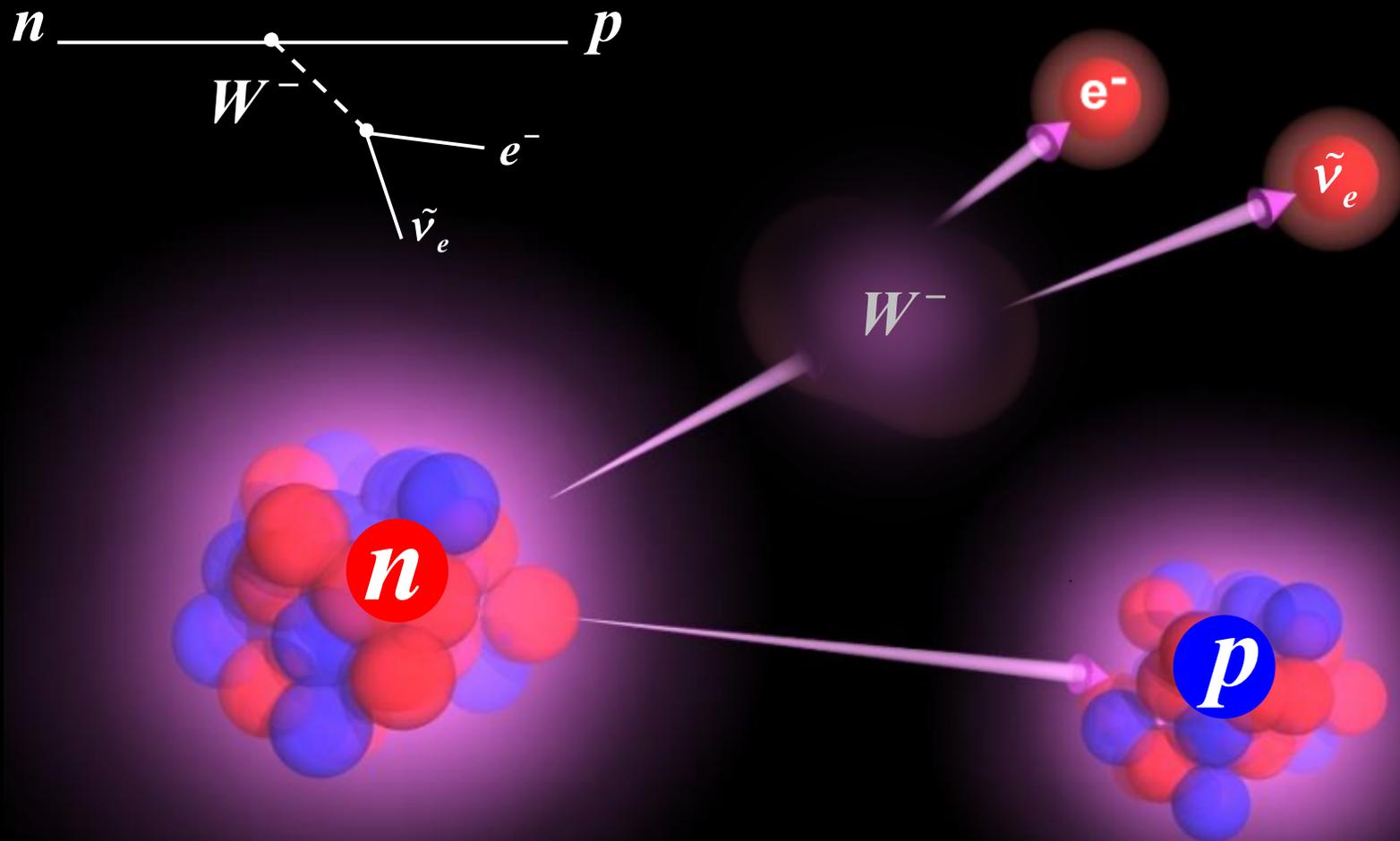


Рождение и жизнь атомных ядер



**ЗАВЕРШАЮЩИЕ
СТАДИИ
ЭВОЛЮЦИИ ЗВЕЗД**

Диаграмма Герцшпрунга-Рассела

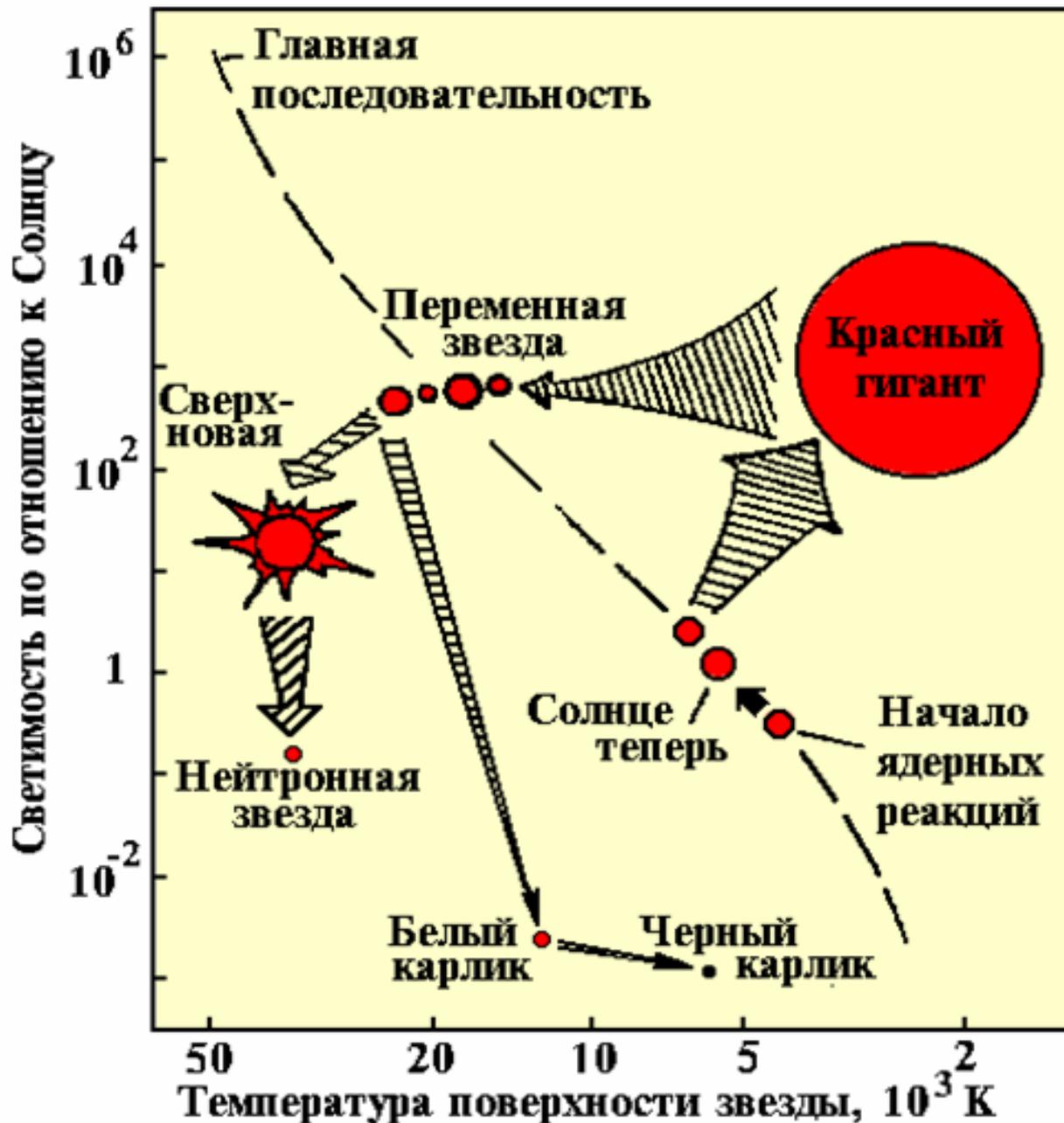


диаграмма
эволюции
звезд

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

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.

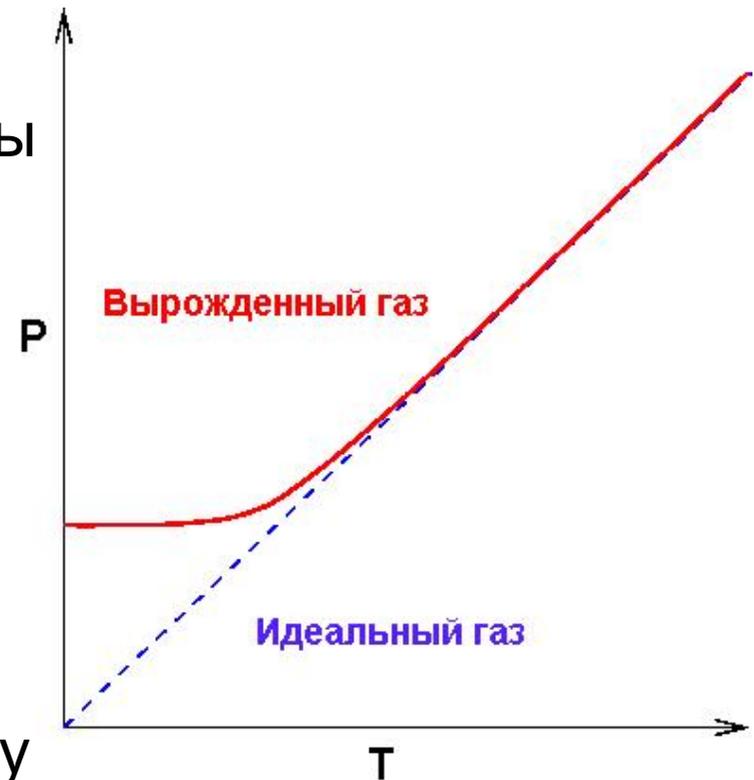
Белый карлик образуется благодаря устойчивому равновесию сил гравитации и давления вырожденного релятивистского электронного газа. Давление электронного газа имеет квантовую природу. Оно возникает как следствие принципа Паули и соотношения неопределенности. Принцип Паули определяет предельный минимальный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

Белые карлики

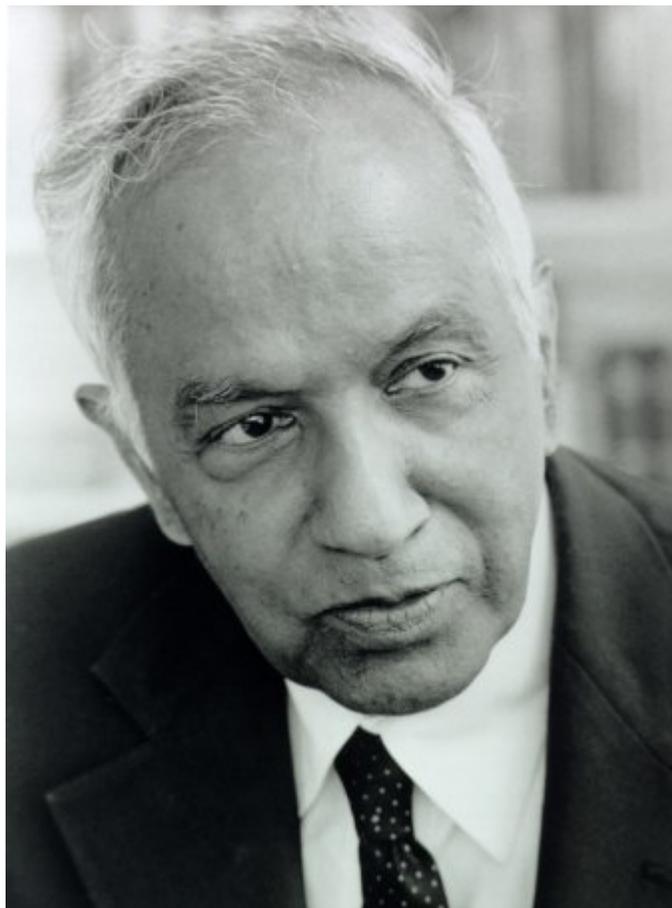
$$\Delta p \cdot \Delta x \approx \hbar$$

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.

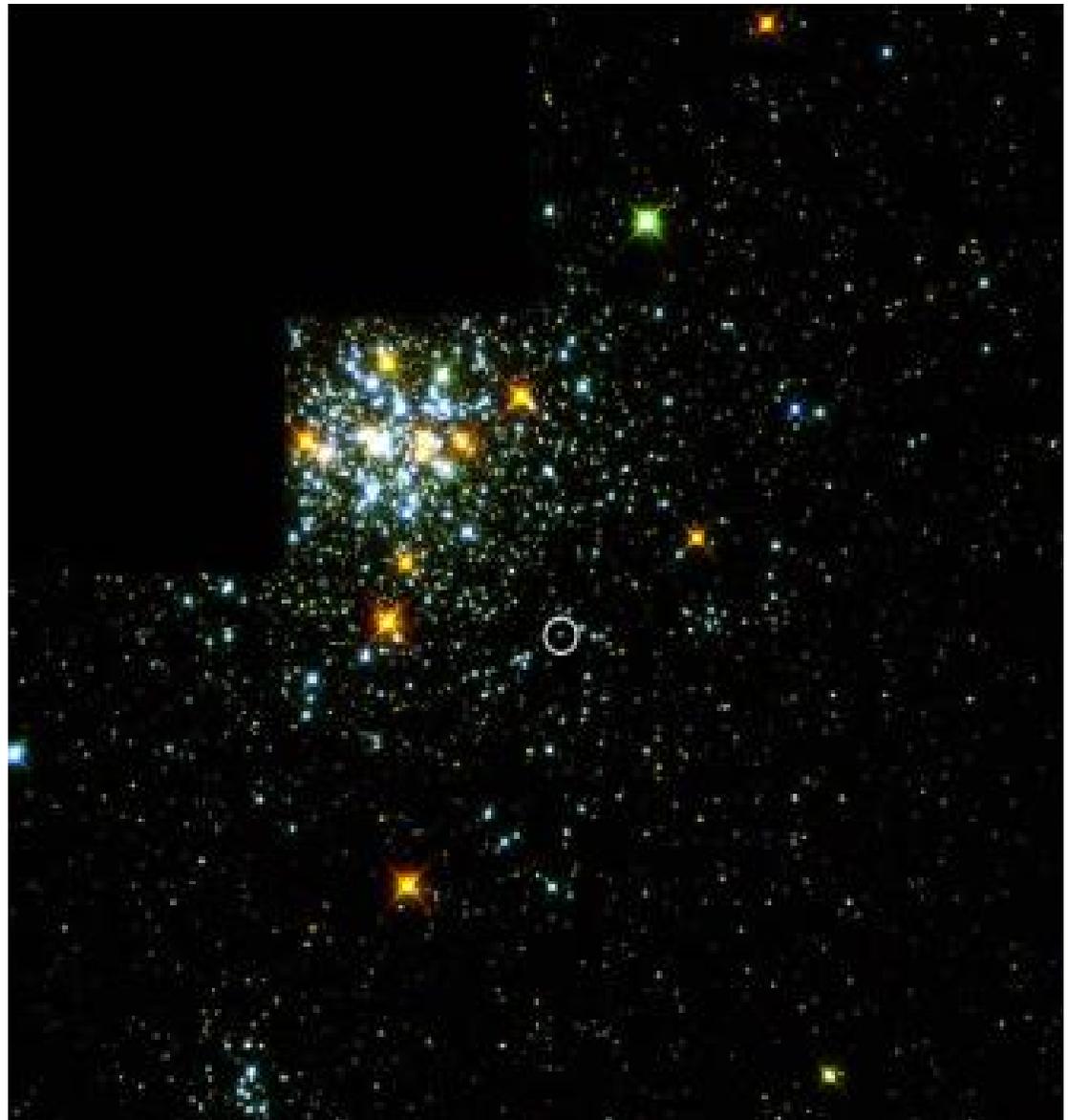
Белые карлики



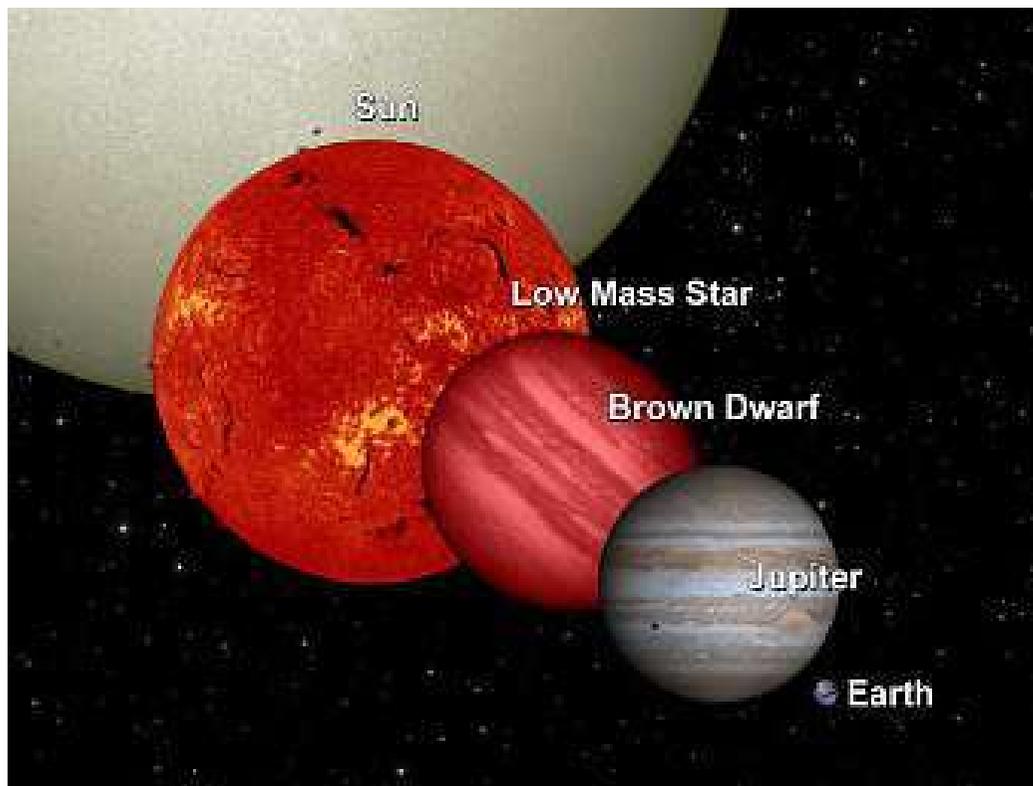
На снимке показана планетарная туманность Красный паук NGC 6537. Эта планетарная туманность, состоит из двух симметричных взаимопроникающих структур и содержит один из самых горячих известных белых карликов, входящих в состав двойной звездной системы.

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

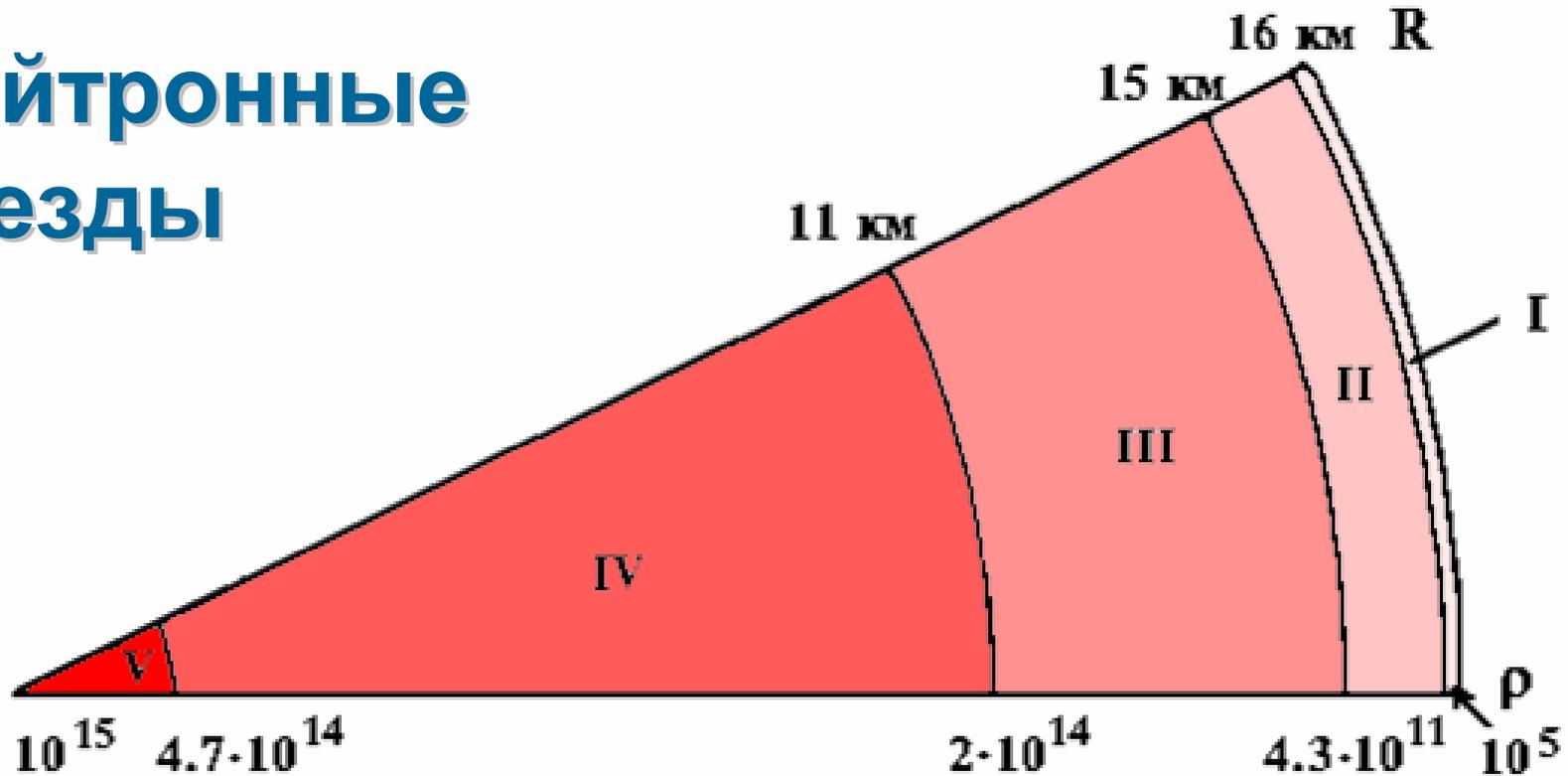
Нейтронная звезда образуется как остаток сверхновой после выброса нейтрино. Она имеет ядерную плотность (10^{14} - 10^{15} г/см³) и типичный радиус 10-20 км. Дальнейшему гравитационному сжатию нейтронной звезды препятствует давление ядерной материи, возникающее за счёт взаимодействия нейтронов. Это давление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

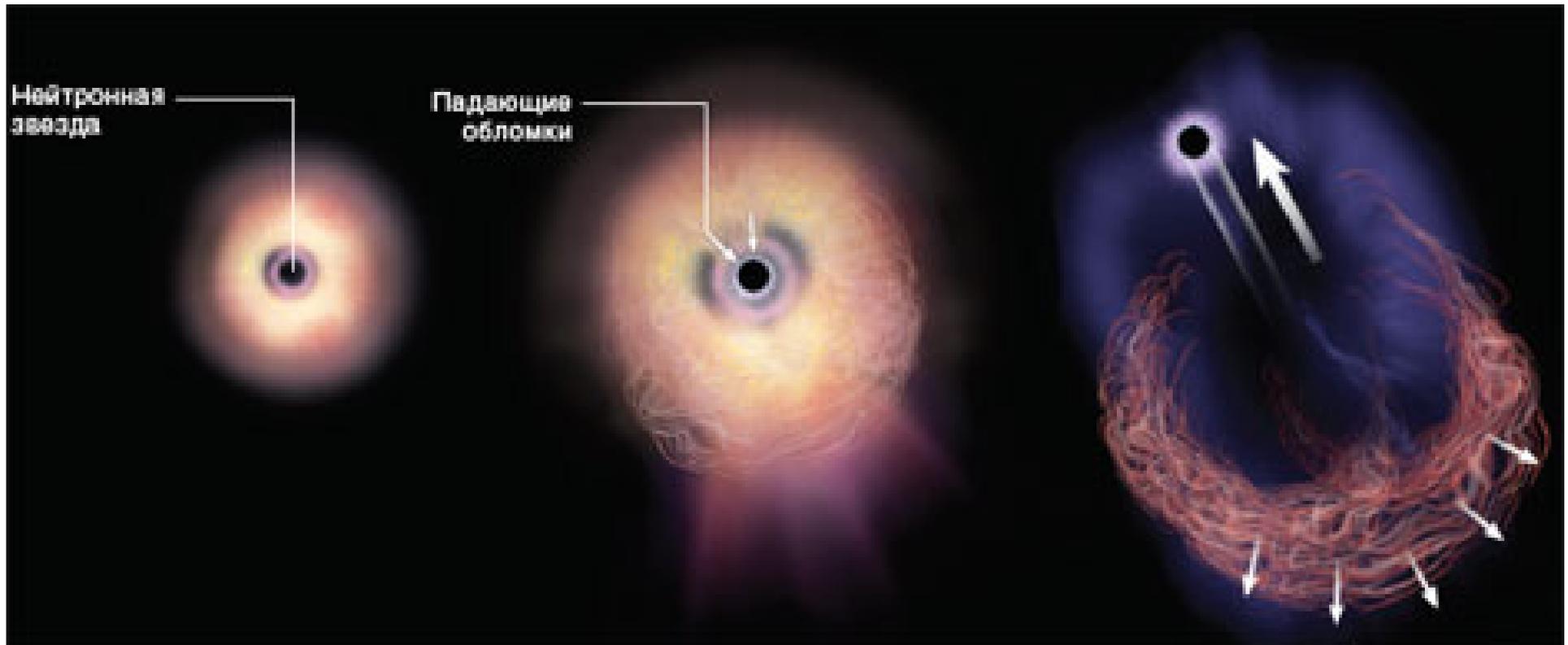
Нейтронные звезды



Нейтронная звезда массой $1.5M_{\odot}$ и радиусом $R=16$ км. Указана плотность ρ в г/см³ в различных частях звезды.

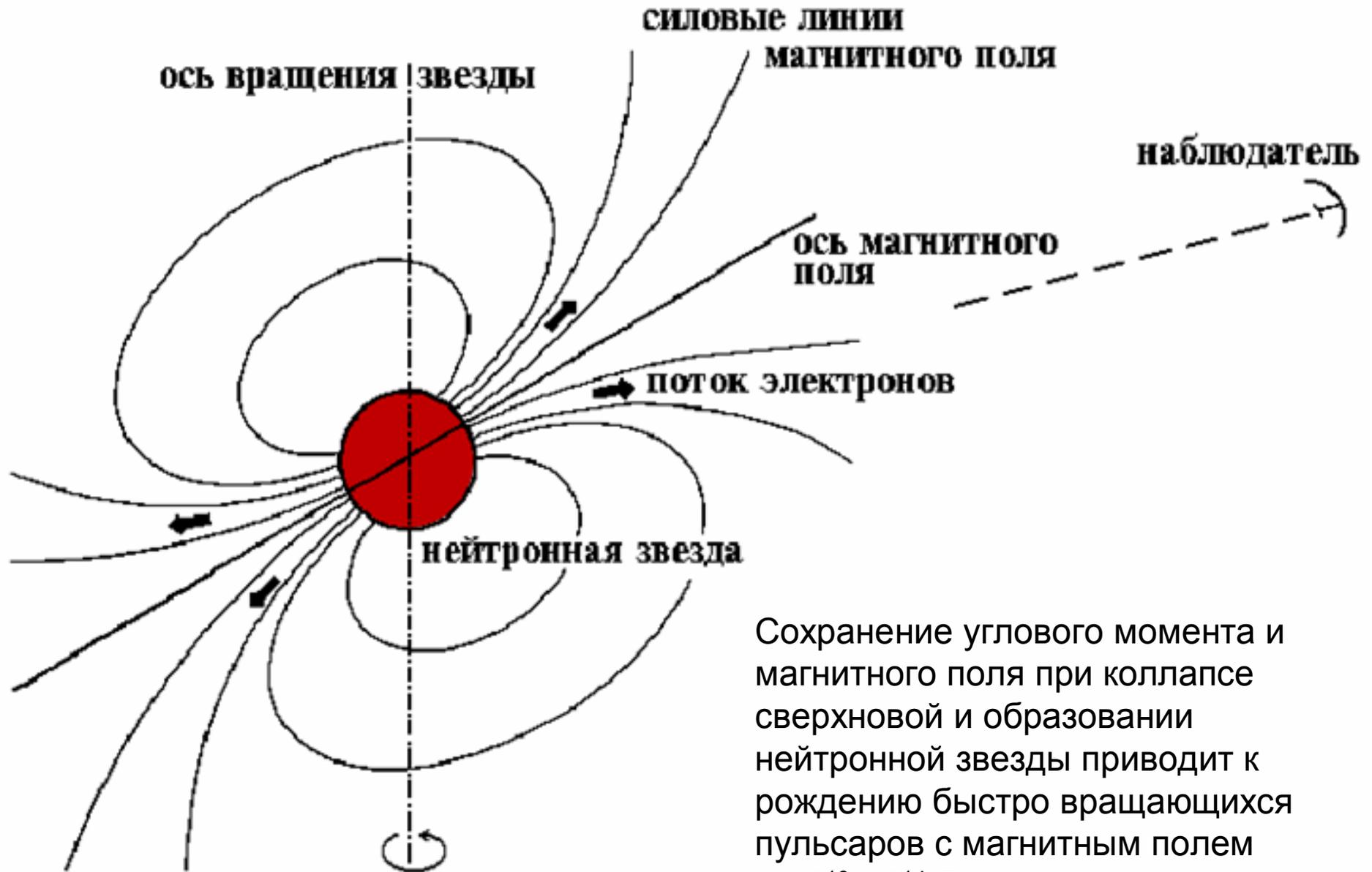
- I – внешний слой из плотно упакованных атомов;
- II – кристаллическая решётка атомных ядер и вырожденных электронов;
- III – твёрдый слой из атомных ядер, перенасыщенных нейтронами;
- IV – жидкое ядро, состоящее в основном из вырожденных нейтронов;
- V – адронная сердцевина нейтронной звезды кроме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

Скорости нейтронных звезд



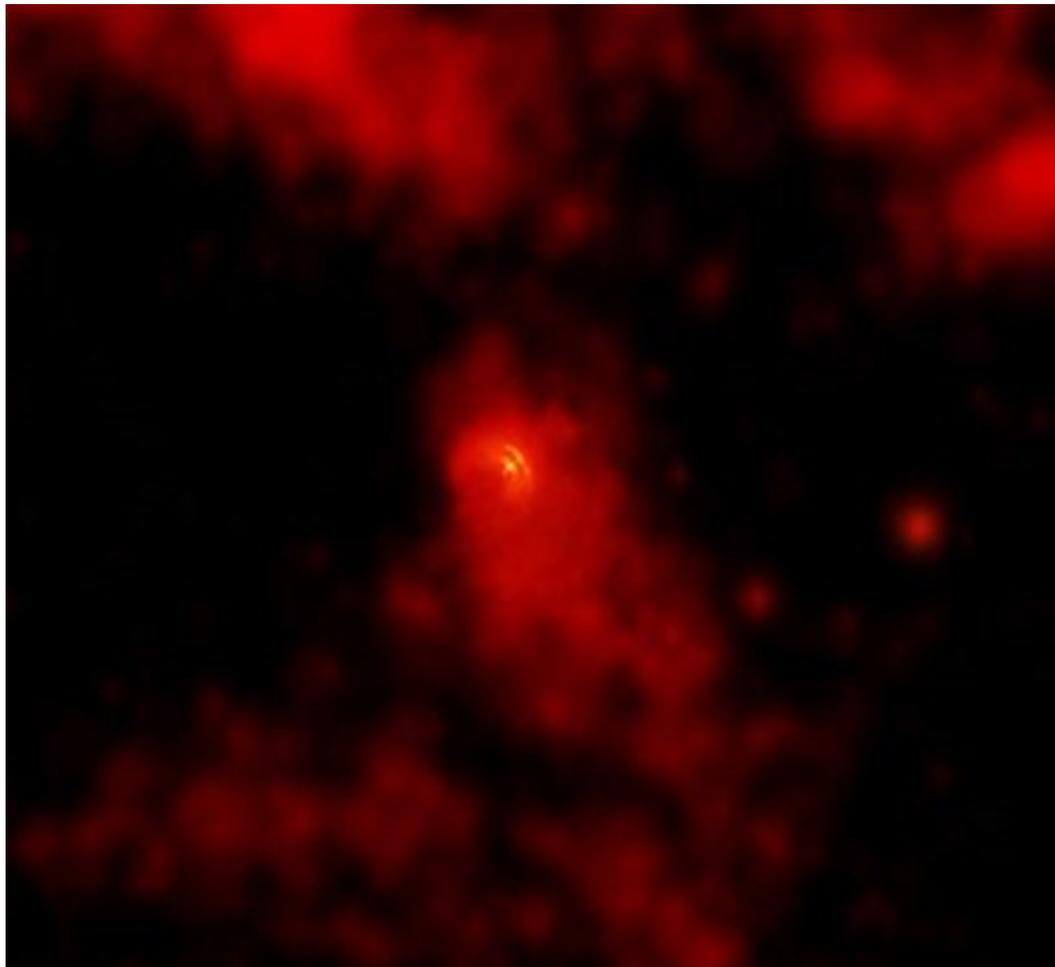
При взрыве сверхновой остатки звезды могут вылететь в одну сторону, при этом нейтронная звезда отбрасывается в другую со скоростью, достигающей 10^2 - 10^3 км/с.

Пульсары



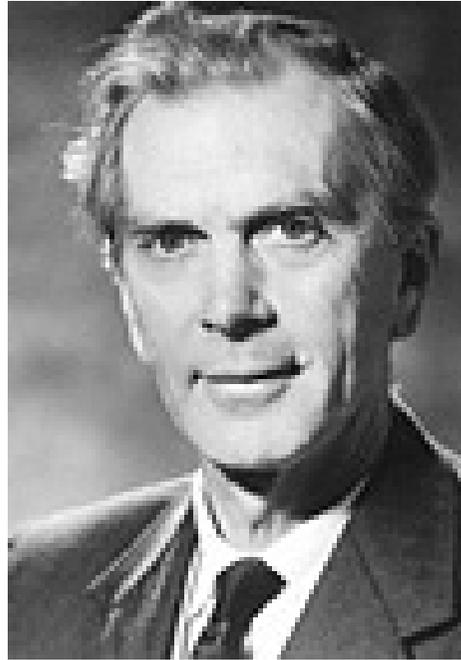
Сохранение углового момента и магнитного поля при коллапсе сверхновой и образовании нейтронной звезды приводит к рождению быстро вращающихся пульсаров с магнитным полем $\sim 10^{10}-10^{14}$ Гс.

Пульсары

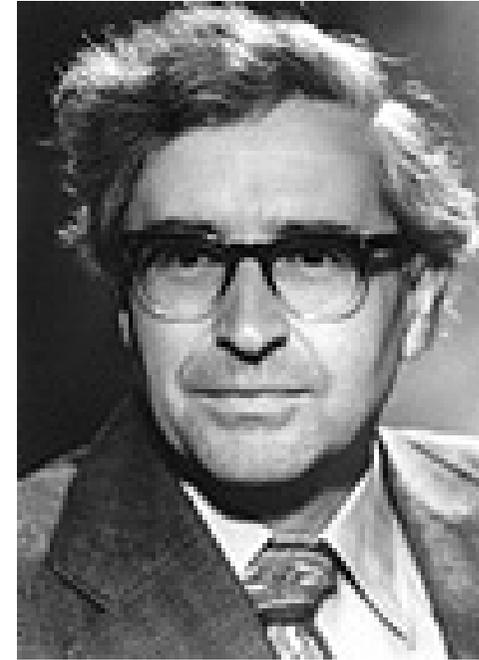


На рентгеновском изображении, полученном обсерваторией Чандра, показан пульсар Вела, представляющий собой нейтронную звезду. Пульсар продолжает поддерживать свечение туманности в центре расширяющегося облака остатков звездного вещества. Пульсар обладает сильным магнитным полем, масса его приблизительно 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}** .

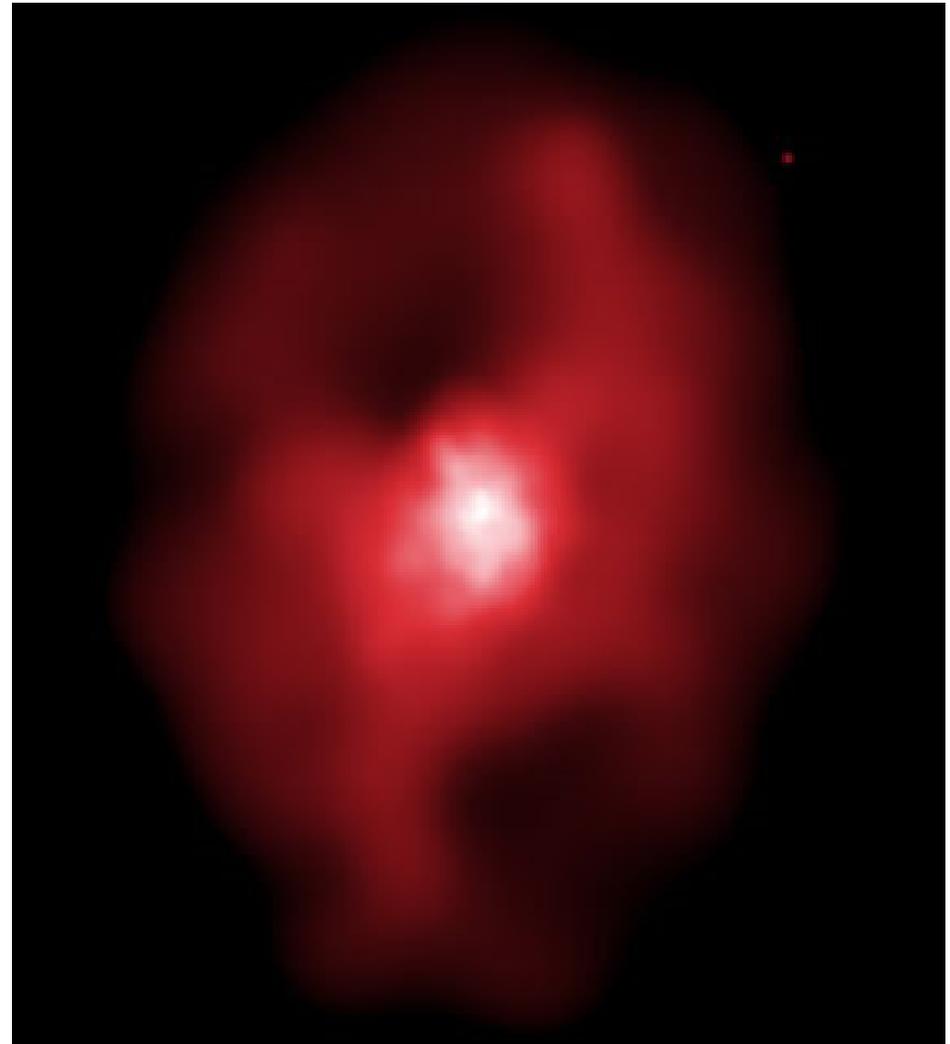
Самая **массивная** (из открытых к настоящему времени) нейтронная звезда J0348+0432 имеет массу **2,04** солнечных масс.

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.

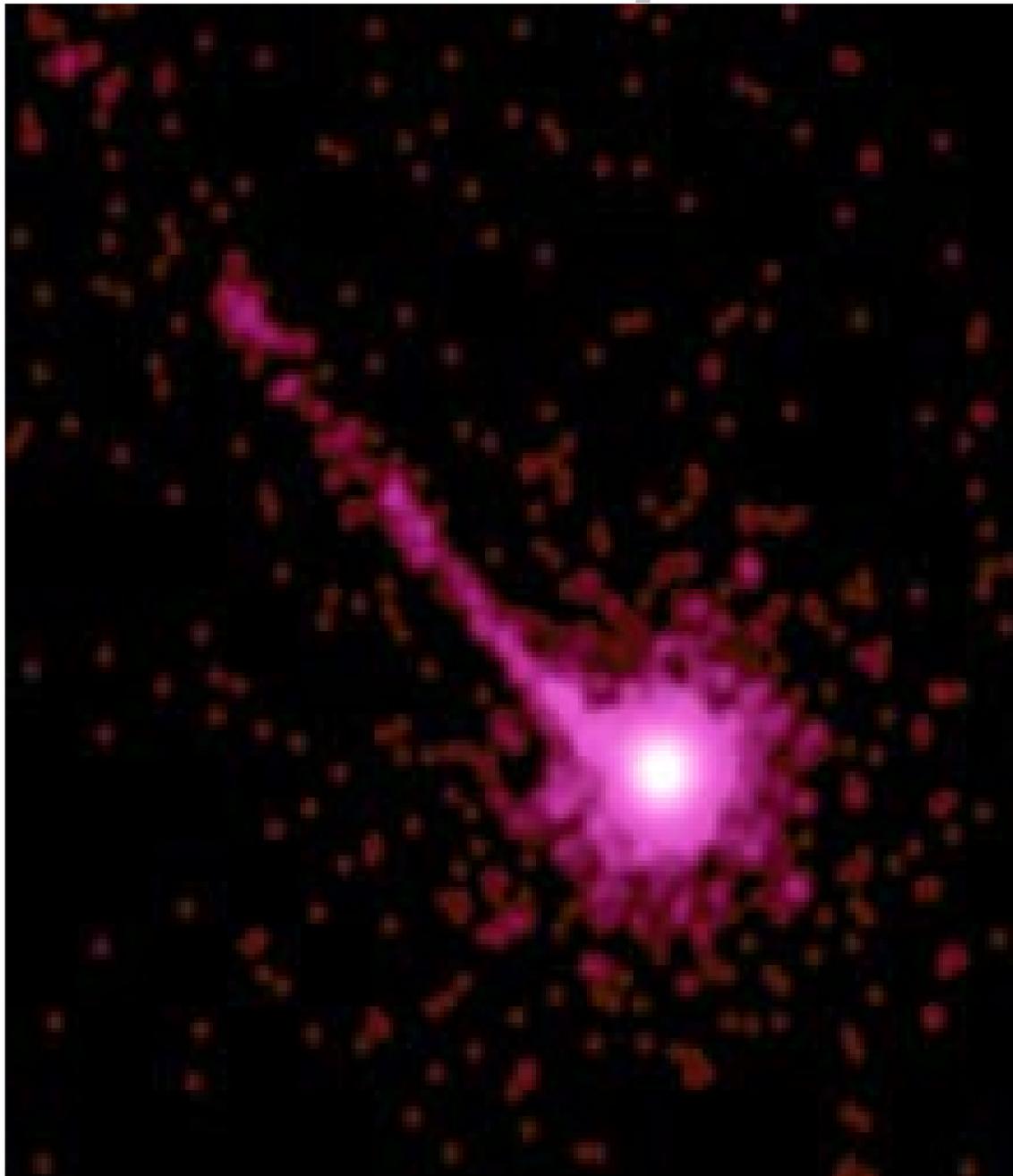
Черные дыры

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

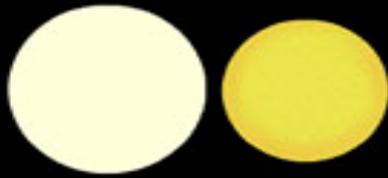
Светимость Солнца - $3,8 \cdot 10^{33}$ эрг/с

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

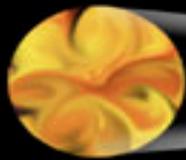


Белый карлик

Звезда-соседка

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

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

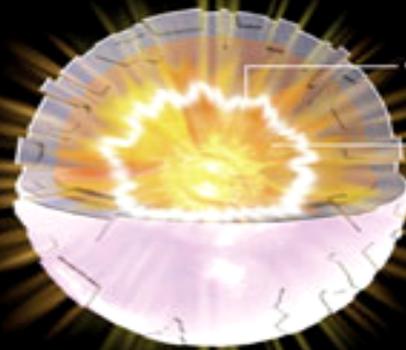


Гелий

Углерод/Кислород

Ядро

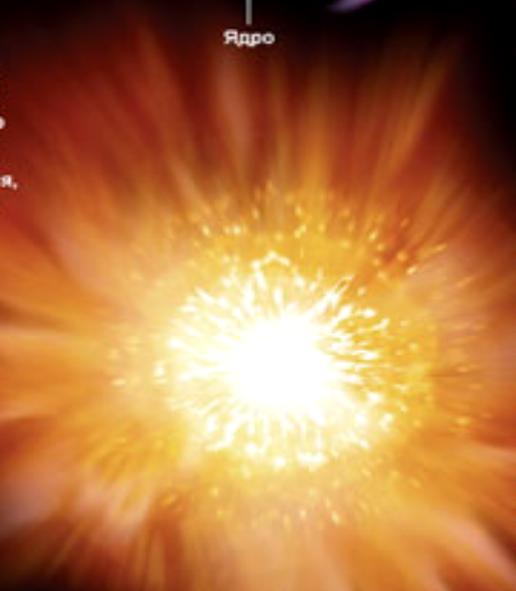
4 Пламя устремляется наружу, превращая углерод и кислород в никель



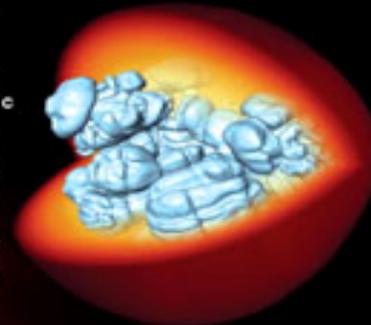
Фронт горения

Никель

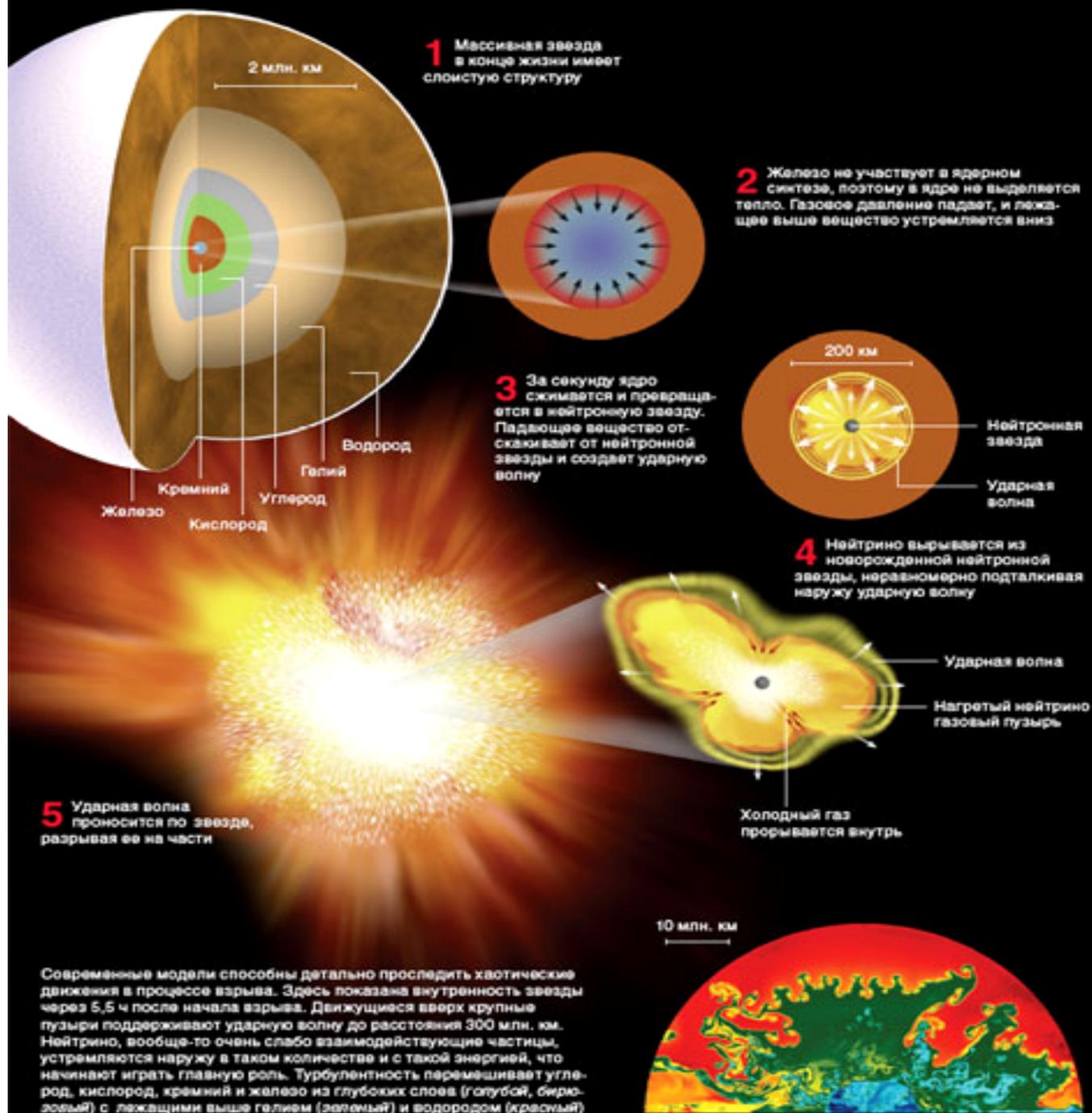
5 За несколько секунд карлик полностью разрушается. Затем еще несколько недель радиоактивный никель распадается, вызывая свечение остатков звезды



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

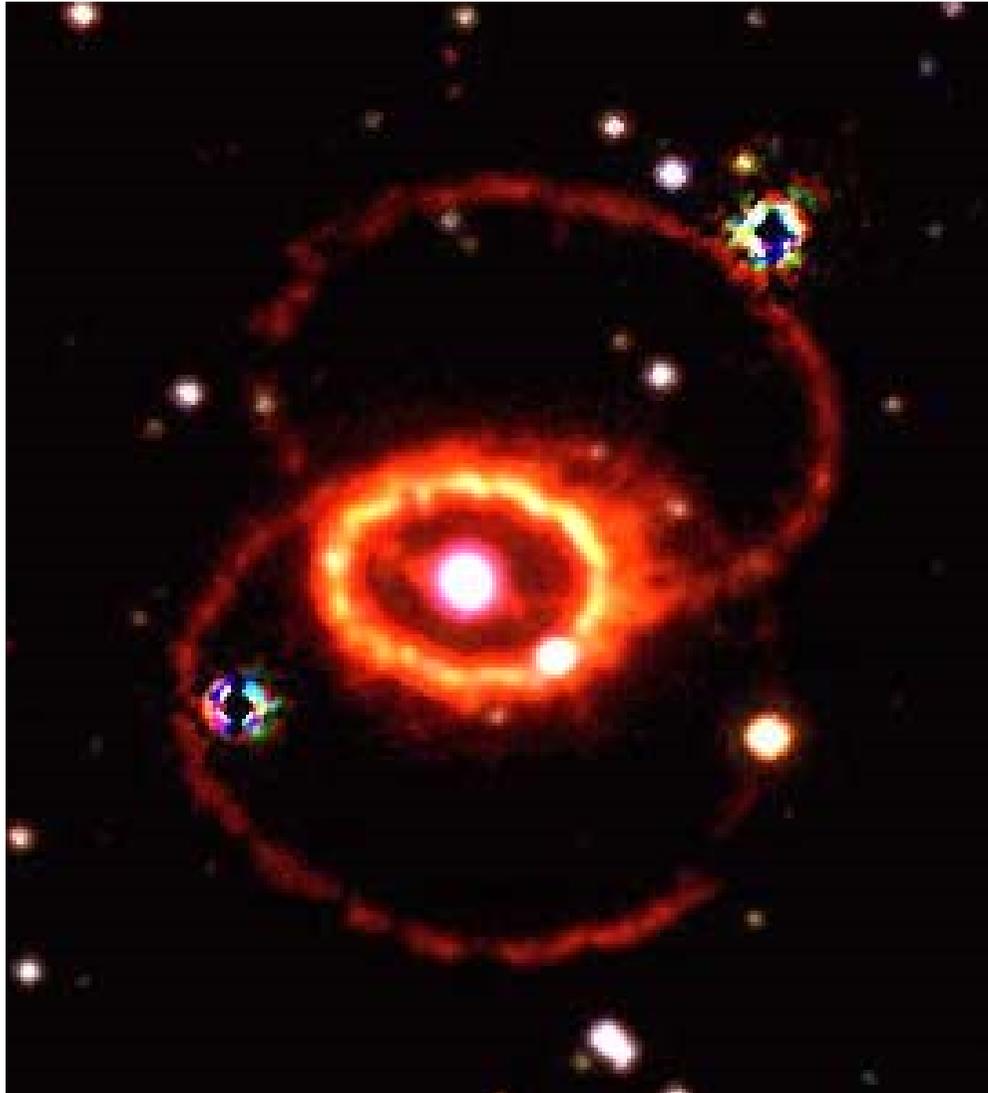


© Anglo-Australian Observatory

Сверхновая SN 1987A

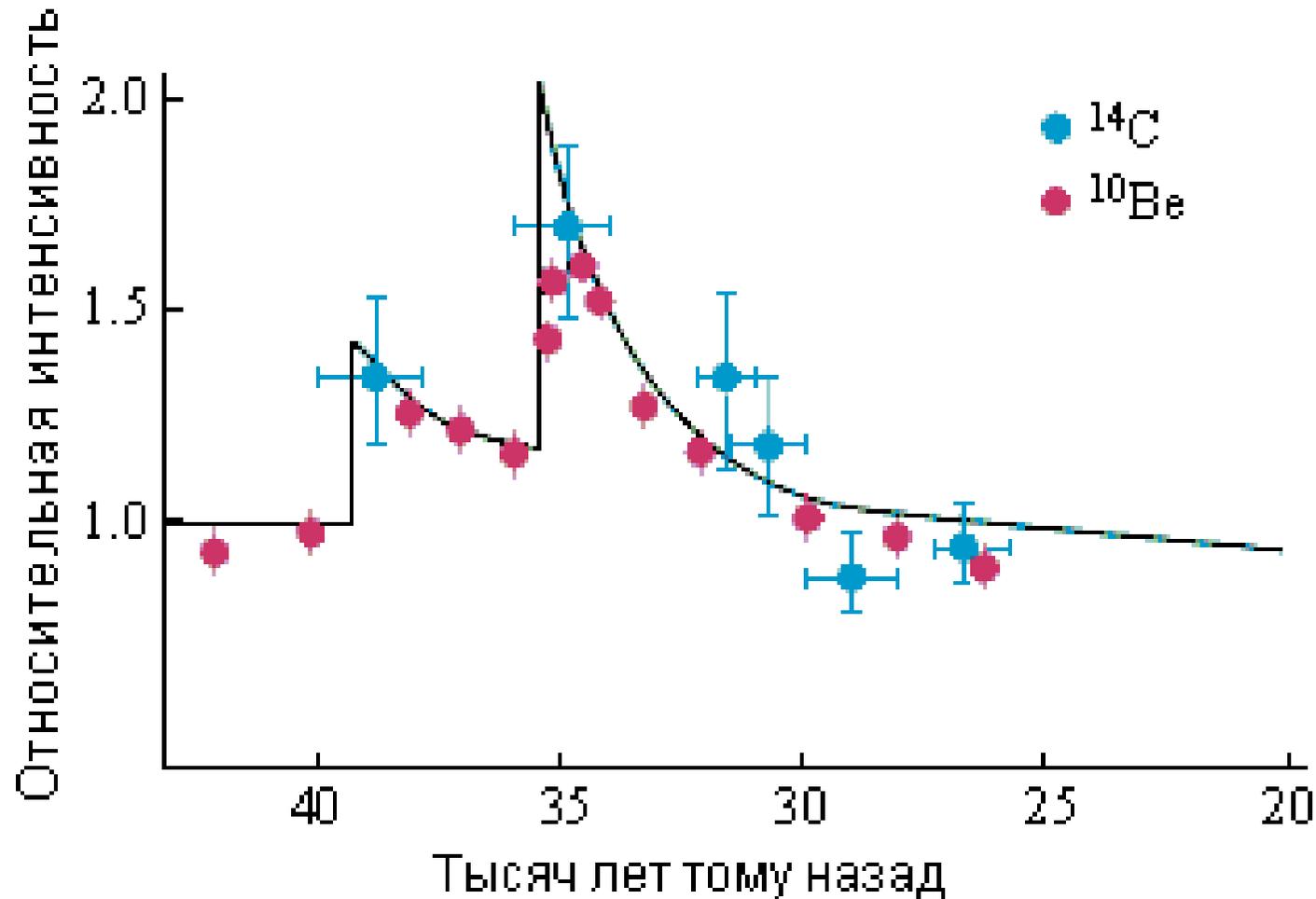
В 1987 г. в одной из ближайших галактик — Большом Магеллановом облаке, отстоящей от нашей галактики на 170000 световых лет, произошел взрыв Сверхновой SN1987A. Оболочка Сверхновой была выброшена взрывом со скоростью в несколько десятков тысяч километров в секунду. На её месте раньше наблюдался голубой 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



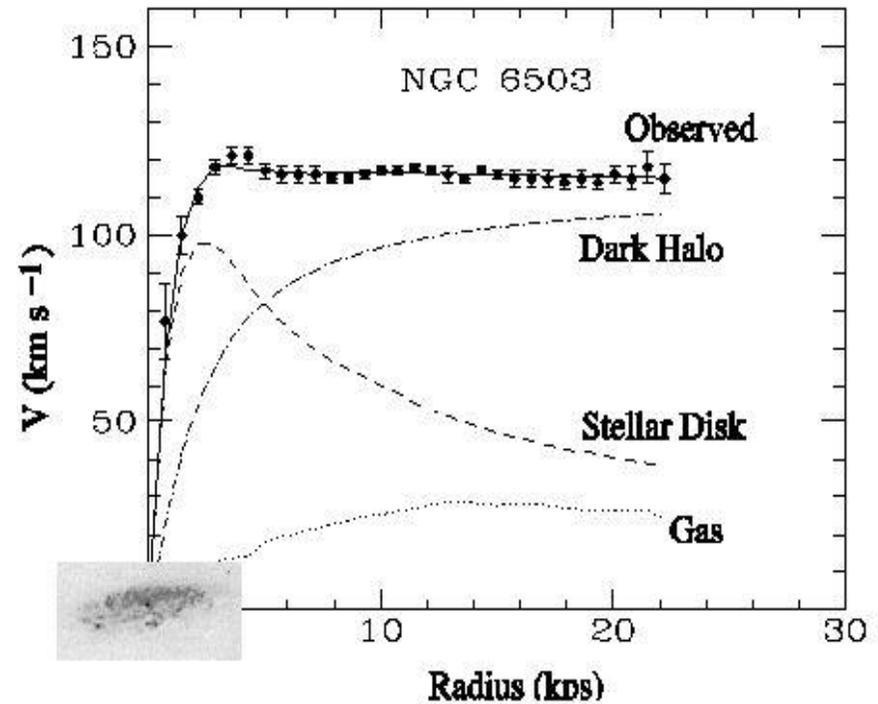
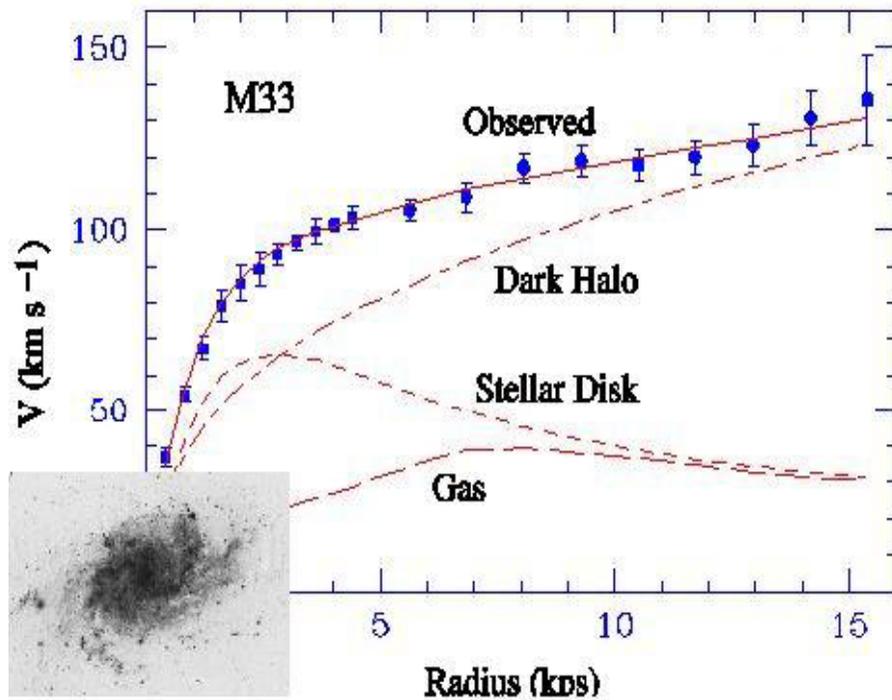
Увеличение интенсивности космических лучей связывают с взрывом Сверхновой близкой к Солнечной системе (около 200 световых лет).

Темная материя

Ротационные кривые



1933 г. Ф. Цвики



Гравитационное линзирование

Гравитационное линзирование изображения далеких галактик с помощью скопления галактик позволяет по форме изображения восстановить распределение плотности материи в скоплении галактик.



Снимок телескопа HUBBLE
скопления галактик CI 0024+17



Составное изображение.
На синей карте распределения материи
(определена по эффектам линзирования),
наложенной на снимок скопления, видна
кольцеобразная структура.

Темная материя

Возможные источники

- **MACHOs** – Massive Astrophysical Compact Halo Objects

Массивные астрофизические объекты в гало галактики

- ✓ Черные дыры

- ✓ Старые нейтронные звезды

- ✓ Коричневые карлики

- **WIMPs** – Weakly Interacting Massive Particles

Масса темной материи примерно в десять раз больше массы светящегося вещества, состоящего из барионной материи.

Эксперименты по поиску WIMPов (значимые результаты за 2008-2011 гг.)

- Эксперимент CDMS II (Cryogenic Dark Matter Search), Беркли, 2009 г.

Зарегистрировано 2 события при ожидаемой величине фона около 1,5 событий.

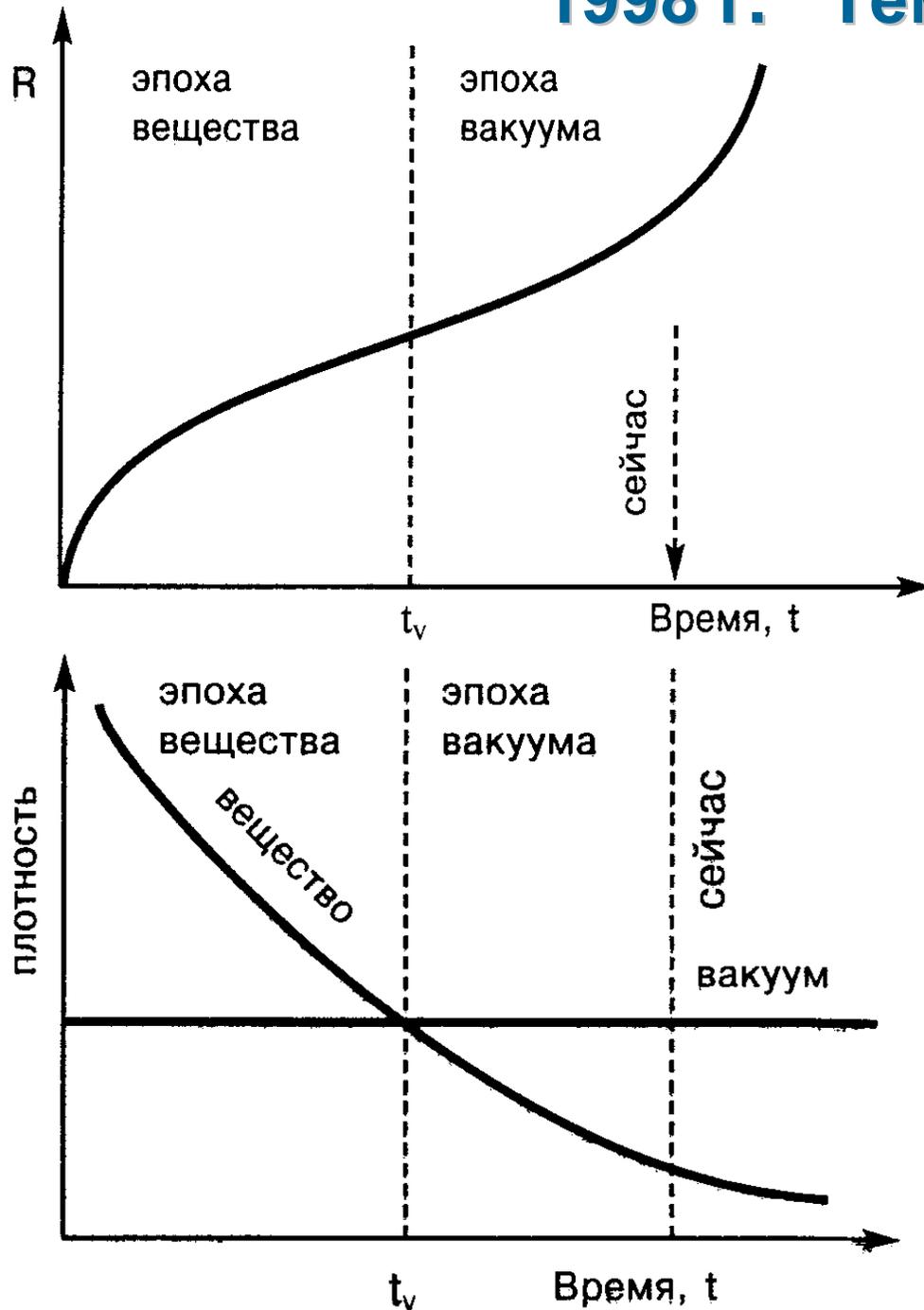
- Эксперимент XENON100, Гран Сассо, 2011 г.

Зарегестрировано 3 события, однако при величине фона 2 событий данный результат нельзя расценивать как детектирование частиц темной материи.

- Эксперимент CRESST (Cryogenic Rare Event Search with Superconducting Thermometres), Гран Сассо, 2011г.

Зарегистрировано 67 событий — кандидатов на роль темной материи. После анализа возможных источников фона осталось 29 событий, в которых, возможно, были зарегистрированы WIMPы.

1998 г. 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.

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

Барионы

Вакуум

