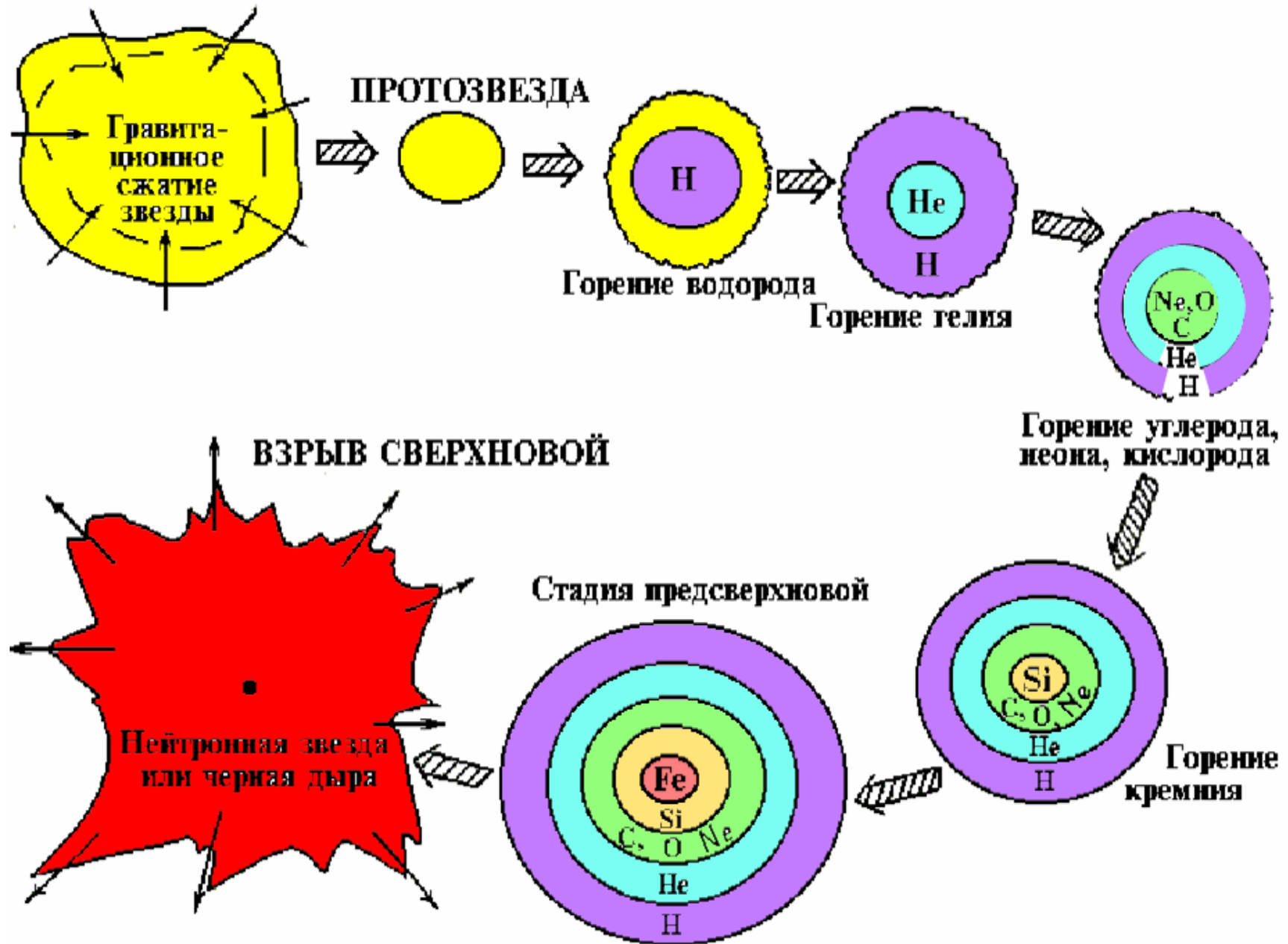


Рождение и жизнь атомных ядер

ЗВЕЗДНЫЙ НУКЛЕОСИНТЕЗ

Образование тяжелых элементов

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



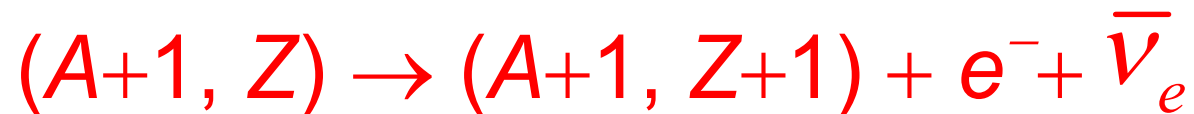
s – процесс

s – процесс

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



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



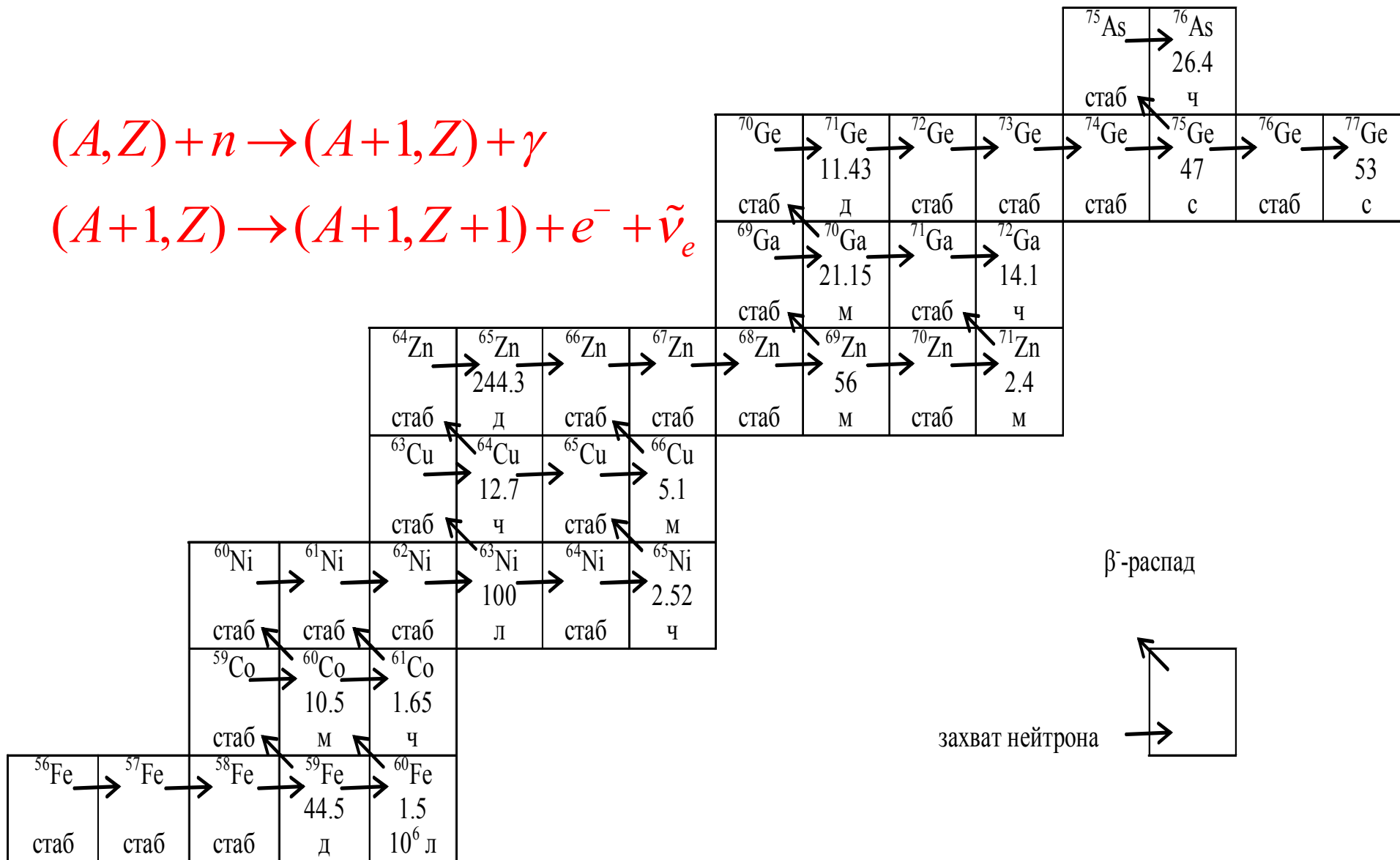
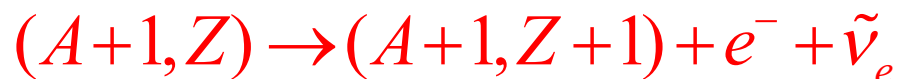
более вероятен, чем захват им следующего нейтрона.

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

$\tau_{n\gamma}$ — 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



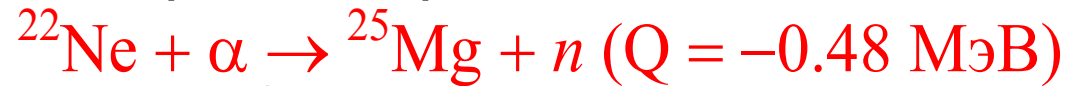
Для первой реакции требуются условия, при которых происходит совместное горение водорода и гелия. В качестве механизма, создающего такие условия, рассматривается соприкосновение конвективной оболочки звезды, в которой происходит горение гелия, с богатой водородом внешней оболочкой. Образование нейтронов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

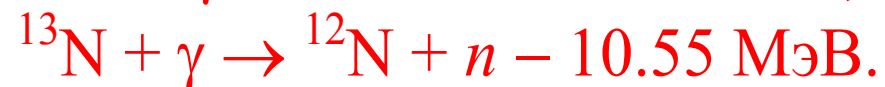
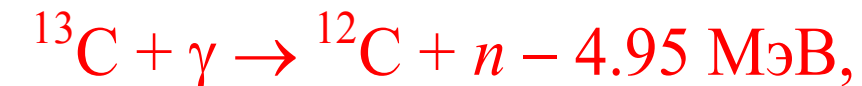
Образование нейтронов в реакции



зависит от наличия ^{14}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.

r – процесс

r - процесс

Если плотности нейтронов ρ_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

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

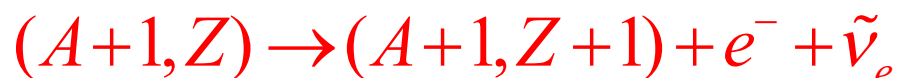
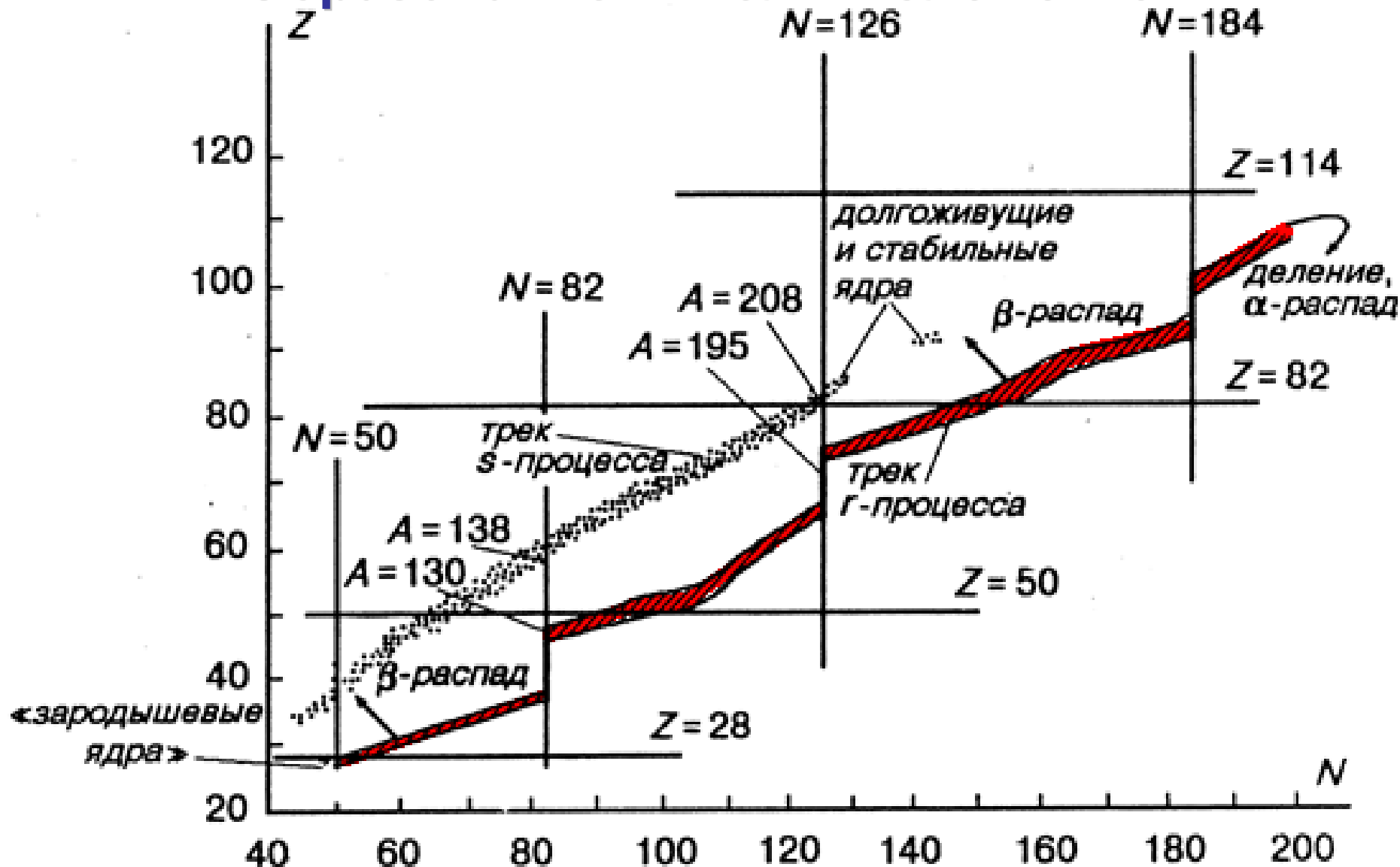
Скорость захвата ядром нейтрона во много раз превышает скорость его β -распада. Захват нейтронов происходит до тех пор, пока скорость реакции (n, γ) не станет меньше скорости β -распада изотопа. При этом ядро успевает захватить 10-20 нейтронов прежде чем испытает β -распад. Такой процесс называют **быстрым**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

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.

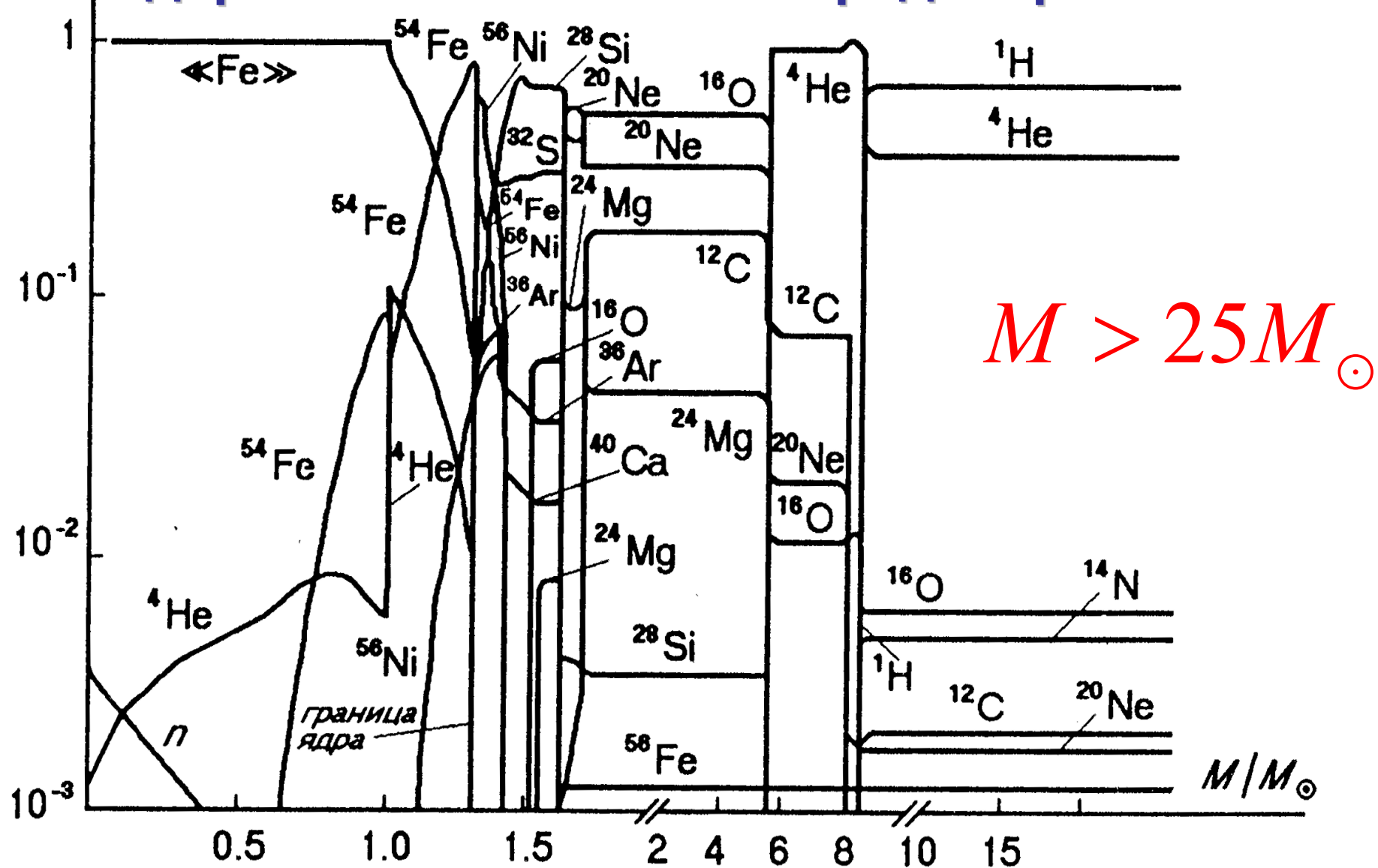
Этот механизм образования элементов называют ***взрывным нуклеосинтезом***. *r*-процесс может протекать и в насыщенных нейтронами ядрах Сверхновых. В этом случае вынос образованных элементов в поверхностные слои звезды, осуществляется за счёт разогретых нейтрино участков звезды.

Образование тяжелых элементов



Взрыв Сверхновой

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.

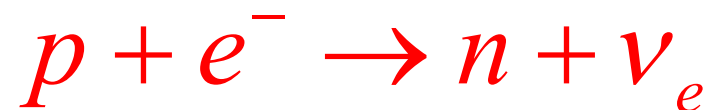
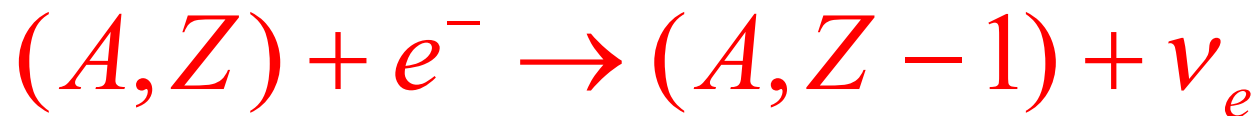
Фоторасщепление железа

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.



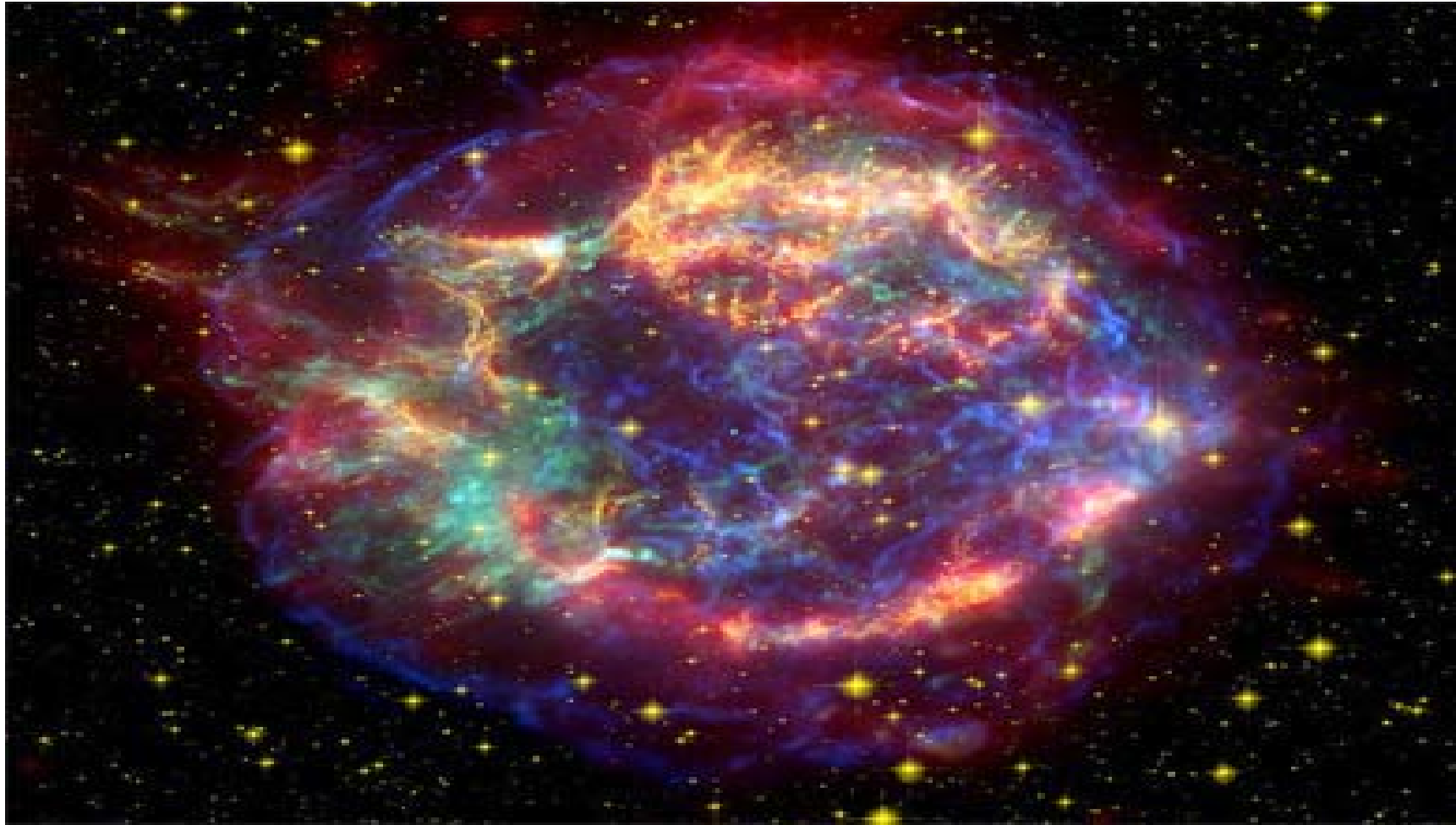
Нейтронизация вещества

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.

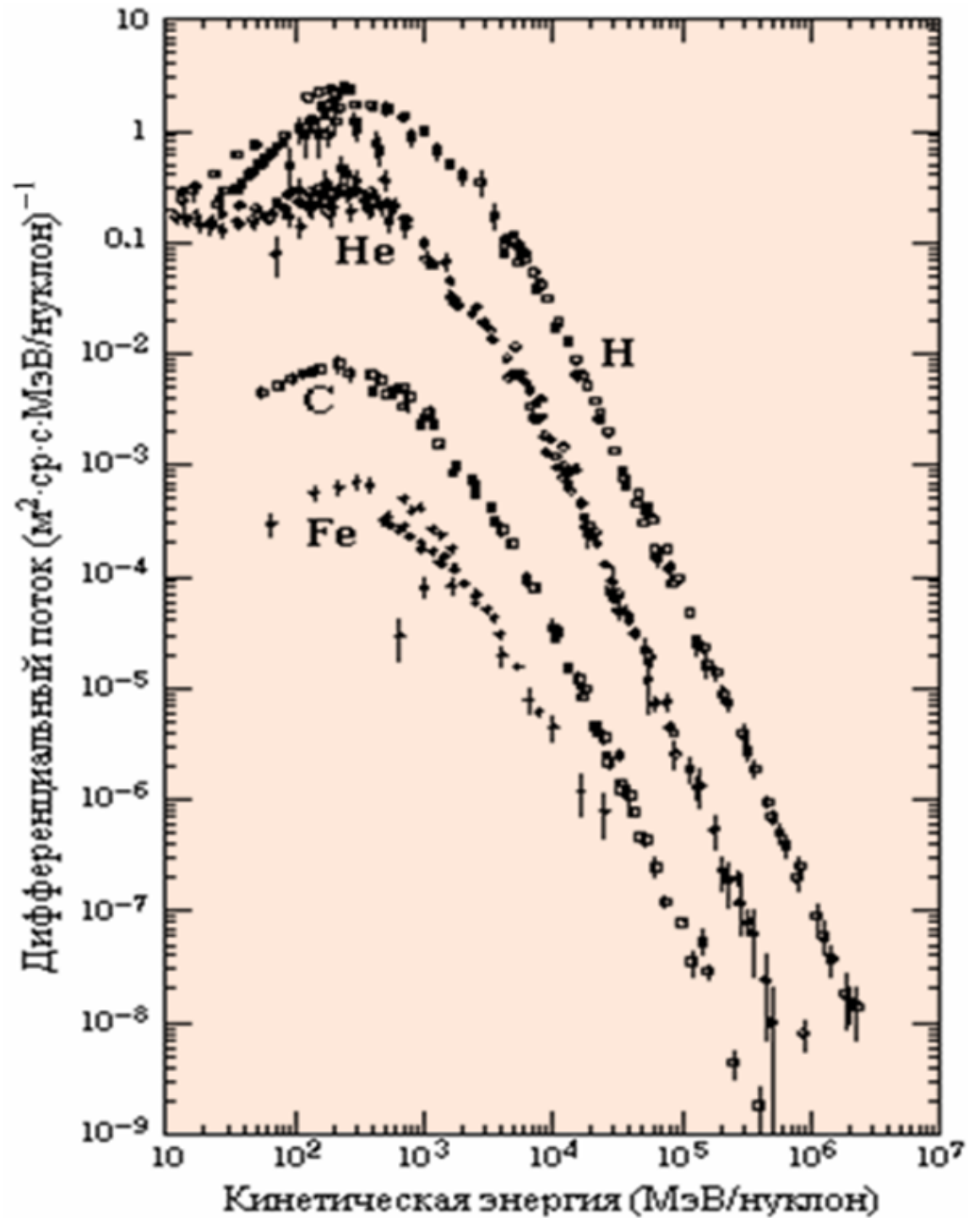
**Нобелевская премия по физике
1936 г.** — В. Гесс
За открытие космического
излучения



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">1. Ядерная компонента ($\approx 90\%$ протонов, $\approx 10\%$ ядер гелия, $\approx 1\%$ более тяжелых ядер),2. Электроны ($\approx 1\%$ от числа ядер),3. Позитроны ($\approx 10\%$ от числа электронов),4. Антиадроны ($< 0.01\%$)	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 α -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**.

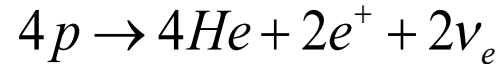
Каскад вторичных космических частиц в атмосфере Земли



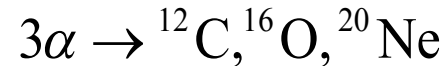
$$(T_{1/2} = 5700 \text{ лет})$$

Ядерные реакции в звездах

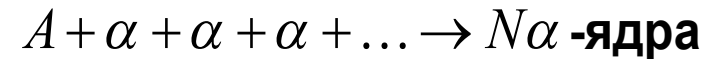
- Горение водорода. CNO-цикл



- Горение гелия.

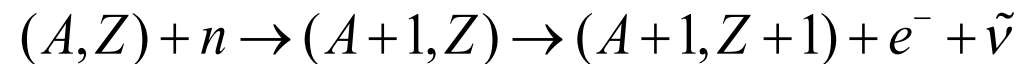


- α -процесс. Образование A/α -ядер

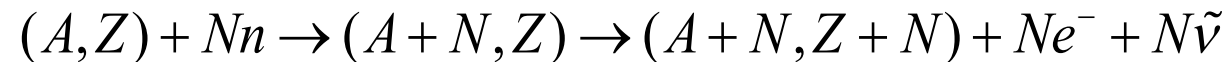


- E-процесс. Образование ядер в районе железного максимума в условиях термодинамического равновесия.

- 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
 $(p, n) (p, \gamma) (\gamma, n) (\gamma, 2n)$

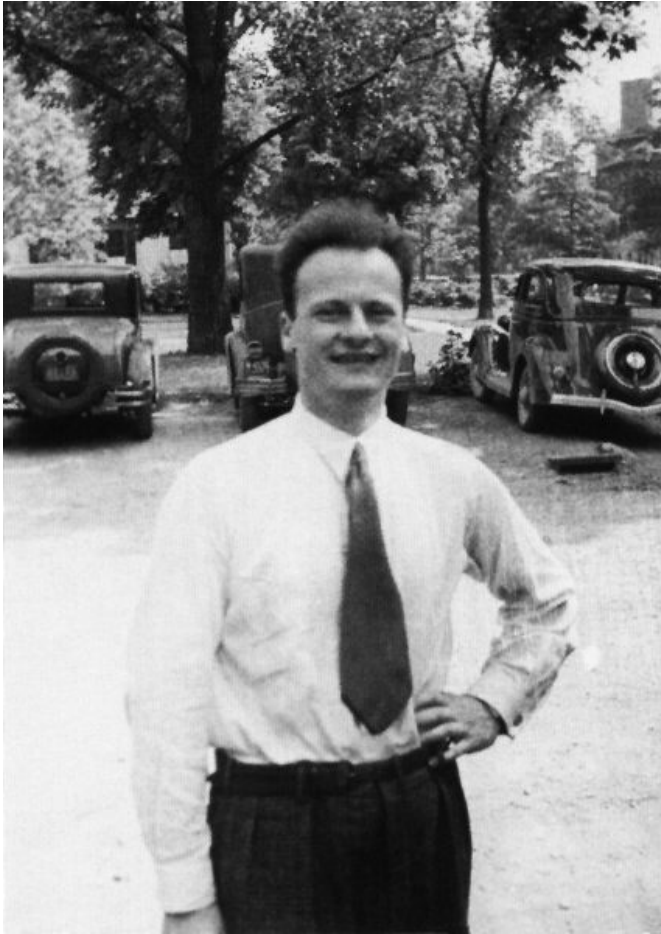
- x-процесс. Реакции под действием космических лучей.

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	Supernovae
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.

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.

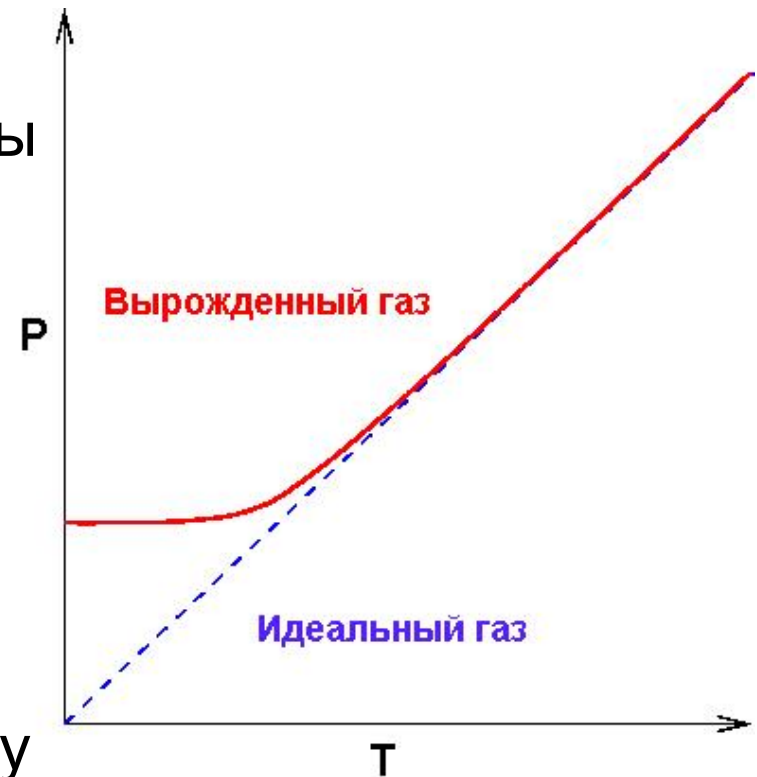
Белый карлик образуется благодаря устойчивому равновесию сил гравитации и давления вырожденного релятивистского электронного газа. Давление электронного газа имеет квантовую природу. Оно возникает как следствие принципа Паули и соотношения неопределенности. Принцип Паули определяет предельный минимальный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

Белые карлики

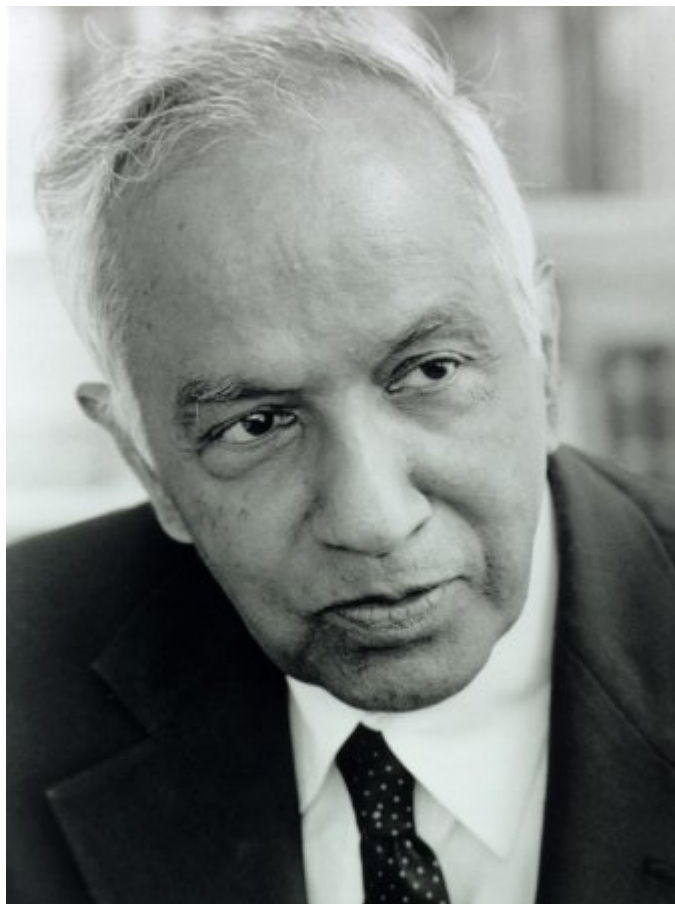
$$\Delta p \cdot \Delta x \approx \hbar$$

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.

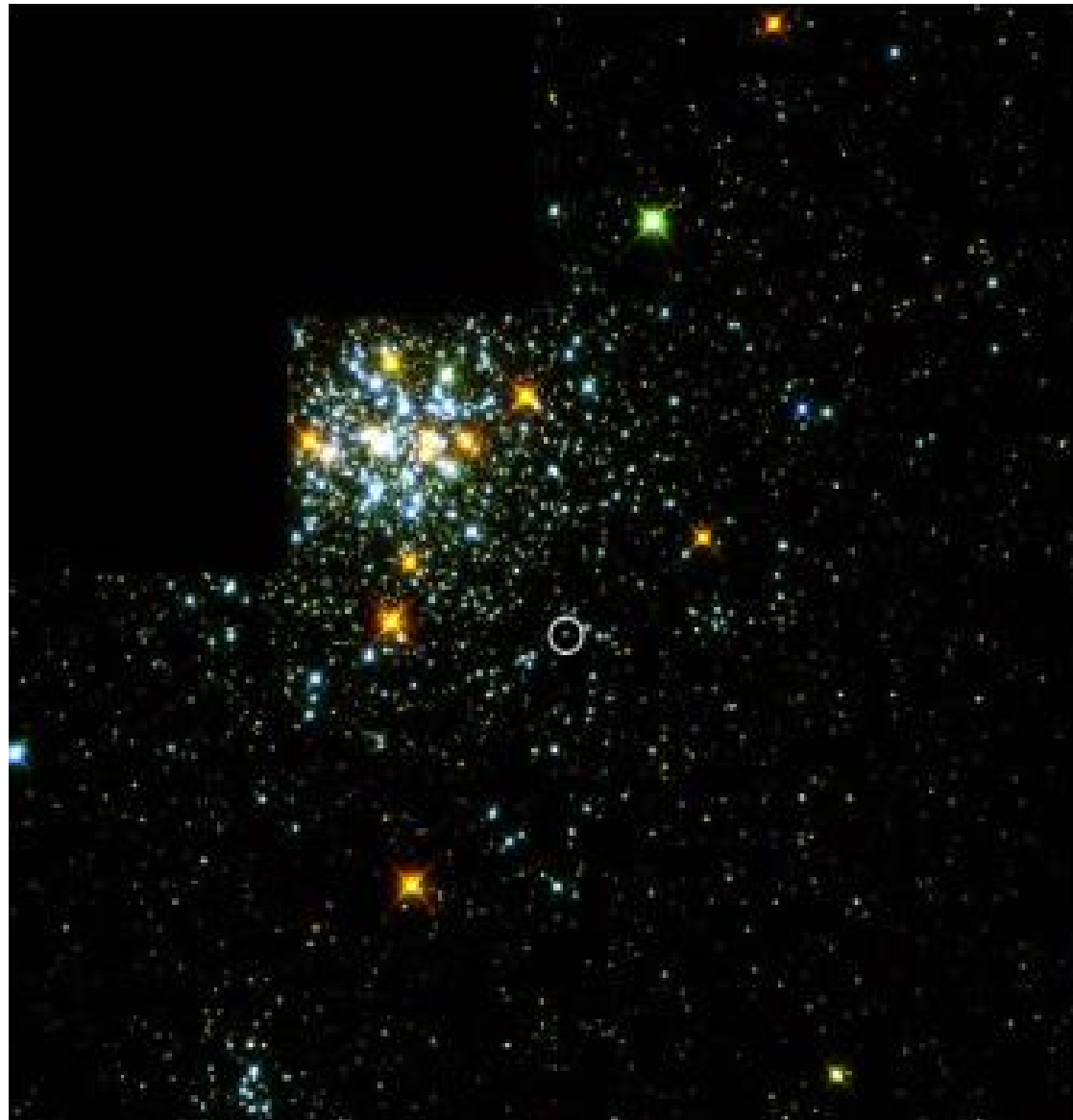
Белые карлики



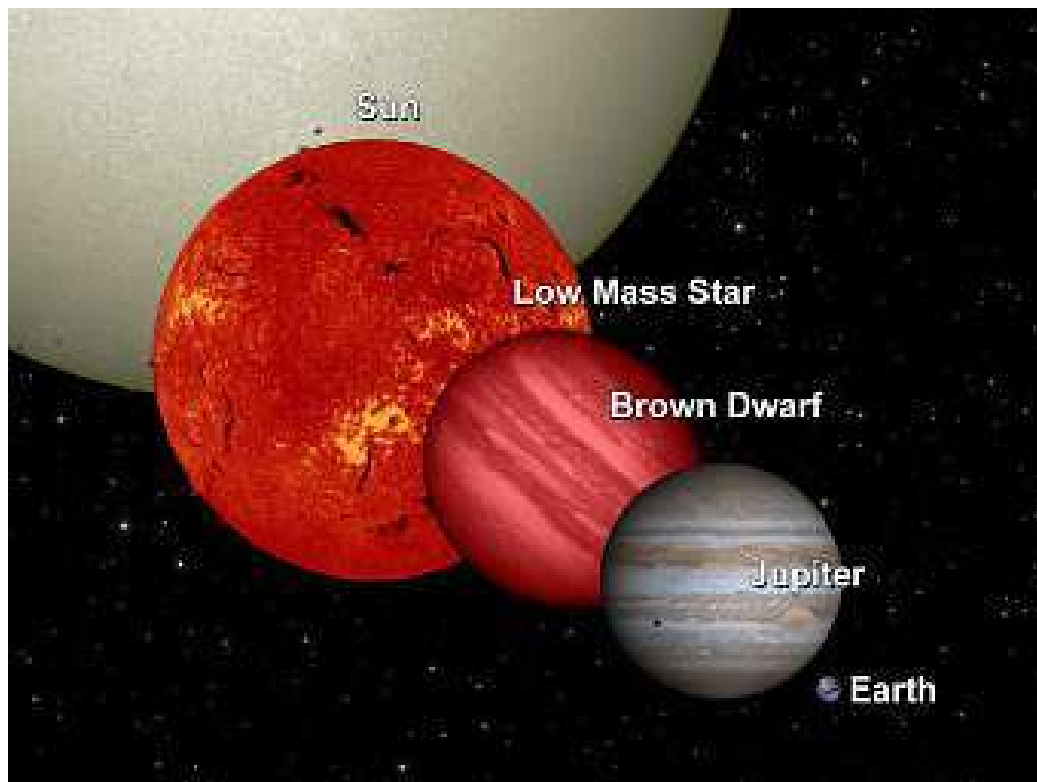
На снимке показана планетарная туманность Красный паук NGC 6537. Эта планетарная туманность, состоит из двух симметричных взаимопроникающих структур и содержит один из самых горячих известных белых карликов, входящих в состав двойной звездной системы.

Белые карлики

В скоплении звезд NGC 1818, находящимся в Большом Магеллановом облаке, обнаружен белый карлик (в кружке) с температурой поверхности около 50000 градусов. Масса звезды-прародителя (красный гигант) оценивается в 7.6 масс Солнца. Звезды тяжелее 6 - 10 масс Солнца, вместо образования белых карликов, должны взрываться, как Сверхновые.



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

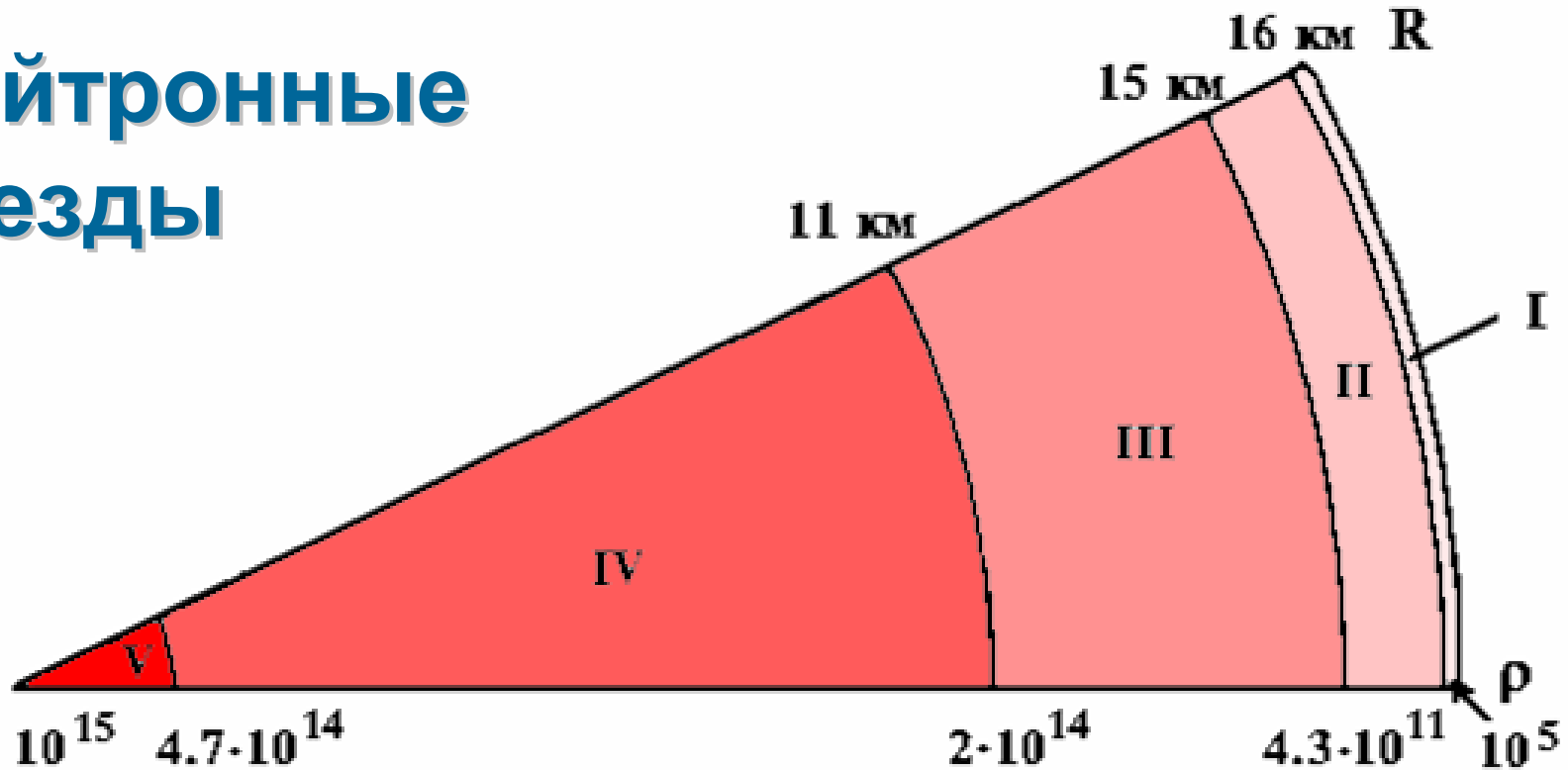
Нейтронная звезда образуется как остаток сверхновой после выброса нейтрино. Она имеет ядерную плотность (10^{14} - 10^{15} г/см³) и типичный радиус 10-20 км. Дальнейшему гравитационному сжатию нейтронной звезды препятствует давление ядерной материи, возникающее за счёт взаимодействия нейтронов. Это давление 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.

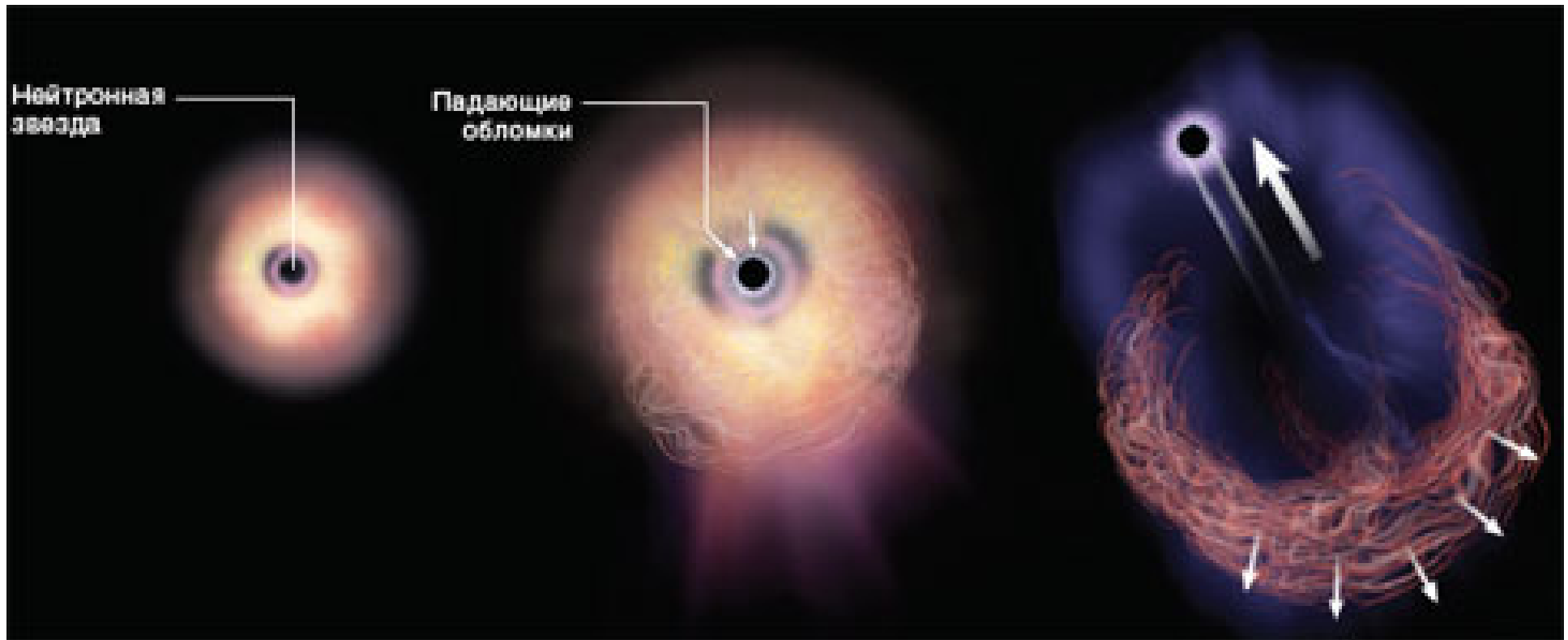
Нейтронные звезды



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

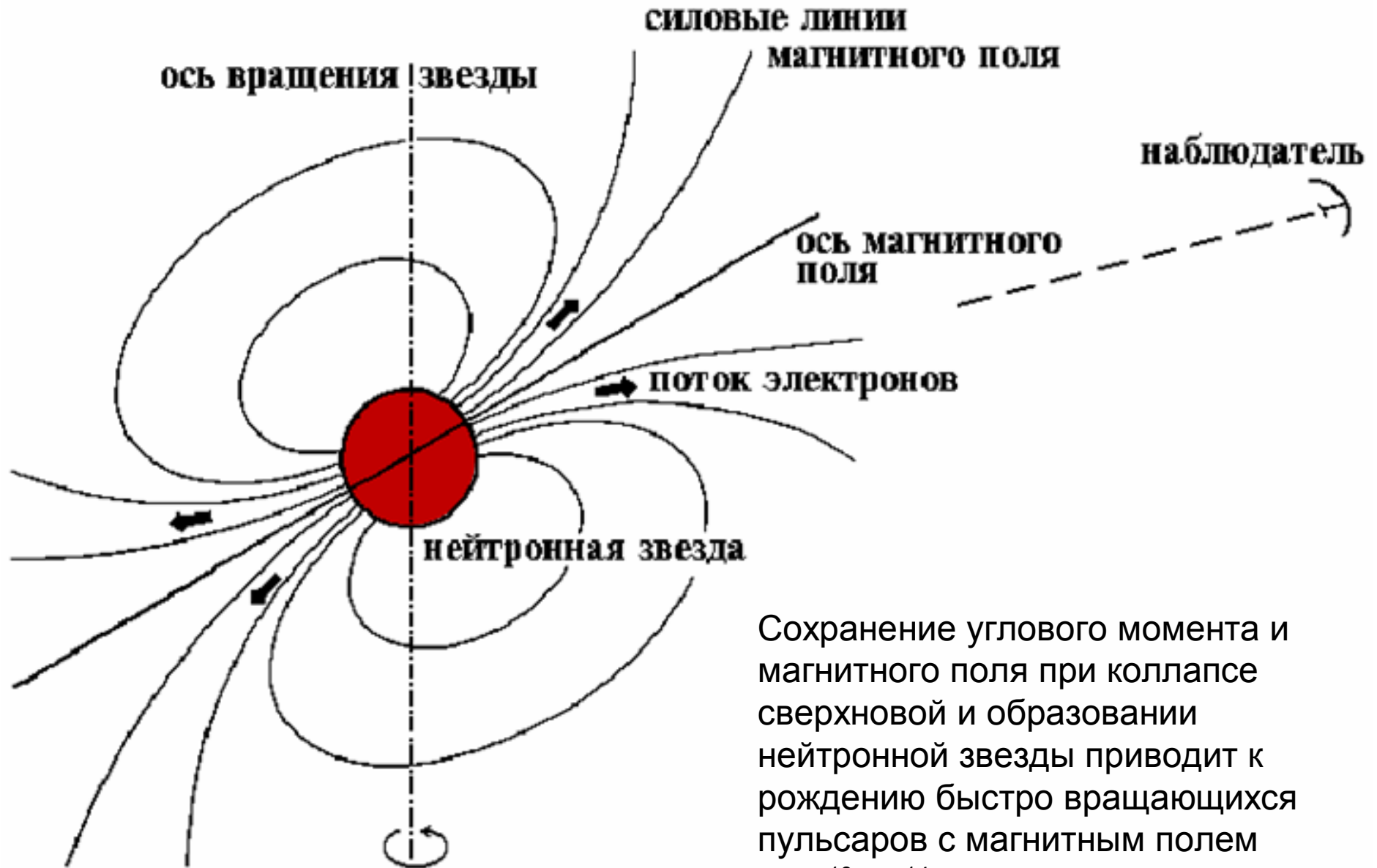
- I – внешний слой из плотно упакованных атомов;
- II – кристаллическая решётка атомных ядер и вырожденных электронов;
- III – твёрдый слой из атомных ядер, перенасыщенных нейтронами;
- IV – жидкое ядро, состоящее в основном из вырожденных нейтронов;
- V – адронная сердцевина нейтронной звезды кроме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

Скорости нейтронных звезд



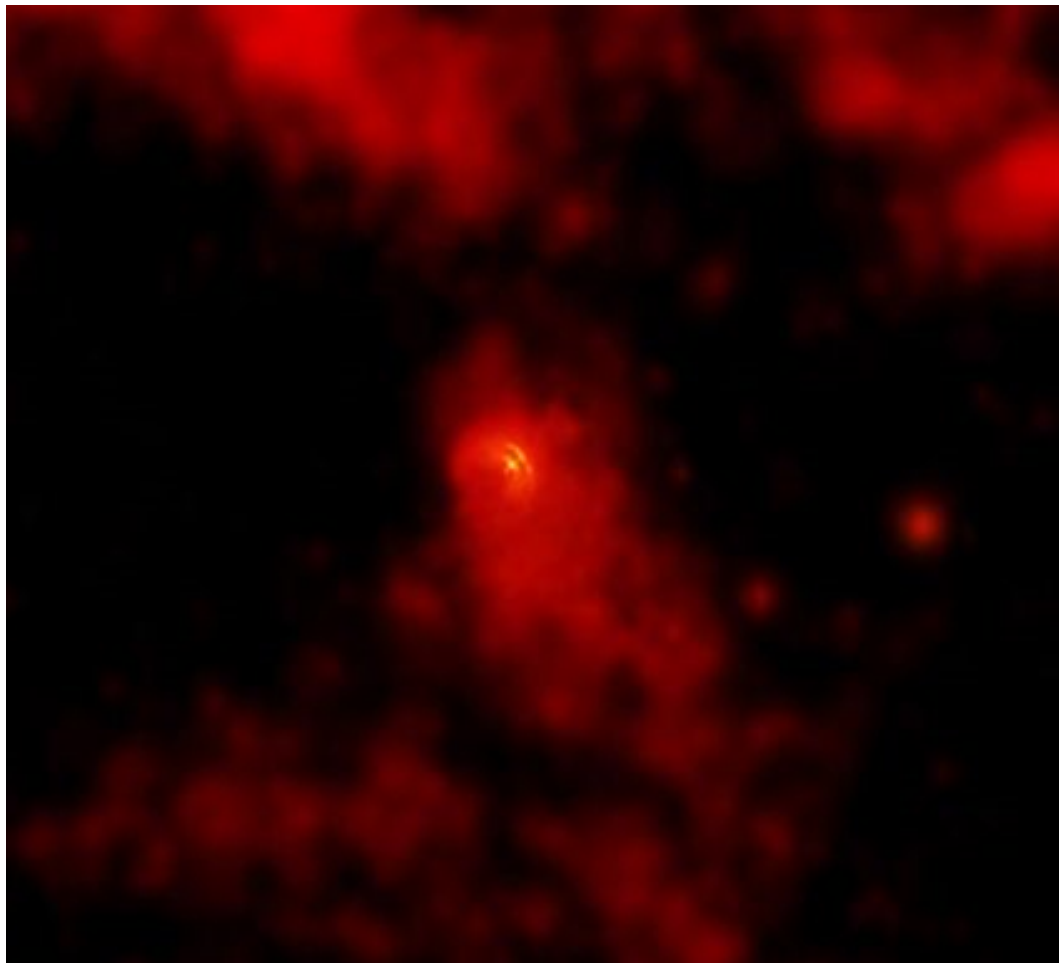
При взрыве сверхновой остатки звезды могут вылететь в одну сторону, при этом нейтронная звезда отбрасывается в другую со скоростью, достигающей 10^2 - 10^3 км/с.

Пульсары



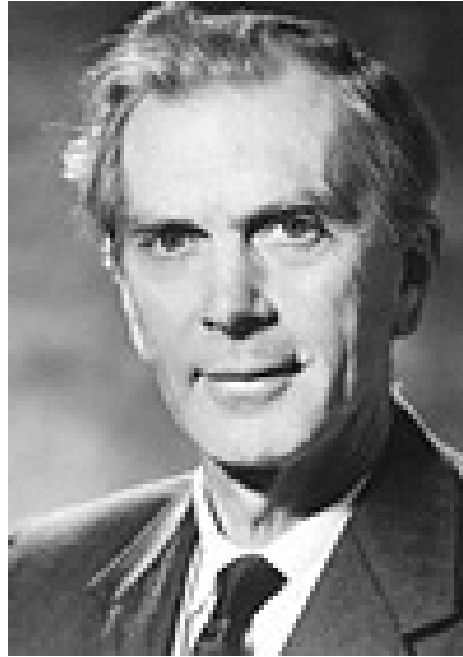
Сохранение углового момента и магнитного поля при коллапсе сверхновой и образовании нейтронной звезды приводит к рождению быстро вращающихся пульсаров с магнитным полем $\sim 10^{10}$ - 10^{14} Гс.

Пульсары



На рентгеновском изображении, полученном обсерваторией Чандра, показан пульсар Вела, представляющий собой нейтронную звезду. Пульсар продолжает поддерживать свечение туманности в центре расширяющегося облака остатков звездного вещества. Пульсар обладает сильным магнитным полем, масса его приблизительно равна массе Солнца, а диаметр составляет около 20 километров. При этом пульсар вращается со скоростью 11 оборотов в секунду.

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

Если при взрыве сверхновой сохраняется остаток массой $M > 5M_{\odot}$, то он не может существовать в виде устойчивой нейтронной звезды. Ядерные силы отталкивания на малых (< 0.5 Фм) расстояниях не в состоянии противостоять дальнейшему гравитационному сжатию звезды. Возникает необычный объект – черная дыра (термин введен Дж. Уилером в 1967 г.).

Существование чёрных дыр предсказано в рамках общей теории относительности Р. Оппенгеймером и Г. Снайдером в 1939 г.

Основное свойство чёрной дыры состоит в том, что никакие сигналы, возникающие внутри неё, не могут выйти за её пределы и достичь внешнего наблюдателя. Звезда массой M , коллапсируя в чёрную дыру, достигает сферы радиуса $r_{ш}$ (сферы Шварцшильда):

$$r_{ш} = \frac{2GM}{c^2} \approx 3(M/M_{\odot}) \text{ км}$$

Формально к этому соотношению можно прийти, полагая в известной формуле для второй космической скорости

$$v_{k2} = \sqrt{2GM / R}$$

предельное значение, равное скорости света.

При достижении объектом размера сферы Шварцшильда его гравитационное поле становится столь сильным, что покинуть этот объект не может даже электромагнитное излучение.

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}** .

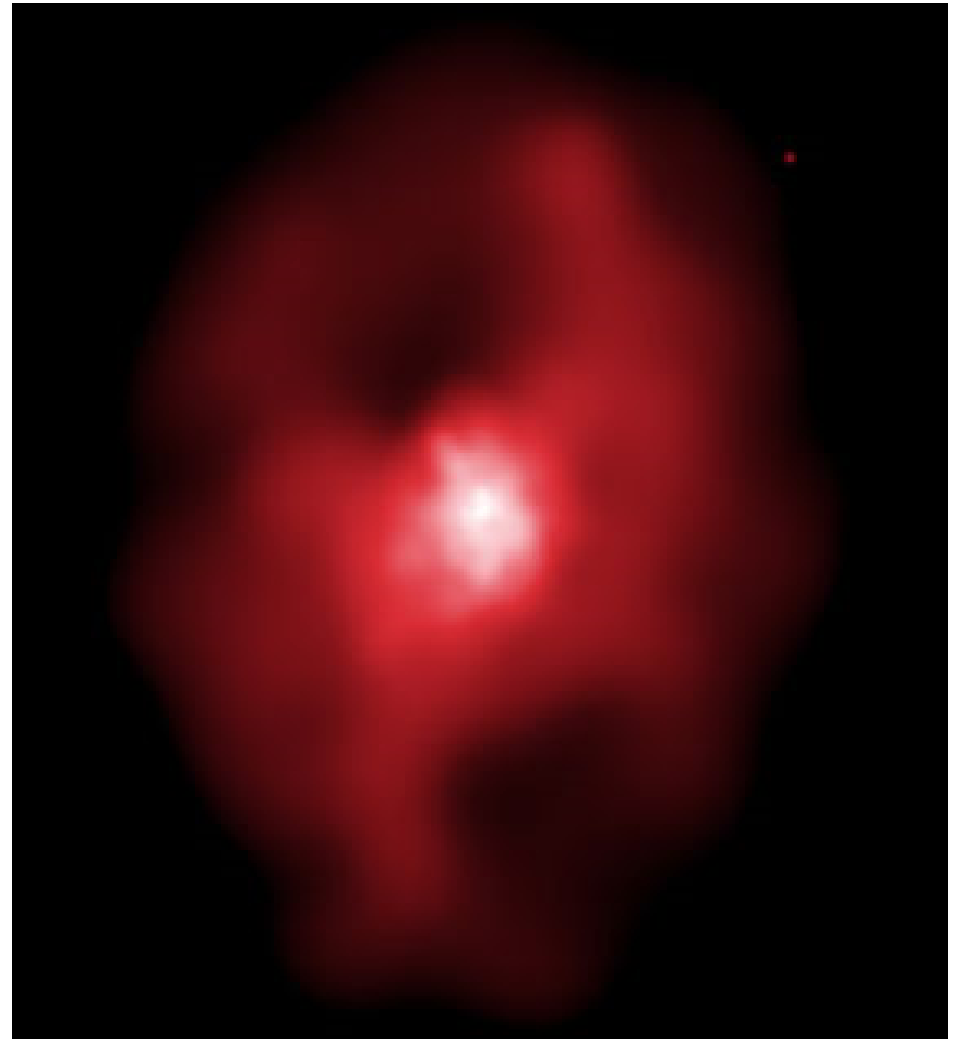
Самая **массивная** (из открытых к настоящему времени) нейтронная звезда J0348+0432 имеет массу **2,04** солнечных масс.

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.

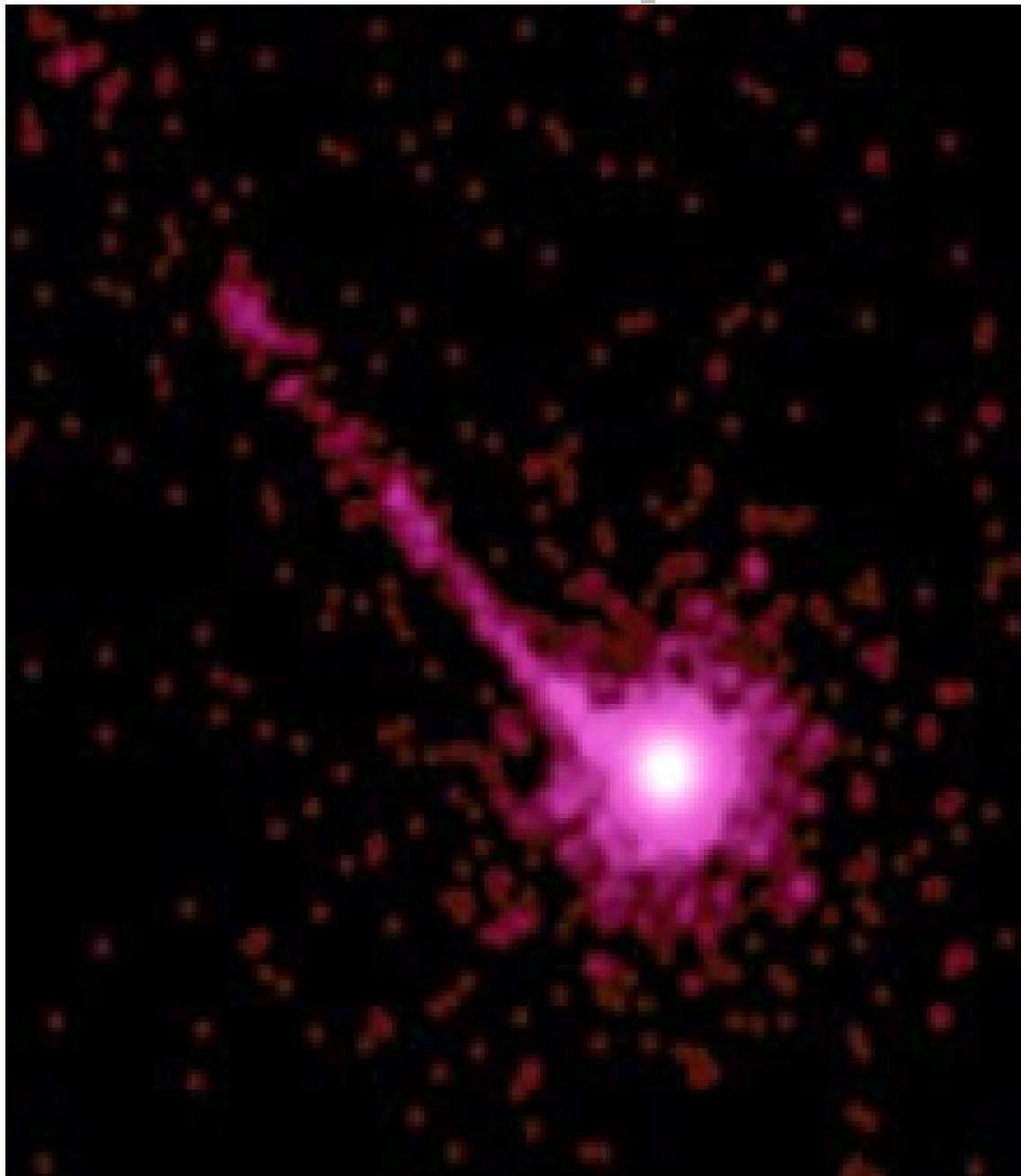
Черные дыры

С помощью рентгеновского телескопа «Чандра» 30 ноября 2003 г. обнаружен мощный выброс вещества во Вселенной. Источником этого извержения является гигантская черная дыра (белая точка в центре изображения), удаленная на расстояние равное 2.6 млрд. световых лет.

Выброс горячего газа, являющийся мощным рентгеновским источником, обнаружен в районе скопления галактик MS 0735.6+7421. Масса черной дыры оценивается приблизительно в 300 млн. масс Солнца. Примерно такое же количество вещества было выброшено с огромной скоростью на расстояние нескольких миллионов световых лет. На



Квазар PKS 1127-145



На снимке, полученном рентгеновским телескопом Chandra показан квазар PKS 1127-145. Виден мощный выброс, который простирается на миллионы световых лет.

Предполагается, что выброс произошел в результате падения газа на сверхмассивную черную дыру.

Квазар удален на расстояние в 10 млрд. световых лет и находится в созвездии Чаша.

Светимость квазара - 10^{45} - 10^{48} эрг/с

Светимость Солнца - $3,8 \cdot 10^{33}$ эрг/с

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

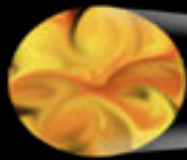


Белый карлик

Звезда-соседка

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

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

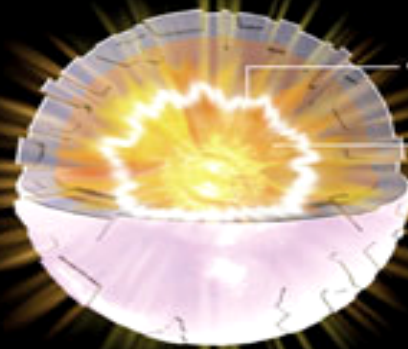


Гелий

Углерод/Кислород

Ядро

4 Пламя устремляется наружу, превращая углерод и кислород в никель



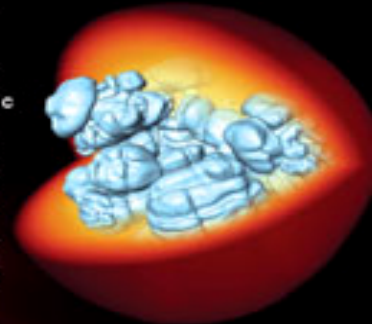
Фронт горения

Никель

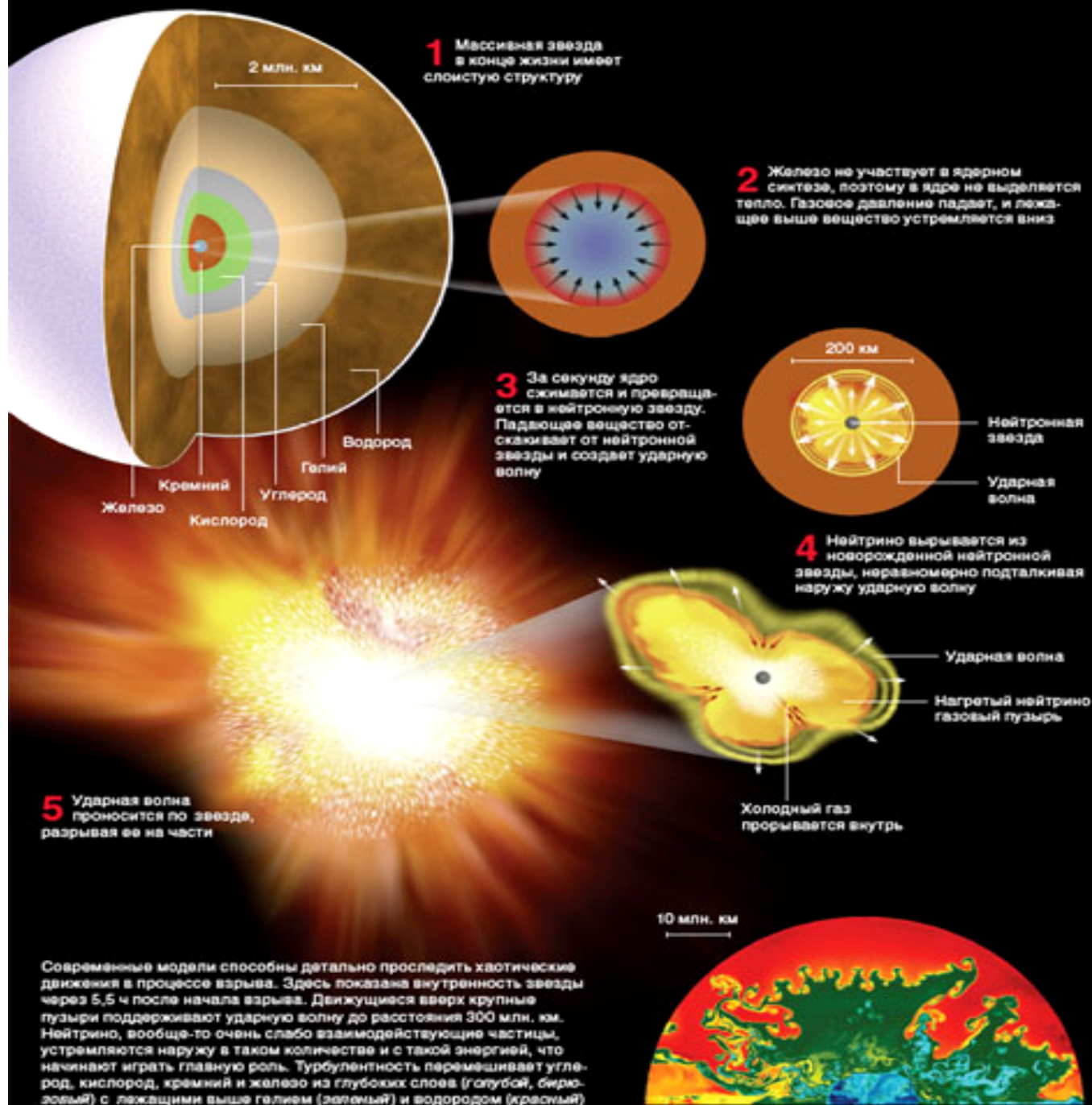
5 За несколько секунд карлик полностью разрушается. Затем еще несколько недель радиоактивный никель распадается, вызывая свечение остатков звезды



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



Сверхновая типа Ib, Ic, II

Сверхновая SN 1987А

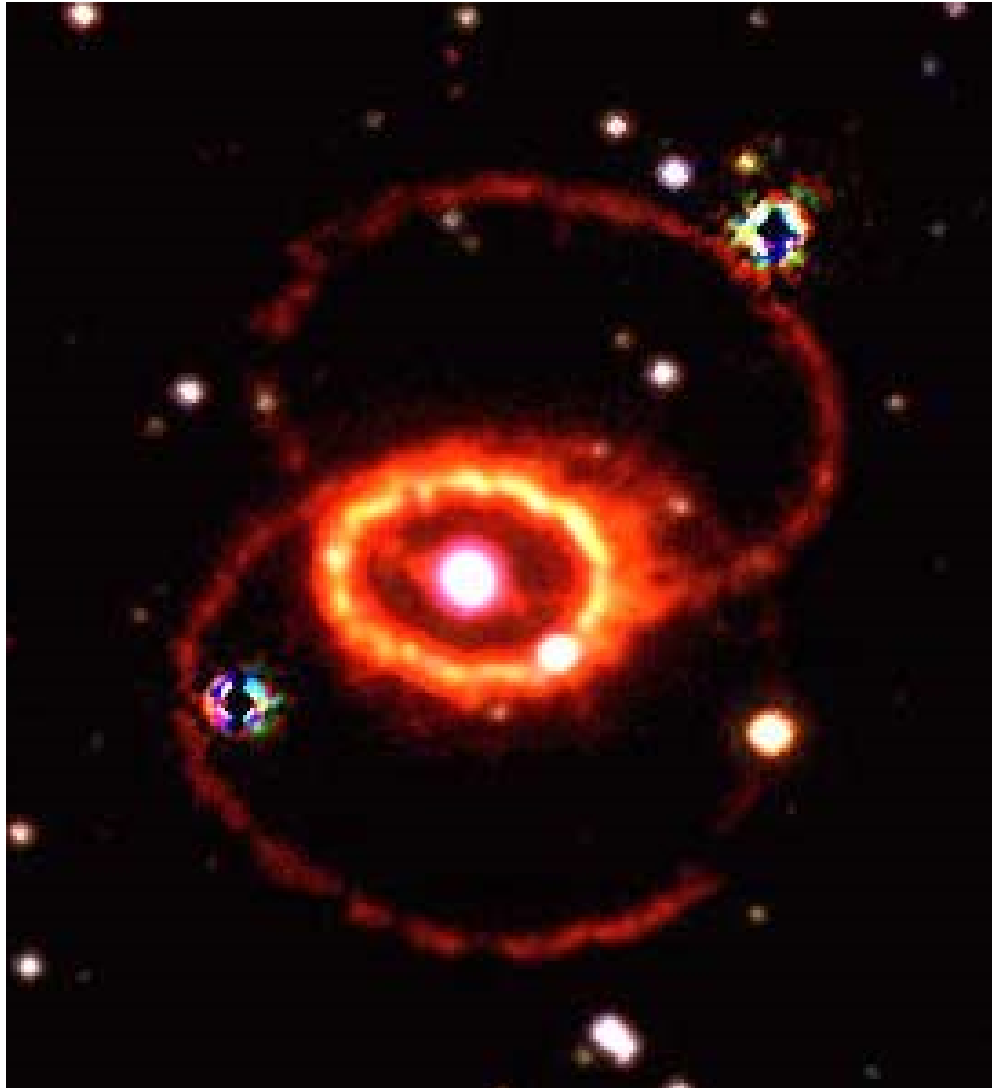


© Anglo-Australian Observatory

Сверхновая SN 1987A

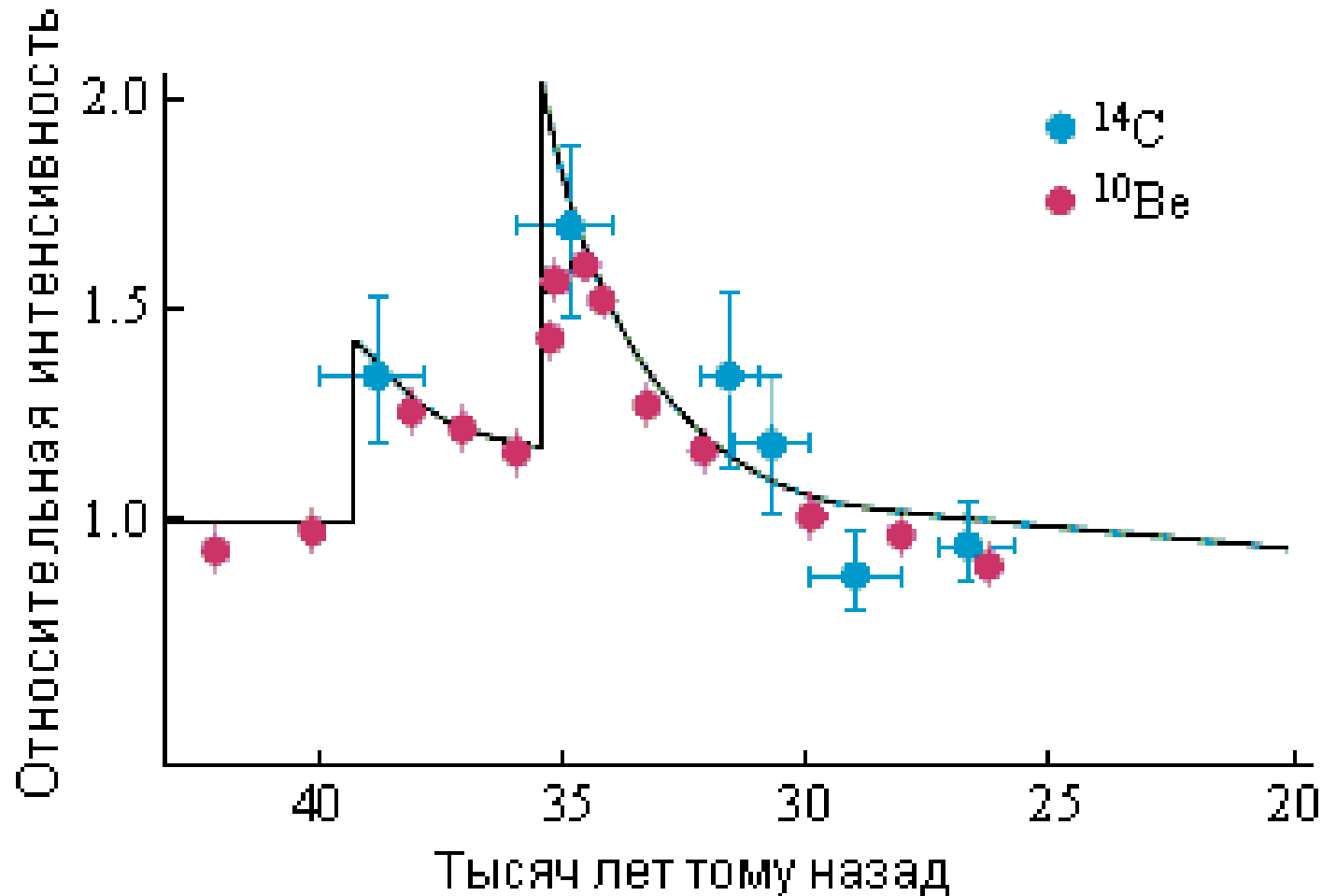
В 1987 г. в одной из ближайших галактик — Большом Магеллановом облаке, отстоящей от нашей галактики на 170000 световых лет, произошел взрыв Сверхновой SN1987A. Оболочка Сверхновой была выброшена взрывом со скоростью в несколько десятков тысяч километров в секунду. На её месте раньше наблюдался голубой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

Сверхновая SN 1987А



На снимке, полученном космическим телескопом Хаббла (HST) изображен остаток от взрыва сверхновой SN 1987А, 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

Временная зависимость интенсивности космических лучей



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