов прежде чем испытает  $\beta$ -распад.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

# r - процесс

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.

# Образование тяжелых элементов

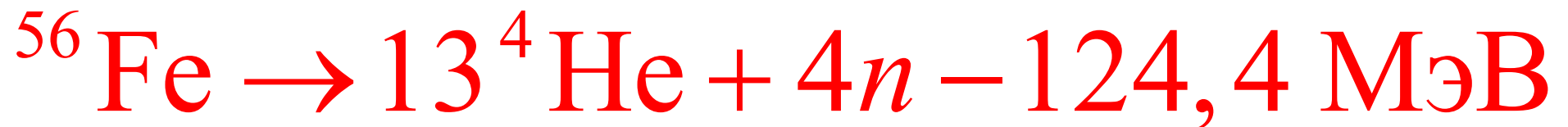


# **Взрыв Сверхновой**



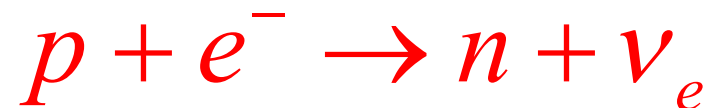
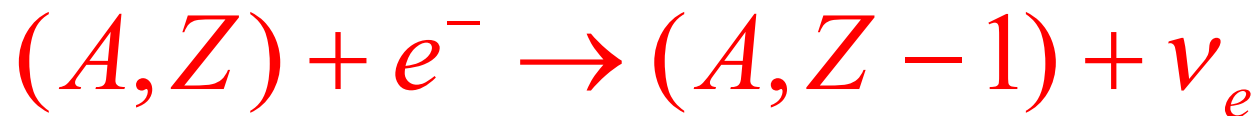
# Фоторасщепление железа

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.



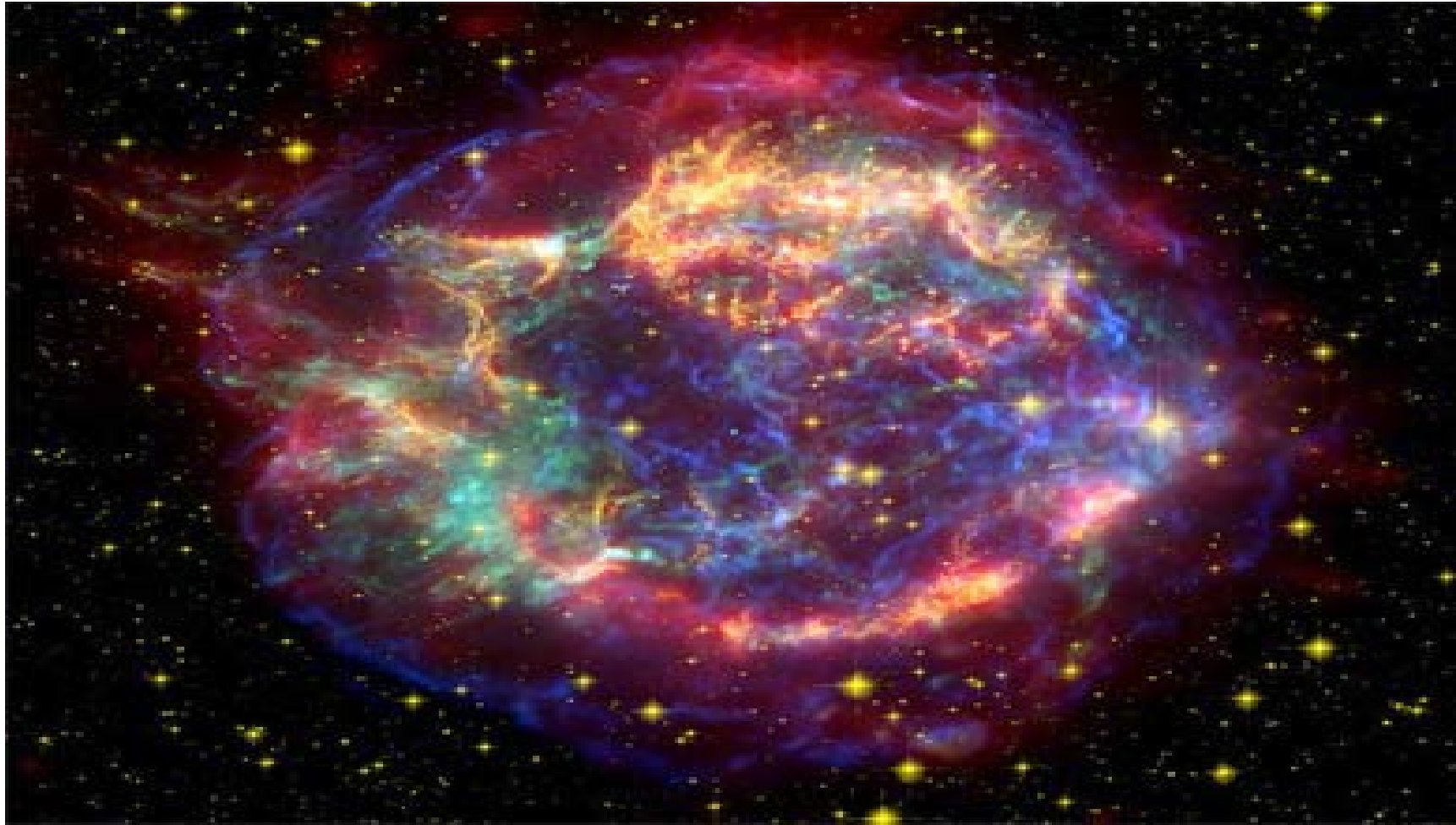
# Нейтронизация вещества

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.

# Сверхновая



Инфракрасный снимок остатка вспышки сверхновой в созвездие Кассиопея, которая произошла приблизительно 500 лет назад. Это самый молодой остаток от взрыва Сверхновой, известный в нашей галактике.

# **Космическое излучение**



**В. Гесс  
(1883-1964)**

**1912 г.** — **Космические лучи** открыты В. Гессом с помощью ионизационной камеры, установленной на воздушном шаре.

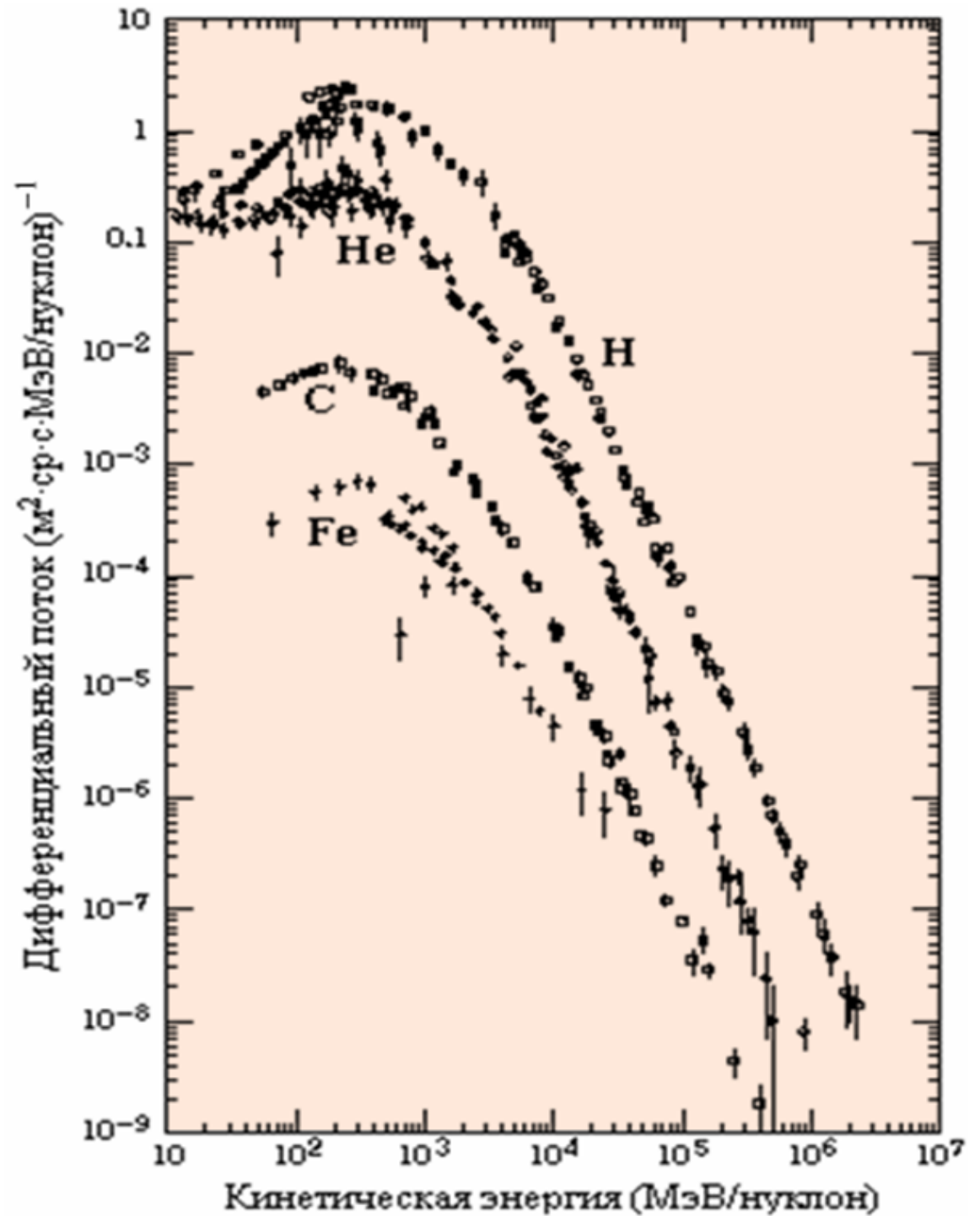
**Нобелевская премия по физике  
1936 г.** — В. Гесс  
За открытие космического  
излучения



# Первичные космические лучи

	Галактические космические лучи	Солнечные космические лучи
Поток	$\approx 1 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$	Во время солнечных вспышек может достигать $\approx 10^6 \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
Состав	<ol style="list-style-type: none"><li>1. Ядерная компонента (<math>\approx 90\%</math> протонов, <math>\approx 10\%</math> ядер гелия, <math>\approx 1\%</math> более тяжелых ядер),</li><li>2. Электроны (<math>\approx 1\%</math> от числа ядер),</li><li>3. Позитроны (<math>\approx 10\%</math> от числа электронов),</li><li>4. Антиадроны (<math>&lt; 0.01\%</math>)</li></ol>	98–99% протоны, $\approx 1.5\%$ ядра гелия
Диапазон энергий	$10^6 - 10^{21}$ эВ	$10^5 - 10^{11}$ эВ

# Космические лучи



# X-процесс

Изотопы **Li**, **Be**, **B** образуются в реакциях расщепления (скалывания) при взаимодействии галактических космических лучей с веществом межзвёздной среды:

1) лёгкая компонента космических лучей (быстрые протоны и  $\alpha$ -частицы) в результате столкновения с тяжёлыми ядрами межзвёздной среды вызывает расщепление их с образованием изотопов **Li**, **Be**, **B**, которые затем смешиваются с межзвёздной средой;

2) быстрые ядра **C**, **N**, **O**, входящие в состав космического излучения, сталкиваясь с ядрами **H** и **He**, превращаются в **Li**, **Be**, **B**.



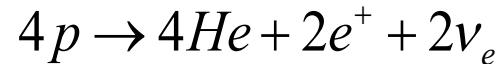
# Каскад вторичных космических частиц в атмосфере Земли



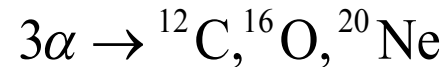
$$(T_{1/2} = 5700 \text{ лет})$$

# Ядерные реакции в звездах

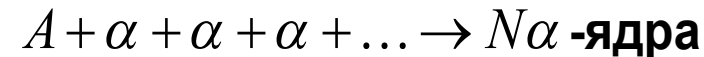
- Горение водорода. CNO-цикл



- Горение гелия.

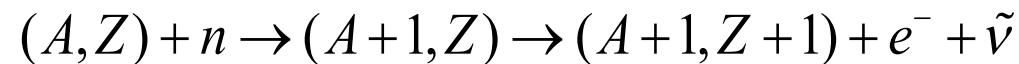


- $\alpha$ -процесс. Образование  $A/\alpha$ -ядер

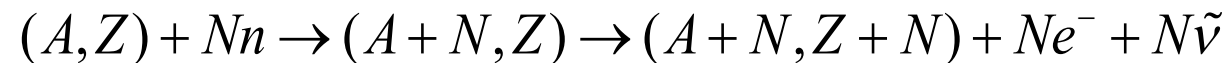


- E-процесс. Образование ядер в районе железного максимума в условиях термодинамического равновесия.

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



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



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

- x-процесс. Реакции под действием космических лучей.

Li, Be, B.

# Происхождение элементов

H B																		He B					
Li C	Be C																	B C	C S L	N S L	O S L	F L	Ne S L
Na L	Mg L																	Al S L	Si S L	P L	S S L	Cl L	Ar L
K L	Ca L	Sc L	Ti S L	V S L	Cr L	Mn L	Fe S L	Co S	Ni S	Cu L	Zn L	Ga S	Ge S	As L	Se S	Br S	Kr S						
Rb S	Sr L	Y L	Zr L	Nb L	Mo S L	Tc L	Ru S L	Rh S	Pd S L	Ag S L	Cd S L	In S L	Sn S L	Sb S	Te S	I S	Xe S						
Cs S	Ba L	Hf S L		Ta S L		W S L		Re S	Os S	Ir S	Pt S	Au S	Hg S L	Tl S L	Pb S	Bi S	Po S	At S	Rn S				
Fr S	Ra S																						
		La L	Ce L	Pr S L	Nd S L	Pm S L	Sm S L	Eu S	Gd S	Tb S	Dy S	Ho S	Er S	Tm S	Yb S L	Lu S							
		Ac S	Th S	Pa S	U S	Np S	Pu S	Am M	Cm M	Bk M	Cf M	Es M	Fm M	Md M	No M	Lr M							

B	Big Bang	L	Large stars	S	Super-novae
C	Cosmic rays	S	Small stars	M	Man-made



**Hans Albrecht Bethe**  
**(1906-2005)**

**Нобелевская премия по физике**

**1967 г. — Г. Бете**

За вклад в теорию ядерных реакций, и особенно за открытие источника энергии звезд.

1938 г. —

Ганс Бете (Hans Bethe) и Чарльз Критчфильд (Charles Critchfield) открыли протон-протонный цикл термоядерных реакций как источник энергии звезд.

Ганс Бете (Hans Bethe) и Карл фон Вайцзеккер (Carl von Weizsacker) открыли углеродно-азотный цикл термоядерных реакций.



**William Alfred Fowler**  
(1911-1995)

Для определения эффективности ядерных реакций в звездах обычно проводится экстраполяция результатов измерений при больших энергиях в область энергий несколько кэВ. Большое число очень тщательных экспериментов было выполнено под руководством В. Фаулера.

**Нобелевская премия по физике**

**1983 г.** — В. Фаулер

За теоретические и экспериментальные исследования ядерных процессов важных при образовании химических элементов во Вселенной.

**ЗАВЕРШАЮЩИЕ  
СТАДИИ  
ЭВОЛЮЦИИ ЗВЕЗД**

# Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

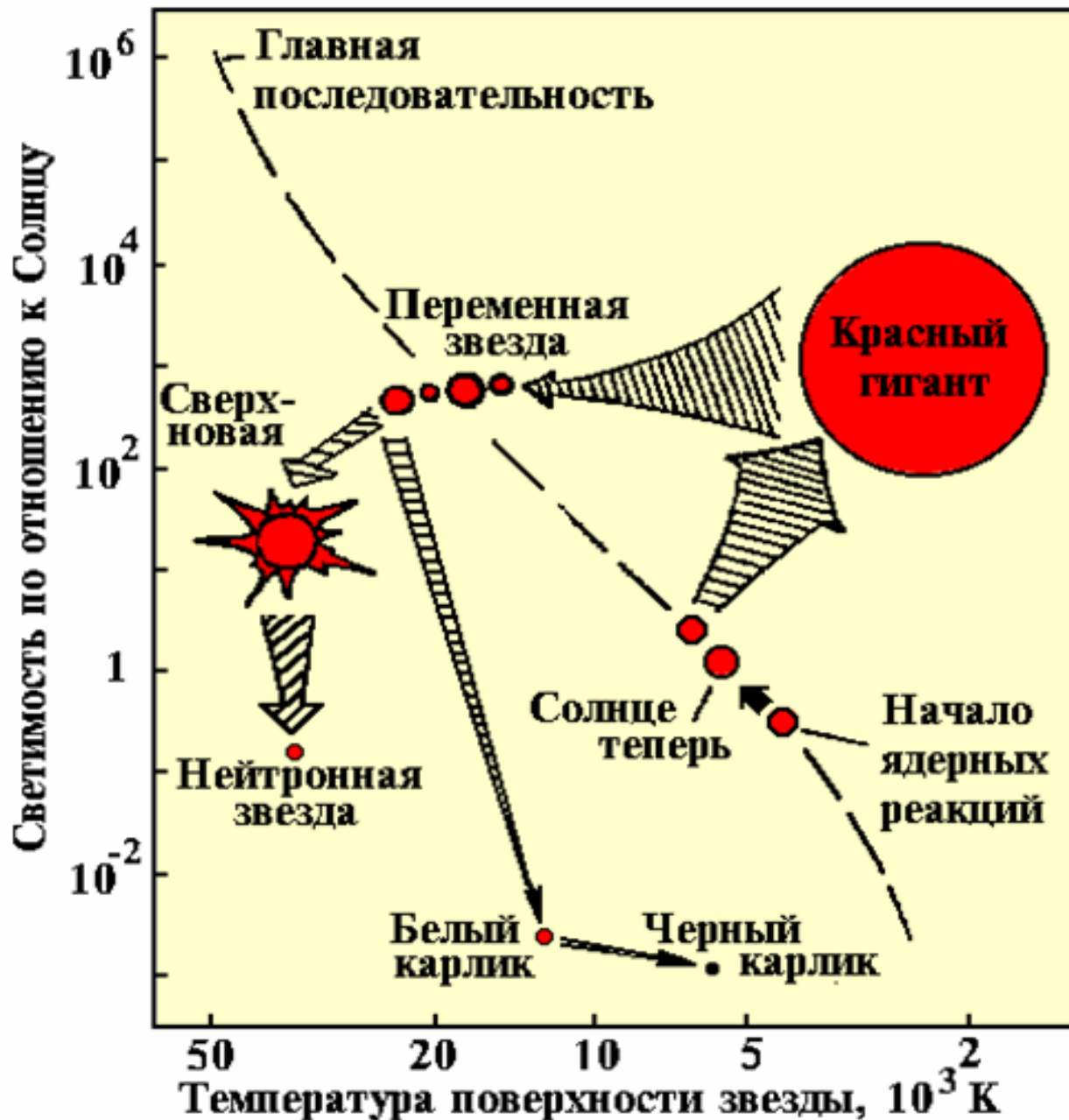


диаграмма  
эволюции  
звезд

# Белые карлики



# Белые карлики

Белые карлики –компактные звезды с массой, сравнимой с массой Солнца, их радиус примерно в **100** раз меньше радиуса Солнца. Поэтому плотность вещества белого карлика  $\rho \approx 10^6 \text{ г/см}^3$ , что примерно в миллион раз больше плотности обычных звезд. Белые карлики образуются из звезд с массой в несколько раз превышающих массу Солнца после сброса внешней оболочки, окружающей плотное ядро звезды.

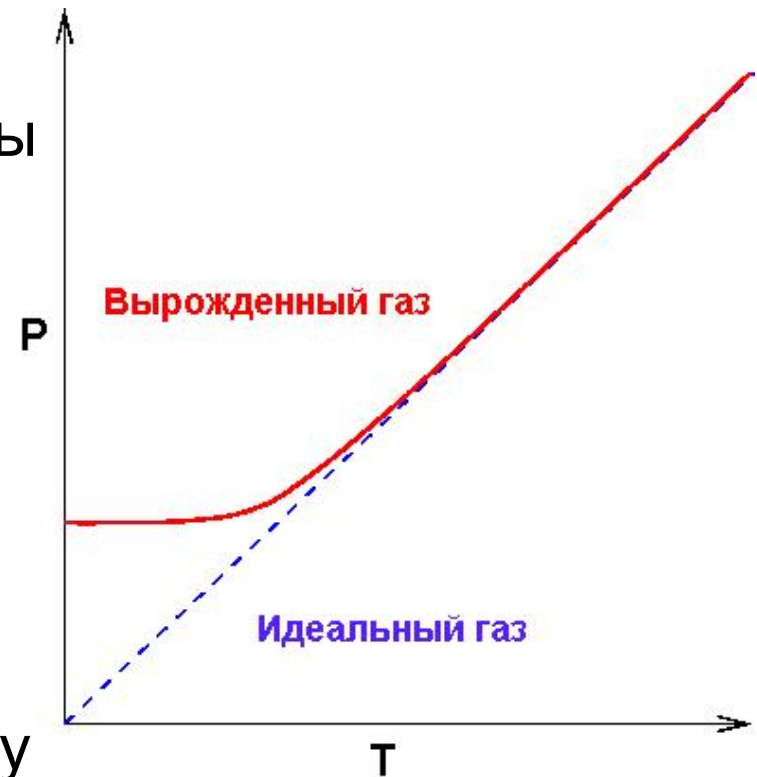
Белый карлик образуется благодаря устойчивому равновесию сил гравитации и давления вырожденного релятивистского электронного газа. Давление электронного газа имеет квантовую природу. Оно возникает как следствие принципа Паули и соотношения неопределенности. Принцип Паули определяет предельный минимальный объем пространства, который может занимать каждый электрон. Внешнее давление не в состоянии этот объем уменьшить.

# Белые карлики

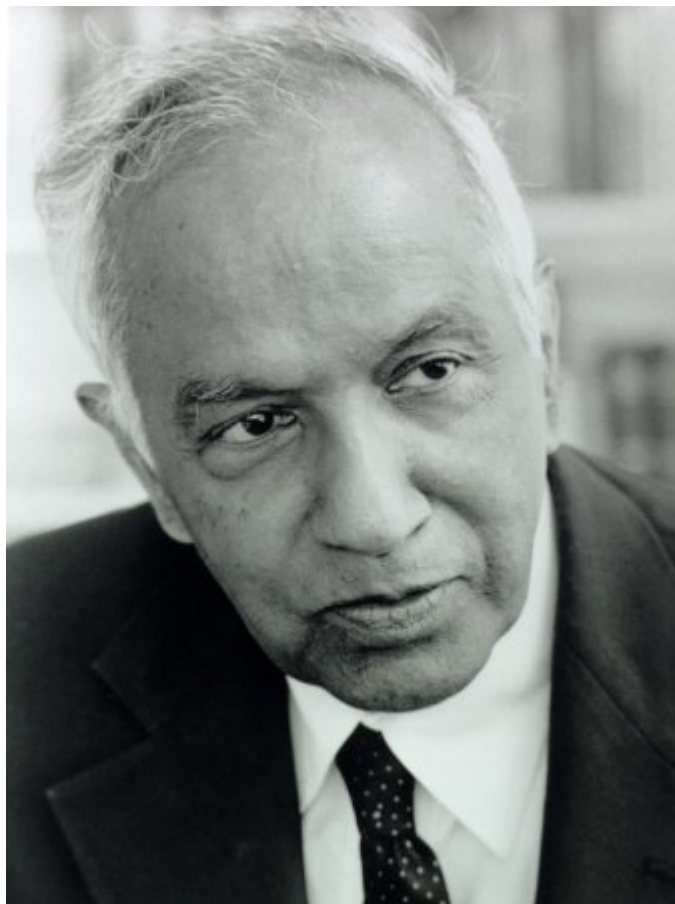
$$\Delta p \cdot \Delta x \approx \hbar$$

При достаточно большой массе звезды гравитационное давление будет больше давления релятивистского электронного газа, однако существует критическое значение массы звезды  $M_{\text{кр}}$ , в плотном веществе звезды из-за действия принципа Паули возникает давление электронного газа, которое может противостоять гравитационному сжатию звезды.

Это критическое значение массы  $M_{\text{кр}} = 1.44 M_{\odot}$  называют Чандрасекаровским пределом.



# Предел Чандрасекара



Subramanyan  
Chandrasekhar  
(1910-1995)

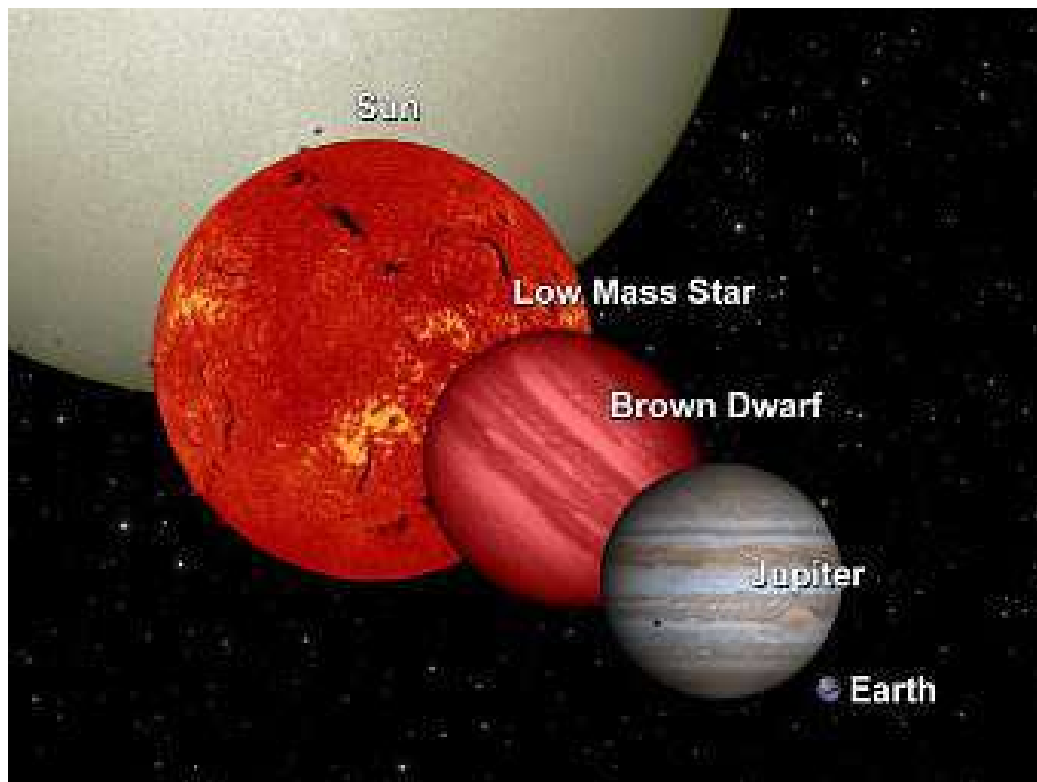
## Чандрасекаровский предел

$$M_{\text{кр}} = 1.44 M_{\odot}$$

**Нобелевская премия по физике**

**1983** — С. Чандрасекар  
За теоретические исследования  
физических процессов, важных для  
структуры и эволюции звезд.

# Коричневые карлики



Объект малой массы ( $M < 0.08M_{\odot}$ ), в котором не горит водород в ядре из-за малой температуры.

Температура поверхности около 1000 К. Светимость  $L/L_{\odot} \sim 10^{-4}-10^{-5}$ . Коричневые карлики излучают энергию за счет медленного сжатия ядра. Время излучения примерно 15 млн. лет.

Гравитационное равновесие поддерживается вырожденным электронным газом, давление которого не позволяет звезде коллапсировать.

# Нейтронные звезды

# Нейтронные звезды

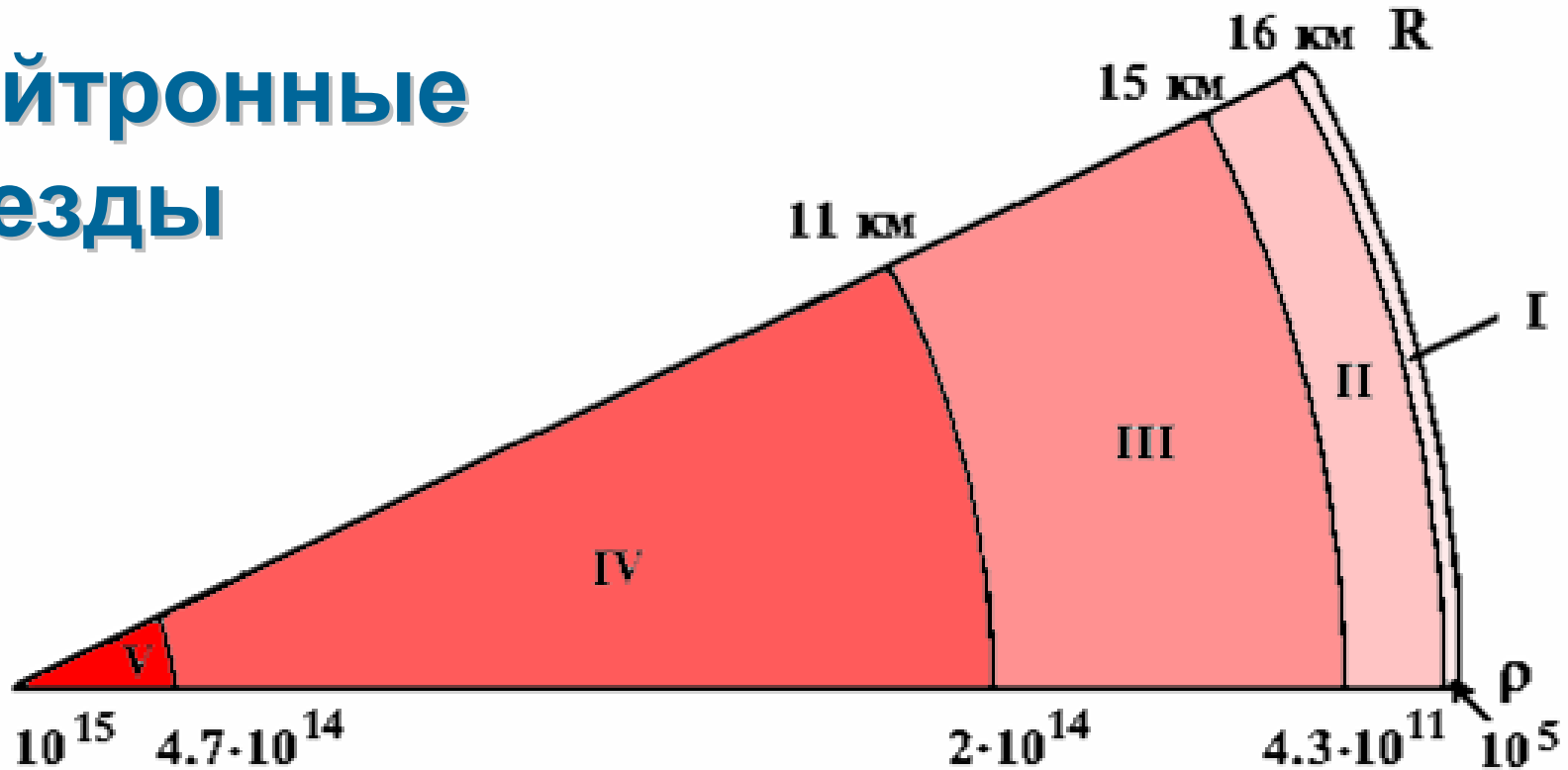
Нейтронная звезда образуется как остаток сверхновой после выброса нейтрино. Она имеет ядерную плотность ( $10^{14}$ - $10^{15}$  г/см<sup>3</sup>) и типичный радиус 10-20 км. Дальнейшему гравитационному сжатию нейтронной звезды препятствует давление ядерной материи, возникающее за счёт взаимодействия нейтронов. Это давление вырожденного нейтронного газа в состоянии удерживать от гравитационного коллапса массы вплоть до  $3M_{\odot}$ .

Массы нейтронных звезд изменяются в пределах

$$(1,4 \div 3)M_{\odot}$$

Нейтрино, образующиеся в момент коллапса сверхновой, быстро охлаждают нейтронную звезду. Её температура падает с  $10^{11}$  до  $10^9$  К за время около 100 с. Дальше темп остывания нейтронной звезды уменьшается. Уменьшение температуры с  $10^9$  до  $10^8$  К происходит за 100 лет и до  $10^6$  К – за миллион лет.

# Нейтронные звезды



Нейтронная звезда массой  $1.5M_{\odot}$  и радиусом  $R=16$  км. Указана плотность  $\rho$  в  $\text{г/см}^3$  в различных частях звезды.

- I – внешний слой из плотно упакованных атомов;
- II – кристаллическая решётка атомных ядер и вырожденных электронов;
- III – твёрдый слой из атомных ядер, перенасыщенных нейтронами;
- IV – жидкое ядро, состоящее в основном из вырожденных нейтронов;
- V – адронная сердцевина нейтронной звезды кроме нуклонов должна содержать пионы и гипероны.

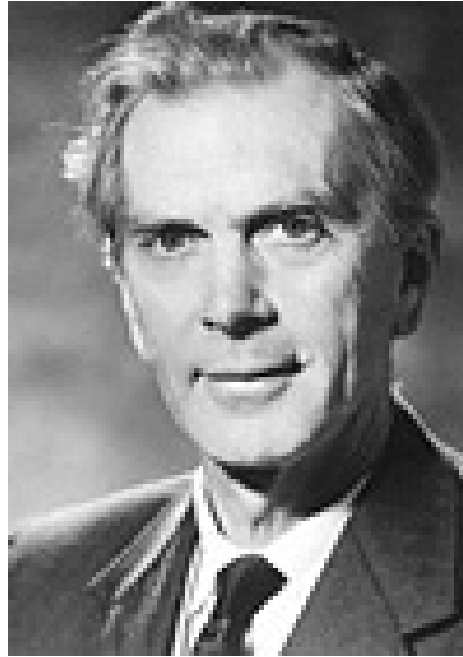
# Пульсары



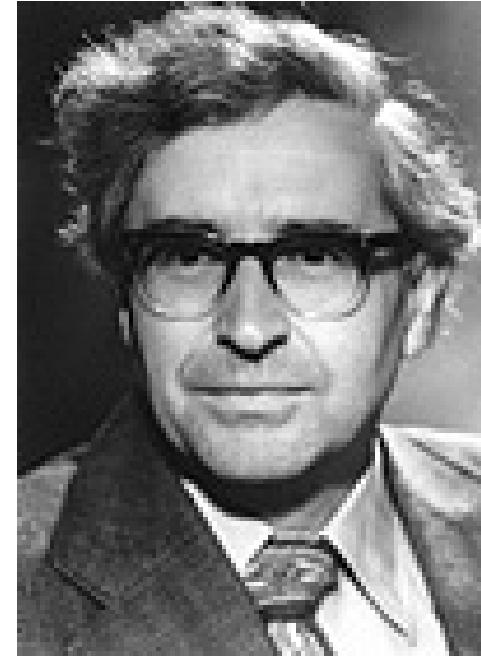
Сохранение углового момента и магнитного поля при коллапсе сверхновой и образовании нейтронной звезды приводит к рождению быстро вращающихся пульсаров с магнитным полем  $\sim 10^{10}$ - $10^{14}$  Гс.



# Пульсары



**Sir Martin Ryle**  
(1918-1984)



**Antony Hewish**  
р. 1924

Нобелевская премия по физике

1974 г. — М. Райл и Э. Хьюиш

За пионерские исследования в радиоастрофизике.

**Райл** - за результаты научных наблюдений и изобретения, в частности метода апертурного синтеза.

**Хьюиш** - за его определяющую роль в открытии пульсаров.

# Пульсары



**Russell A. Hulse**  
р. 1950



**Joseph H. Taylor Jr.**  
р. 1941

**Нобелевская премия по физике  
1993 г. — Р. Халс, Дж. Тейлор-мл.**

За открытие нового типа пульсаров, давшее новые возможности в изучении гравитации.

В 1974 г. Дж. Тейлор и Р. Халс обнаружили пару нейтронных звезд, вращающихся друг относительно друга с периодом 3 ч 45 мин. Одна из нейтронных звезд являлась радиоизлучающим пульсаром. Пульсар вращался вокруг своей оси со стабильной угловой скоростью и поэтому служил исключительно точными часами. Благодаря этому стало возможно точно измерить массы обеих звезд и рассчитать характер их орбитального движения. **Оказалось, что период обращения этой двойной системы уменьшается на 70 мкс в год, что хорошо согласуется с предсказаниями общей теории относительности. Сокращение периода обращения двойной звездной системы обусловлено гравитационным излучением.**

# Черные дыры

# Черные дыры

1939 г. Р. Оппенгеймер,  
Г.Снайдерс

$$\frac{mv^2}{2} = G \frac{mM}{r}$$

$$R_{\text{грав}} = \frac{2GM}{c^2}$$

$$R_{\text{грав}} (\text{Солнце}) = 3 \text{ км}$$

$$R_{\text{грав}} (\text{Земля}) = 1 \text{ см}$$

Реликтовые черные дыры  
Сверхмассивные черные

$$\text{дыры} \\ (M = 10^5 \div 10^{10} M_{\odot})$$

1974 г. С. Хокинг.

Излучение черных дыр

$$T_H = 10^{-7} (M_{\odot}/M)$$

$$t_{\text{испар}}(M_H = 10M_{\odot}) = 10^{69} \text{ лет}$$

$$t_{\text{испар}}(M_H = 10^9 \text{ г}) = 0,1 \text{ с}$$

# Предел Оппенгеймера-Волкова

Если действию гравитации в звезде противостоит давление вырожденных нейтронов (нейтронная звезда), можно получить аналогичную предельную массу для нейтронной звезды (ее называют пределом Оппенгеймера-Волкова, (Oppenheimer, Volkoff) которые в 1939 году рассмотрели строение простейшей нейтронной звезды, состоящей только из вырожденных нейтронов). Современные оценки предела Оппенгеймера — Волкова лежат в пределах **2,5—3  $M_{\odot}$** .

Самая **массивная** (из открытых к настоящему времени) нейтронная звезда J0348+0432 имеет массу **2,04** солнечных масс.

Самая **маломассивная** (из известных) чёрная дыра это — ХТЕ J1650-500, она была открыта в 2001 году. Исследования показали, что её масса составляет **3,8±0,5** солнечной массы.

# **Взрыв Сверхновой**

# Сверхновая типа Ia

Один из видов сверхновых типа Ia — результат внезапной ядерной детонации звезды

**1** Более массивная из двух звезд солнечного типа, исчерпав свое топливо, превращается в белый карлик

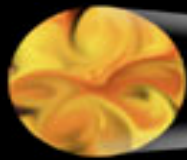


Белый карлик

Звезда-соседка

**2** Белый карлик захватывает газ, теряемый соседкой, и приближается к критической массе

**3** «Пламя» неуправляемых ядерных реакций возгорается в турбулентном ядре карлика

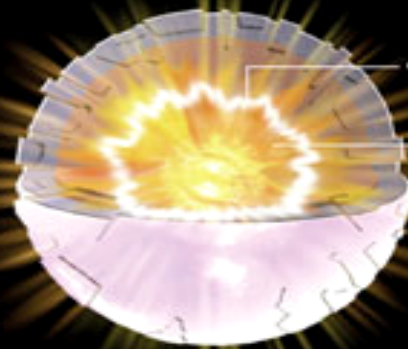


Гелий

Углерод/Кислород

Ядро

**4** Пламя устремляется наружу, превращая углерод и кислород в никель



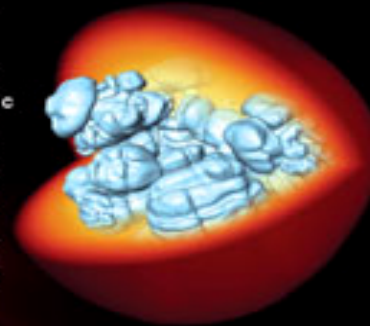
Фронт горения

Никель

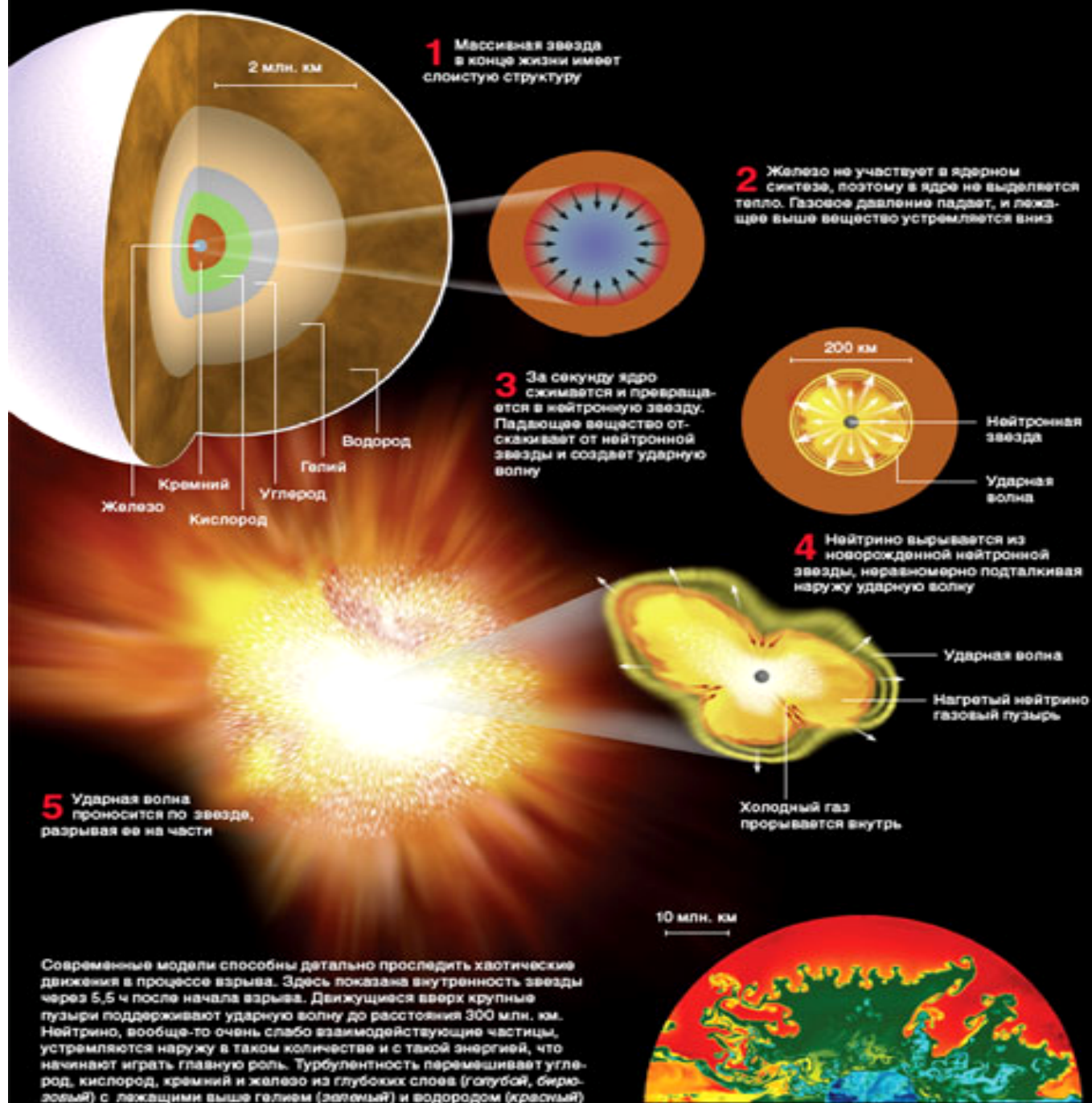
**5** За несколько секунд карлик полностью разрушается. Затем еще несколько недель радиоактивный никель распадается, вызывая свечение остатков звезды



Прорыв в моделировании сверхновых позволил исследовать турбулентность. Здесь показано, что произойдет через 0,6 с после воспламенения. Фронт ядерного горения имеет турбулентную, пузырчатую структуру (голубой). Турбулентность служит причиной быстрого продвижения фронта и подавления стабилизирующих механизмов звезды



Сверхновые другого рода образуются при сжатии звезд с массами более 8 масс Солнца. Они относятся к типам Ib, Ic или II, в зависимости от наблюдаемых особенностей



Современные модели способны детально проследить хаотические движения в процессе взрыва. Здесь показана внутренность звезды через 5,5 ч после начала взрыва. Движущиеся вверх крупные пузыри поддерживают ударную волну до расстояния 300 млн. км. Нейтрино, вообще-то очень слабо взаимодействующие частицы, устремляются наружу в таком количестве и с такой энергией, что начинают играть главную роль. Турбулентность перемешивает углерод, кислород, кремний и железо из глубоких слоев (голубой, бирюзовый) с лежащими выше гелием (зеленый) и водородом (красный)

# Сверхновая типа Ib, Ic, II



# Сверхновая SN 1987А



© Anglo-Australian Observatory

# Сверхновая SN 1987A

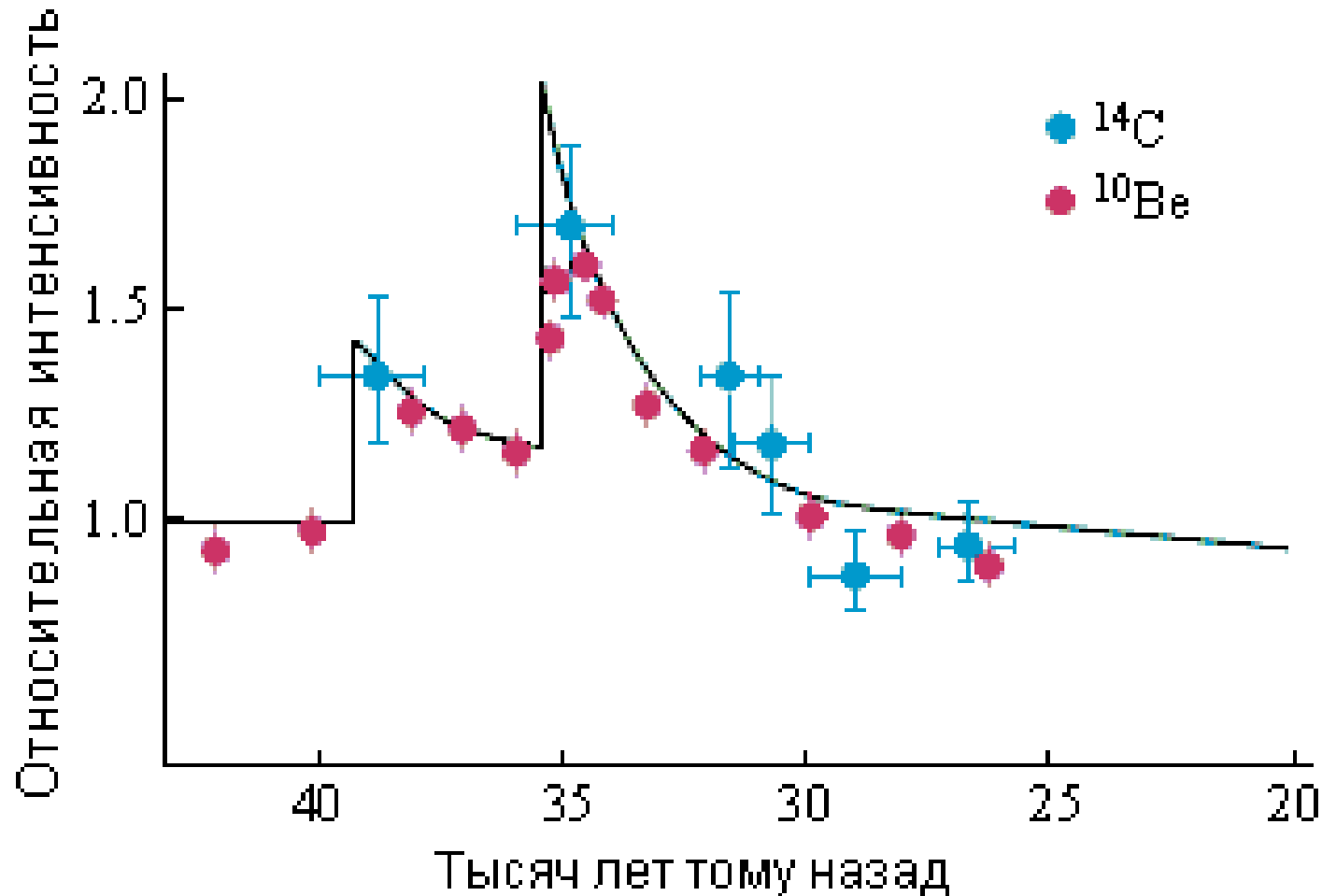
В 1987 г. в одной из ближайших галактик — Большом Магеллановом облаке, отстоящей от нашей галактики на 170000 световых лет, произошел взрыв Сверхновой SN1987A. Оболочка Сверхновой была выброшена взрывом со скоростью в несколько десятков тысяч километров в секунду. На её месте раньше наблюдался голубой гигант массой  $16M_{\odot}$  (снимок справа). Нейтринные детекторы зарегистрировали 25 нейтрино от этого взрыва. Длительность нейтринного сигнала составляла 25 секунд. Средняя энергия нейтрино  $\sim 20$  МэВ. Полная энергия, унесенная при взрыве Сверхновой SN1987A оценивается  $\sim 3 \cdot 10^{53}$  эрг.

# Сверхновая SN 1987A



На снимке, полученном космическим телескопом Хаббла (HST) изображен остаток от взрыва сверхновой SN 1987A, расположенный в Большом Магеллановом Облаке спустя 12 лет после вспышки. После взрыва сверхновой около образовались три газовых кольца. В красном свете излучают нагретые взрывом ионизированный азот и водород. Кольца образовались под действием ударной волны, распространяющейся со скоростью более 50 млн. км в час.

# Временная зависимость интенсивности космических лучей



Увеличение интенсивности космических лучей связывают с взрывом Сверхновой, близкой к Солнечной системе (около 200 световых лет).