

The background of the slide is a composite image. The upper portion shows a clear night sky with the Milky Way galaxy visible as a dense band of stars and dust, stretching from the top left towards the center. The lower portion shows the dark silhouettes of ancient stone ruins, including several tall, rectangular pillars and a small structure with a gabled roof, set against the dark horizon.

Лекция 9

**Dust to Dust and
Ashes to Ashes**

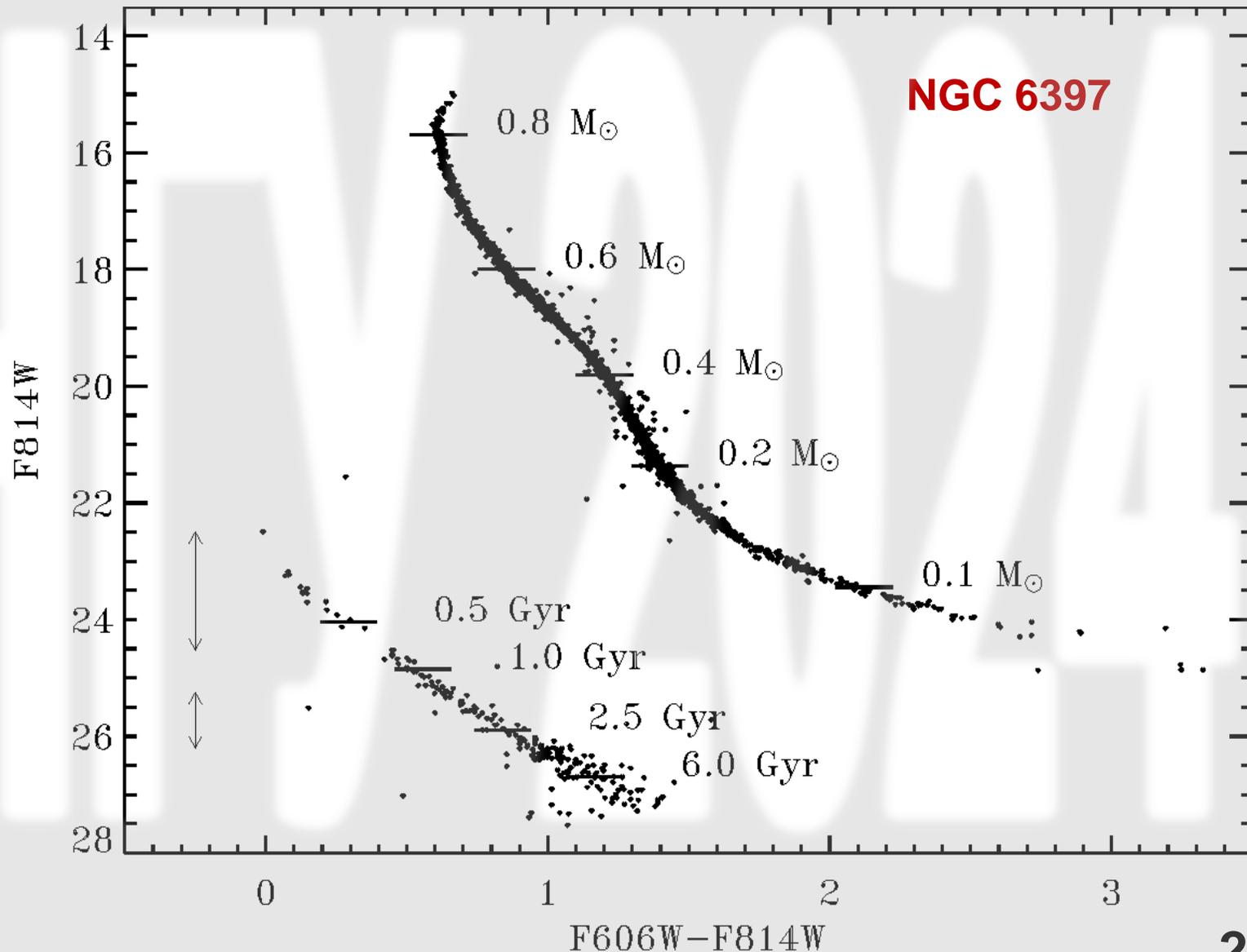
ФФ НГУ, 2024

Белые карлики

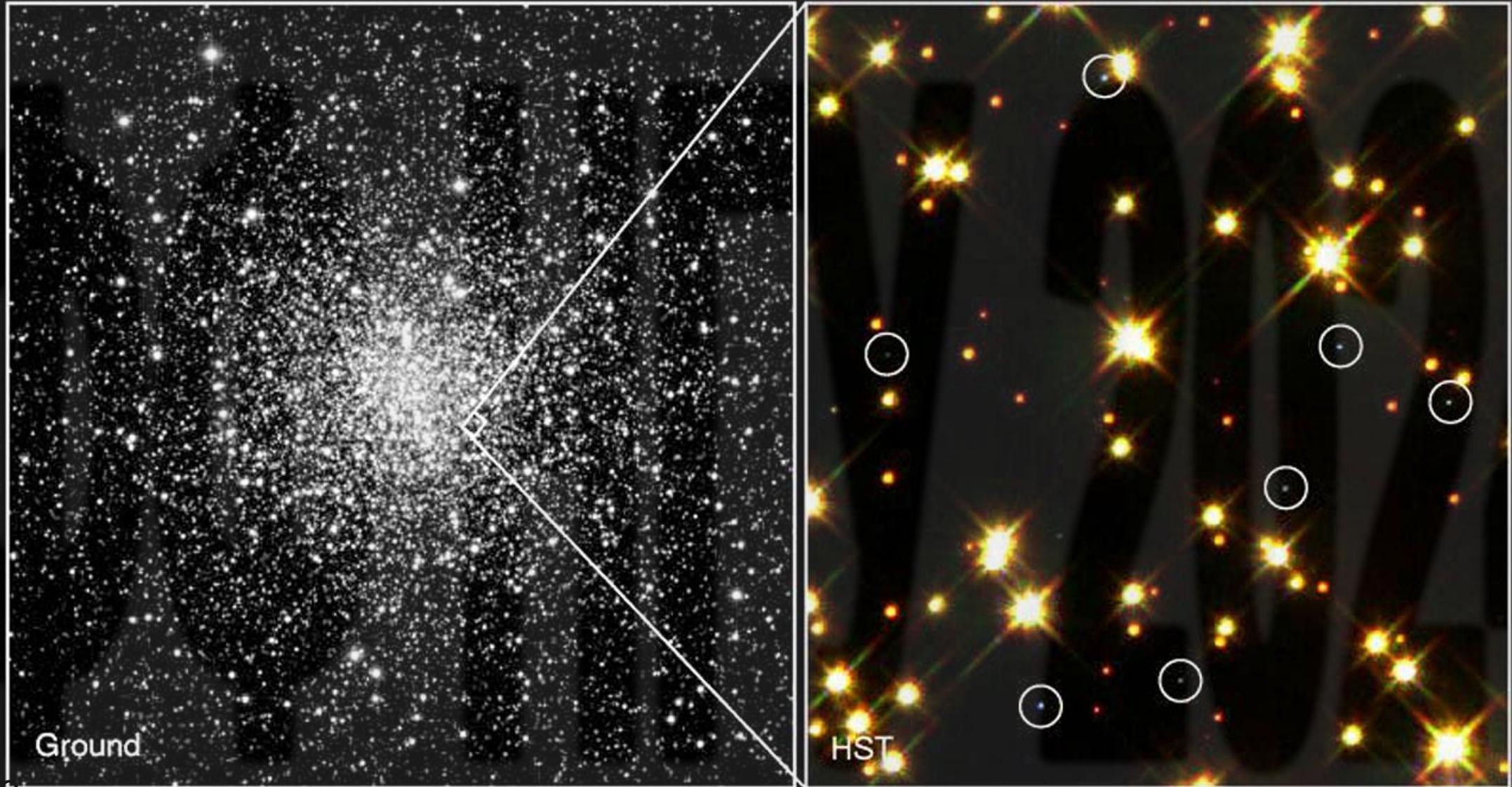
Звезда с массами $M \lesssim 8M_{\odot}$ после стадии ARGB сбрасывает оболочку а ее ядро, лишенное возможности дальнейшего термоядерного синтеза, медленно остывает – превращается в белый карлик.

Шаровые звездные скопления – одни из самых старых объектов в Галактике (возраст ~ 12 Глет).

Естественно ожидать, что в шаровых скоплениях должно быть много белых карликов.



Белые карлики



White Dwarf Stars in M4

PRC95-32 · ST ScI OPO · August 28, 1995 · H. Bond (ST ScI), NASA

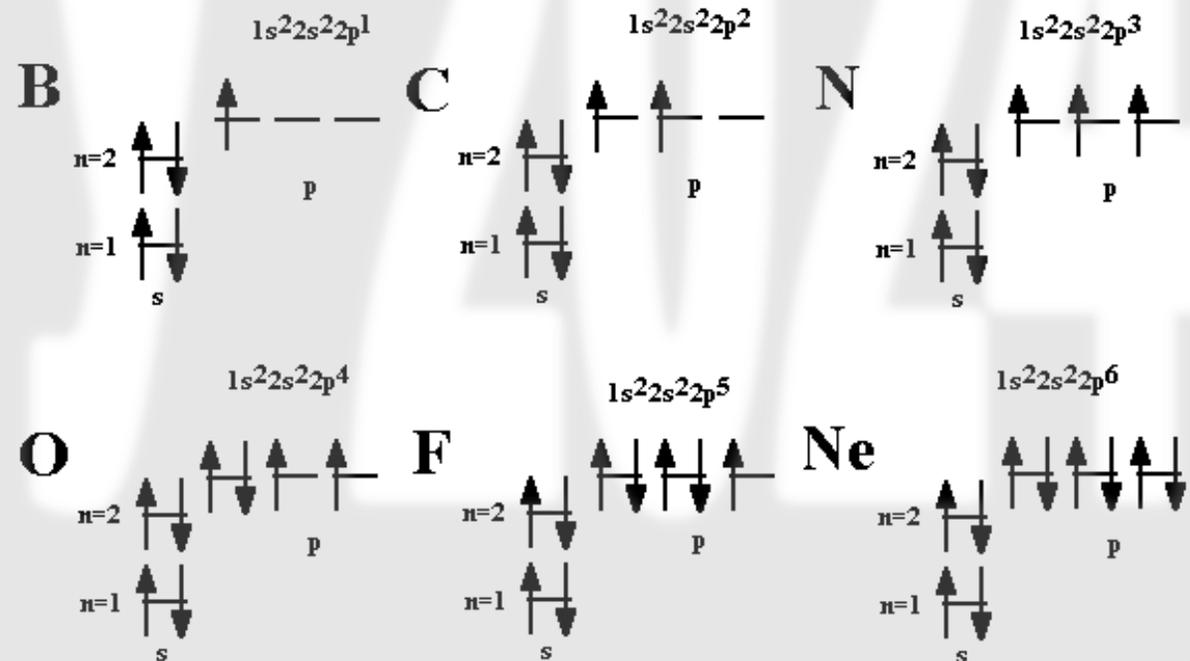
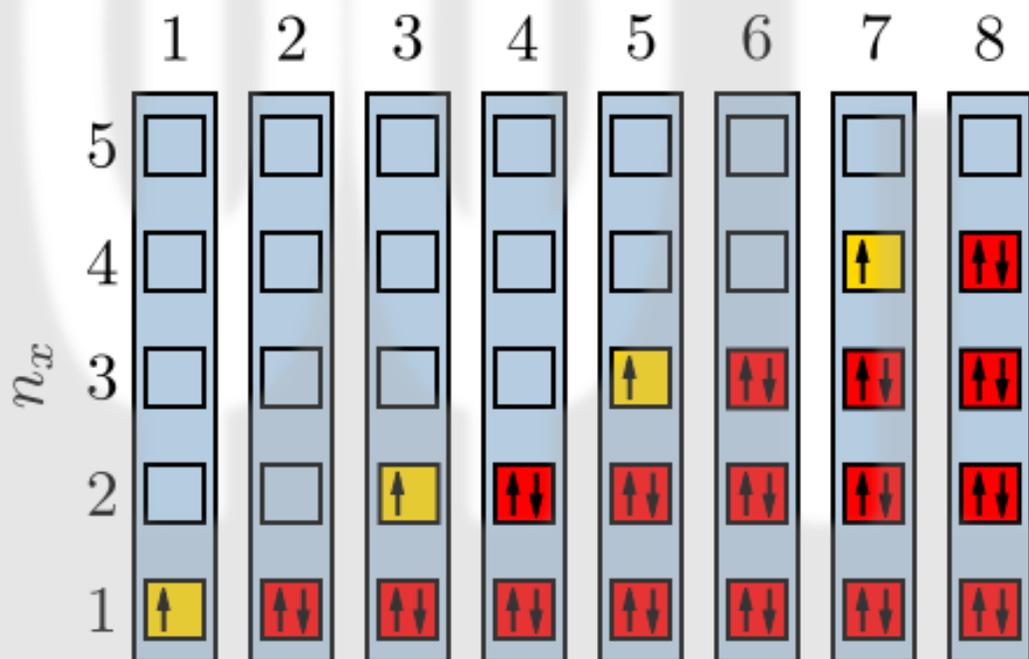
HST · WFPC2

Вырожденный электронный газ

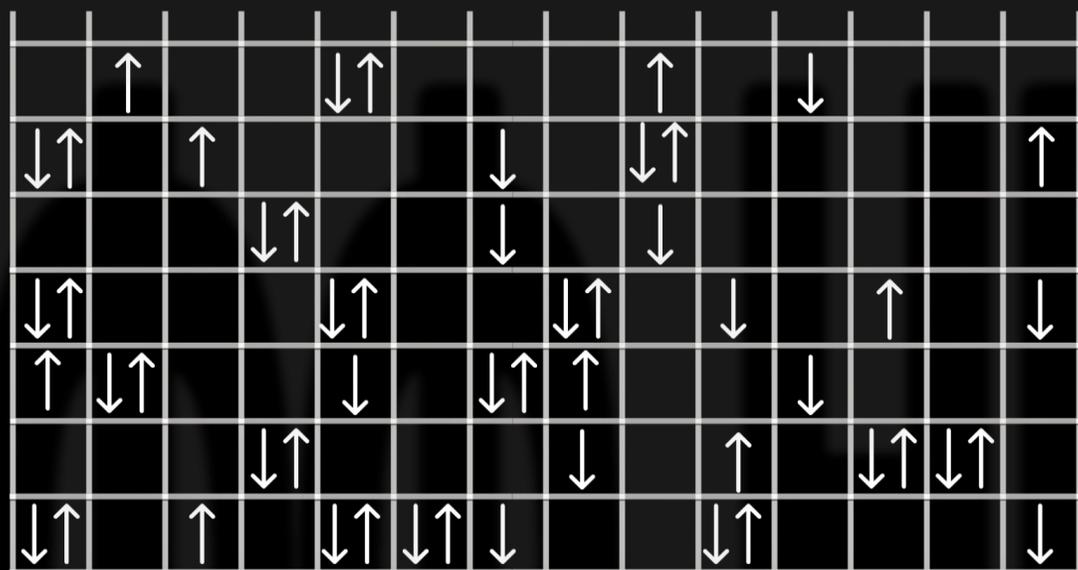
Термоядерный синтез в БК не идет, устойчивость обеспечивается давлением вырожденного электронного газа.

Два фермиона (частицы с полуцелым спином) не могут иметь одинаковые наборы всех квантовых чисел – принцип запрета Паули.

Этот же принцип обуславливает существование электронных оболочек в атоме – все электроны не могут «упасть» на самый нижний уровень.



Вырожденный электронный газ

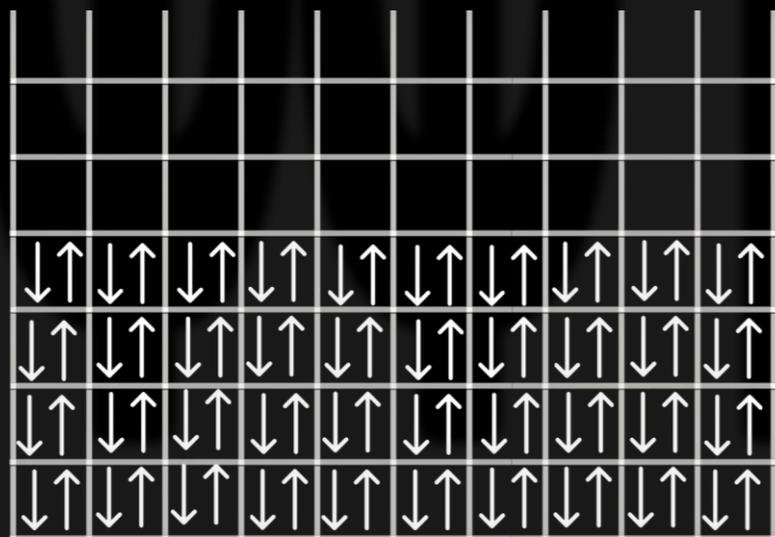


Согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга

$$\Delta x \Delta p \geq \hbar/2$$

то есть в фазовом $x - p$ пространстве существует минимальный объем, который может занимать одна частица.

ИМПУЛЬС



координата

При постепенном уменьшении координатного пространства (сжатие ядра звезды) для сохранения достаточного фазового объема, чтобы «вместить» все электроны, должна увеличиваться импульсная составляющая...

импульсы электронов перестают быть связаны с температурой соотношением идеального газа.

В результате с ростом массы радиус БК уменьшается!

Вырожденный фермионный газ

Согласно соотношению неопределенностей Гейзенберга $\Delta x \Delta p \simeq \hbar$

В вырожденном состоянии фермион занимает минимально возможную область $\Delta x \sim n^{-1/3}$.

Тогда $\Delta p \sim p_x \simeq \hbar n^{1/3}$.

Тогда полный импульс можно оценить как $p \simeq \sqrt{p_x^2 + p_y^2 + p_z^2} = \sqrt{3} \hbar n^{1/3}$.

Тогда **оценка давления** вырожденного фермионного газа в нерелятивистском случае:

$$P_{\text{вф}} = \frac{1}{3} n p v = \frac{1}{3} n \frac{p^2}{m_{\text{ф}}} = \frac{\hbar^2}{m_{\text{ф}}} n^{5/3}$$

Аналогично, в релятивистском случае:

$$P_{\text{вф}} = \frac{1}{3} n p c = \frac{1}{\sqrt{3}} \hbar c n^{4/3}$$

Равновесие белого карлика - 1

Гравитационное давление в центре БК оценим из условия равновесия: $\frac{dP}{dr} = -G \frac{\rho M(r)}{r^2}$.

Тогда при постоянной плотности, заменяя $M(r) = \frac{4\pi}{3} \rho r^3$, получаем: $P_{\text{гр}} = \frac{2\pi}{3} G \rho^2 R^2$.

Концентрация электронов $n_e = Z \cdot \frac{\rho}{A m_p} = \frac{Z}{A} \frac{\rho}{m_p}$

Тогда давление вырожденного электронного газа в нерелятивистском случае:

$$P_{\text{вэ}} = \frac{\hbar^2}{m_e} n^{5/3} = \frac{\hbar^2}{m_e} \left(\frac{Z}{A} \frac{\rho}{m_p} \right)^{5/3}$$

Приравнивая гравитационное давление давлению вырожденного газа электронов, получаем:

$$\frac{2\pi}{3} G \rho^2 R^2 = \frac{\hbar^2}{m_e} \left(\frac{Z}{A} \frac{\rho}{m_p} \right)^{5/3} \quad \longrightarrow \quad R \sim 1/M^{1/3}$$

Соотношение масса-радиус

Обратная зависимость радиуса от масс БК согласуется с наблюдениями.

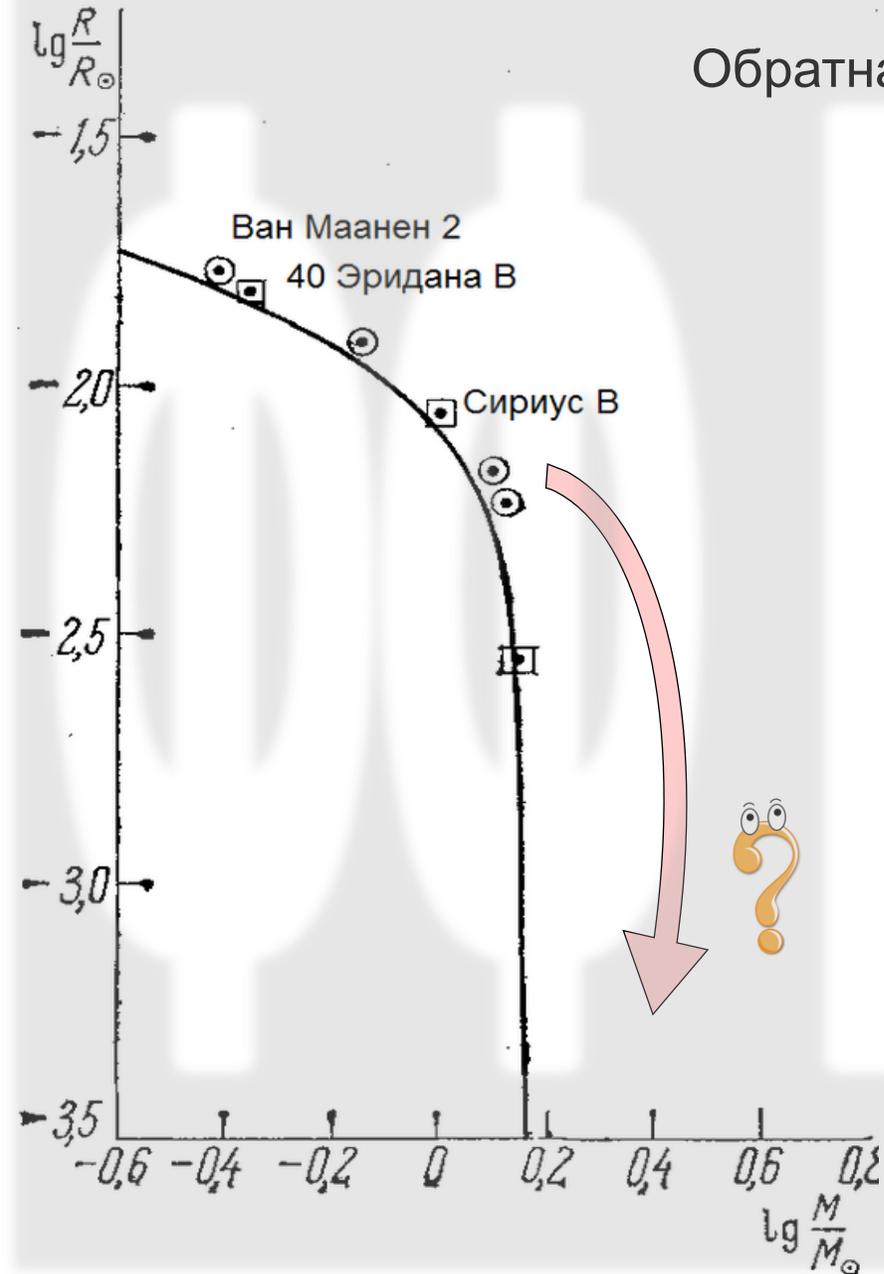
Проверим условие нерелятивистского газа:

$$v_e = \frac{p}{m_e} \simeq \frac{\hbar n^{1/3}}{m_e} = \frac{\hbar}{m_e} \left(\frac{Z \rho}{A m_p} \right)^{1/3}$$

Как мы видели на примере Сириуса В, его плотность порядка 10^9 кг/м³. Тогда получаем

$$v_e = 10^8 \text{ м/с} \simeq \frac{c}{3}$$

Электронный газ в БК является релятивистским!



Равновесие белого карлика - 2

Гравитационное давление в центре БК оценим из условия равновесия: $\frac{dP}{dr} = -G \frac{\rho M(r)}{r^2}$.

Тогда при постоянной плотности, заменяя $M(r) = \frac{4\pi}{3} \rho r^3$, получаем: $P_{\text{гр}} = \frac{2\pi}{3} G \rho^2 R^2$.

Концентрация электронов $n_e = Z \cdot \frac{\rho}{A m_p} = \frac{Z}{A} \frac{\rho}{m_p}$

Тогда давление вырожденного электронного газа в **релятивистском** случае:

$$P_{\text{вэ}} = \frac{\hbar c}{\sqrt{3}} n^{4/3} = \frac{\hbar c}{\sqrt{3}} \left(\frac{Z}{A} \frac{\rho}{m_p} \right)^{4/3}$$

Приравнивая гравитационное давление давлению вырожденного газа электронов, получаем:

$$\frac{2\pi}{3} G \rho^2 R^2 = \frac{\hbar c}{\sqrt{3}} \left(\frac{Z}{A} \frac{\rho}{m_p} \right)^{4/3}$$

Белые карлики: предел Чандрасекара

В 1931 г. Ландау и Чандрасекар независимо друг от друга показали, что белые карлики имеют предельную массу.

$$\frac{2\pi}{3} G \rho^2 R^2 = \frac{\hbar c}{\sqrt{3}} \left(\frac{Z \rho}{A m_p} \right)^{4/3}$$

масса

$$(\rho^{1/3} R)^2 = \frac{3 \hbar c}{2\pi G} \left(\frac{Z}{A} \frac{1}{m_p} \right)^{4/3}$$

$$M_{Ch} \approx \frac{3}{4} \frac{1}{m_p^2} \left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{3/2} \approx 1.44 M_{\odot}$$

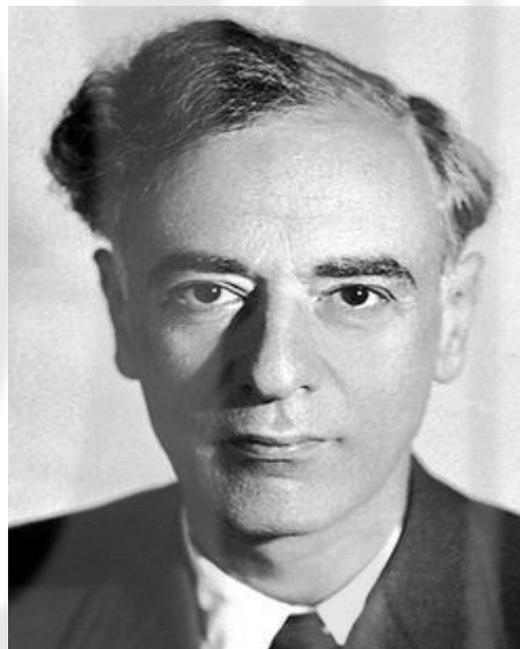
Более аккуратные
вычисления

БК – массивный
релятивистский
квантовый объект!

$$\left(\frac{\hbar c}{G} \right)^{1/2} = 2.176 \times 10^{-8} \text{ кг} - \text{масса Планка}$$

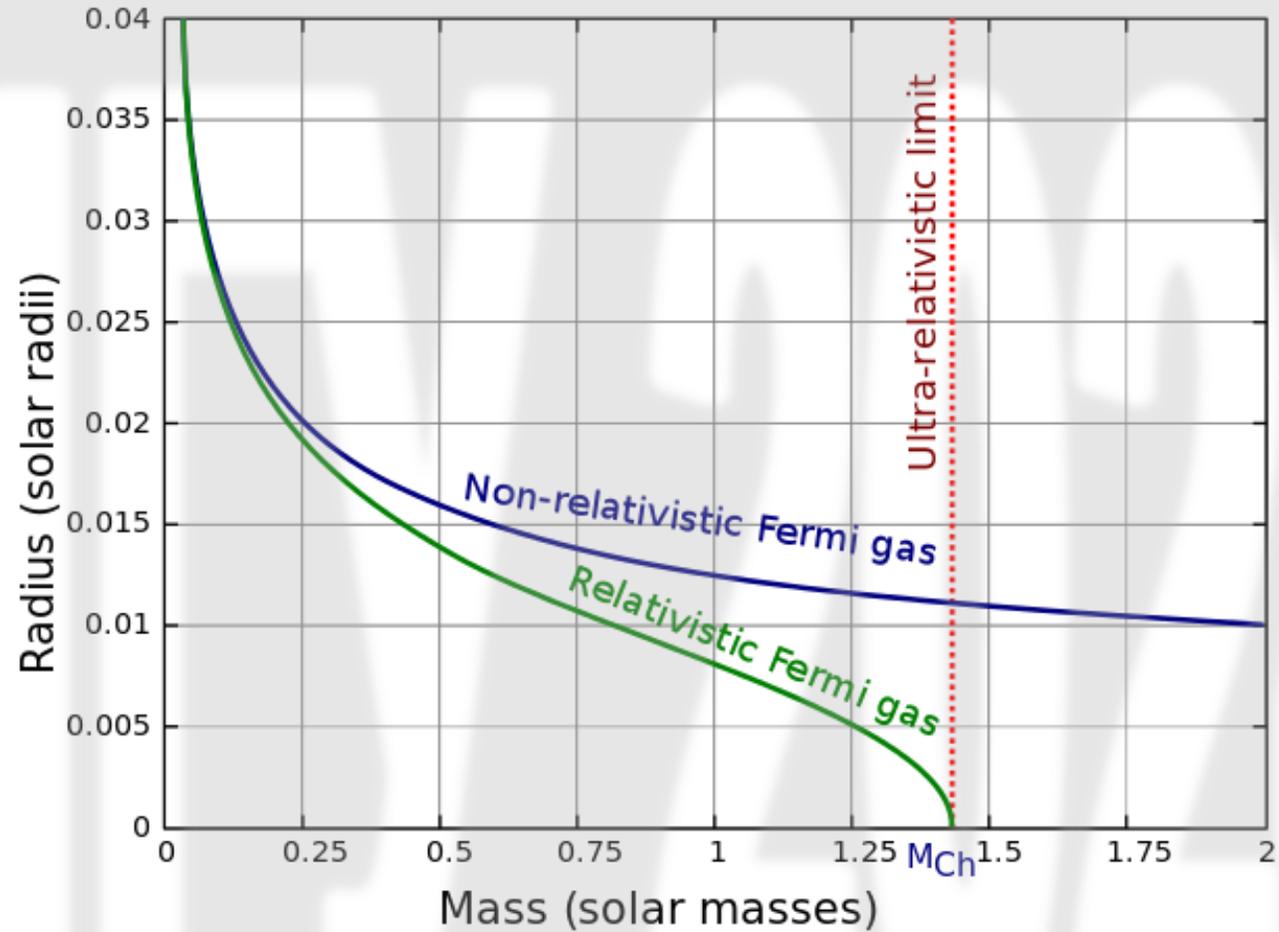
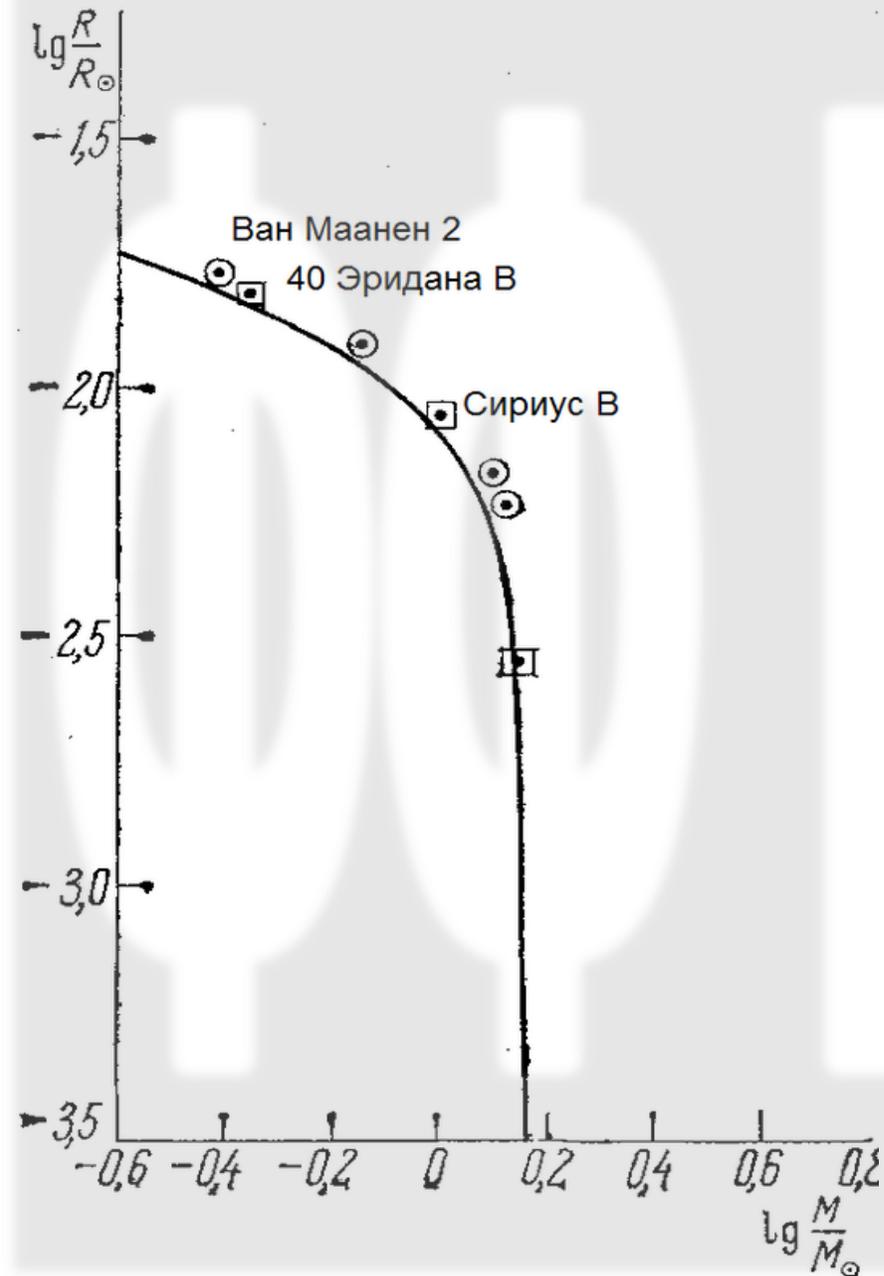


С.Чандрасекар



Л.Д.Ландау

Белые карлики: масса



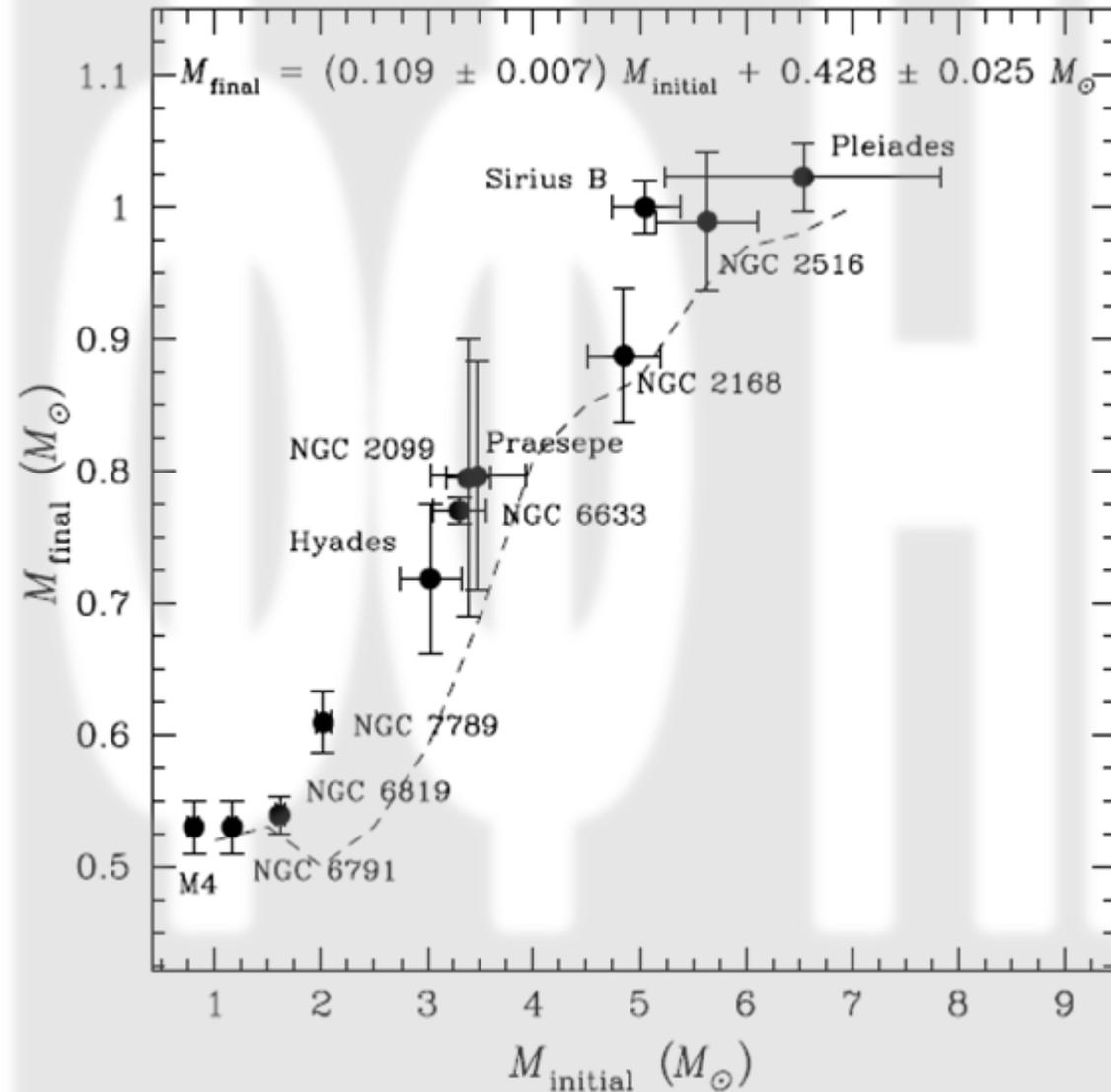
Самый массивный БК, известный на сегодня: [arXiv:2107.08458](https://arxiv.org/abs/2107.08458)

$$M_{\text{БК}} \approx 1.35 M_{\odot}$$

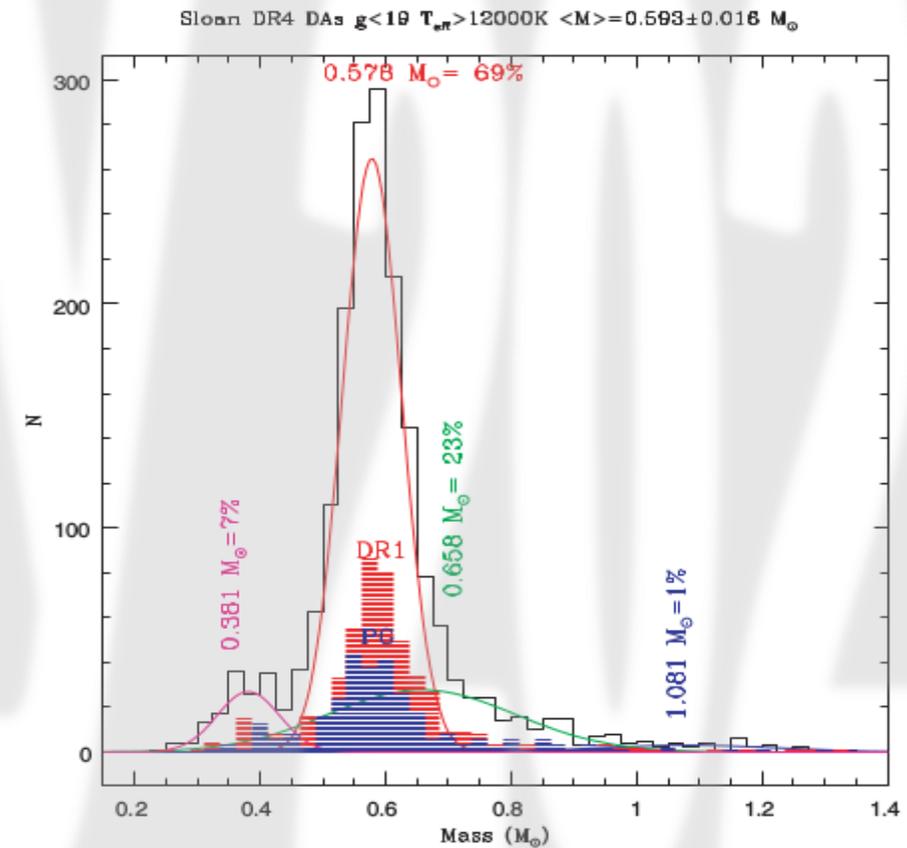
$$R_{\text{БК}} \approx 2100 \text{ км}$$

Белые карлики: масса

Kalirai (2013, Mem Soc. Astr. It., 84, 58)



Звезды с начальной массой $\lesssim 8M_{\odot}$ заканчивают свою эволюцию в виде белого карлика.



Т.к. распределение Салпитера быстро падает с ростом массы, большинство БК имеют массу $\sim 0.6M_{\odot}$.

Новые звезды

Если белый карлик находится в двойной системе, то на поздних стадиях эволюции второй звезды, вещество ее внешней оболочки может перетекать на БК.

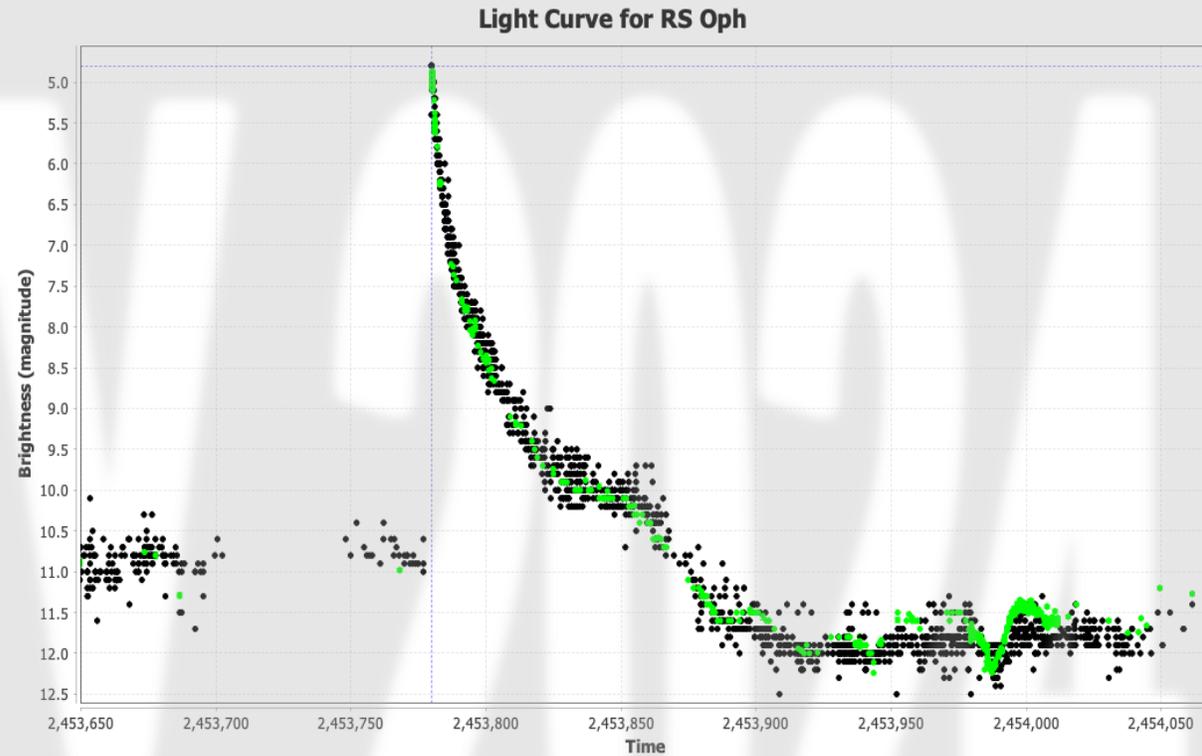
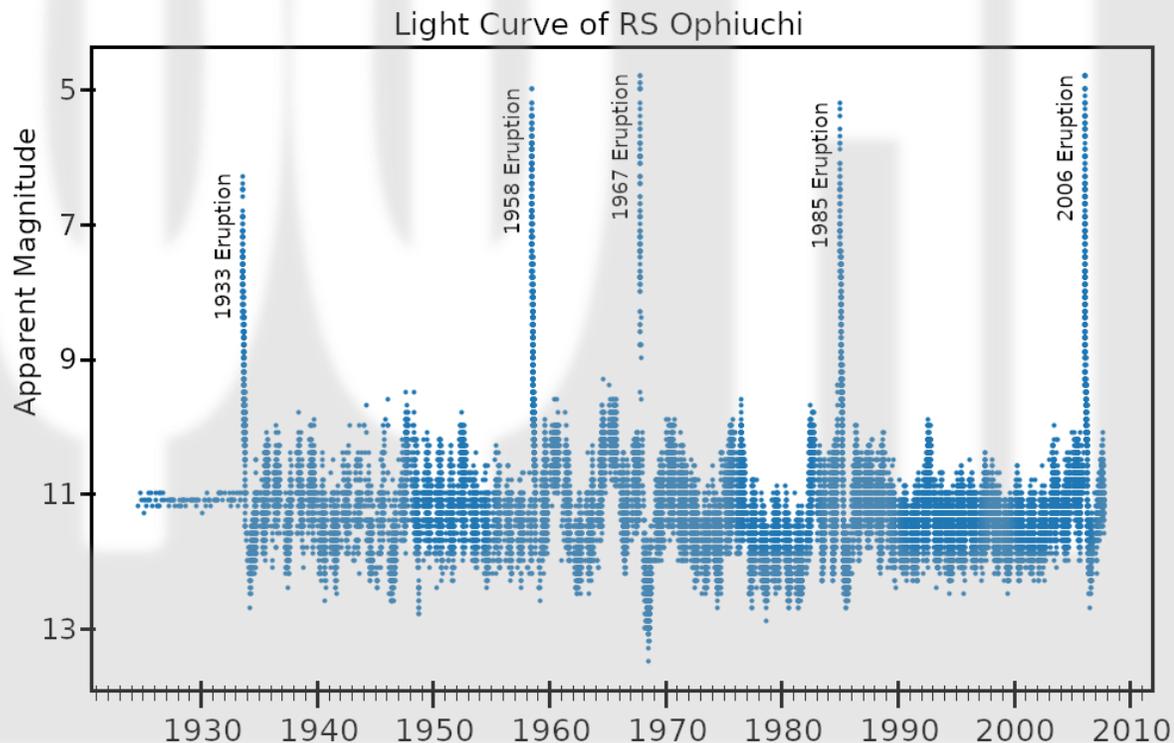
Перетекающее вещество накапливается на поверхности БК, пока не достигаются условия для термоядерного горения водорода.

Происходит термоядерный взрыв.

Новые звезды

Светимость вспышки быстро (часы) увеличивается и может достигать $\sim 10^5 L_{\odot}$.

При взрыве белый карлик сбрасывает водородную оболочку, однако ее масса, как правило, очень мала, и быстро рассеивается в межзвездном пространстве.



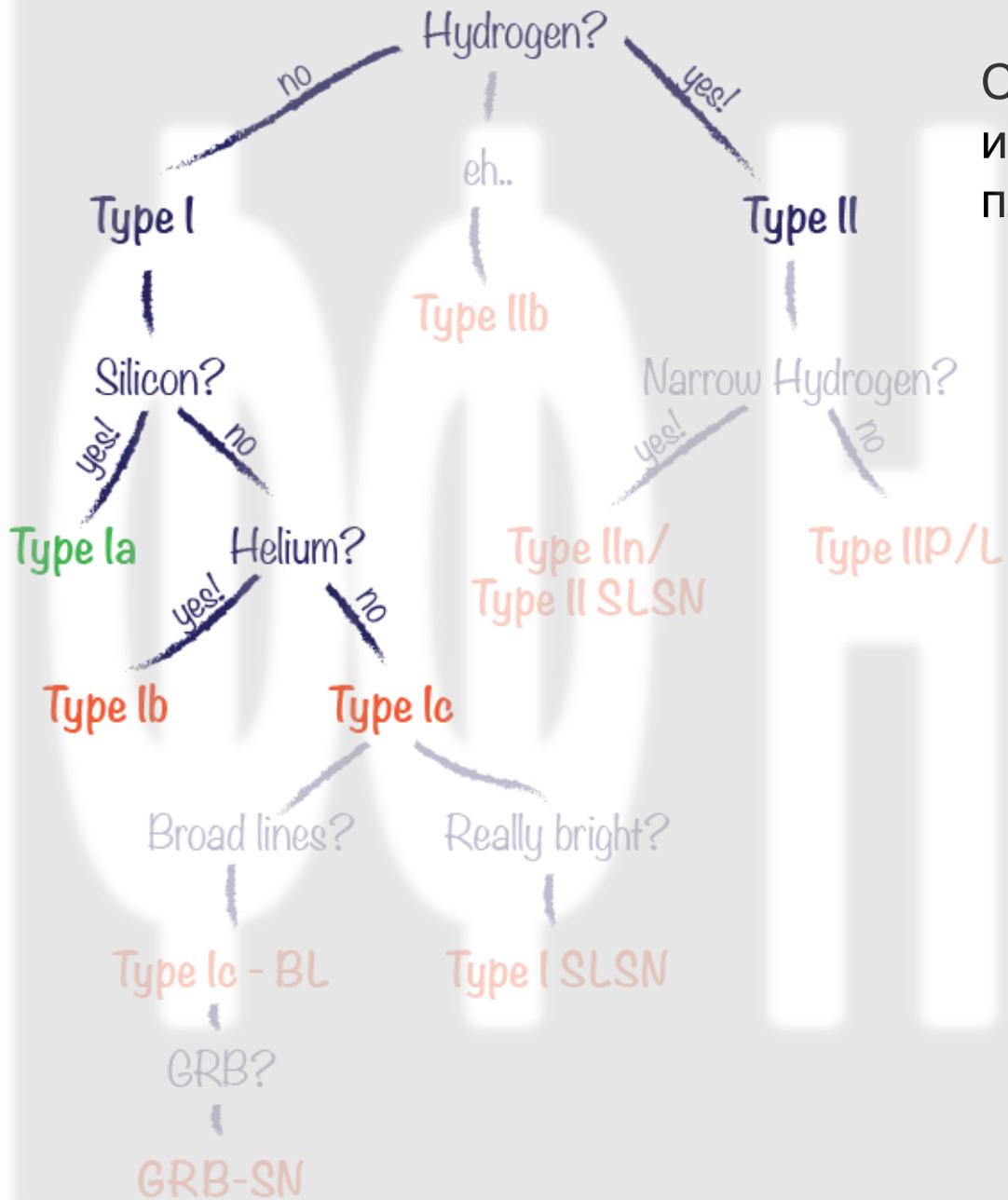
При этом двойная система, как правило, не разрушается и процесс накопления массы с последующей вспышкой может повторяться.

Массивные звезды

Финальные этапы «жизни» тяжелой звезды ($M \gtrsim 8M_{\odot}$) существенно более драматичны и определяются множеством факторов.

В большинстве случаев (но не всегда), они уходят ярко!

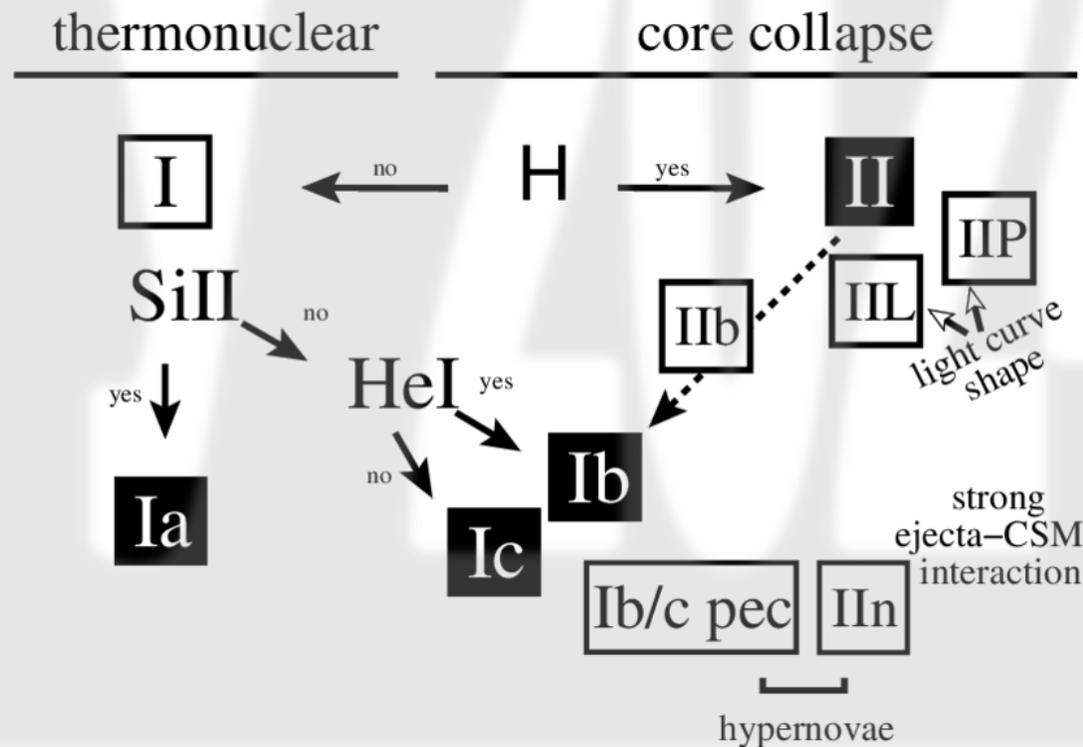
The Supernova Zoo



Сверхновые: классификация

Сложившаяся классификация основана на деталях спектра излучения и форме кривой блеска СН и (как «обычно») плохо отражает физическое содержание процесса.

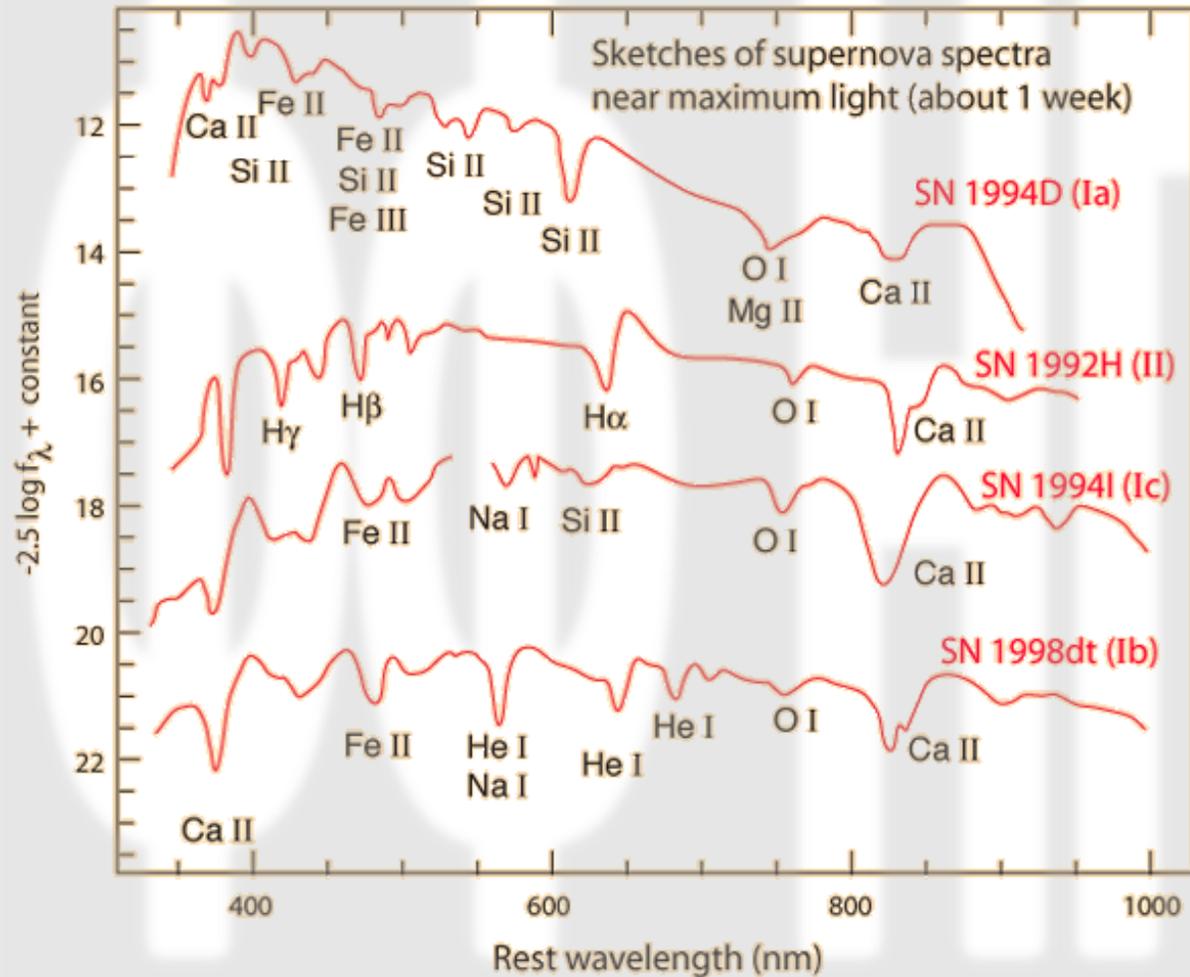
По сути, сверхновые можно разделить на те, что вызваны коллапсом ядра звезды, и на термоядерные взрывы белых карликов.



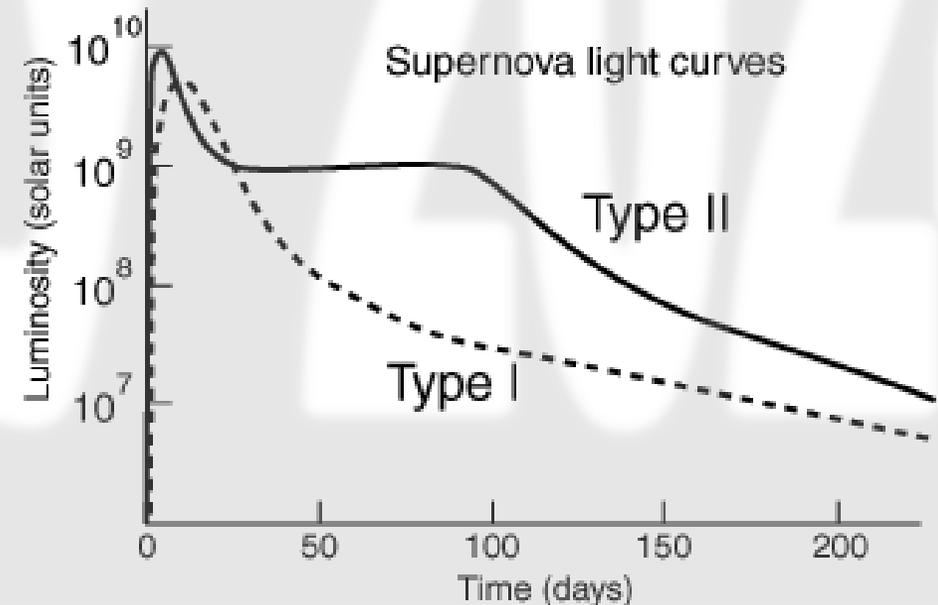
Сверхновые: классификация

Согласно современным моделям эволюции массивных ($\geq 8M_{\odot}$) звезд, наблюдаемый тип сверхновой (кроме типа Ia) и остаточный объект (нейтронная звезды, черная дыра или полный разлет звезды без остатка) определяется:

- начальной массой звезды;
- ее химическим составом (металличностью);
- наличием звезды-компаньона.



Sketches of spectra from Carroll & Ostlie, data attributed to Thomas Matheson of National Optical Astronomy Observatory.



Сверхновые: сценарий катастрофы

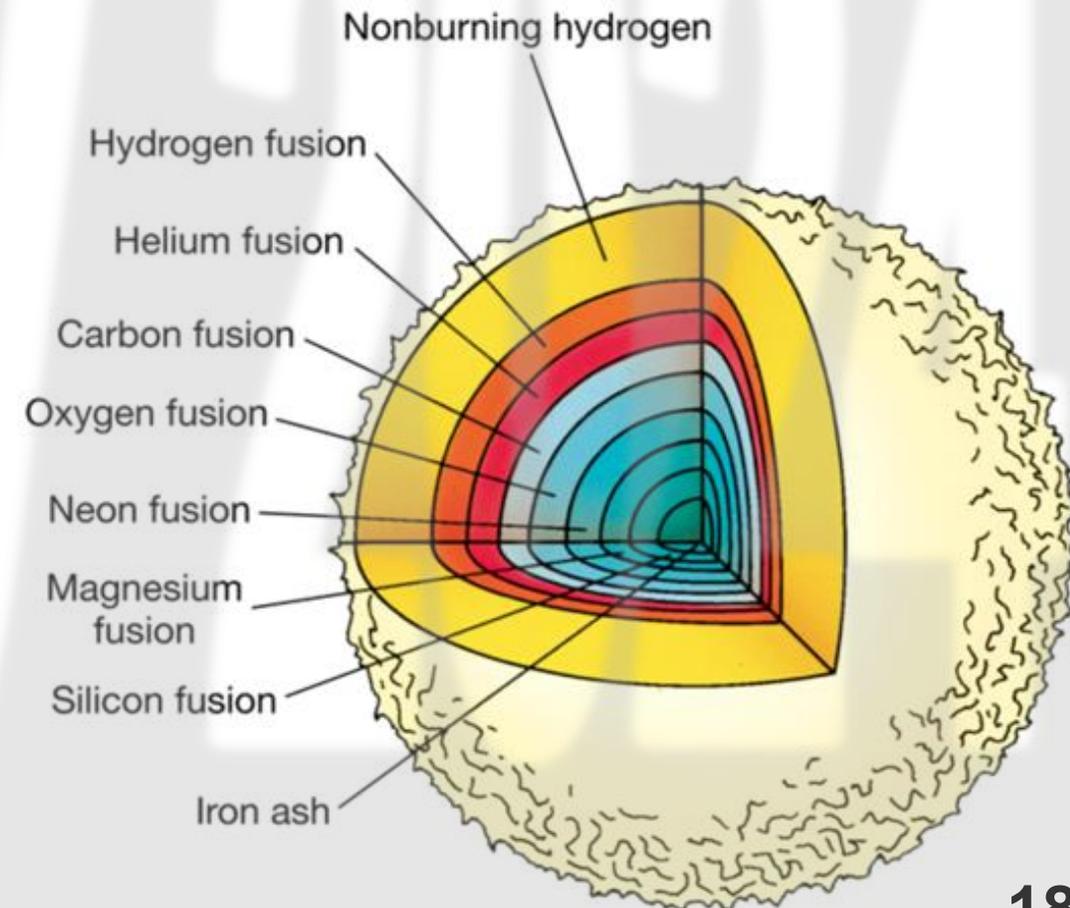
Все типы СН кроме Ia, являются проявлением коллапса ядра массивной звезды на заключительной стадии эволюции. Детали этого процесса зависят от множества параметров (массы, химического состава, множества одновременно протекающих ядерных реакций), но основной сценарий считается достаточно хорошо понятым и проверенным в наблюдениях.

По мере горения гелия, увеличивается С-О ядро звезды. При достижении температуры $\sim 10^8$ К начинается горение углерода с образованием более тяжелых элементов O, Ne и Mg.

При достижении необходимых условий загорается кислород, в результате чего в основном образуется кремний.

Кремний, в свою очередь, горит с образованием элементов группы железа, в основном Fe и Ni при температуре $\sim 3 \times 10^9$ К.

В результате ядро звезды приобретает слоистую («луковичную») структуру.



Сверхновые: сценарий катастрофы

При горении более тяжелых элементов, удельный выход энергии падает, время горения также быстро сокращается. Так для $M_* \sim 20M_{\odot}$:

горение водорода (ГП): $t_{\text{H}} \approx 10^7$ лет

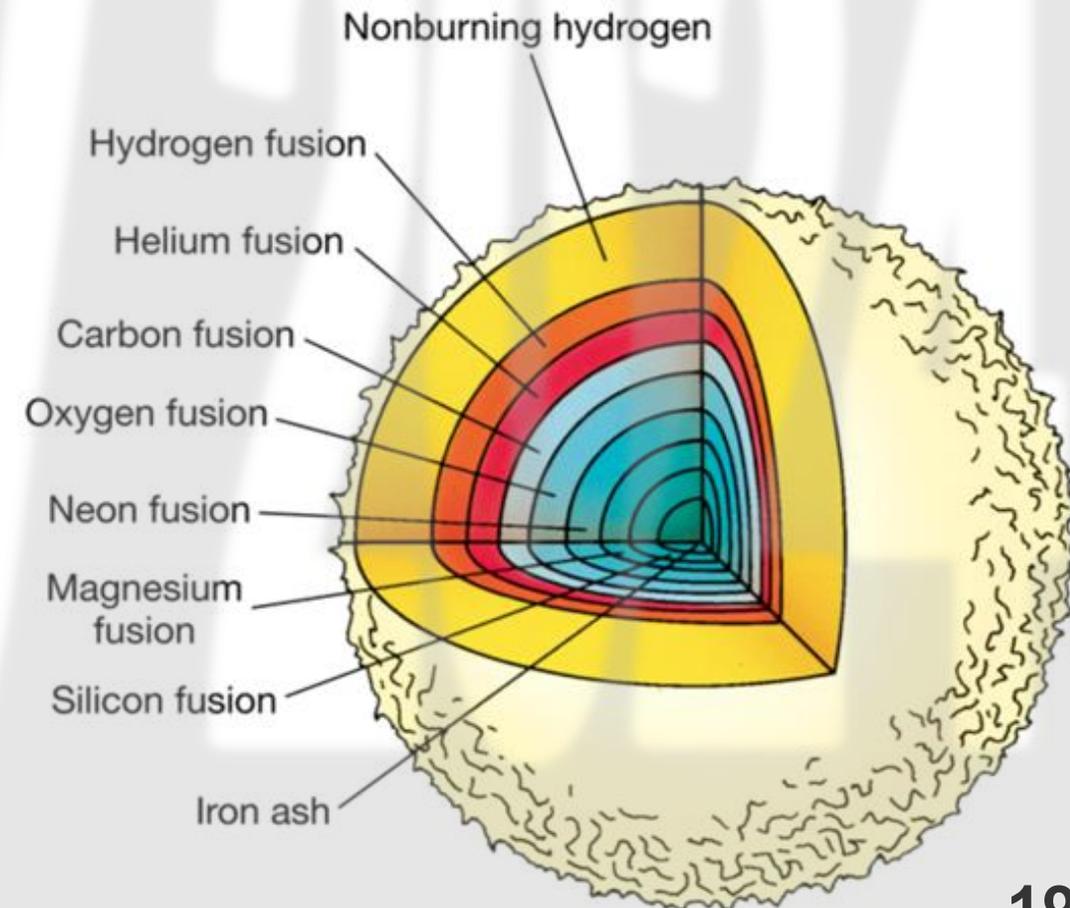
горение гелия: $t_{\text{He}} \approx 10^6$ лет

горение углерода: $t_{\text{C}} \approx 300$ лет

горение кислорода: $t_{\text{O}} \approx 200$ сут

горение кремния: $t_{\text{Si}} \approx 2$ сут

Равновесие ядра при таких температурах и плотностях обеспечивается в основном давлением вырожденного электронного газа.



Сверхновые: сценарий катастрофы

При достигнутой высокой температуре ($\sim 10^{10}$ К) и плотности ($\sim 10^{13}$ кг/м³) в центре железного ядра, энергии фотонов теперь достаточно, чтобы запустился обратный процесс – фотодиссоциация ядер железа и гелия:



с поглощением огромного количества энергии! Кроме того, активно идут процессы β -захвата как свободными протонами, так протонами в ядрах, нейтрино уносит много энергии (URCA – процесс):



нейтрон, нестабильный в свободном состоянии, теперь становится стабильным, при этом светимость в нейтрино на 5 – 7 порядков превосходит светимость в ЭМ спектре!

Комбинация этих процессов приводит к резкому охлаждению ядра, падению давления, неустойчивости, и очень быстрому гомологическому (время коллапса оболочки не зависит от ее радиуса – скорость пропорциональна радиусу) коллапсу внутренней части ядра.

Сверхновые: сценарий катастрофы

При достижении плотности $\sim 10^{18}$ кг/м³ (~ 3 ядерной плотности) коллапс резко останавливается – теперь уже нейтронное вещество становится вырожденным! Происходит отскок падающего вещества и навстречу более медленным внешним слоям движется волна отраженного вещества. При их встрече образуется ударная волна.

В возникшей ударной волне сжатия возобновляется реакция диссоциации ядер железа, поглощается энергия, внешняя оболочка ядра «замирает».

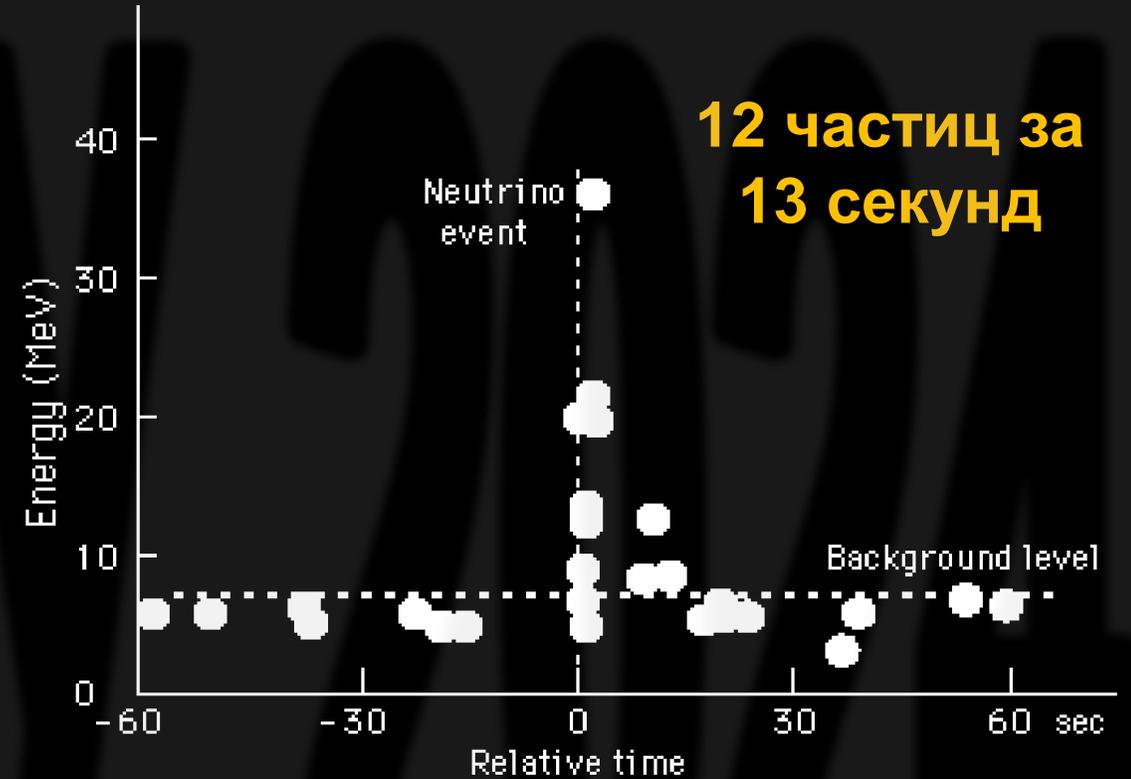
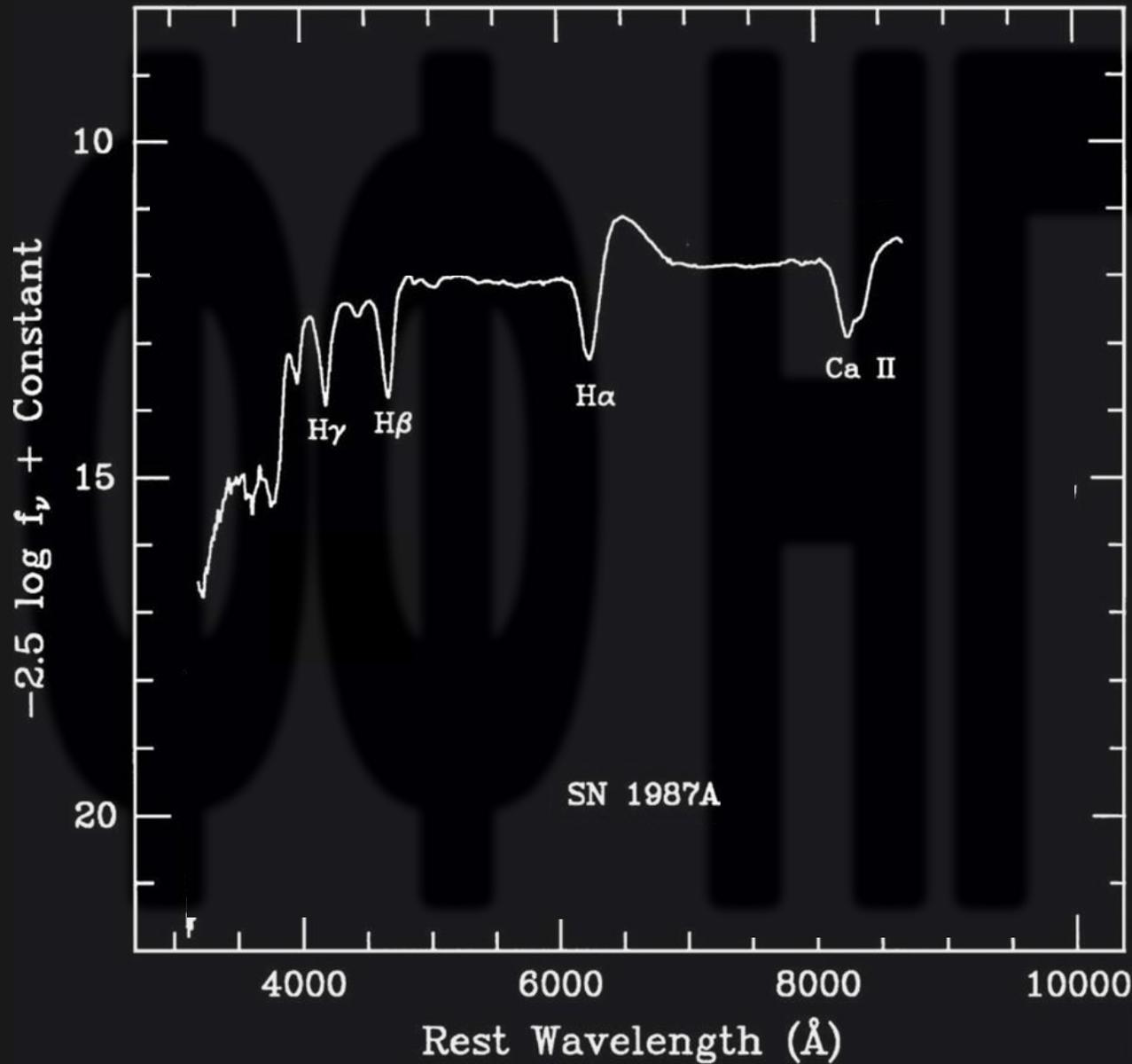
Из центральной части ядра идет мощный поток нейтрино. Из-за высокой (ядерной) плотности оболочки, в ней поглощается заметная доля (несколько%) нейтрино.

Если переданного импульса окажется недостаточно, коллапс возобновится без вспышки СН.

Если переданный импульс велик – произойдет вспышка. Тип вспышки будет определяться химическим составом самых внешних слоев звезды.

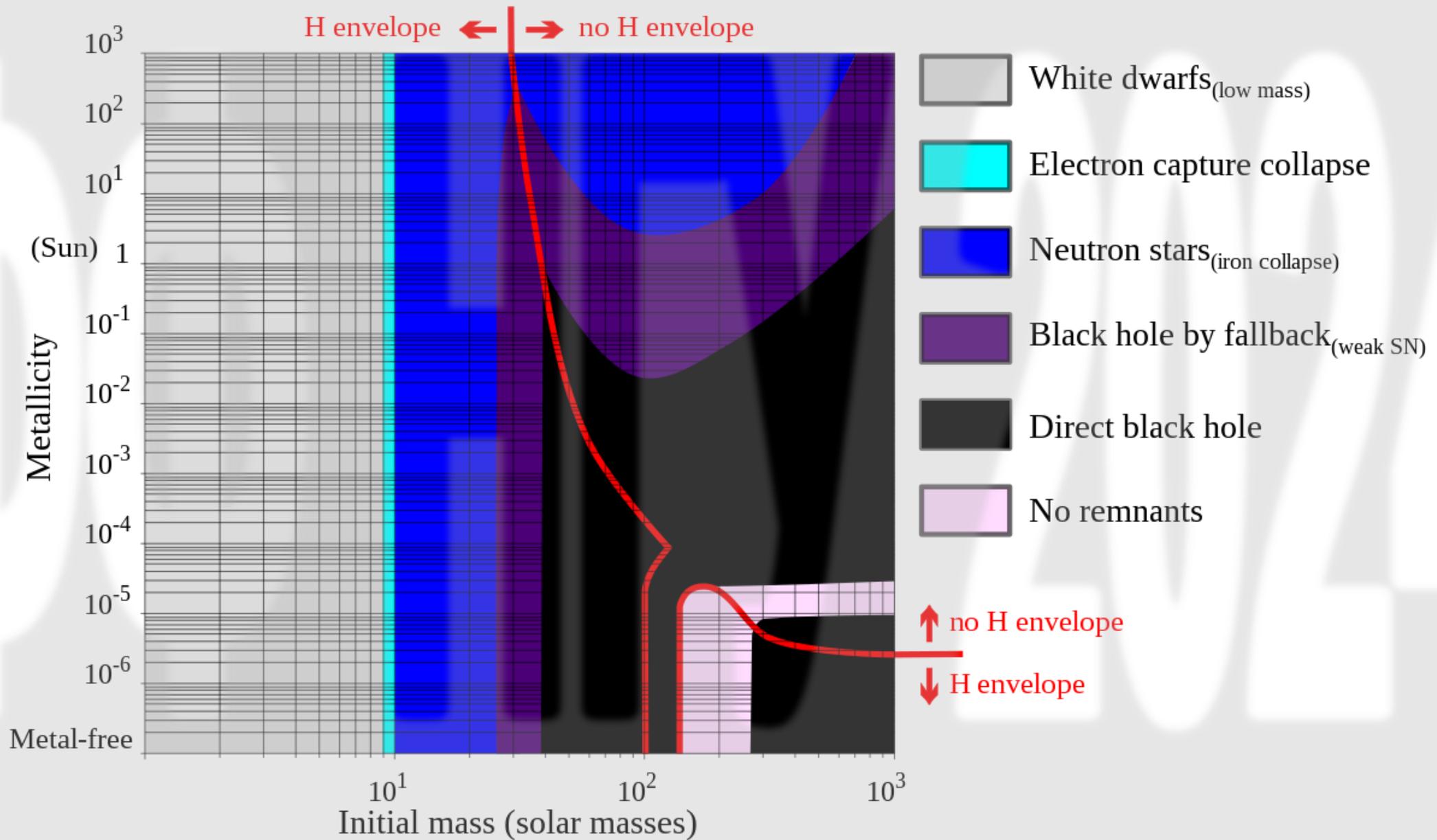
Бо́льшая часть энергии ($>99\%$) уносится нейтрино. Даже небольшие вариации переданной энергии нейтрино могут приводить к существенной разнице в видимой энергии вспышки.

Сверхновая SN1987A

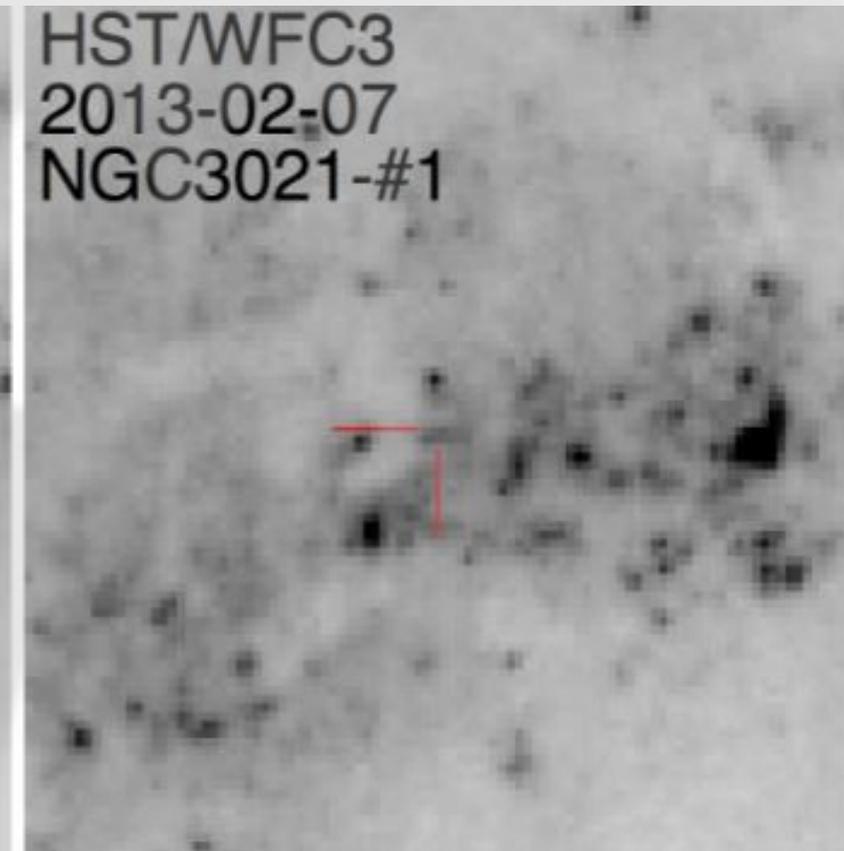
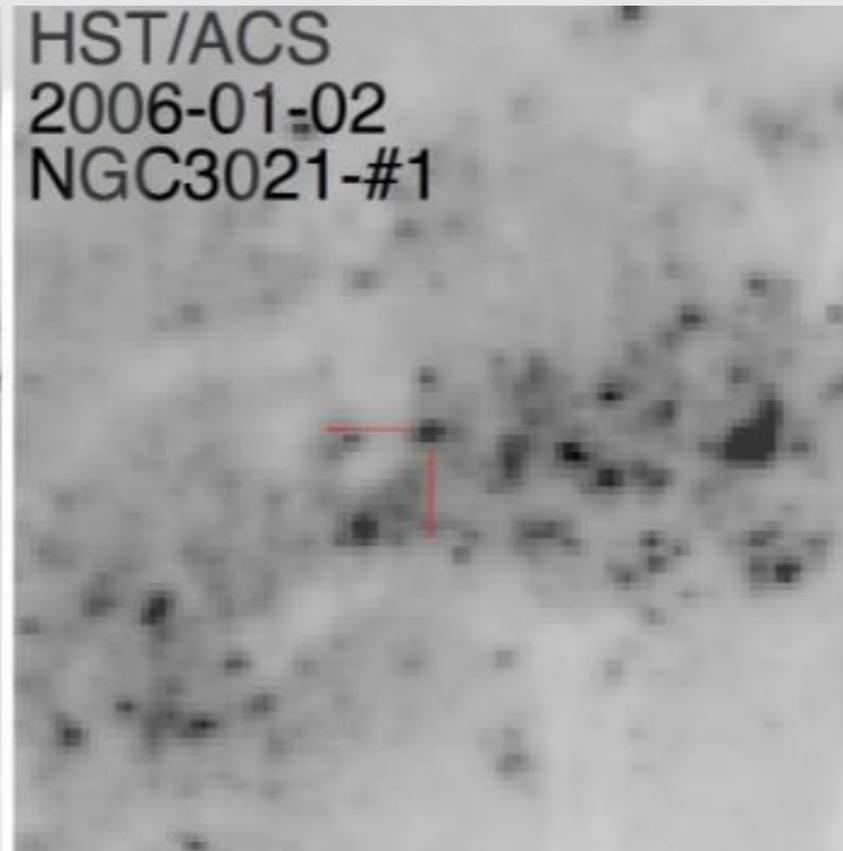
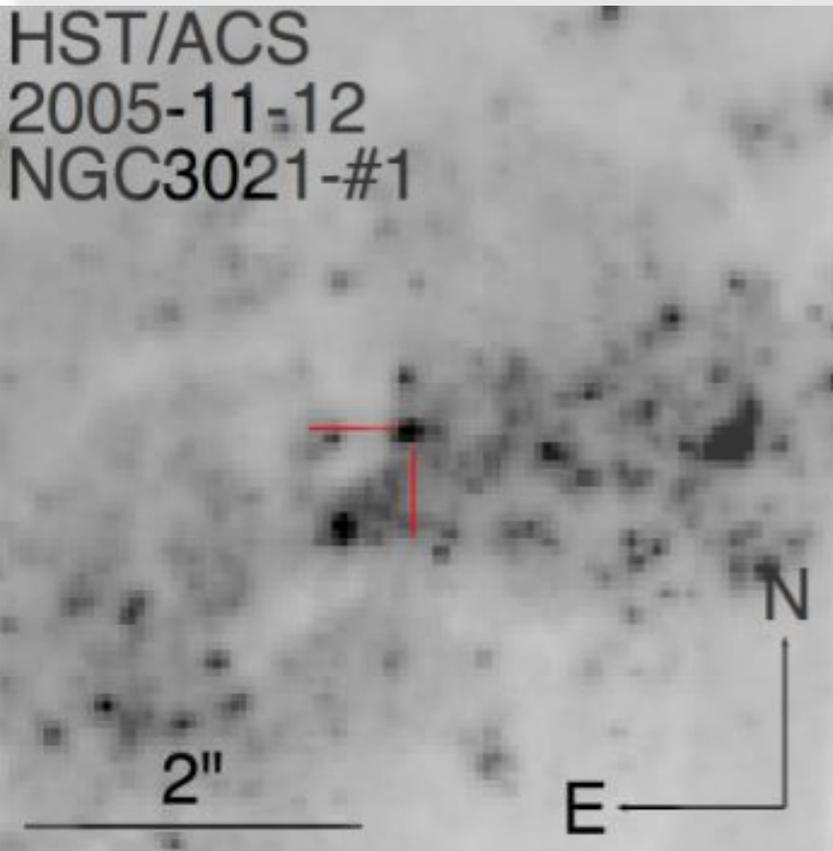


Первое наблюдение (анти-)нейтрино астрофизического происхождения!

Сверхновые: сценарий катастрофы



Звезды, ушедшие «по-английски»



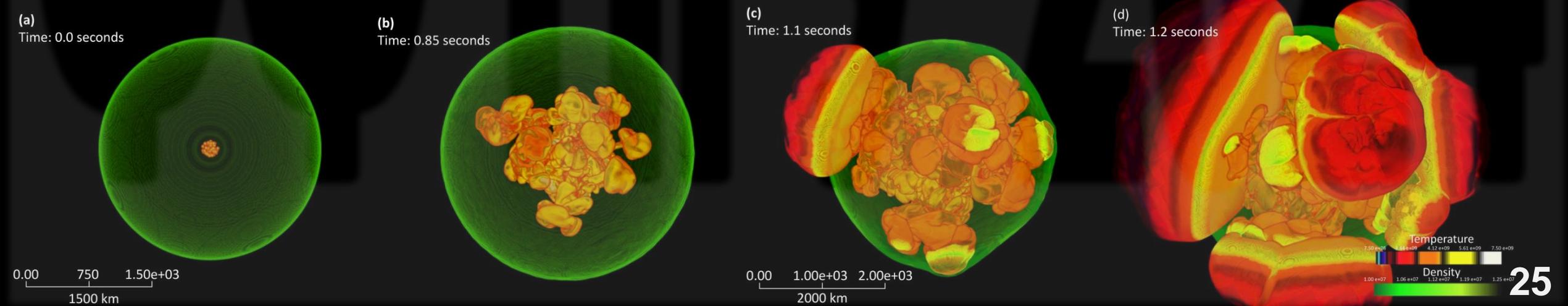
Авторы нашли случай, когда массивная звезда исчезла, а никакой сверхновой не было видно. Они используют архивные данные телескопа Хаббла для поиска исчезнувших без взрыва массивных звезд. Детальный анализ показал, что одно событие действительно очень похоже на исчезновение желтого сверхгиганта (масса около 25-30 масс Солнца) без взрыва. Это подтверждает идею о возможности «тихого коллапса» некоторых массивных звезд.

Сверхновые типа Ia

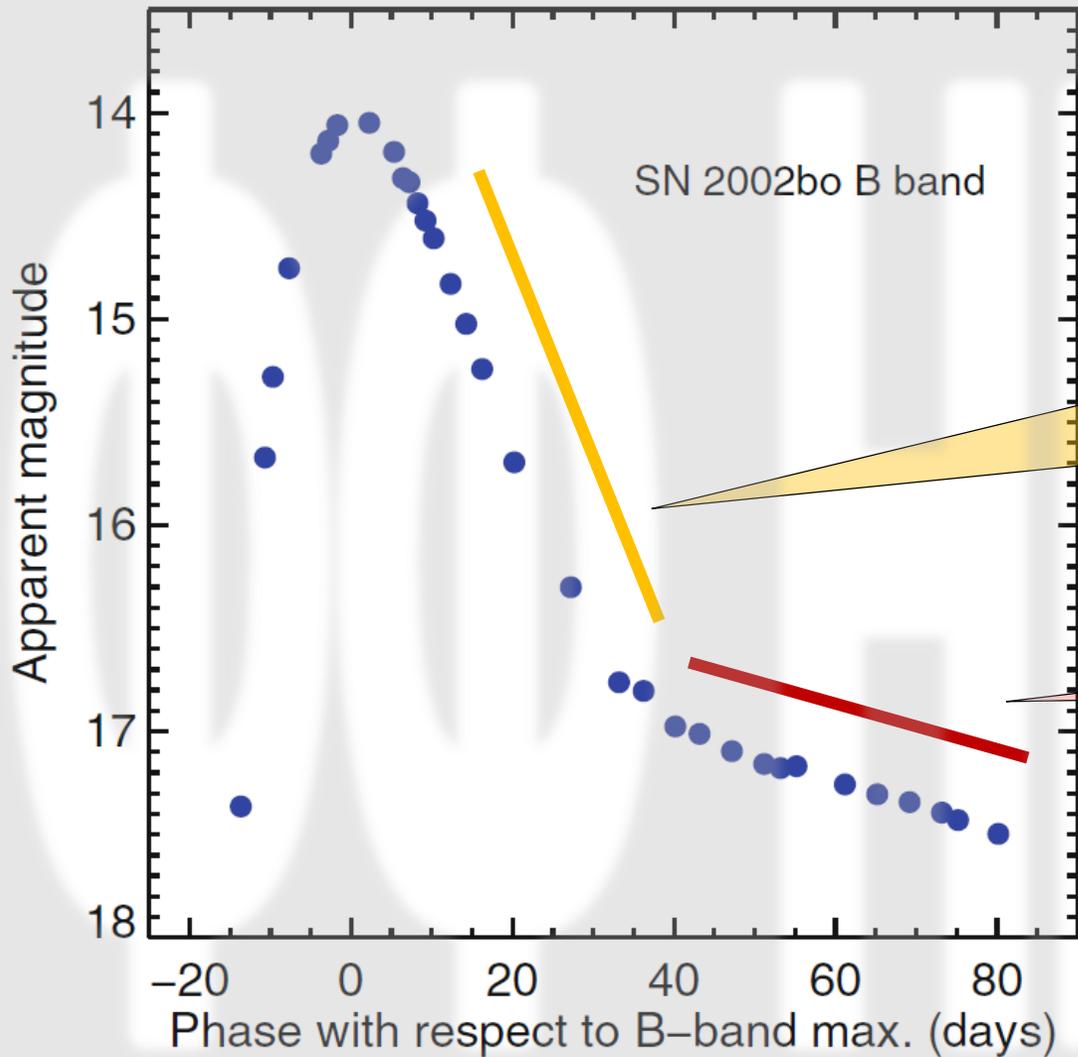
При некоторых условиях перетока вещества на белый карлик, в его поверхностном слое может идти стабильное горение водорода в гелий. Постепенно увеличиваясь, его масса может превысить предел Чандрасекара.

Более вероятный сценарий – слияние двух белых карликов. Если их суммарная масса может превысить предел Чандрасекара ($\sim 1.4M_{\odot}$).

При превышении предельной массы, плотность вещества повышается настолько, что расстояние между ядрами (например С в С-О карлике) становится достаточно малым для преодоления кулоновского барьера – происходит очень быстрая (~ 1 с) инициация горения углерода практически по всему объему БК – мощный термоядерный взрыв.

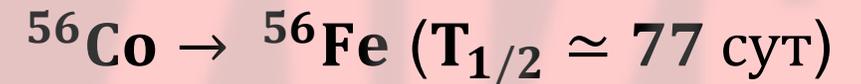
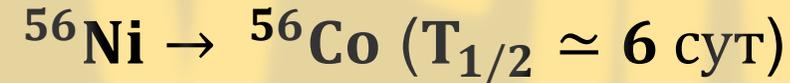


Сверхновые типа Ia



Взрыв приводит к полному уничтожению БК – продукты реакций (в основном группы железа) разлетаются в межзвездное пространство

В основном

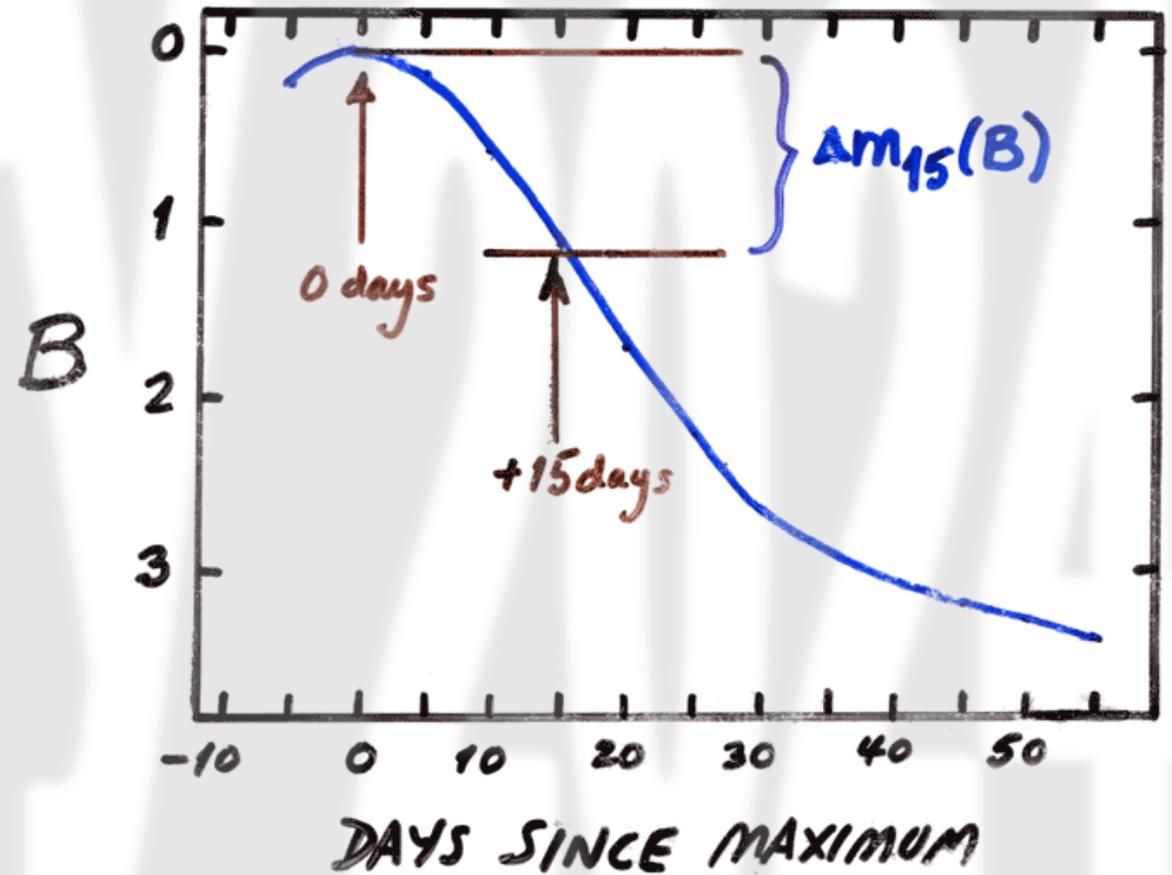
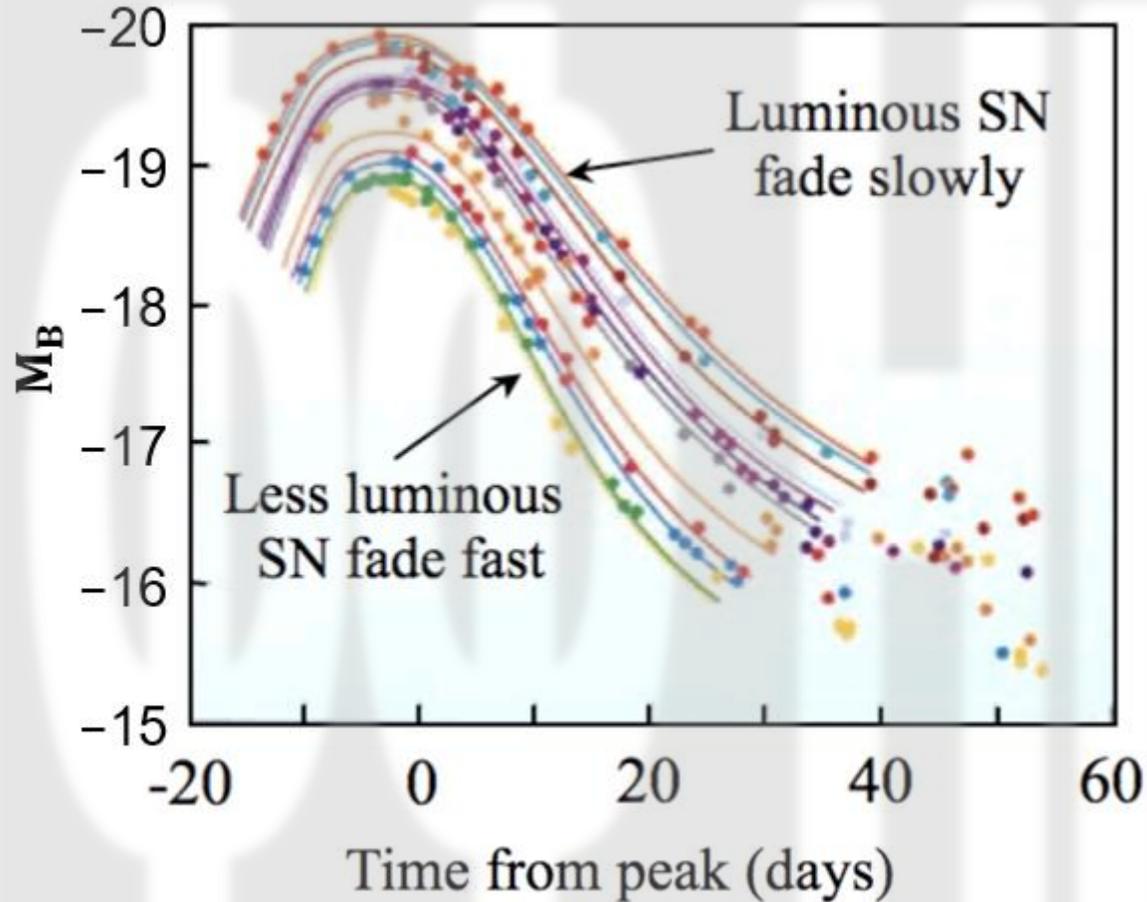


Поскольку начальные условия термоядерного взрыва SN типа Ia с хорошей точностью одинаковы, можно ожидать, что максимальная светимость и форма вспышки также будут почти одинаковы.. 26

Сверхновые типа Ia

Зависимость Рафта-Псковского-Филиппса

Bert Rust
Юрий Псковский
Mark Phillips

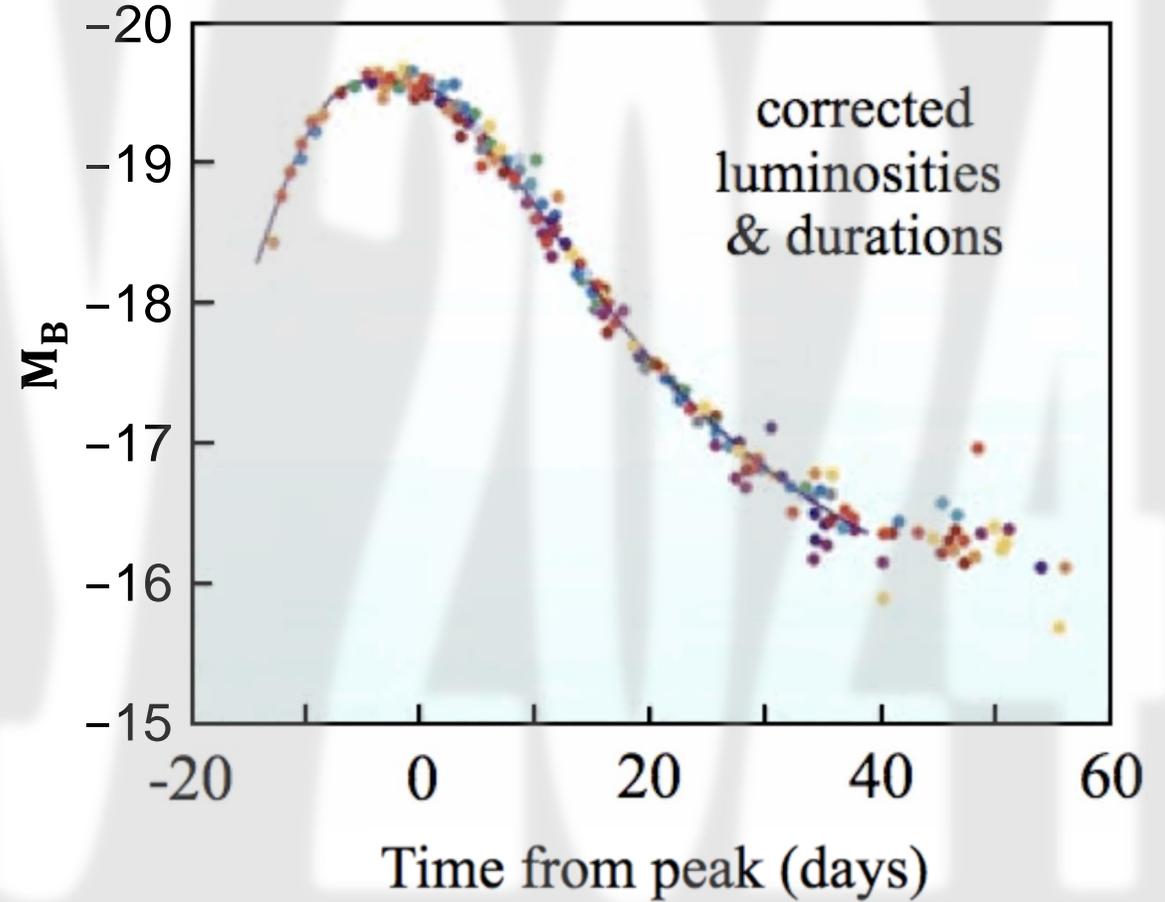
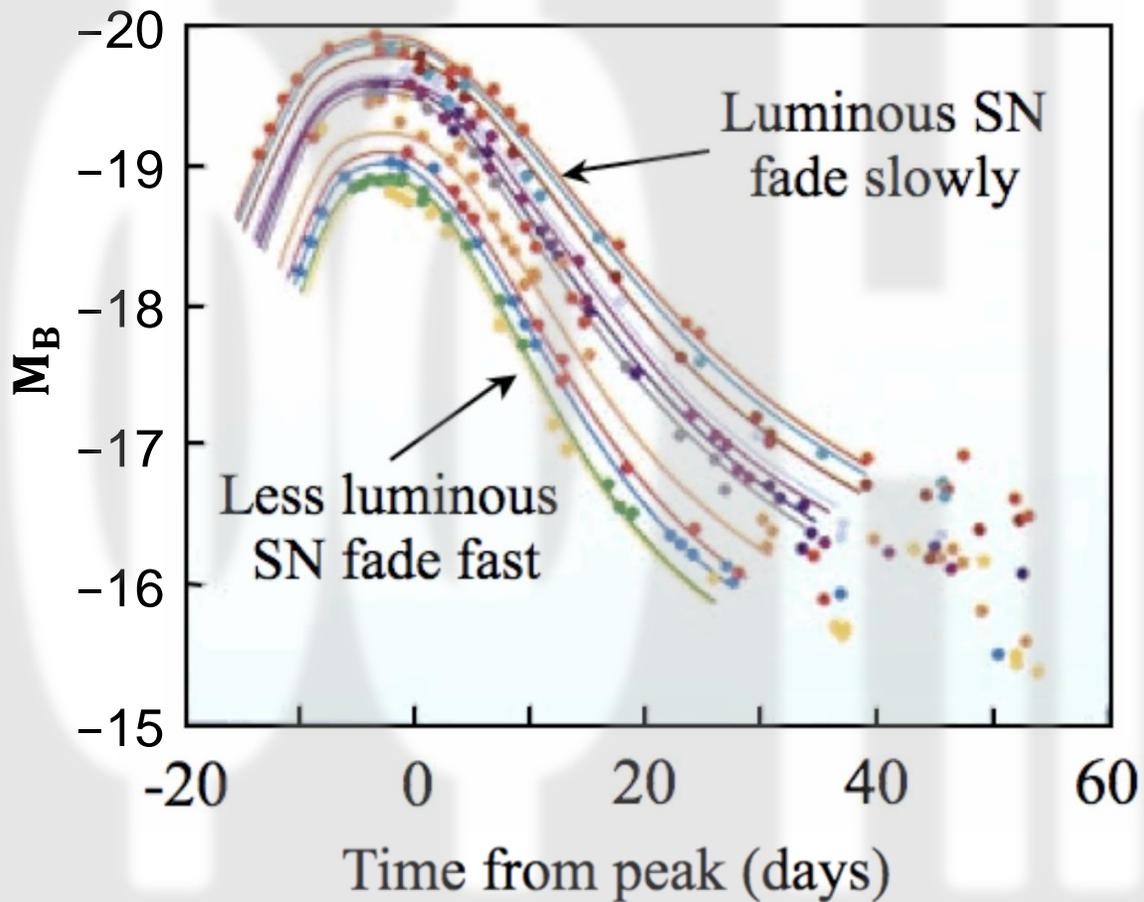


Зависимость, установленная Филипсом из наблюдений (1995):

$$M_B^{max} = -21.726 + 2.698\Delta m_{15}$$

Сверхновые типа Ia

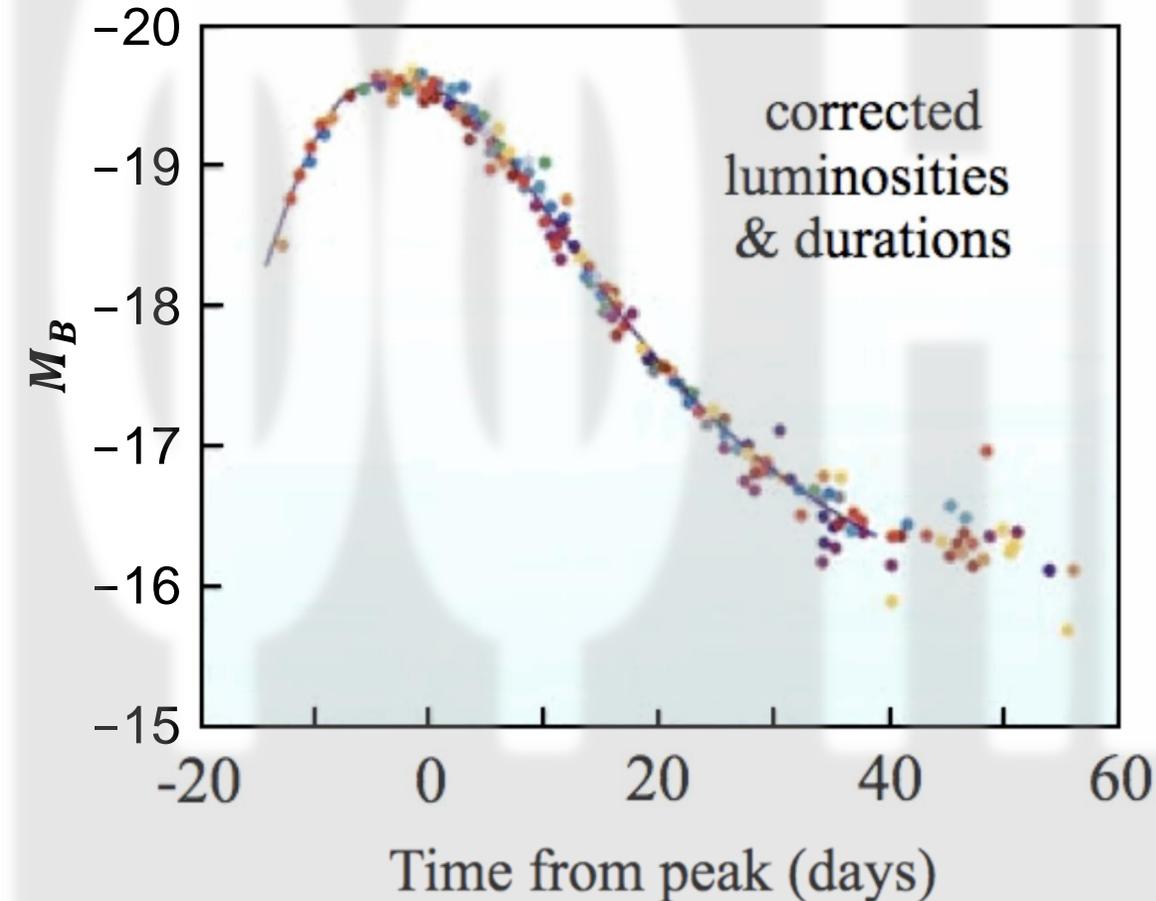
После введения поправки Филиппса:



Это позволяет использовать вспышки SN Ia как «стандартные свечи».

Сверхновые типа Ia: Стандартные свечи

Абсолютная звездная величина в максимуме вспышки сверхновой типа Ia в фильтре В (после поправки на время затухания) примерно равна $M_B^{max} \simeq -19.6$. Сравнивая с видимой звездной величиной, можно определить расстояние до галактики, где произошла вспышка.



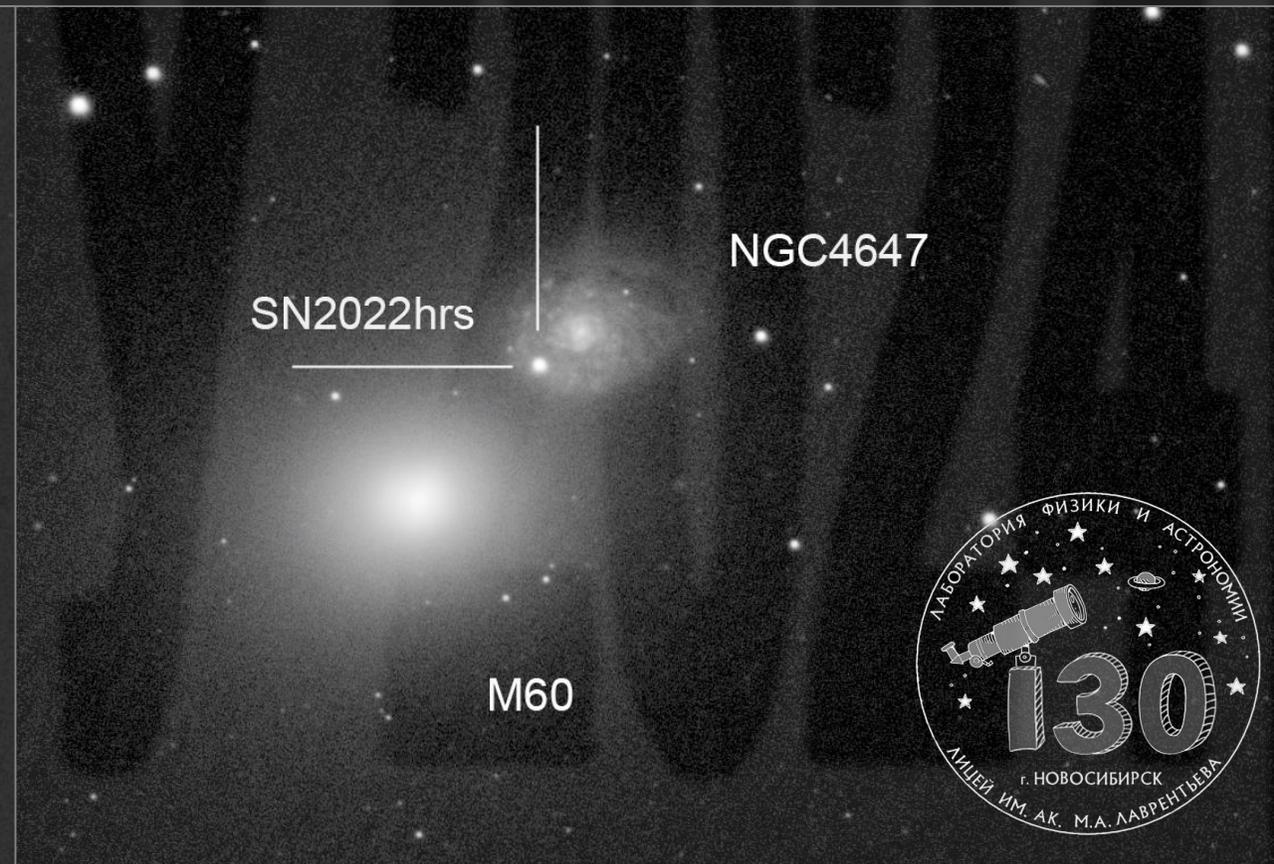
$$m_B - M_B^{max} = 5 \log \frac{d}{10 \text{ пк}}$$

Огромная светимость вспышек (до $10^{11} L_{\odot}$), позволяет регистрировать их на космологических расстояниях.

Этот метод является одним из основных в космологии для изучения расширения Вселенной.

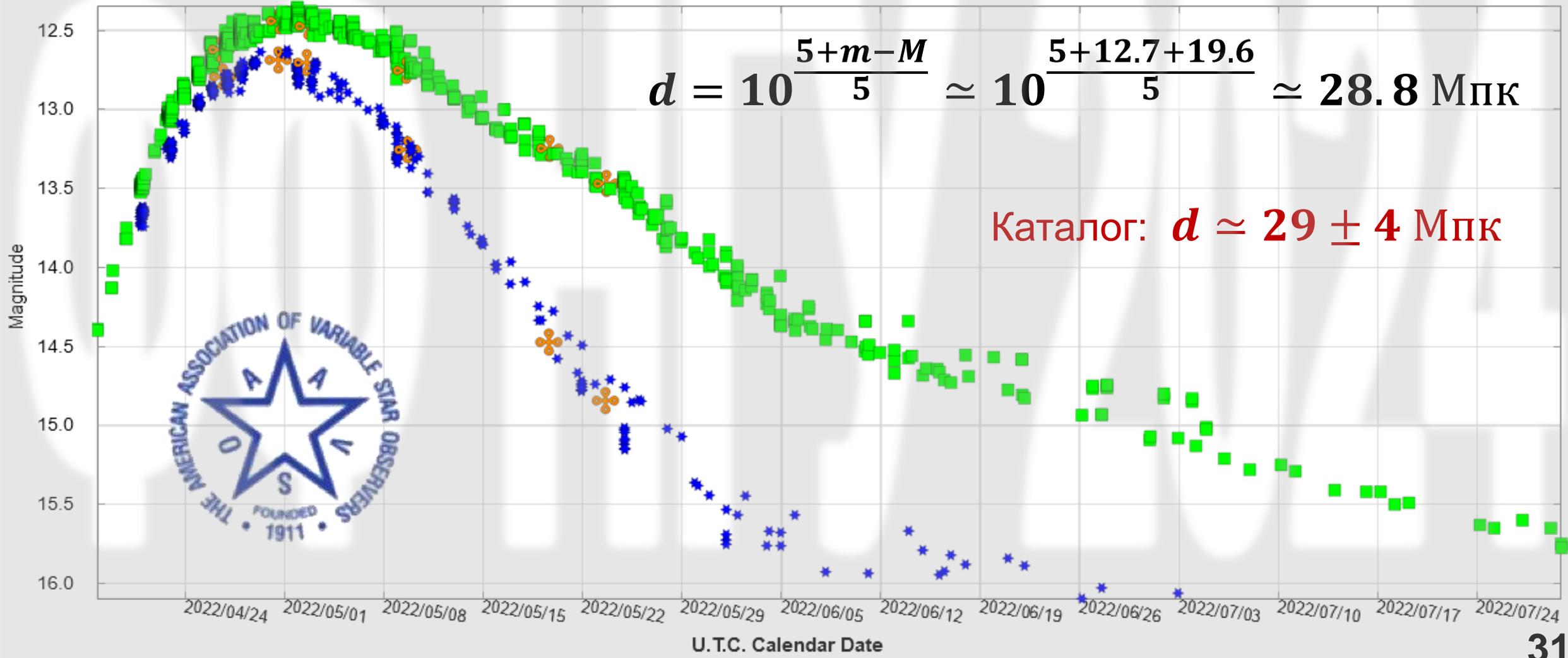
Сверхновая SN2022hrs

Яркая вспышка сверхновой типа Ia. Открыта 16 апреля 2022 года японским астрономом любителем Коичи Итагаки в галактике NGC4647 в созвездии Девы.



Результаты

All (1157) (403) B (754) V



Нейтронные звезды: предсказание



Photo from the Nobel Foundation archive.

James Chadwick

Prize share: 1/1

“for the discovery of the neutron”

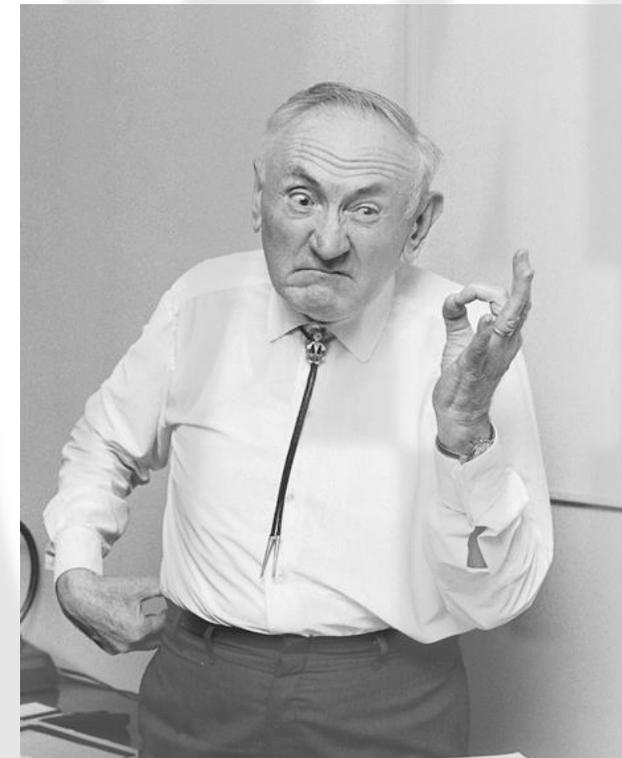
В 1932 году Джеймс Чэдвик открыл нейтрон.

Через два года Уолтер Бааде и Фриц Цвикки предположили, что:

“... supernovae represent the transitions from ordinary stars into neutron stars, which in their final stages consist of extremely closely packed neutrons.”



Walter Baade



Fritz Zwicky

Равновесие нейтронной звезды

Гравитационное давление в центре НЗ: $P_{\text{гр}} = \frac{2\pi}{3} G \rho^2 R^2.$

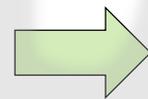
Концентрация нейтронов: $n_n \simeq \frac{\rho}{m_n}$

Тогда давление вырожденного нейтронного газа в нерелятивистском случае:

$$P_{\text{ВН}} = \frac{\hbar^2}{m_n} n^{5/3} = \frac{\hbar^2}{m_n} \left(\frac{\rho}{m_n} \right)^{5/3}$$

Приравнивая гравитационное давление давлению вырожденного газа электронов, получаем:

$$\frac{2\pi}{3} G \rho^2 R^2 = \frac{\hbar^2}{m_n} \left(\frac{\rho}{m_n} \right)^{5/3}$$



$$R_{\text{НЗ}} \simeq \frac{3\hbar^2}{GM^{1/3}} \left(\frac{1}{m_n} \right)^{8/3}$$

Параметры нейтронной звезды

Пусть масса НЗ: $M_{\text{НЗ}} = 1.5M_{\odot}$. Тогда:

Характерный радиус НЗ: $R_{\text{НЗ}} \simeq \frac{3\hbar^2}{GM^{1/3}} \left(\frac{1}{m_n}\right)^{8/3} \simeq 10 \text{ км.}$

Средняя плотность:

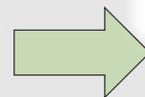
$$\rho_{\text{НЗ}} \simeq \frac{M_{\text{НЗ}}}{V} = \frac{3}{4\pi} \frac{M_{\text{НЗ}}}{R_{\text{НЗ}}^3} \simeq 5 \times 10^{14} \text{ г/см}^3.$$

Ядерная плотность:

$$\rho_{\text{яд}} \simeq 2 \times 10^{14} \text{ г/см}^3$$

Предельную массу НЗ можно **оценить** приравнивая ее радиус радиусу Шварцшильда $M_{\text{НЗ}} = R_{\text{Sh}}$:

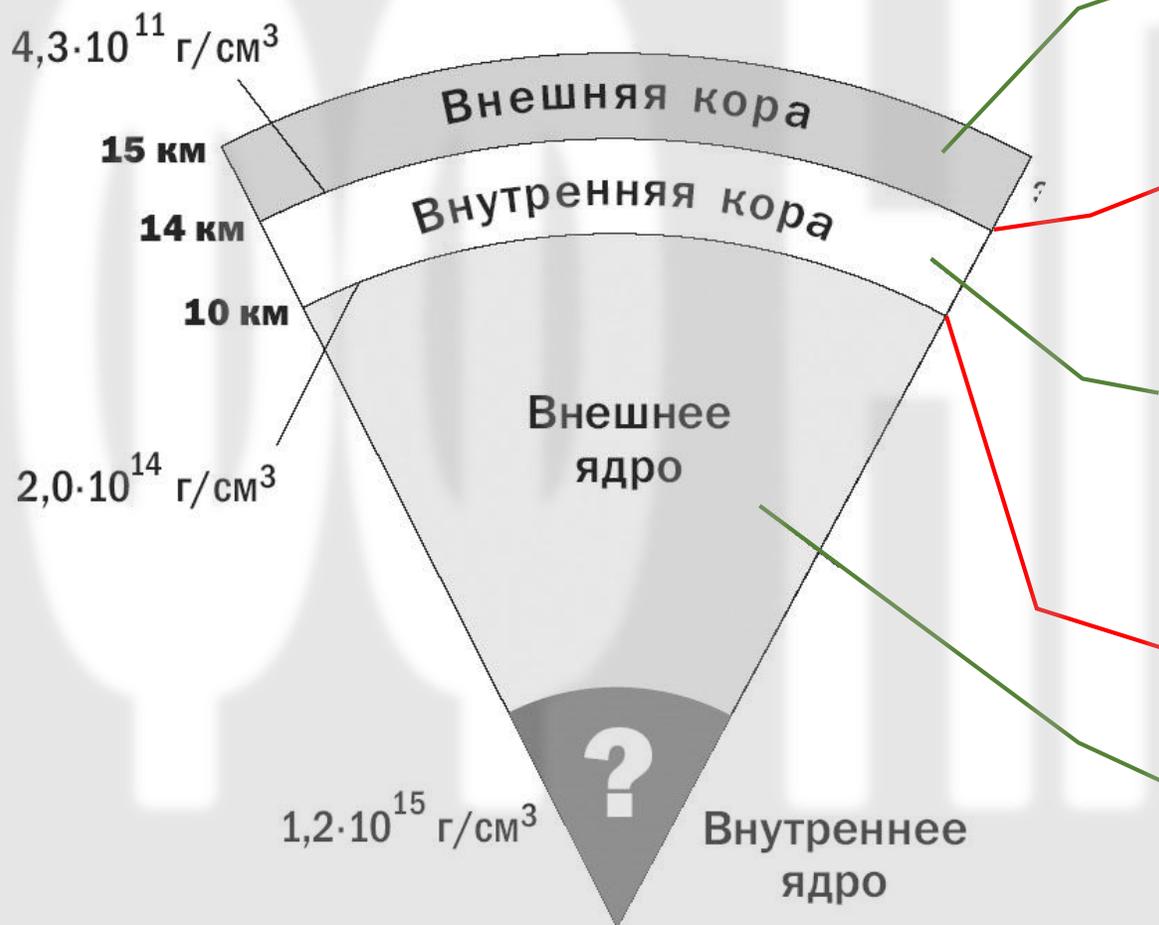
$$\frac{3\hbar^2}{GM^{1/3}} \left(\frac{1}{m_n}\right)^{8/3} = \frac{2GM}{c^2}$$



$$M_{\text{НЗ}}^{\text{max}} \simeq \left(\frac{3}{2}\right)^{3/4} \frac{M_{\text{Pl}}^3}{m_n^2} \simeq 2.6M_{\odot}$$

Нейтронные звезды: строение

Существует множество разных моделей внутреннего строения НЗ, однако можно выделить общие черты:



Внешняя кора: тяжелые ядра (${}_{26}^{56}\text{Fe}$), возможно в кристаллической форме, вырожденные релятивистские электроны.

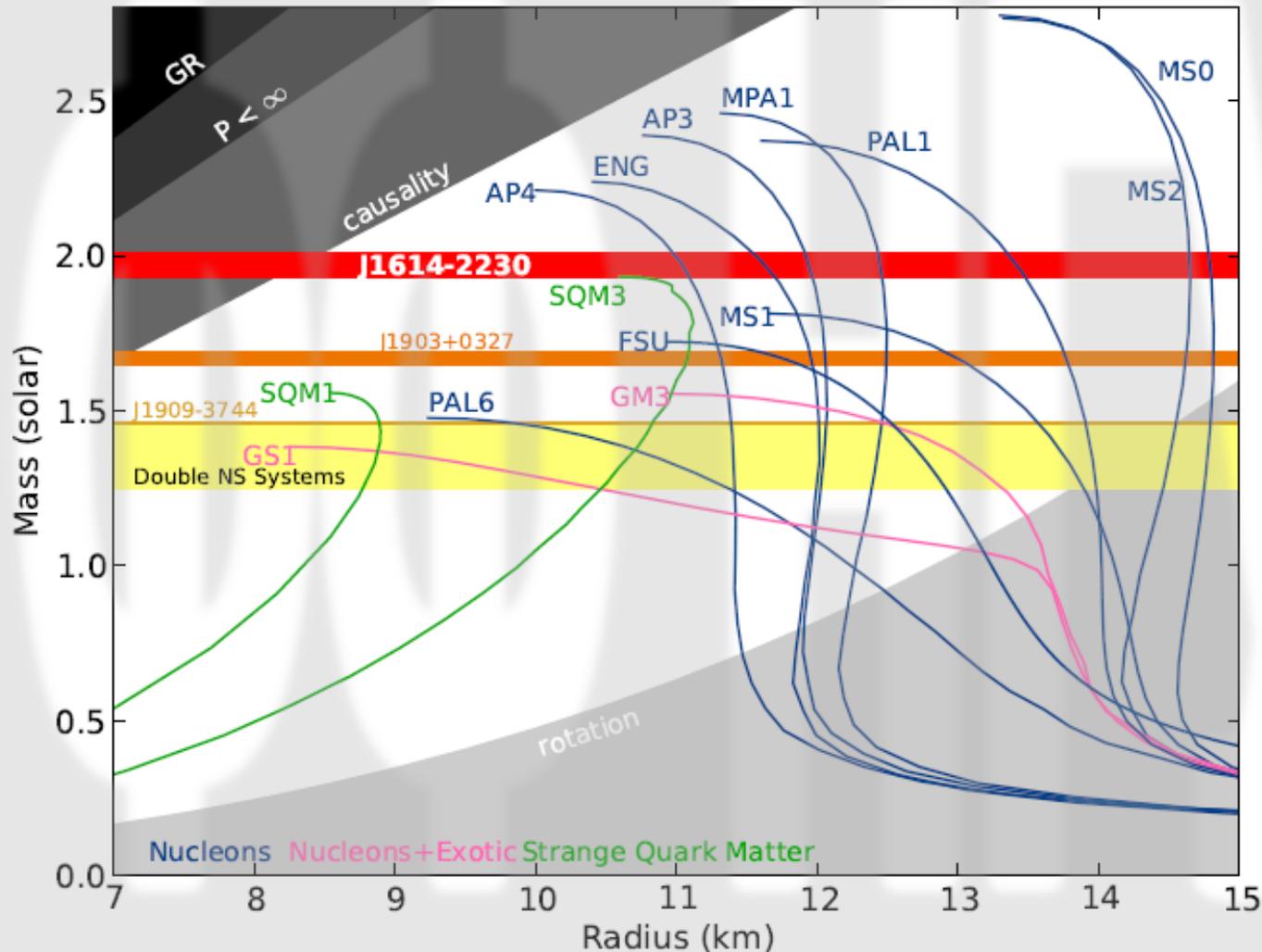
Граница – «вытекание» нейтронов из ядер.

Внутренняя кора: кристаллическая решетка из ядер сильно обогащенных нейтронами (например ${}_{36}^{118}\text{Kr}$), сверхтекучие нейтроны и вырожденные релятивистские электроны.

Граница – плотность вещества сравнивается с ядерной.

Внешнее ядро: сверхтекучие нейтроны, сверхпроводящие протоны, вырожденные релятивистские электроны.

Нейтронные звезды: строение



Мы плохо знаем, как ведет себя вещество при плотности в 10-20 раз выше ядерной.

Соотношение масса-радиус и предельное значение массы НЗ существенно зависят от внутреннего строения НЗ.

Точные измерения масс **и** радиусов НЗ позволит получить информацию о их строении и определить предпочтительную модель/исключить некоторые модели.

Сложная наблюдательная задача.

Нейтронные звезды: пульсары

Сохранение момента импульса приводит к тому, что даже небольшое («нормальное») вращение исходной звезды при сжатии ядра в БК (или даже в НЗ) приводит к быстрому вращению остатка.

Грубая («наивная») оценка для Солнца. Радиус ядра Солнца $R_{\text{ядра}} \sim 0.3R_{\odot} \approx 2 \times 10^5$ км. При сжатии его в БК с радиусом $R_{\text{БК}} \sim 10^4$ км, период вращения $P_{\odot} \approx 25$ сут $\approx 2 \times 10^6$ с уменьшится до

$$P_{\text{БК}} \approx P_{\odot} \left(\frac{R_{\text{ядра}}}{R_{\text{БК}}} \right)^2 \approx \mathbf{5000 \text{ с.}}$$

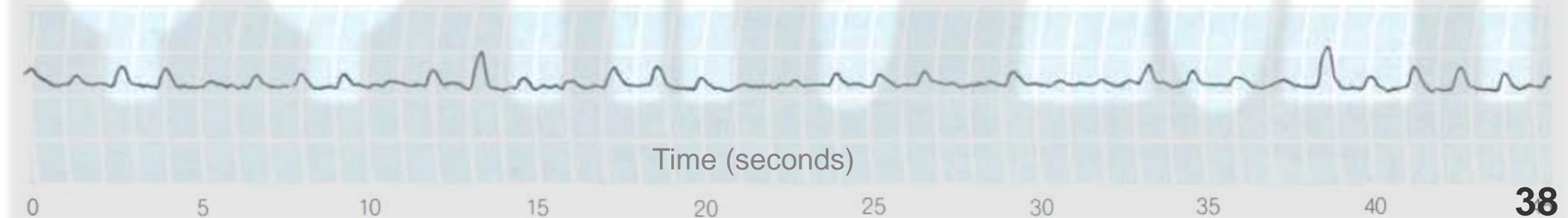
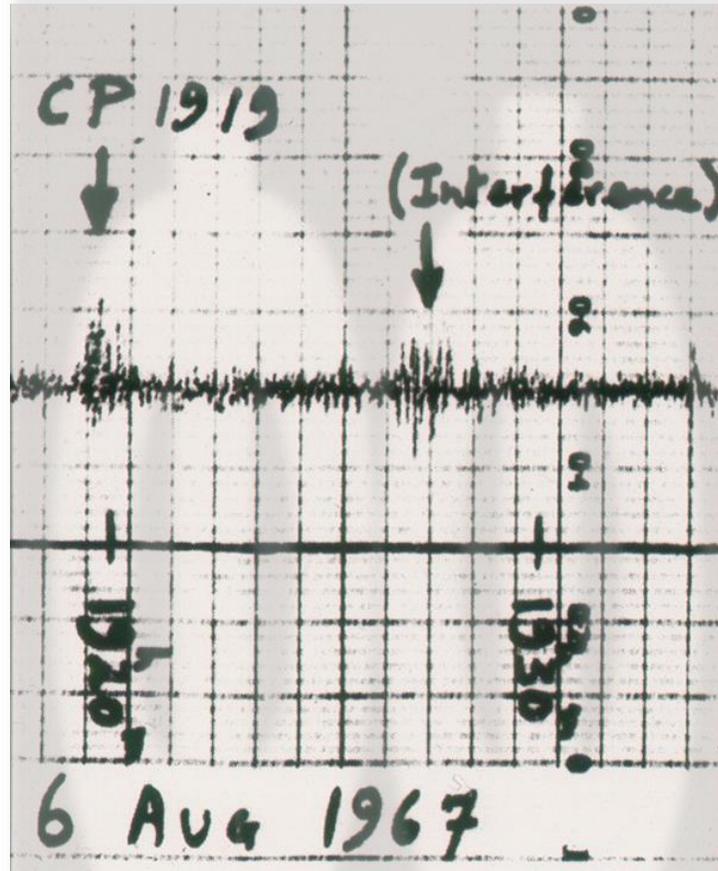
Аналогичная ситуация с магнитным полем. Сохранение потока через поверхность звезды при уменьшении радиуса (площади), приводит к сильному росту напряженности.

$$B_{\text{БК}} \approx B_{\odot} \left(\frac{R_{\odot}}{R_{\text{БК}}} \right)^2 \approx 2 \times 10^{-4} \times (70)^2 \approx \mathbf{10 \text{ Тл.}}$$

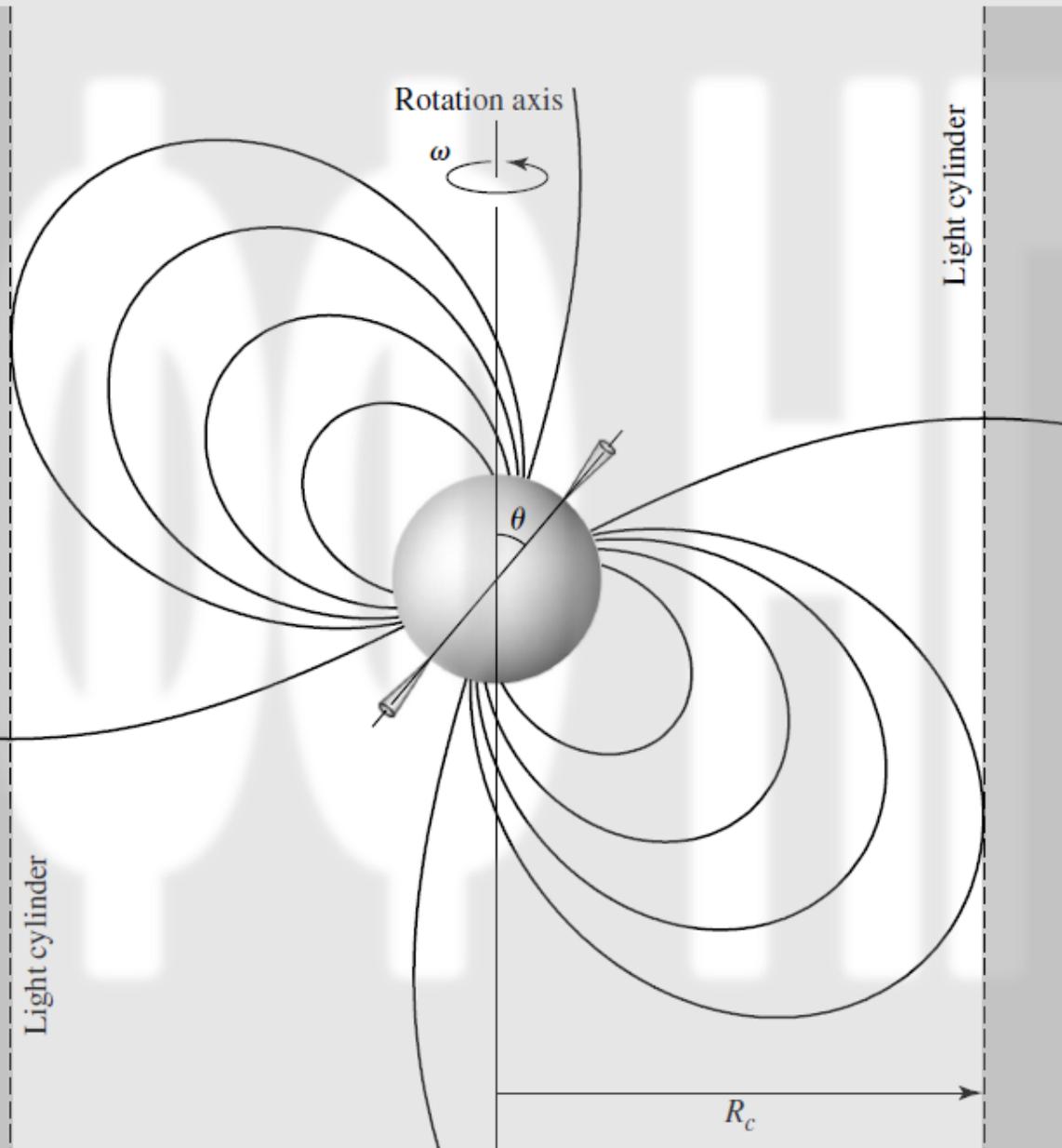
В обоих случаях, для нейтронных звезд эффект будет еще на 5 – 6 порядков сильнее!

Нейтронные звезды: открытие

1967: Antony Hewish и Jocelyn Bell. Открытие радио-пульсаров.



Нейтронные звезды: пульсары



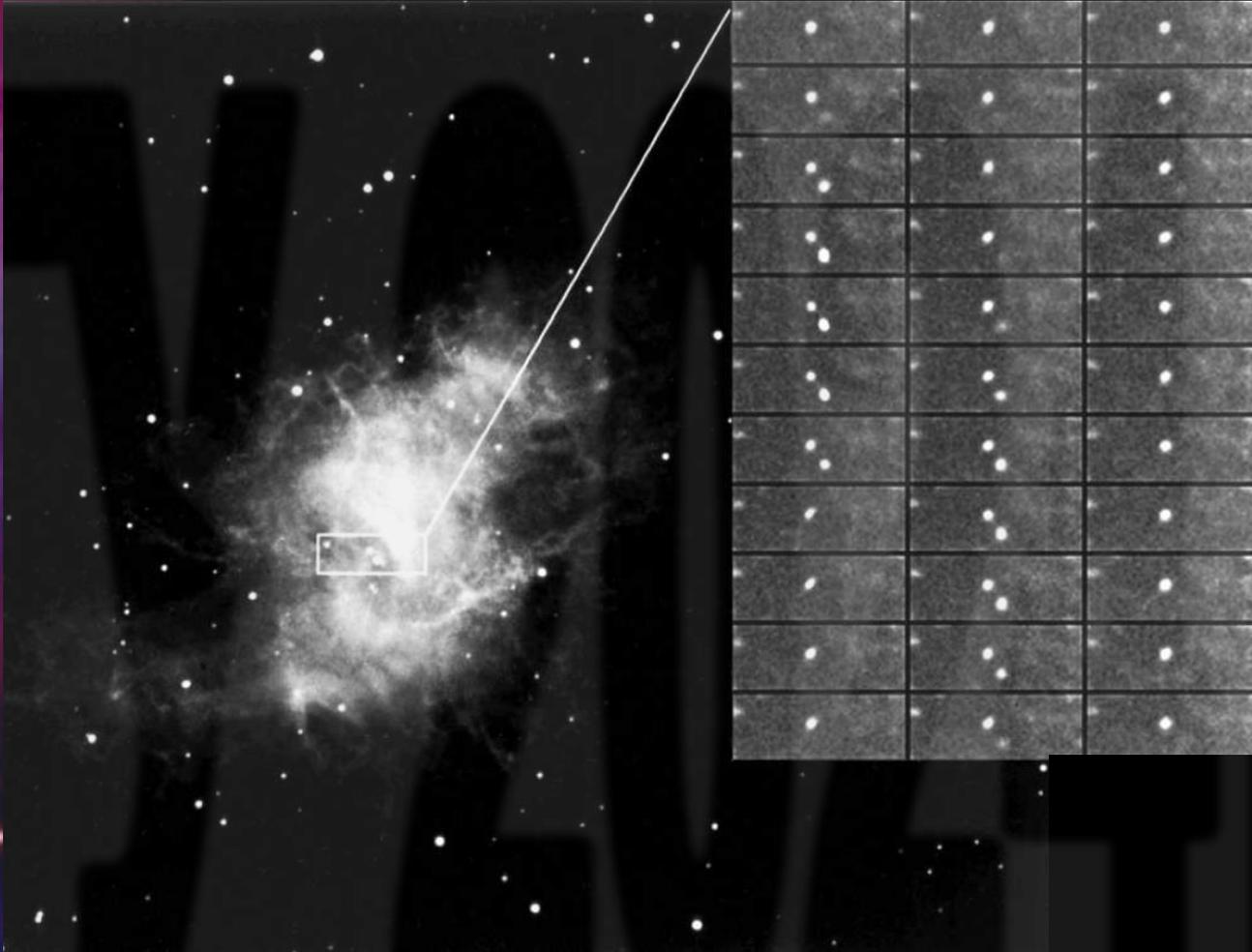
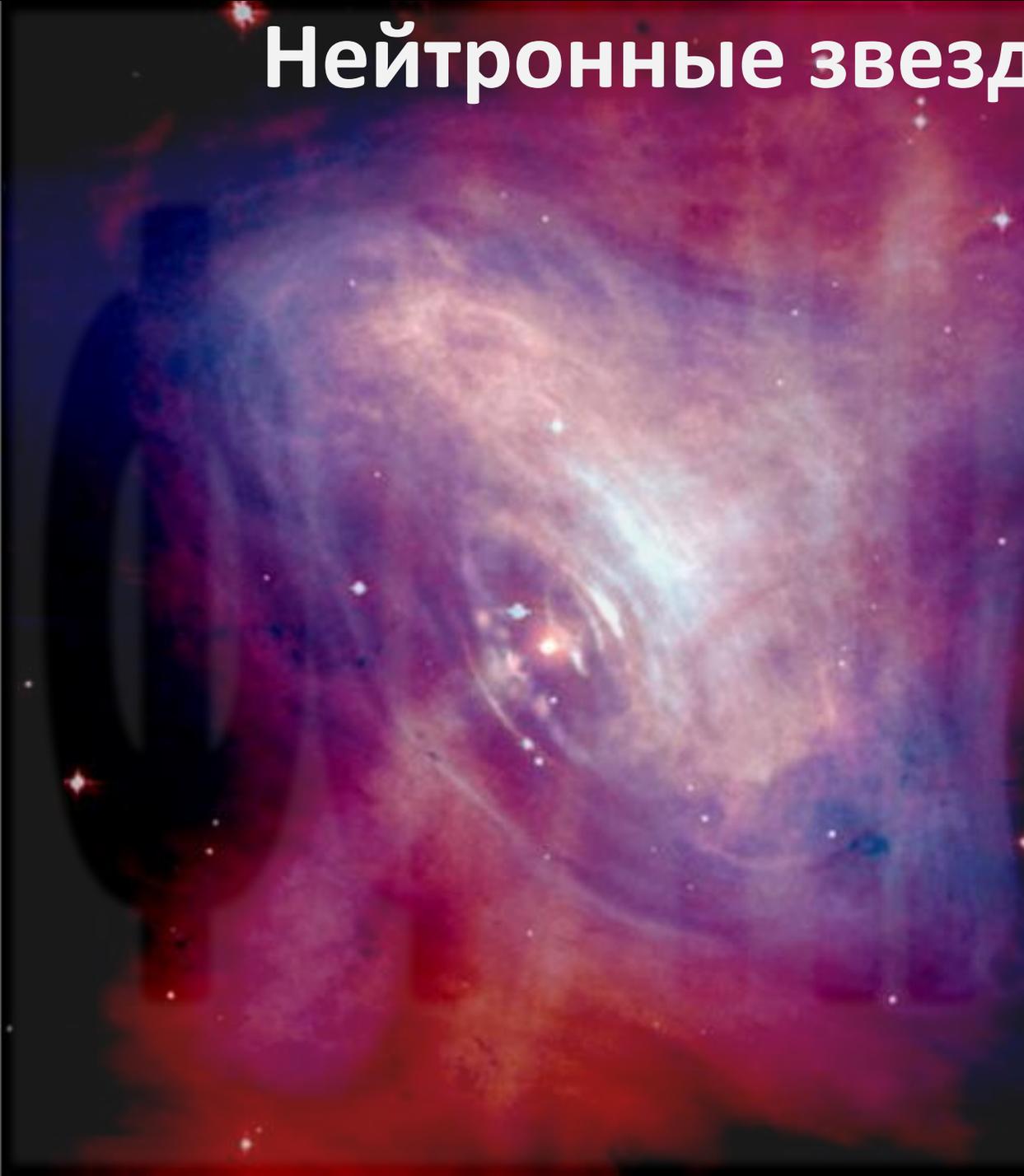
Пульсары – быстро вращающиеся ($P \lesssim 1\text{с}$) нейтронные звезды с сильным магнитным полем, ось вращения которых не совпадает с осью магнитного диполя.

Сильное и быстро меняющееся магнитное поле индуцирует сильное вихревое электрическое поле в окрестности НЗ, которое ускоряет свободные заряды (электроны, протоны, ядра).

Релятивистские заряды, двигаясь в сильном магнитном поле «накручиваются» на линии магнитного поля и излучают (синхротронное излучение) в широком ЭМ диапазоне (в основном в рентгеновском).

Кроме того, при падении на НЗ в приполярных областях и взаимодействии с ее поверхностью, испускается тормозное излучение.

Нейтронные звезды: пульсар в Крабе



Пульсации могут быть не только в радио, но и в оптическом диапазоне.

Нейтронные звезды: пульсары

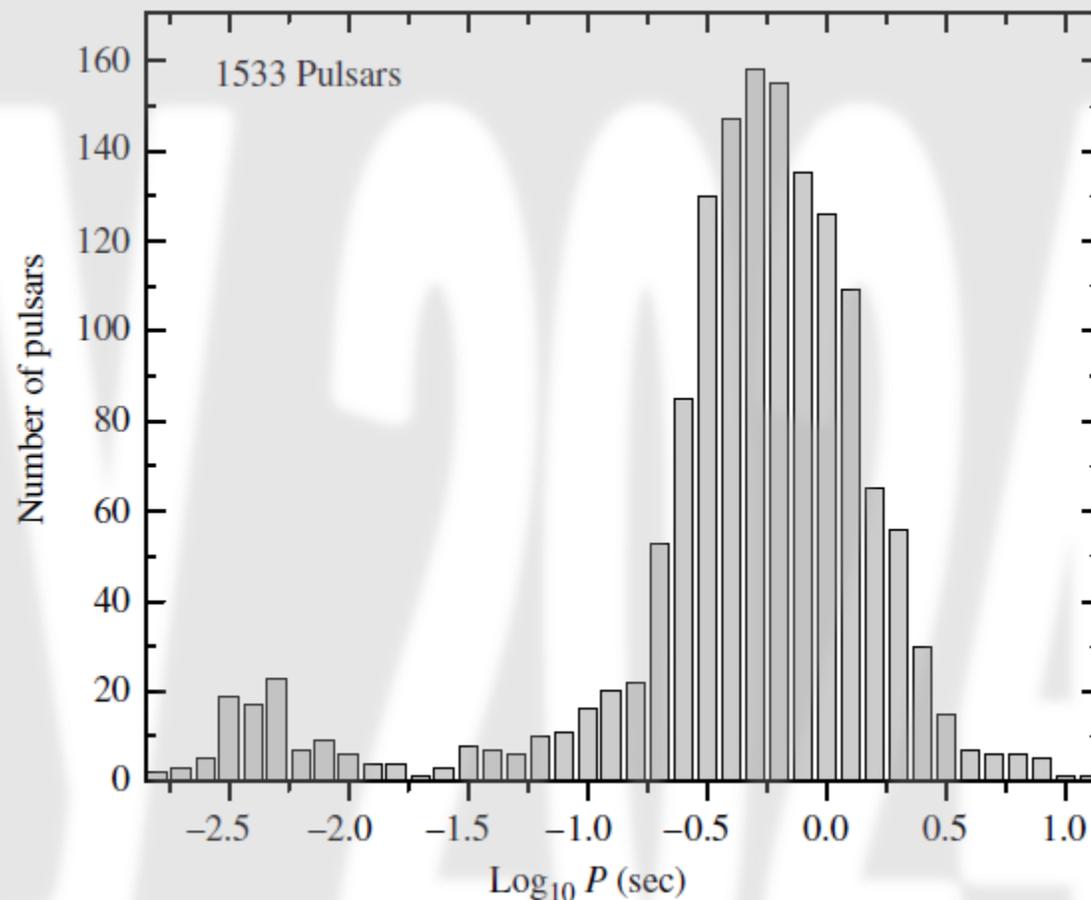
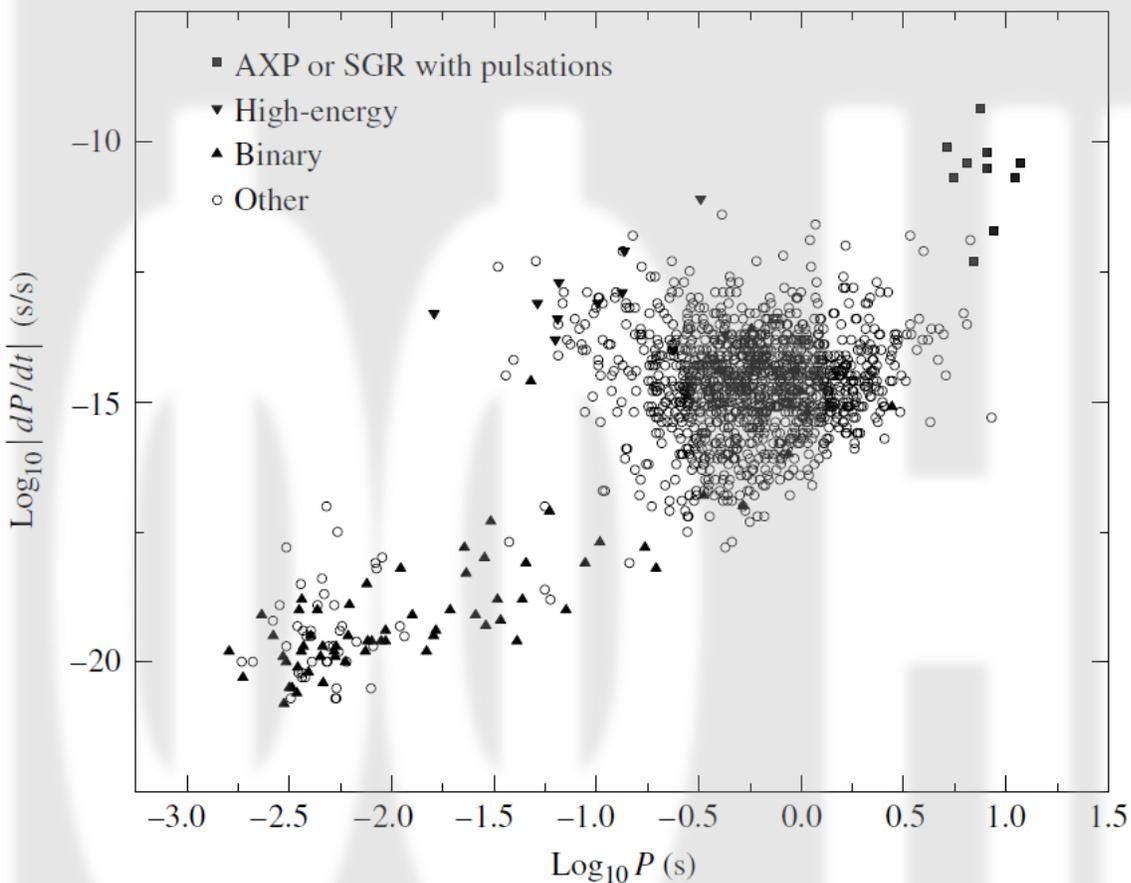


Диаграмма период-производная периода содержит только прямо наблюдаемые величины, которые легко и очень точно измеряются.

Явно выделяются (по крайней мере) две группы пульсаров с характерными периодами, что может быть связано с разными механизмами их рождения. Кроме того есть уникальные объекты с нетипичными параметрами, которые также требуют своего объяснения.

Нейтронные звезды: проверка СТО

Тесная двойная система нейтронных звезд, одна из которых – радио-пульсар PSR 1913 + 16. Из-за быстрого вращения система теряет энергию на излучение гравитационных волн.

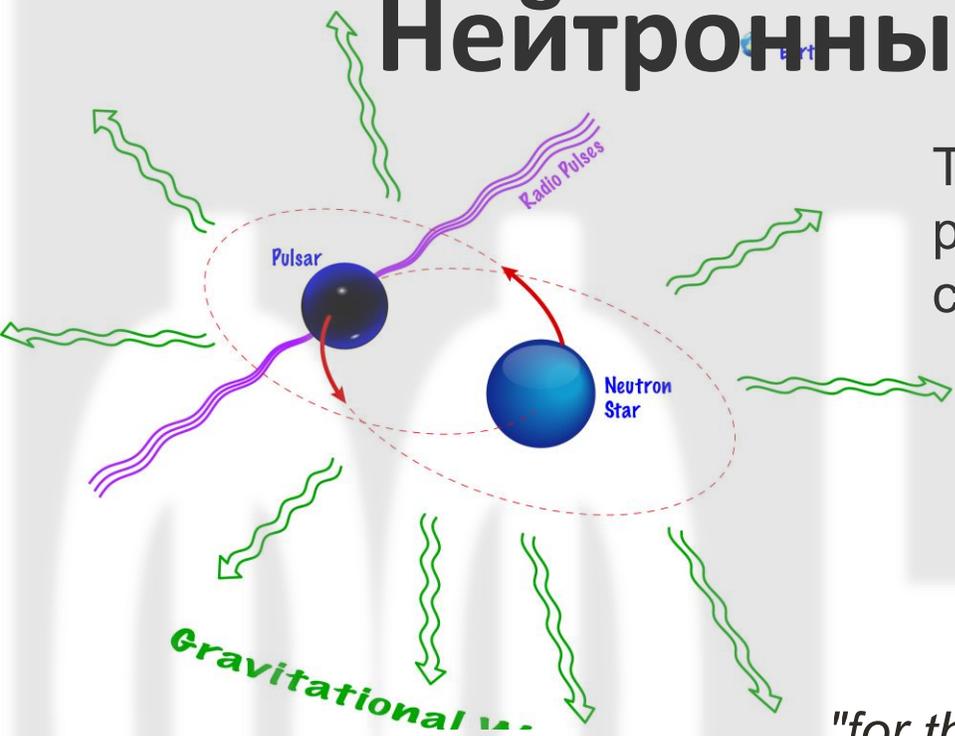
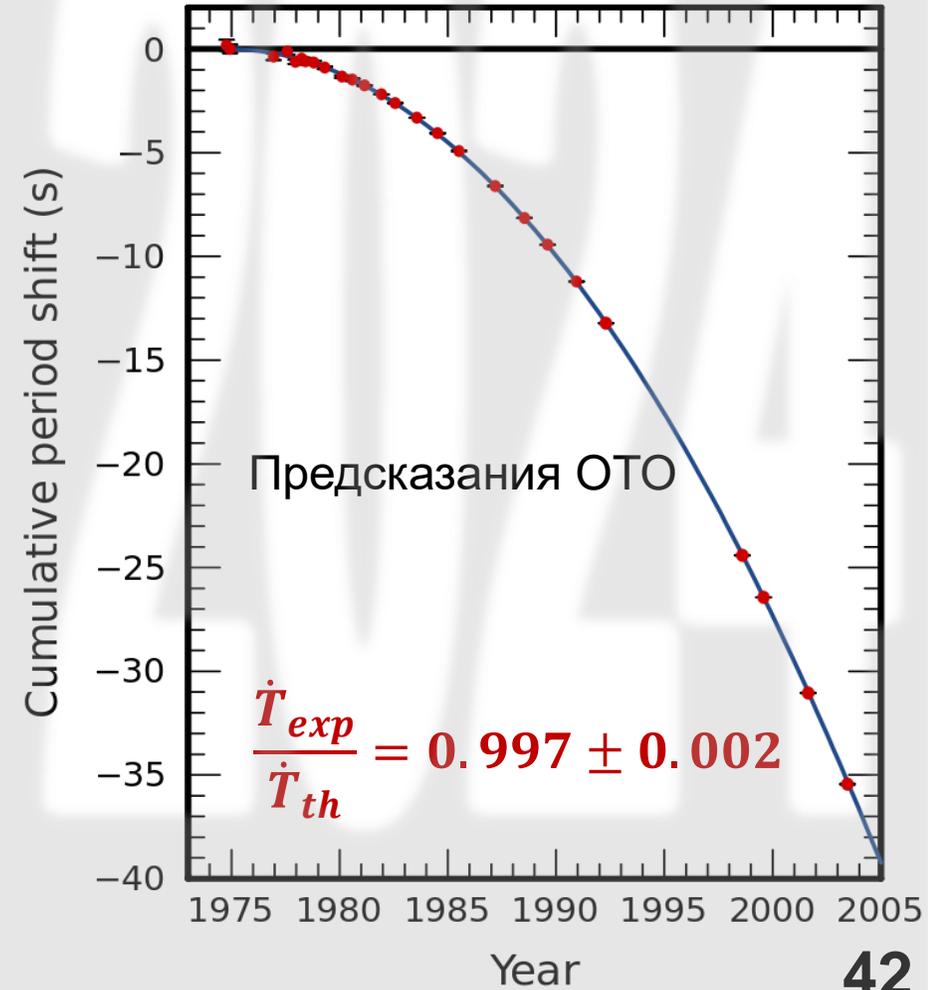


Photo from the Nobel Foundation archive.
Russell A. Hulse



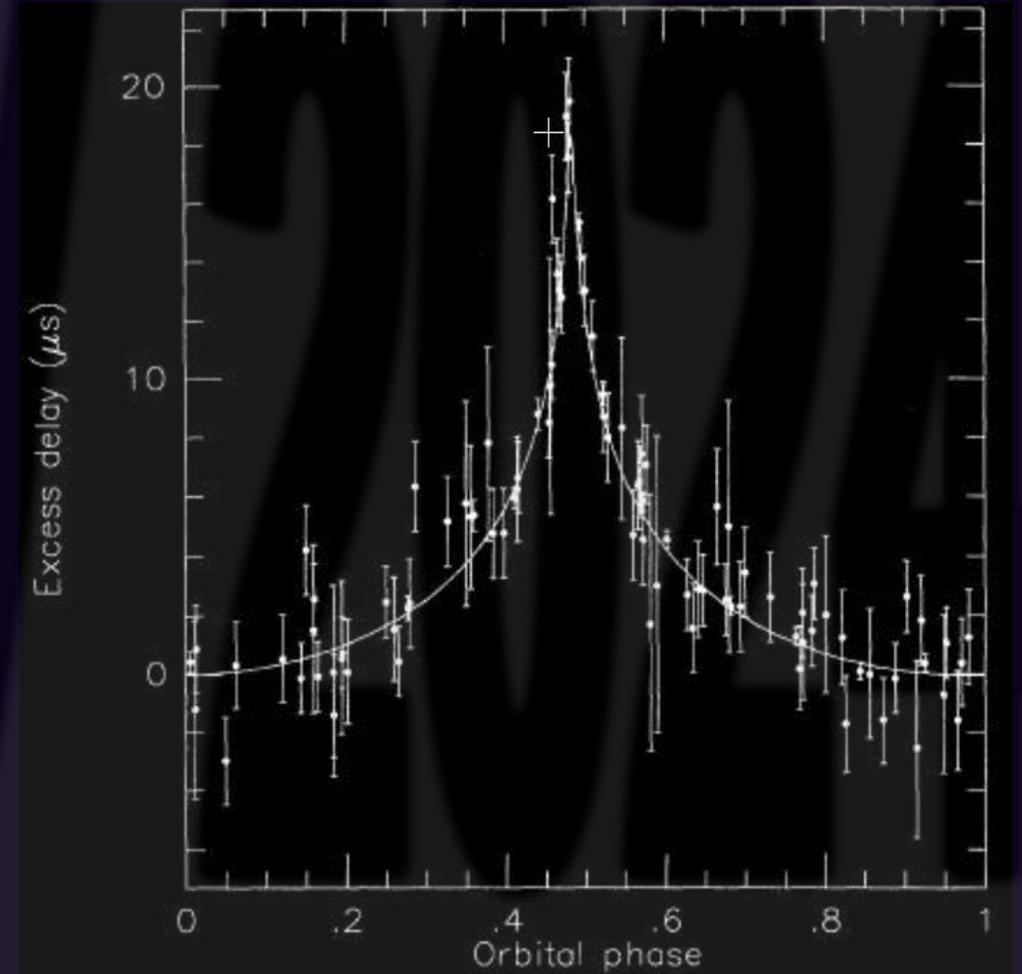
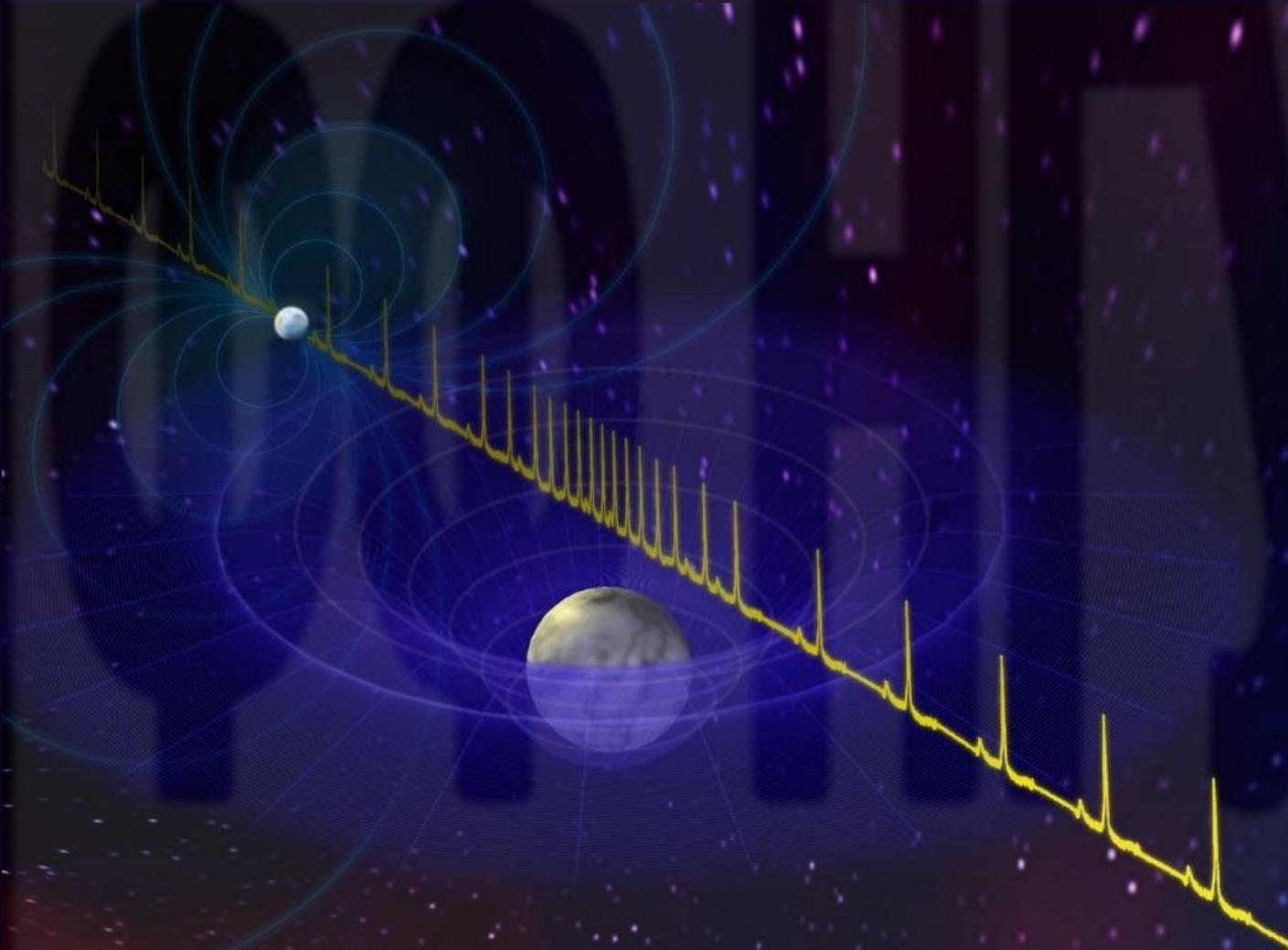
Photo from the Nobel Foundation archive.
Joseph H. Taylor Jr.

"for the discovery of a new type of pulsar, a discovery that has opened up new possibilities for the study of gravitation"



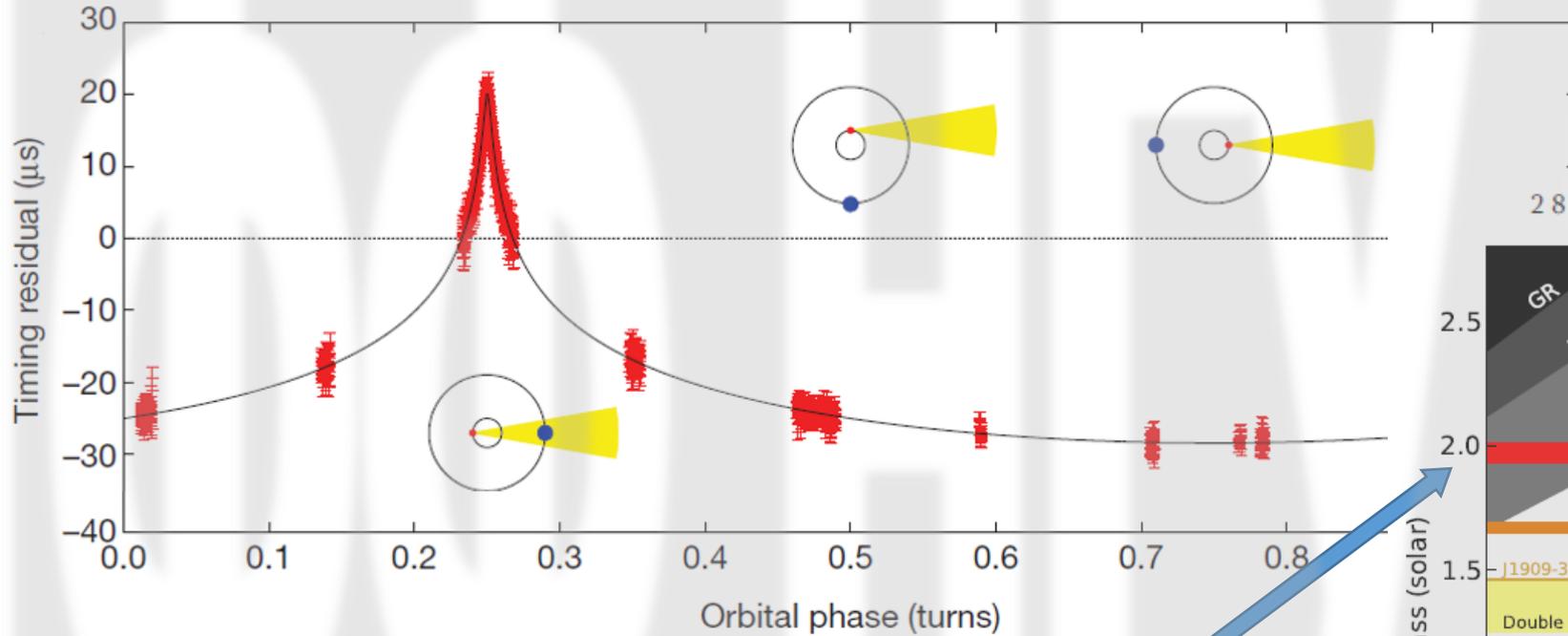
Нейтронные звезды: проверка СТО

При прохождении вблизи массивного тела электромагнитным волнам требуется больше времени, чтобы достичь наблюдателя, если пространство-время искривлено (задержка Шапиро).

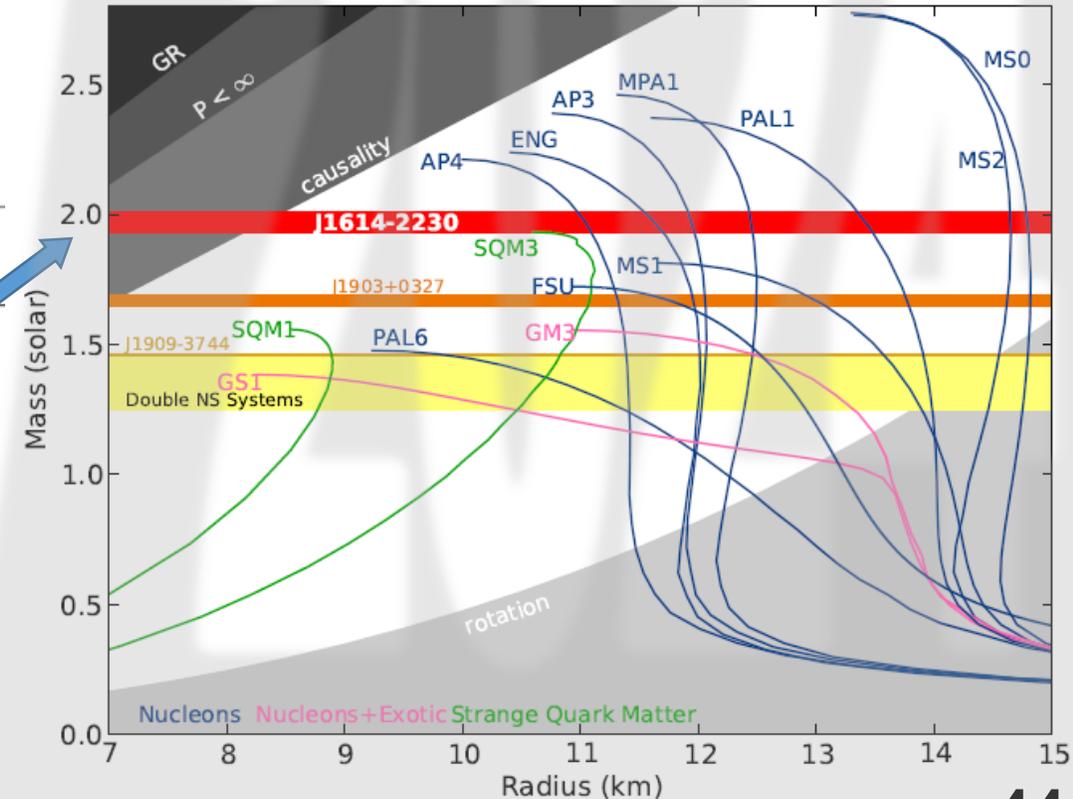


Нейтронные звезды: проверка СТО

Эффект Шапиро для двойной системы пульсара PSR J1614-2230.
Угол наклона плоскости орбиты 89.17° .



28 OCTOBER 2010 | VOL 467 | NATURE | 1081



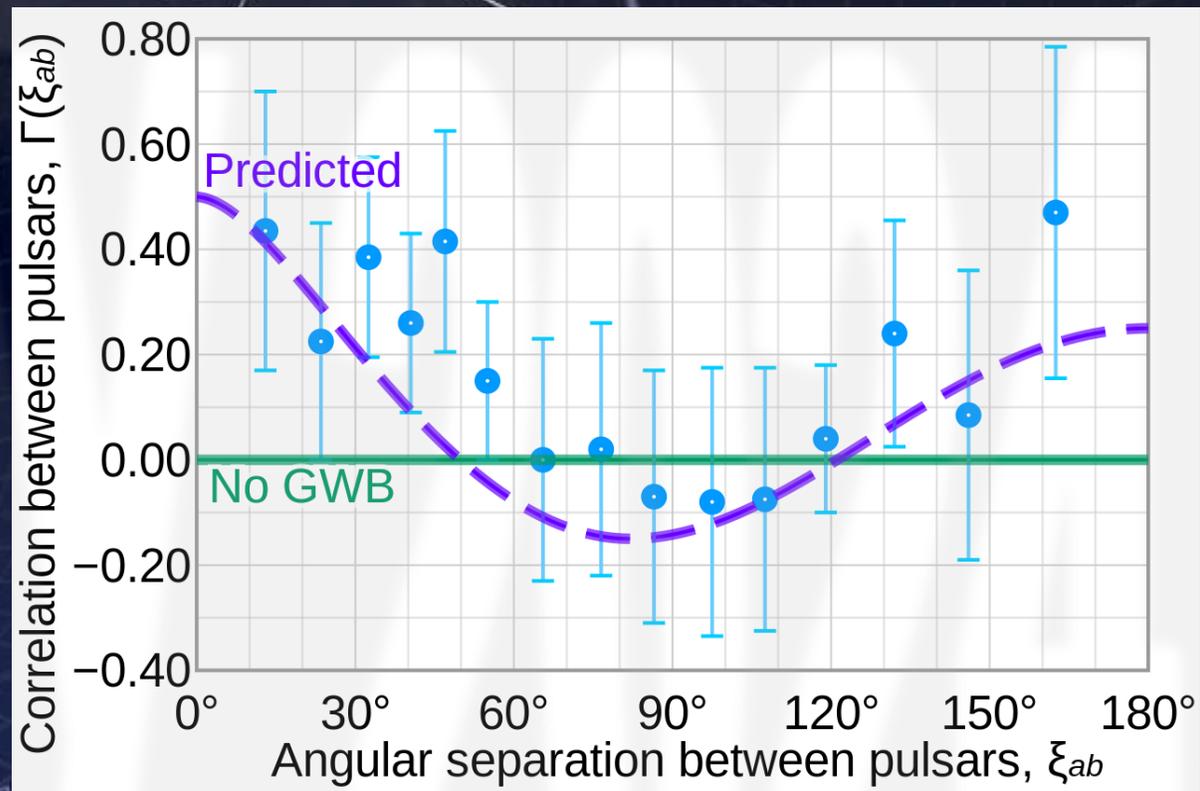
"We calculate the pulsar mass to be $(1.97 \pm 0.04)M_\odot$, which rules out almost all currently proposed hyperon or boson condensate equations of state. Quark matter can support a star this massive only if the quarks are strongly interacting and are therefore not «free» quarks".

Сверхдлинные гравитационные волны

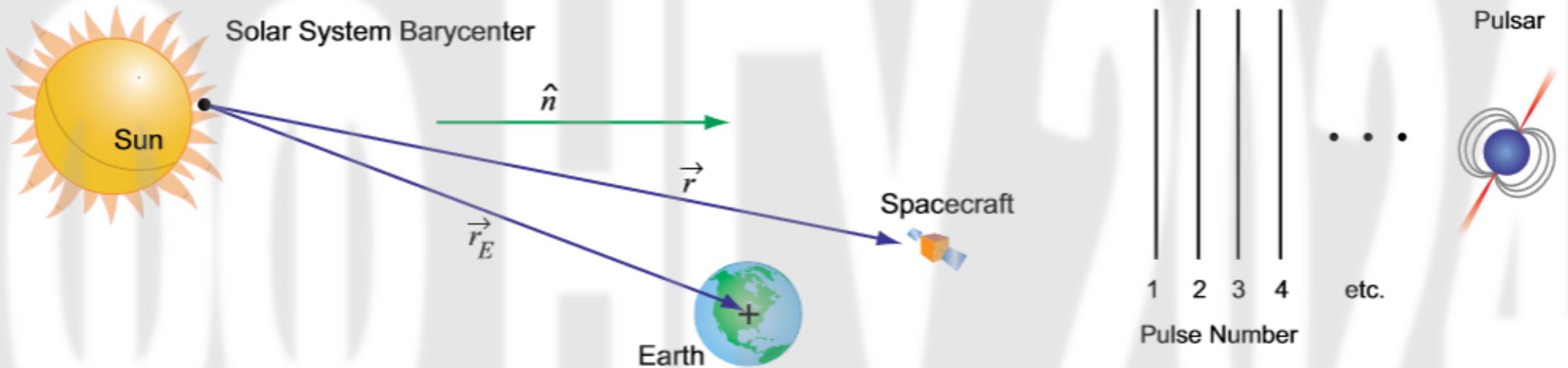
В 2020 году, после 12 лет измерений с использованием 67 пульсаров, эксперимент NANOGrav анонсировал первое указание на наблюдение сигнала от сверхдлинных гравитационных волн.

К 2023 году уже четыре Pulsar Timing Array эксперимента сообщили о своих результатах.

Достигнутая точность еще не позволяет с надежностью утверждать о наблюдении, грав. волн, а скорее является демонстрацией применимости данной методики.



Нейтронные звезды как маяки



Все ведущие космические агентства в мире (включая российское) сейчас работают над созданием систем навигации, основанных на наблюдении рентгеновского излучения стабильных одиночных пульсаров.

Нейтронные звезды

Нейтронные звезды – астрономические объекты с разнообразными наблюдательными проявлениями и богатой физикой (сверхтекучесть и сверхпроводимость, сверхвысокие плотности, сверхсильные гравитационные и электромагнитные поля и т.п.).

До сих пор существует множество актуальных задач и проблем, связанных с физикой пульсаров. Кроме того, изучение свойств пульсаров (в частности их внутреннее строение) может пролить свет на проблемы фундаментальной физики, например – свойства сильных взаимодействий при сверхвысоких плотностях материи.

Изучение компактных объектов – динамично развивающееся направление астрофизики. За последнее время получено множество интересных и важных результатов.

Обзоры по нейтронным звездам

1. Потехин «Физика нейтронных звезд» УФН 2010 <https://ufn.ru/ru/articles/2010/12/c/>
2. Курс лекций по компактным объектам С.Б.Попова:
<https://www.youtube.com/watch?v=X2GyagGgxwk&list=PL-18izvyDXIfUTE2he7mACU-3YjvVPt0v>

Черная дыра: что это?

Для физика/математика

Обладает определенными
внутренними свойствами

Объект, обладающий горизонтом
моментом импульса и т.д.

Для астронома

Обладает определенными
внешними проявлениями

Компактный, массивный объект, не
проявляющий признаков наличия
поверхности.

Черные дыры: типы



Черные дыры звездных масс: от нескольких единиц M_{\odot} до десятков M_{\odot} . Образуются в результате эволюции массивных звезд.

Черные дыры промежуточных масс: $\sim 10^2 - 10^5 M_{\odot}$. Наименее изученные объекты. Наблюдаются более или менее надежные кандидаты.

Сверхмассивные черные дыры: $> 10^5 M_{\odot}$. Наблюдаются в центре большинства крупных галактик.

Первичные черные дыры: гипотетические черные дыры образовавшиеся на первых этапах расширения вселенной. Могут быть любой массы. Минимально возможной массой ЧД считается масса Планка.

Как «увидеть» черную дыру?

1. Двойные системы
2. Аккреция вещества
3. Микролинзирование
4. Гравитационные волны



Отсутствие у ЧД поверхности приводит к существенным отличиям спектра рентгеновского излучения, вызванного аккрецией вещества на ЧД, от спектра НЗ.

俞京川 2019.8.9
Yu Jingchuan

Черные дыры: аккреция

Система Лебедь X-1 была выделена как кандидат в двойную с черной дырой в начале 70-х гг.



Система Лебедь X-1 является двойной. Вторая звезда класса B0 и массой $\sim 30M_{\odot}$ часть которой, возможно, была получена ранее от теперь невидимого компаньона.

Система Лебедь X-1 принадлежит к OB ассоциации Cygnus OB3, возраст которой оценивается ~ 5 Млет, а значит первая звезда должна была иметь массу $>40M_{\odot}$.

При взрыве СН, двойная система, как правило, распадается, скорее всего произошел прямой коллапс без взрыва.

Теория звездной эволюции предсказывает массу остатка $\sim 20 \pm 5M_{\odot}$. Наблюдательные данные приводят к оценкам массы от 15 до $21 M_{\odot}$.

Лебедь X-1

National Aeronautics and
Space Administration



CYGNUS X-1 PRESENTS:

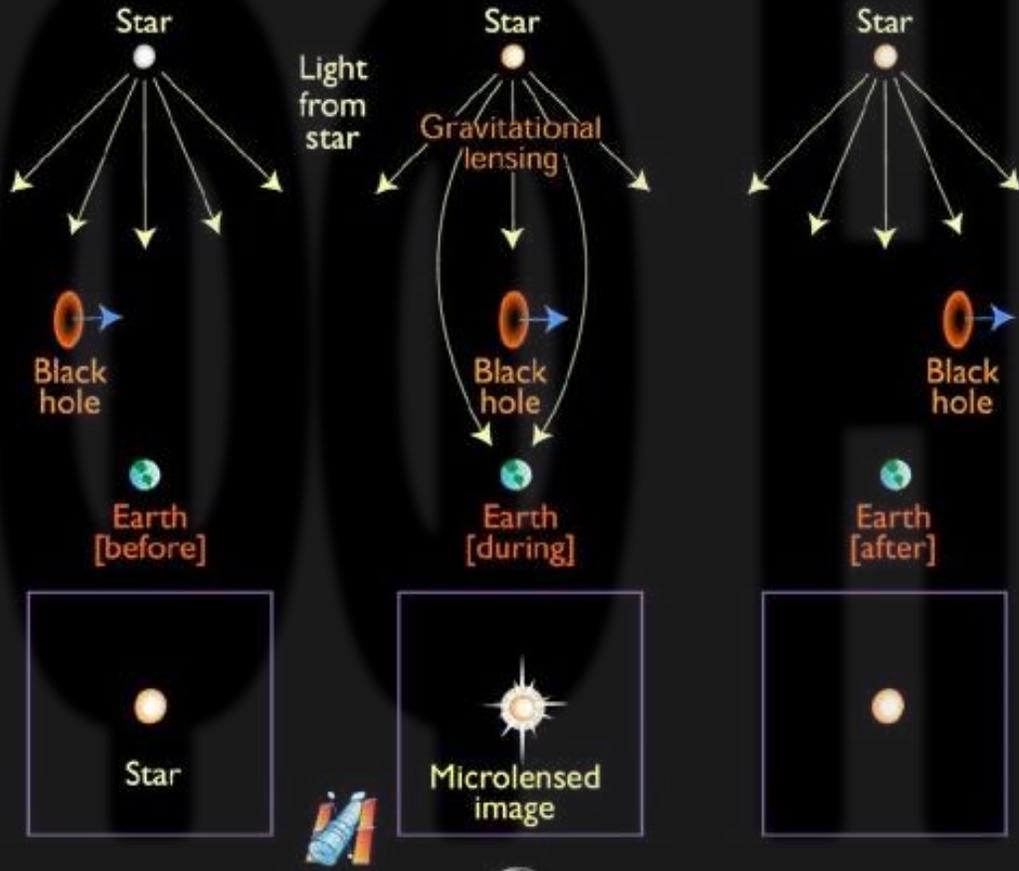
DEVoured BY GRAVITY

«Черная дыра в источнике Лебедь X-1 – это самая консервативная гипотеза»
(Э. Салпитер)

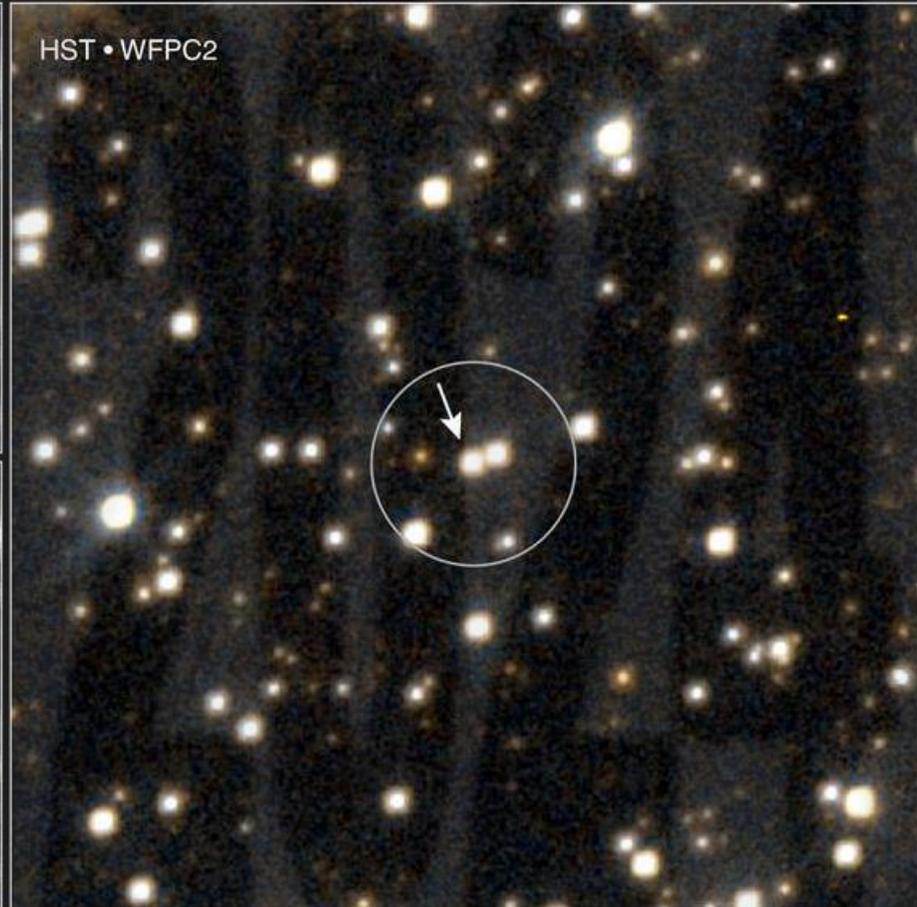
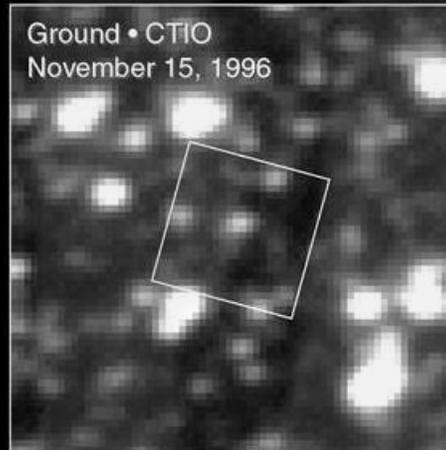
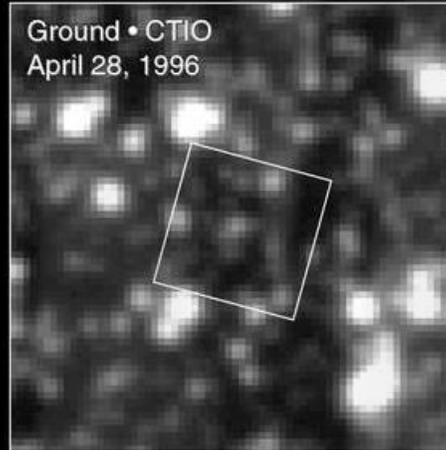
IT'S DINNER TIME AND YOU'RE THE MEAL!
LURKING IN OUR GALAXY APPROXIMATELY 8,000 LIGHT YEARS FROM EARTH IS A MONSTER NAMED CYGNUS X-1. THIS BLACK HOLE, WHICH HAS ABOUT 14.3 TIMES THE MASS OF OUR SUN, WILL STRETCH AND SQUEEZE ANYTHING IT CAPTURES IN ITS IMMENSE GRAVITY. CYGNUS X-1 IS WAITING, SNACKING ON ITS NEIGHBORING STARS. DON'T GET TOO CLOSE, OR YOU'LL BECOME MEAT.

Микролинзирование

Gravitational Microlensing by Black Hole



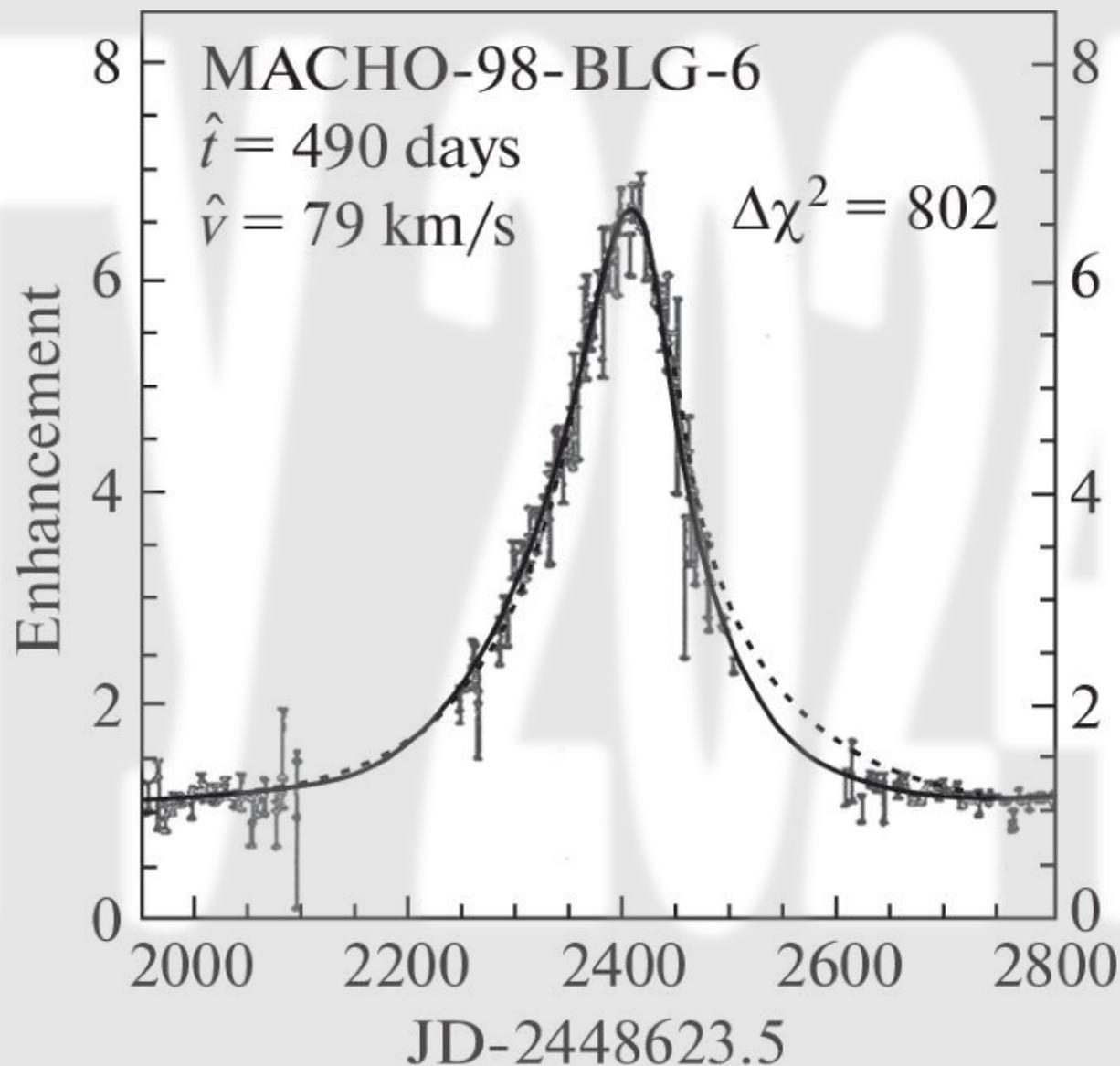
Проект МАСНО = Massive Compact Halo Objects



Microlens Event MACHO-96-BLG-5
Hubble Space Telescope • WFPC2

Черные дыры: микролинзирование

Event	M/M_{\odot}
104-C	$1.1^{+1.1}_{-0.5}$
96-BLG-5	6^{+10}_{-3}
96-BLG-12	$1.3^{+1.8}_{-0.7}$
98-BLG-6	$2.5^{+1.7}_{-0.9}$
99-BLG-1	$0.7^{+1.2}_{-0.4}$
99-BLG-8	$1.2^{+1.6}_{-0.6}$

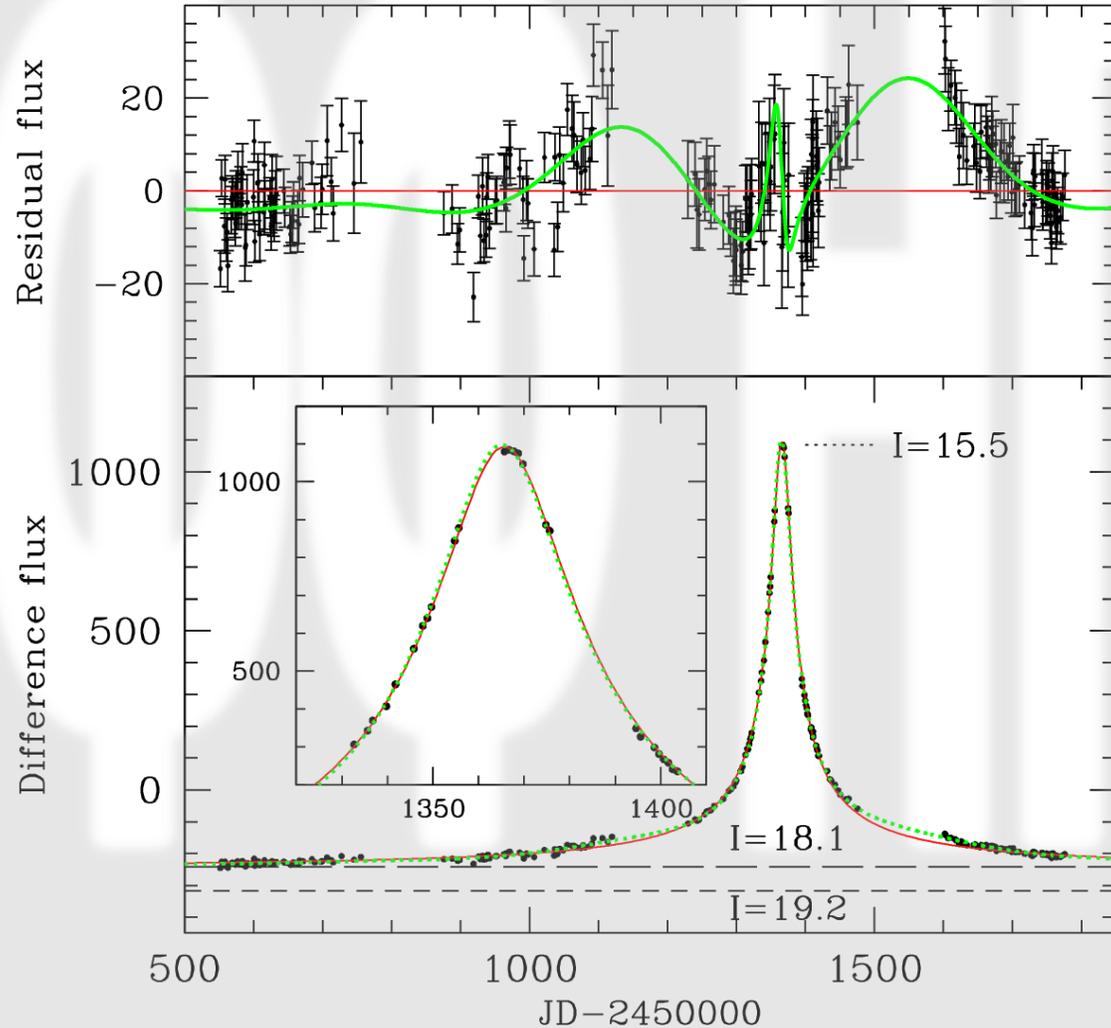


Черные дыры: микролинзирование

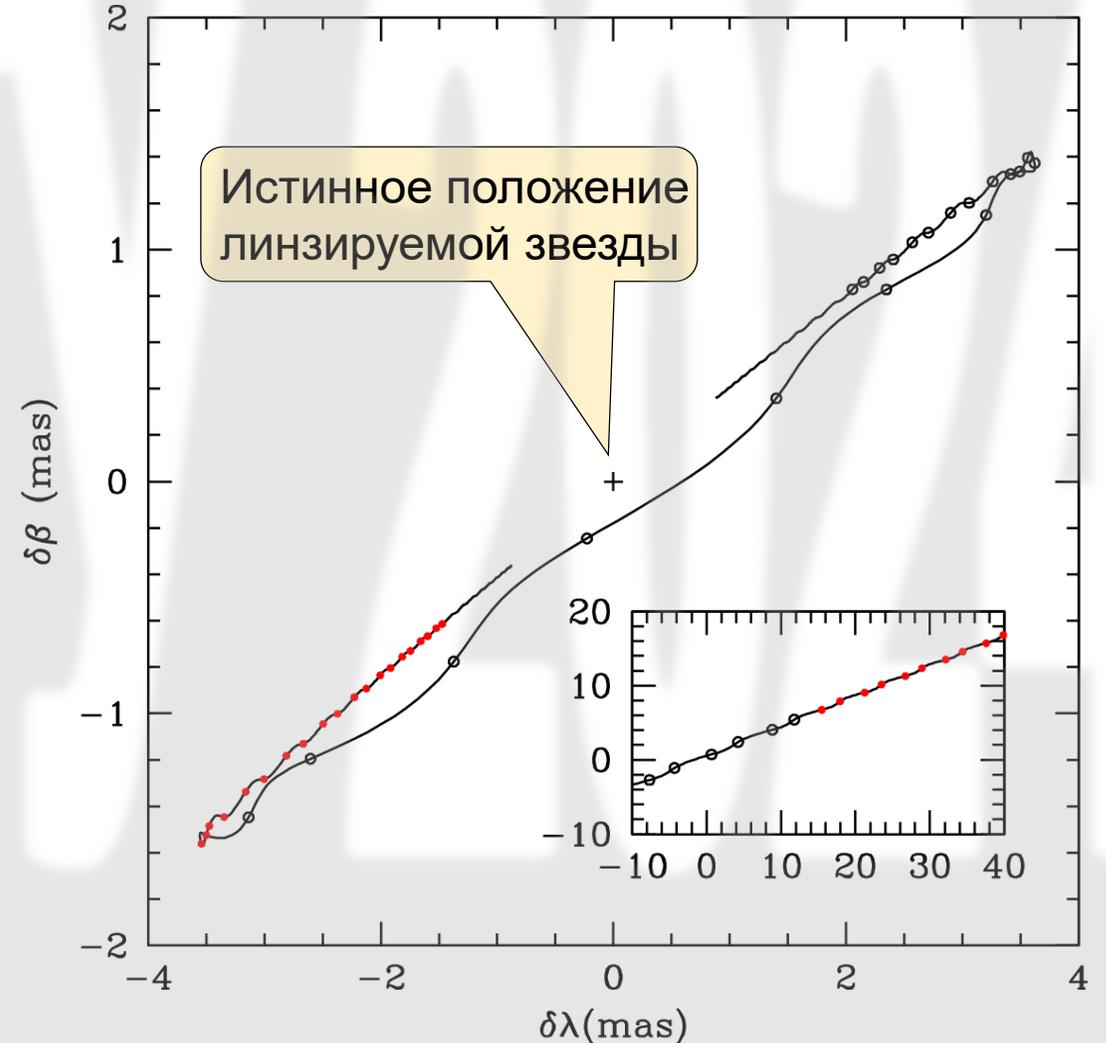
Совместное событие MACHO-BLG-22/OGLE-1999-BUL-32

Продолжительность: 641 дней.

Оценка массы линзы $M_{\text{BH}} > 4M_{\odot}$

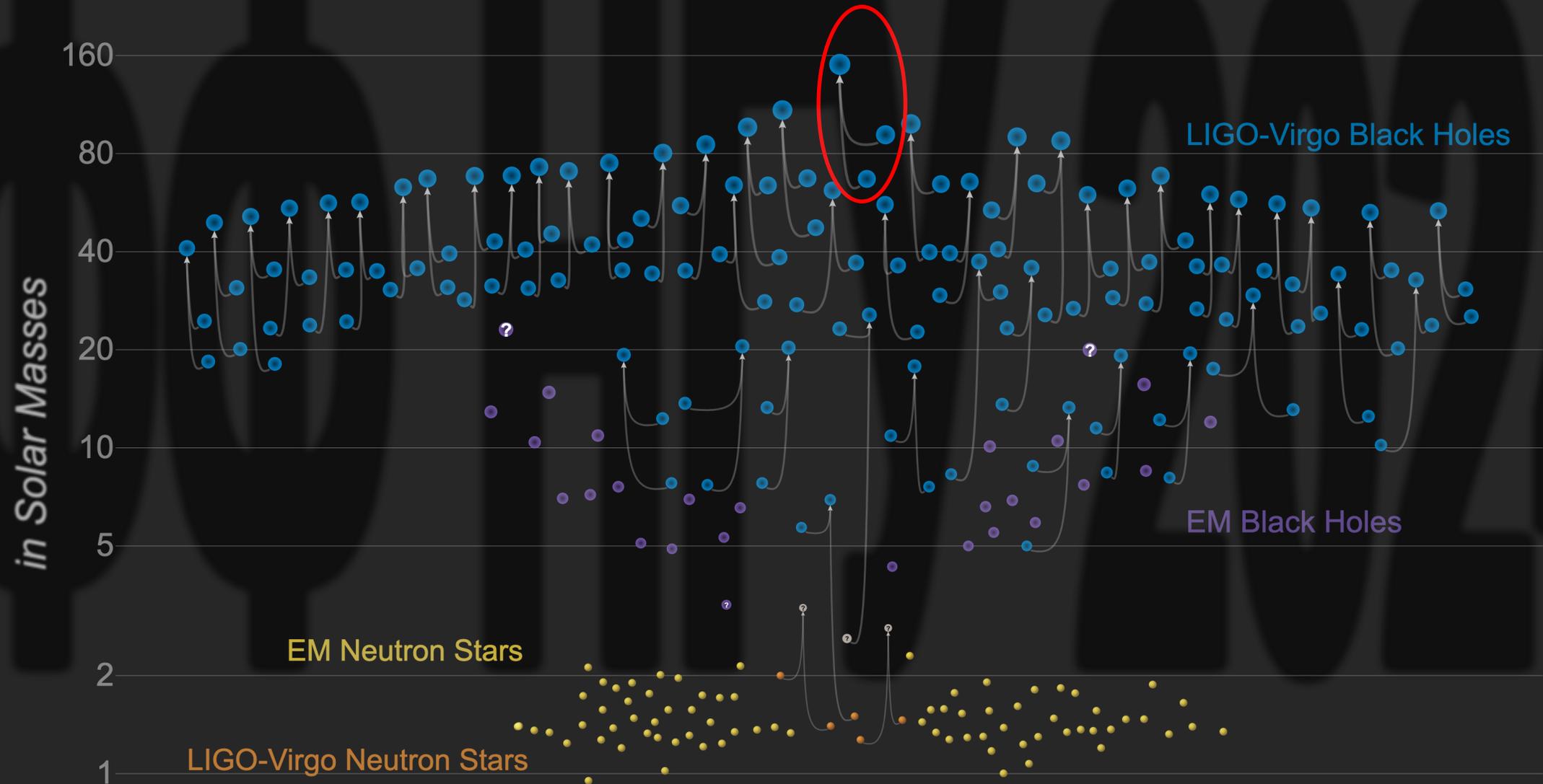


Смещение координат объекта из-за влияния движущейся гравитационной линзы. Между каждыми точками 6 месяцев.



Черные дыры: гравитационные волны

Masses in the Stellar Graveyard



Черные дыры: гравитационные волны

2009.01190, 2009.01075

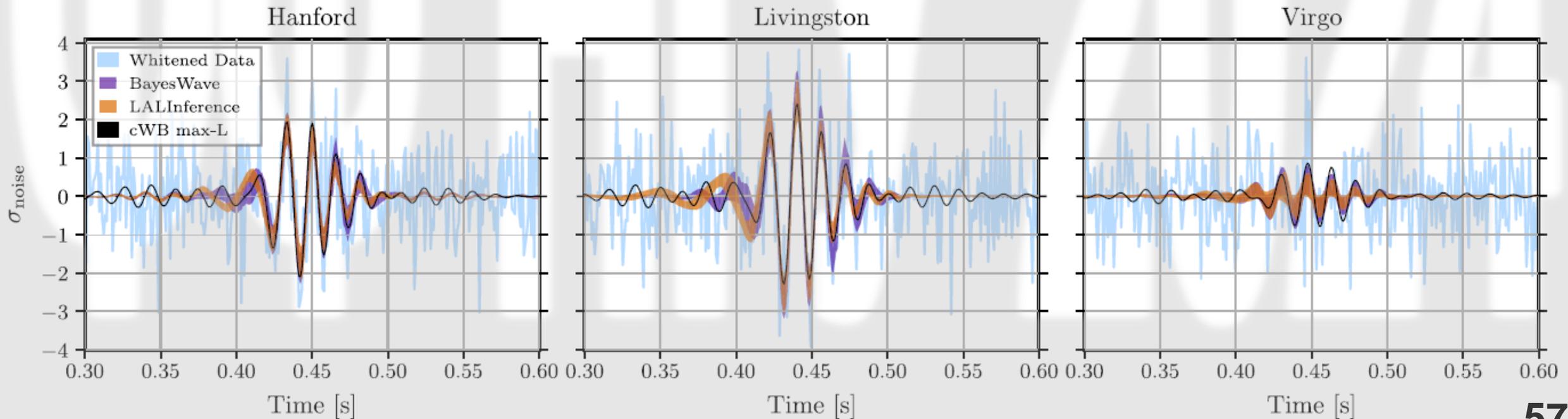
Самые массивные (из слившихся):

Масса основной ЧД: $85_{-14}^{+21} M_{\odot}$

Масса второй ЧД: $66_{-18}^{+17} M_{\odot}$

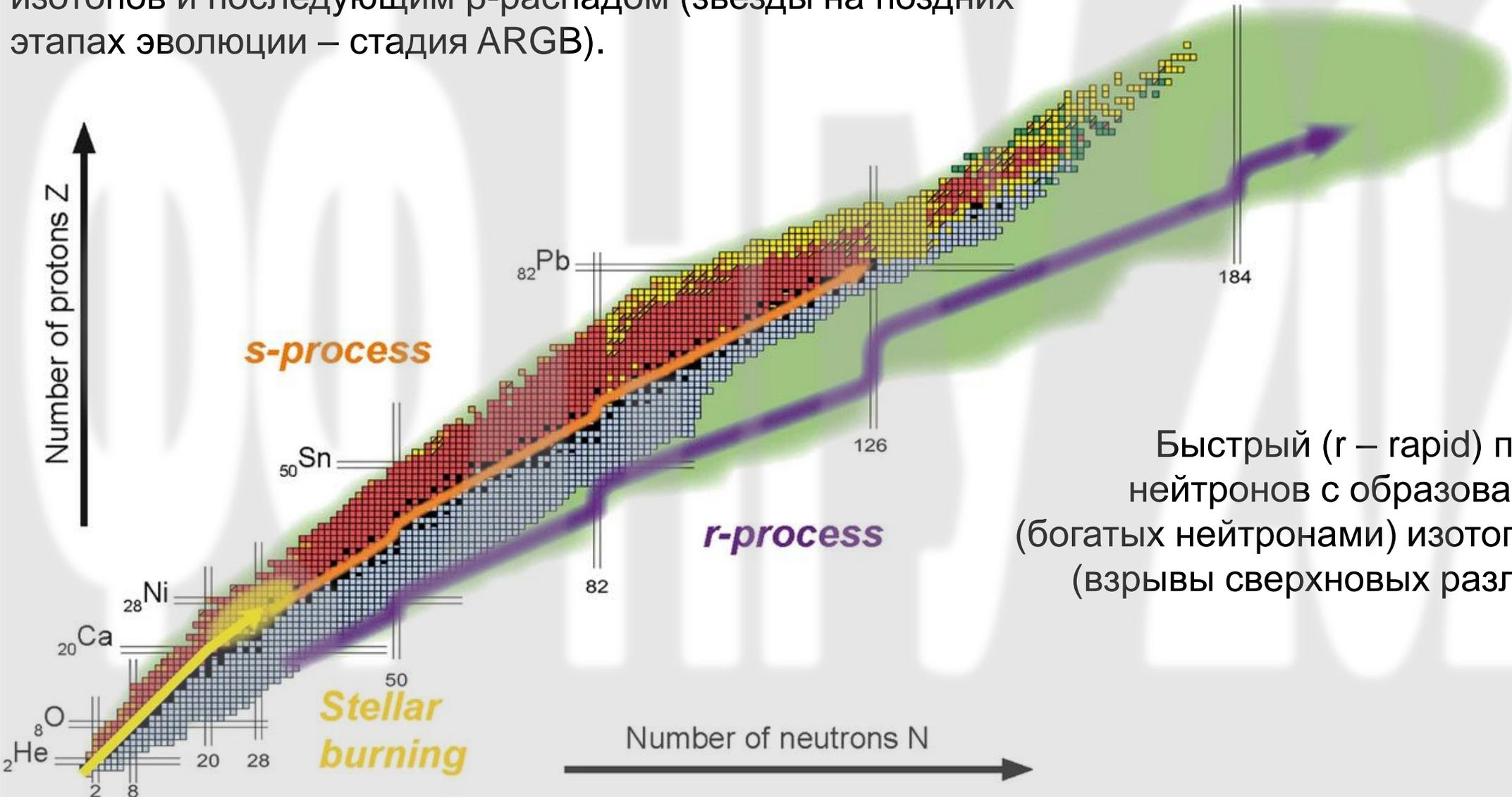
Расстояние: $5.3_{-2.6}^{+2.4}$ Гпк

Масса результирующей ЧД: $150_{-17}^{+29} M_{\odot}$ попадает в диапазон промежуточных масс!



Синтез тяжелых элементов

Медленный (s – slow) захват нейтронов с образованием тяжелых изотопов и последующим β -распадом (звезды на поздних этапах эволюции – стадия ARGB).



Быстрый (r – rapid) процесс захват нейтронов с образованием тяжелых (богатых нейтронами) изотопов элементов (взрывы сверхновых различных типов).

Синтез элементов

В катастрофических процессах финальной стадии «жизни» тяжелых звезд образуется вещество для нового этапа эволюции Вселенной – образование планетных систем (следующая лекция) и жизни.

