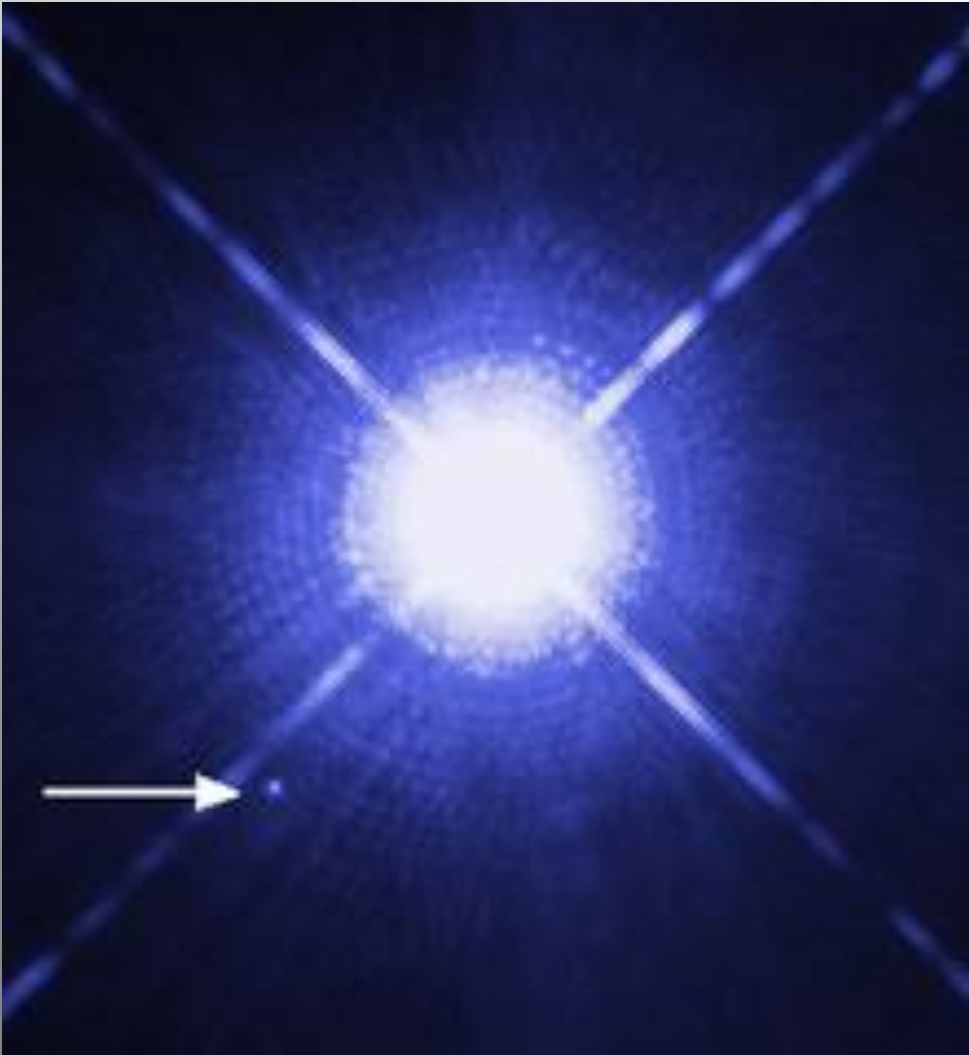


БЕЛЫЕ КАРЛИКИ,
СВЕРХНОВЫЕ,
НЕЙТРОННЫЕ
ЗВЕЗДЫ И
ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

СЕРГЕЙ ПОПОВ
(ГАИШ МГУ)

НЕОБЫЧНЫЕ КОМПАКТНЫЕ ЗВЕЗДЫ



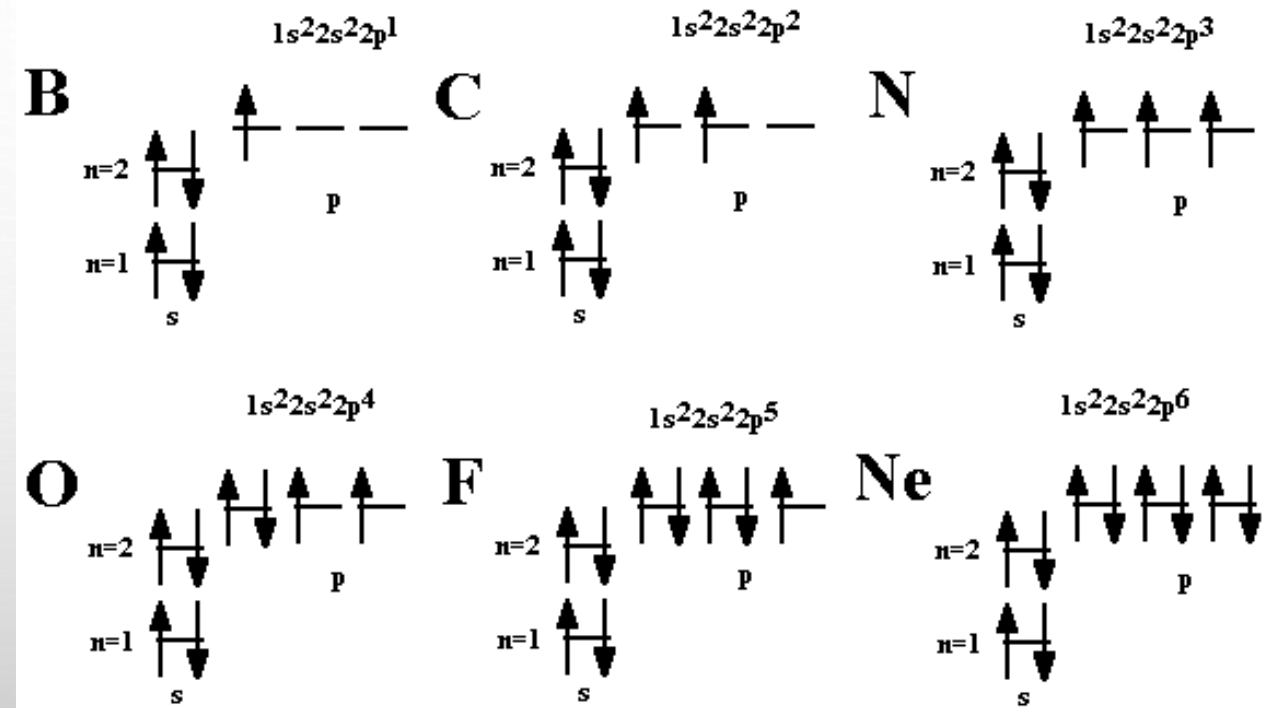
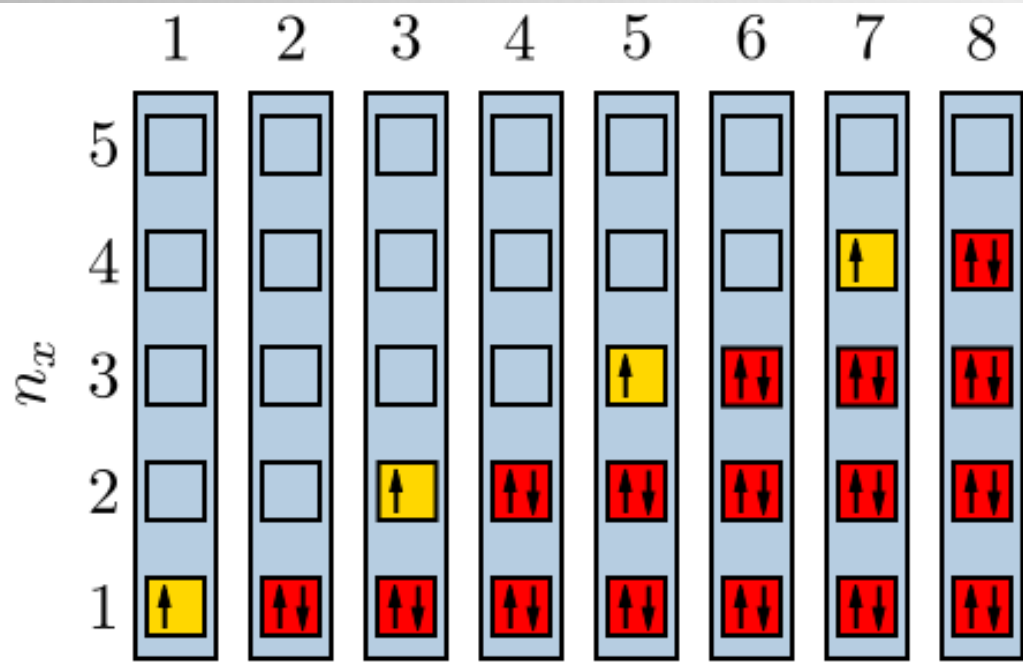
Измерения температур, масс и радиусов для источников в двойных системах позволило надежно доказать существование массивных компактных объектов с относительно высокой температурой.

При массе порядка солнечной они имеют массу порядка земной.

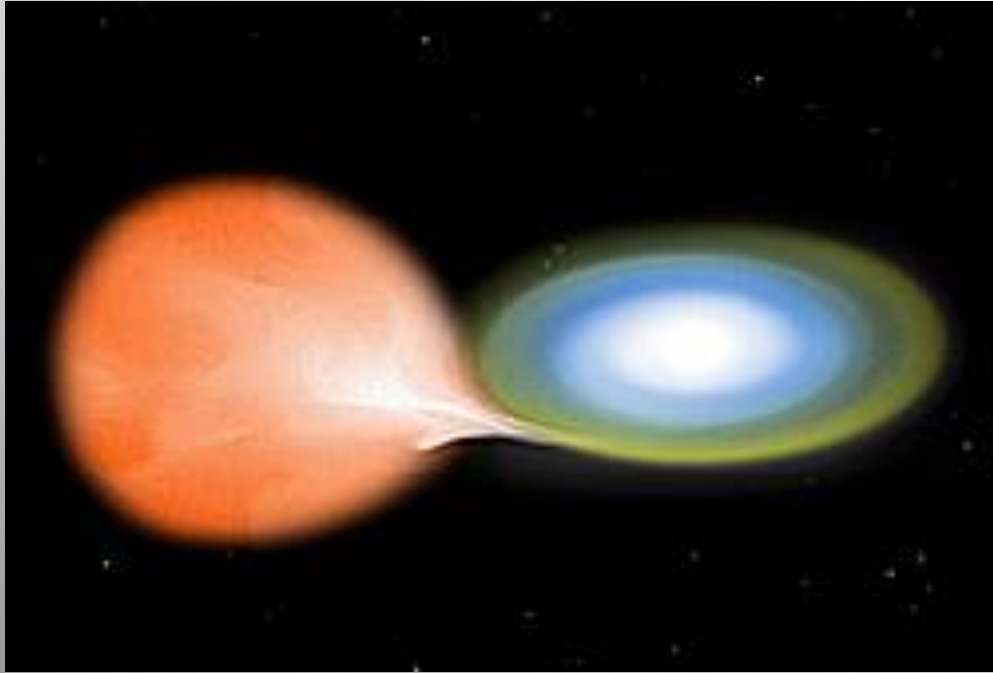
Для объяснения природы этих объектов понадобилась квантовая механика.

ЗАПРЕТ ПАУЛИ

Два фермиона не могут иметь одинаковые волновые функции (не могут находиться в одном квантовом состоянии).

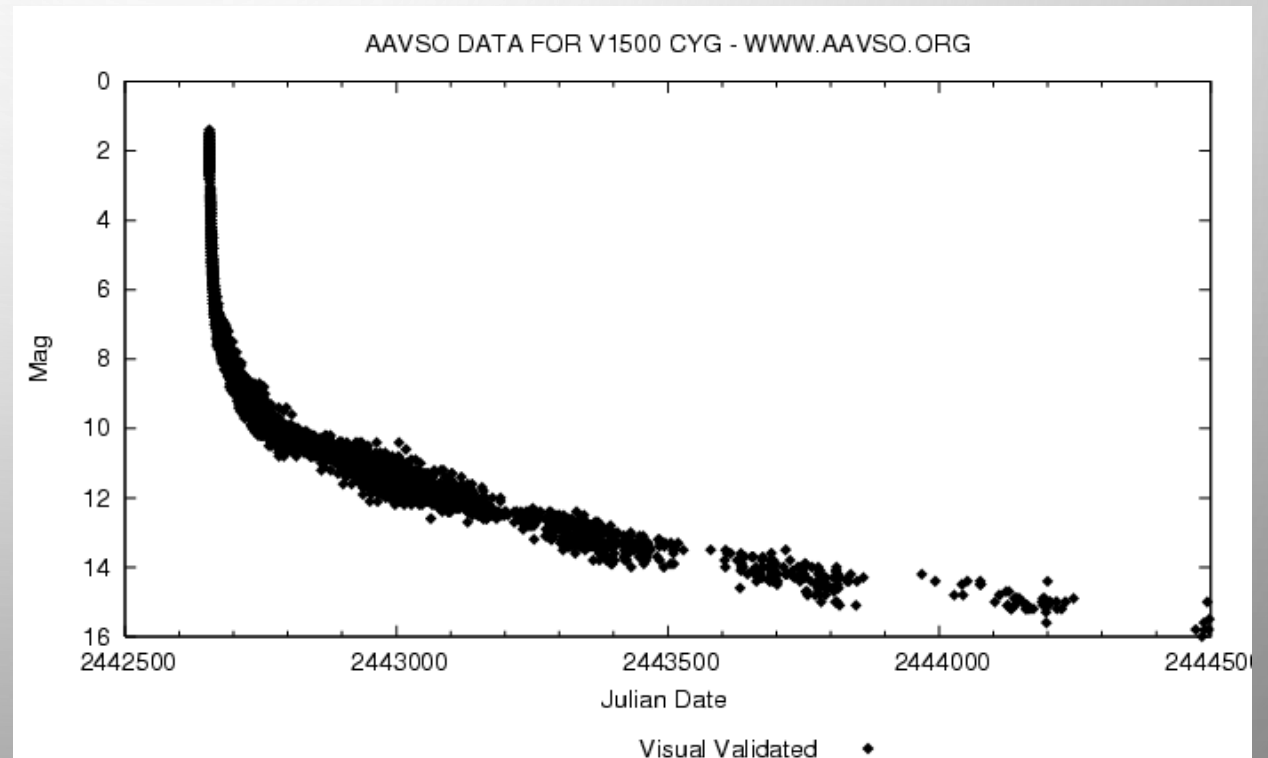


НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

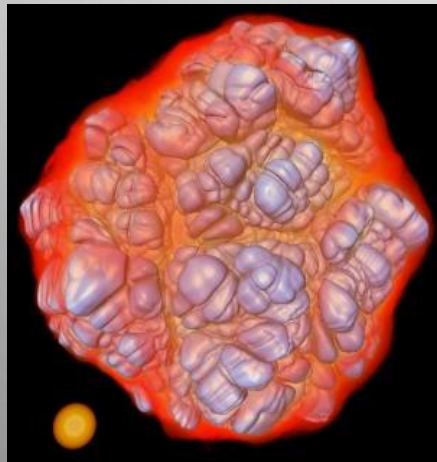
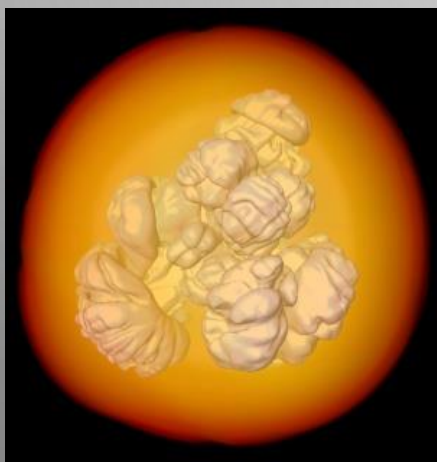
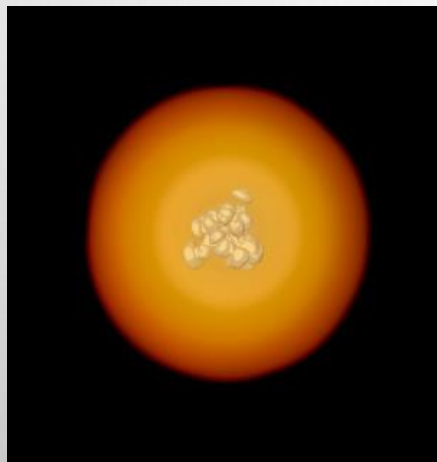
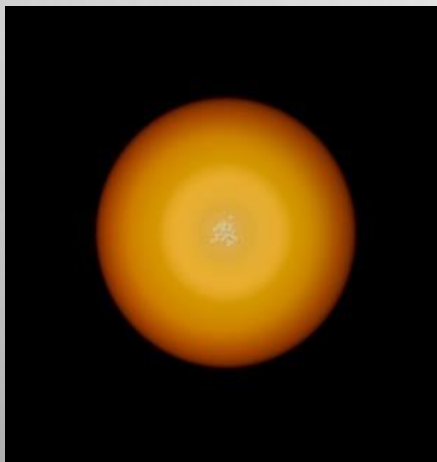


Перетекающее вещество накапливается на поверхности белого карлика, пока не происходит взрыв.

Термоядерное взрывное горение водорода



ВЗРЫВ SN IA



Достигнув критической массы,
белые карлики взрываются.

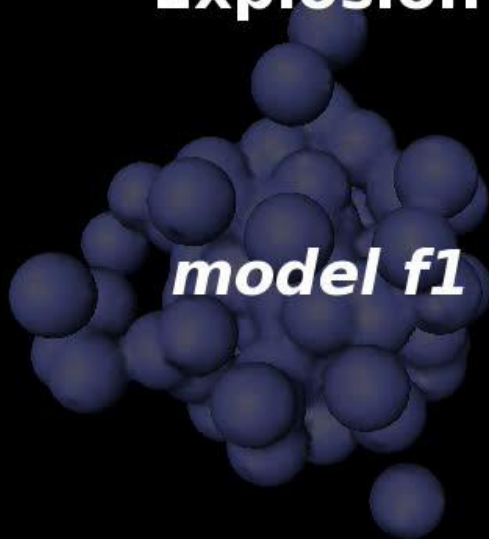
Это термоядерный взрыв,
полностью разрушающий объект.

Наблюдения именно таких сверхновых
привели к открытию темной энергии.

Они также очень важны для
синтеза многих тяжелых элементов.

ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ ТИПА IA

Thermonuclear Supernova Explosion

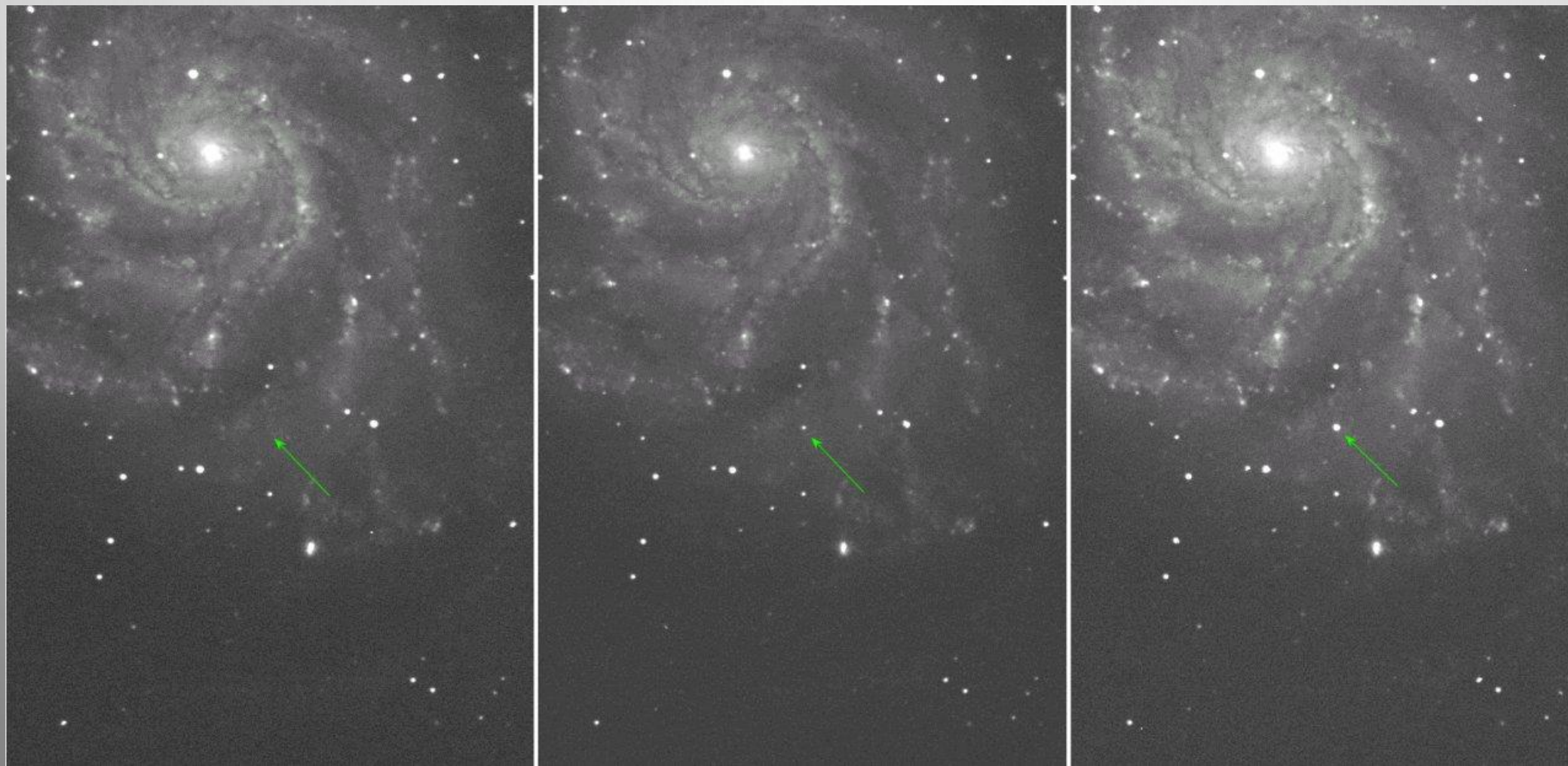


(c) Friedrich Röpke, MPA, 2004

Взрыв происходит, если в белом карлике начинается неустойчивое термоядерное горение углерода.

Масса белого карлика может достичь предела или в результате аккреции, или в результате слияния двух карликов.

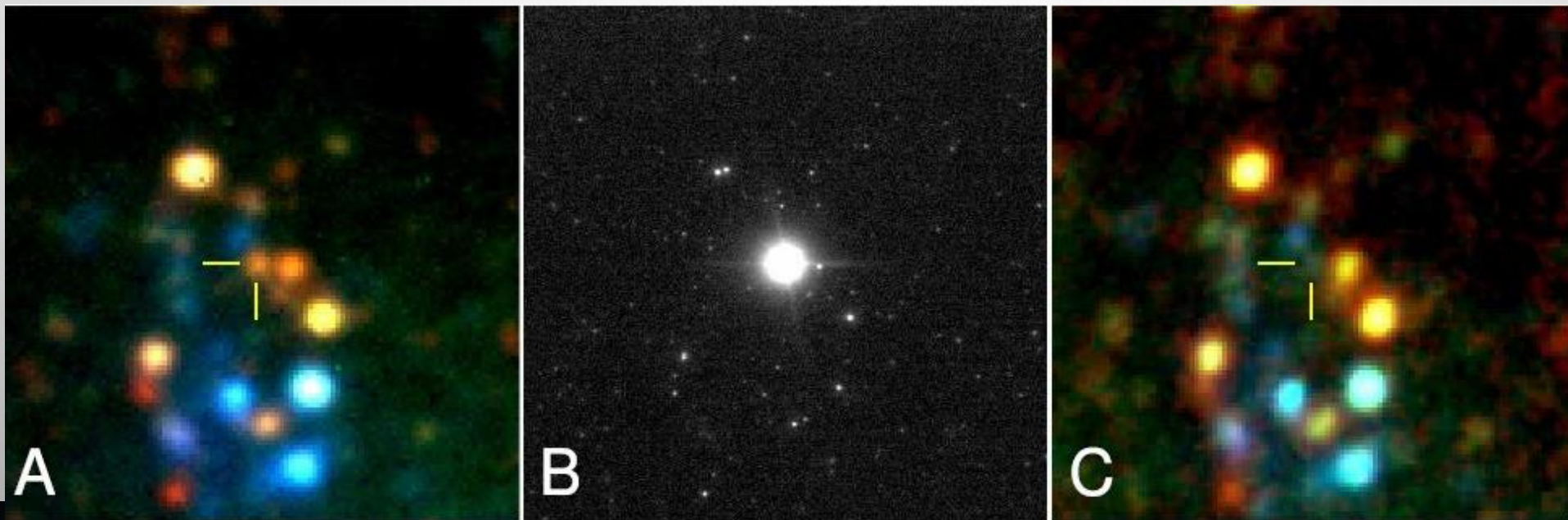
СВЕРХНОВАЯ Ia В БЛИЗКОЙ ГАЛАКТИКЕ



1110.6201

Галактика M101. 6.4 Мпк. Самая близкая сверхновая Ia за последние 25 лет.

СВЕРХНОВЫЕ



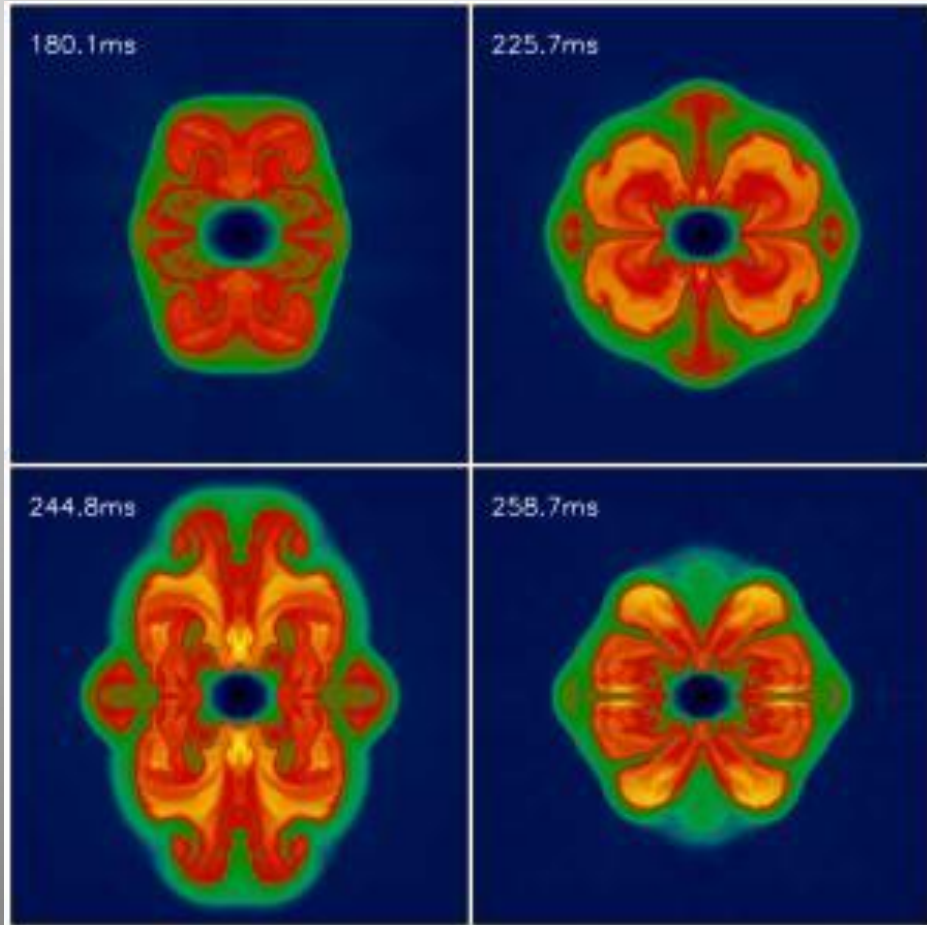
Жизнь массивной звезды заканчивается колоссальным взрывом – сверхновой. Также взрываться могут белые карлики, если они стали слишком тяжелыми.

На короткое время звезда становится ярче целой галактики!

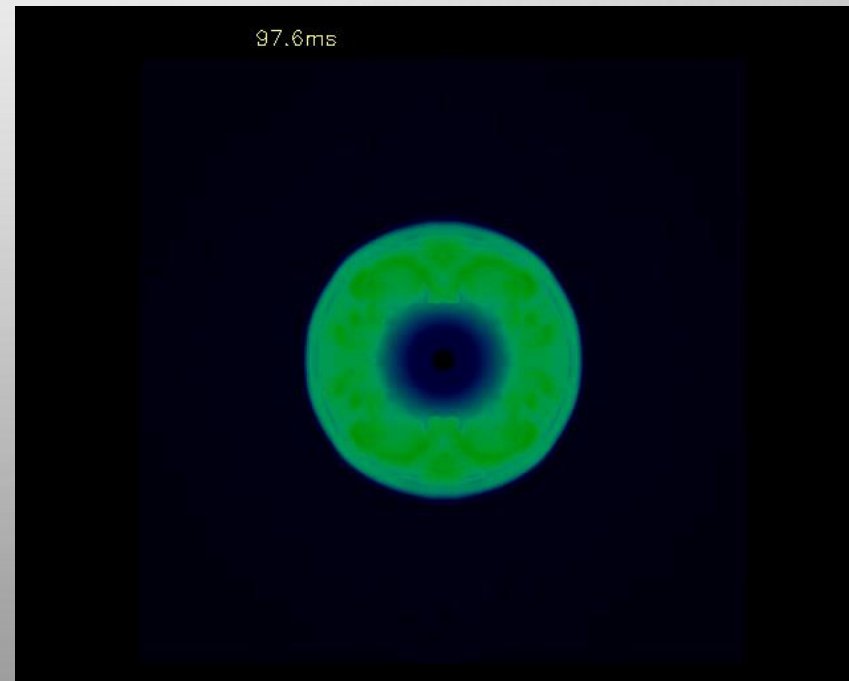
ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ

Расчеты взрывов сверхновых можно смело отнести к числу самых сложных задач

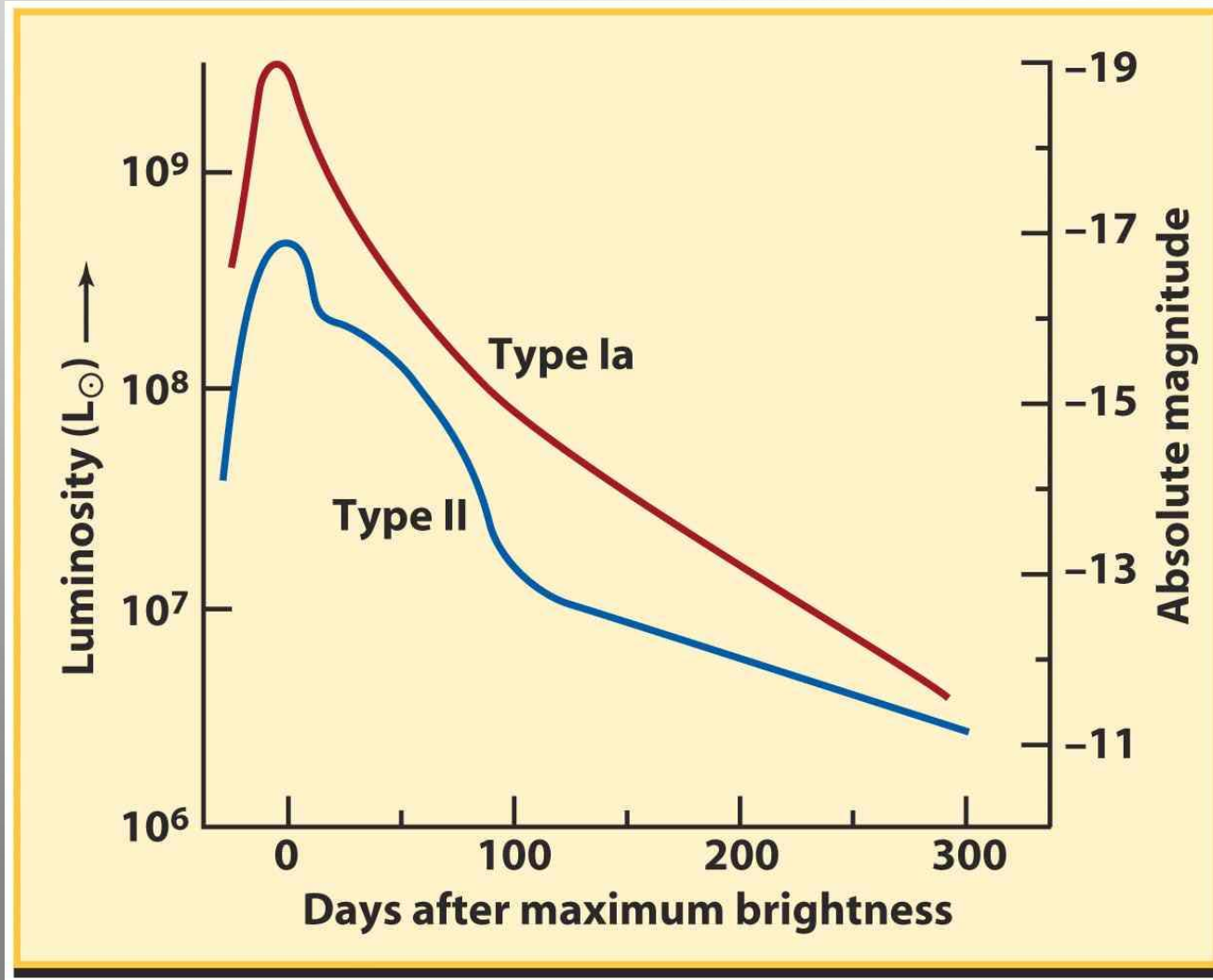
- термоядерные реакции
- магнитные поля
- гидродинамика
- нейтрино
- эффекты теории относит.



(Buras, Janka et al.)

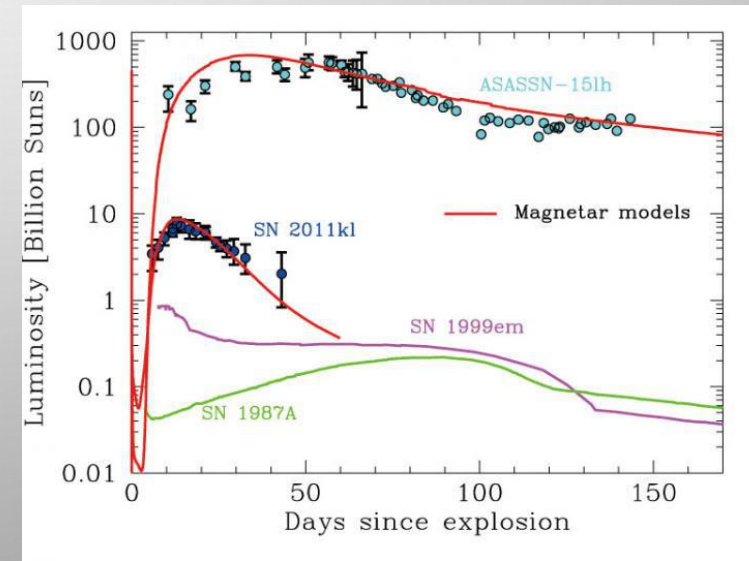


КРИВАЯ БЛЕСКА СВЕРХНОВОЙ



В течение сотен дней после коллапса сверхновая видна в основном за счет распада радиоактивных элементов.

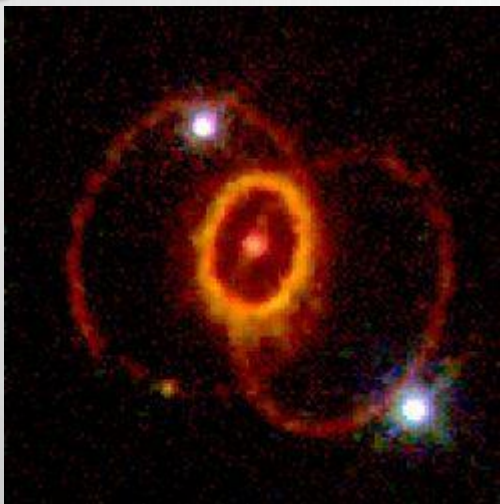
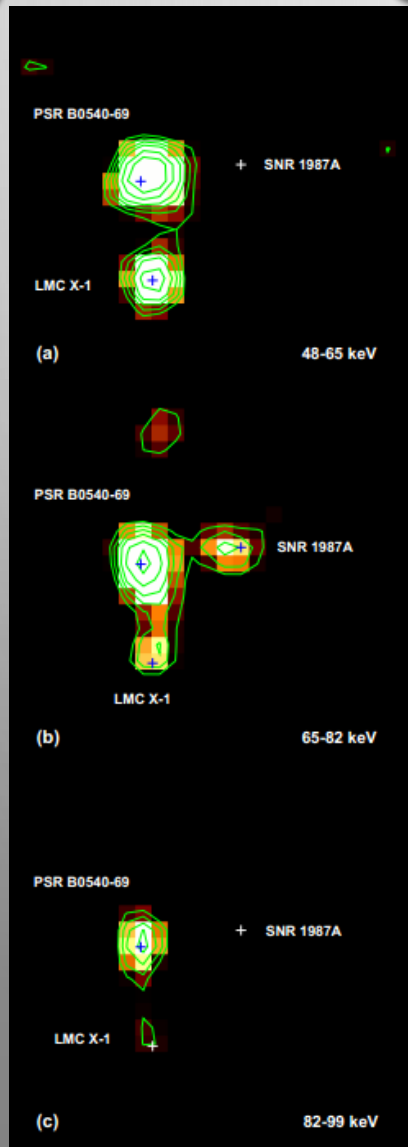
На ранних стадиях также могут быть дополнительные источники энергии.



Bersten et al.

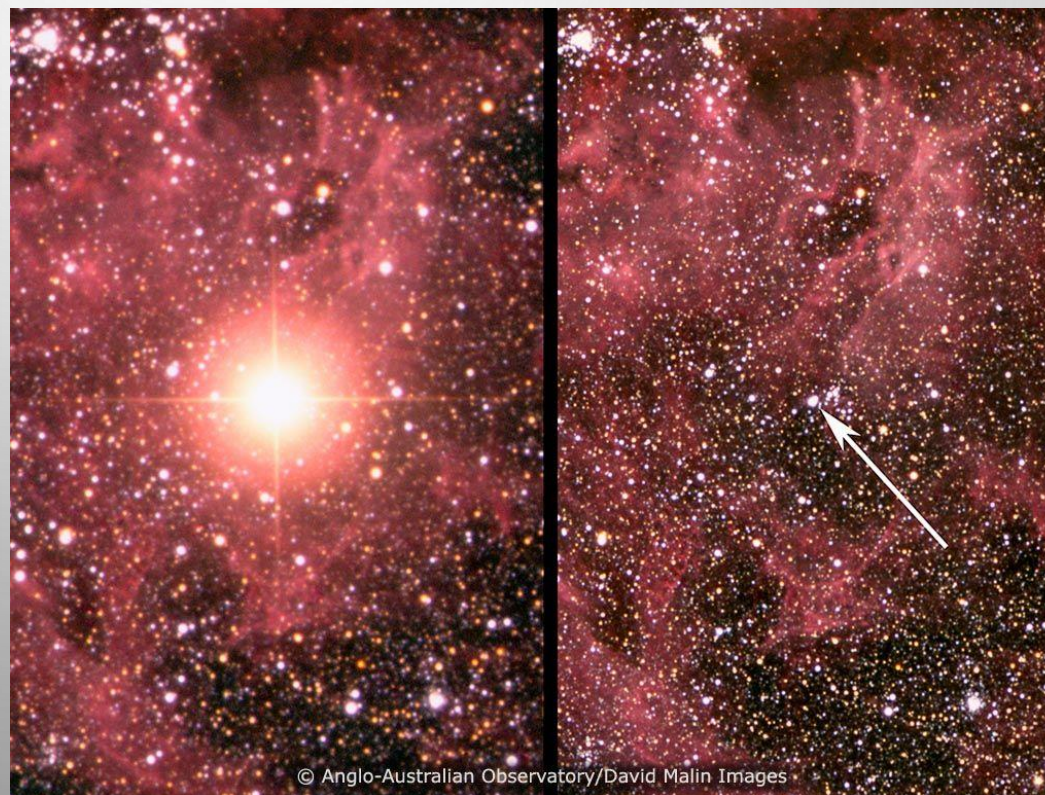
ТИТАН В СВЕРХНОВОЙ 1987А

Наблюдения на спутнике INTEGRAL позволили обнаружить излучение от распада титана-44 в остатке сверхновой 1987А.

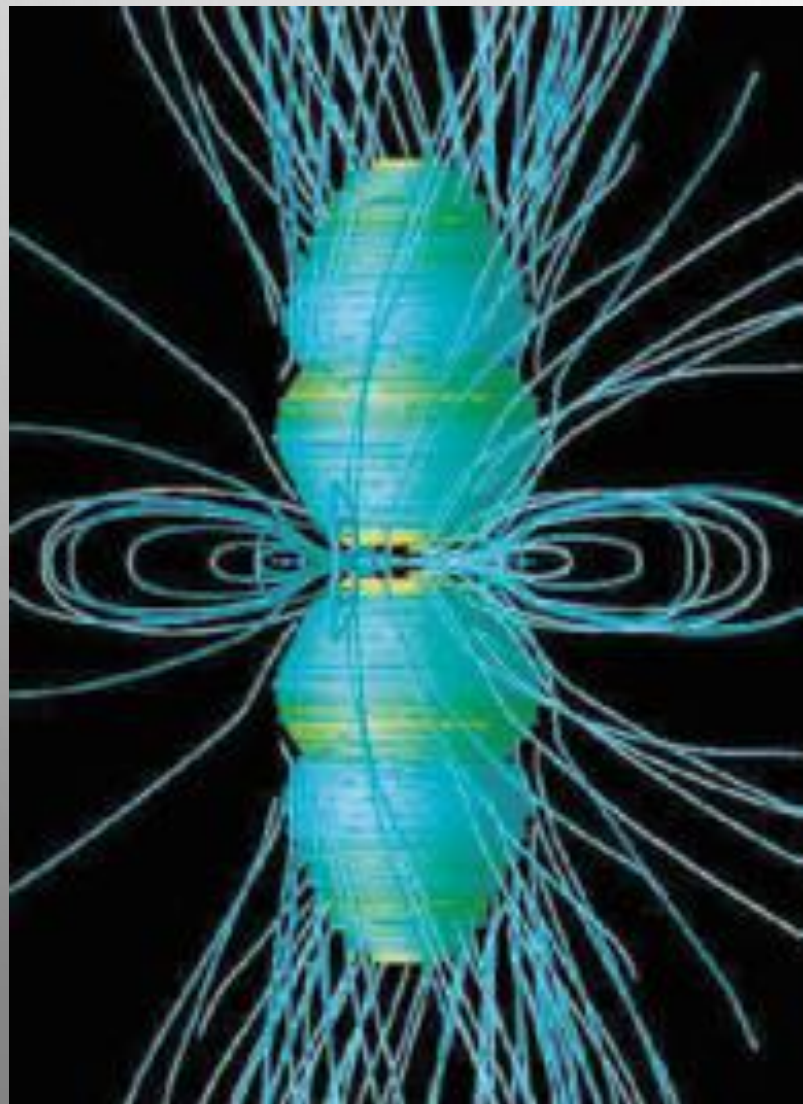


Именно распад титана-44 отвечает за свечение остатка на определенном этапе эволюции.

1211.2656



ПРОГРЕСС В ИЗУЧЕНИИ СВЕРХНОВЫХ



Теория

- Более мощные компьютеры позволят считать в деталях
- Учет многих эффектов сразу



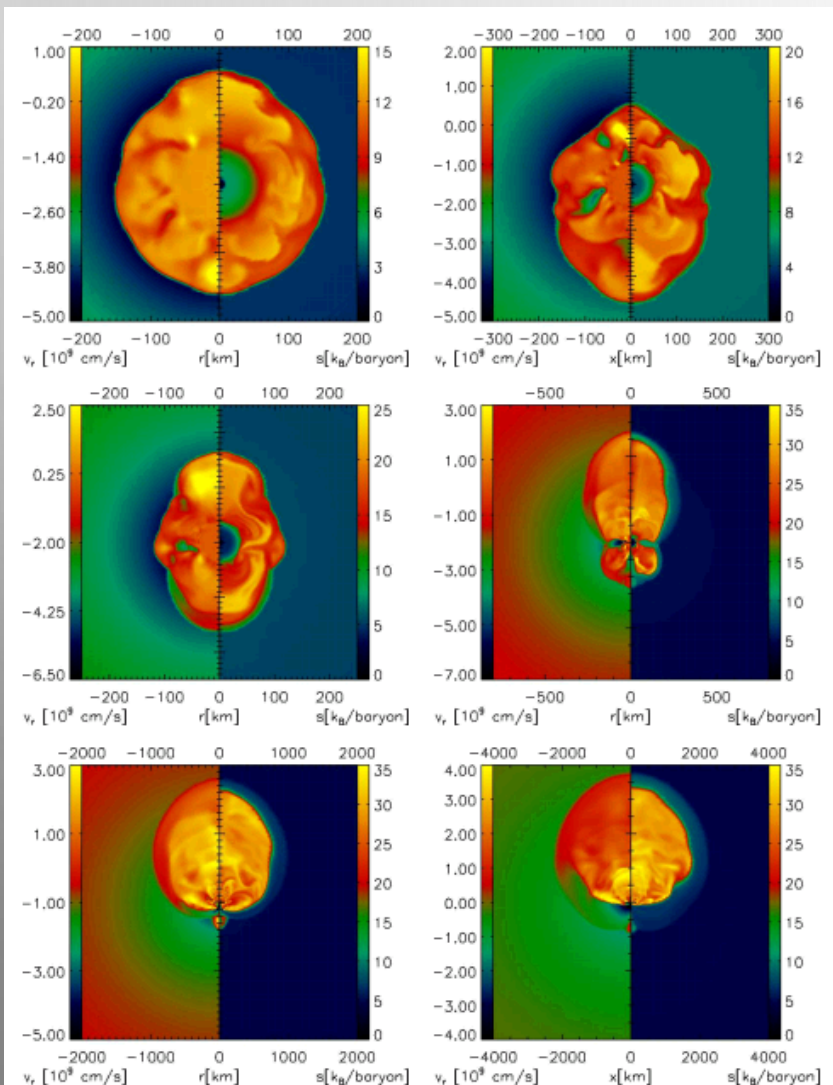
Наблюдения

- Наблюдения нейтрино
- Наблюдения очень ранних стадий вспышки сразу в нескольких диапазонах спектра

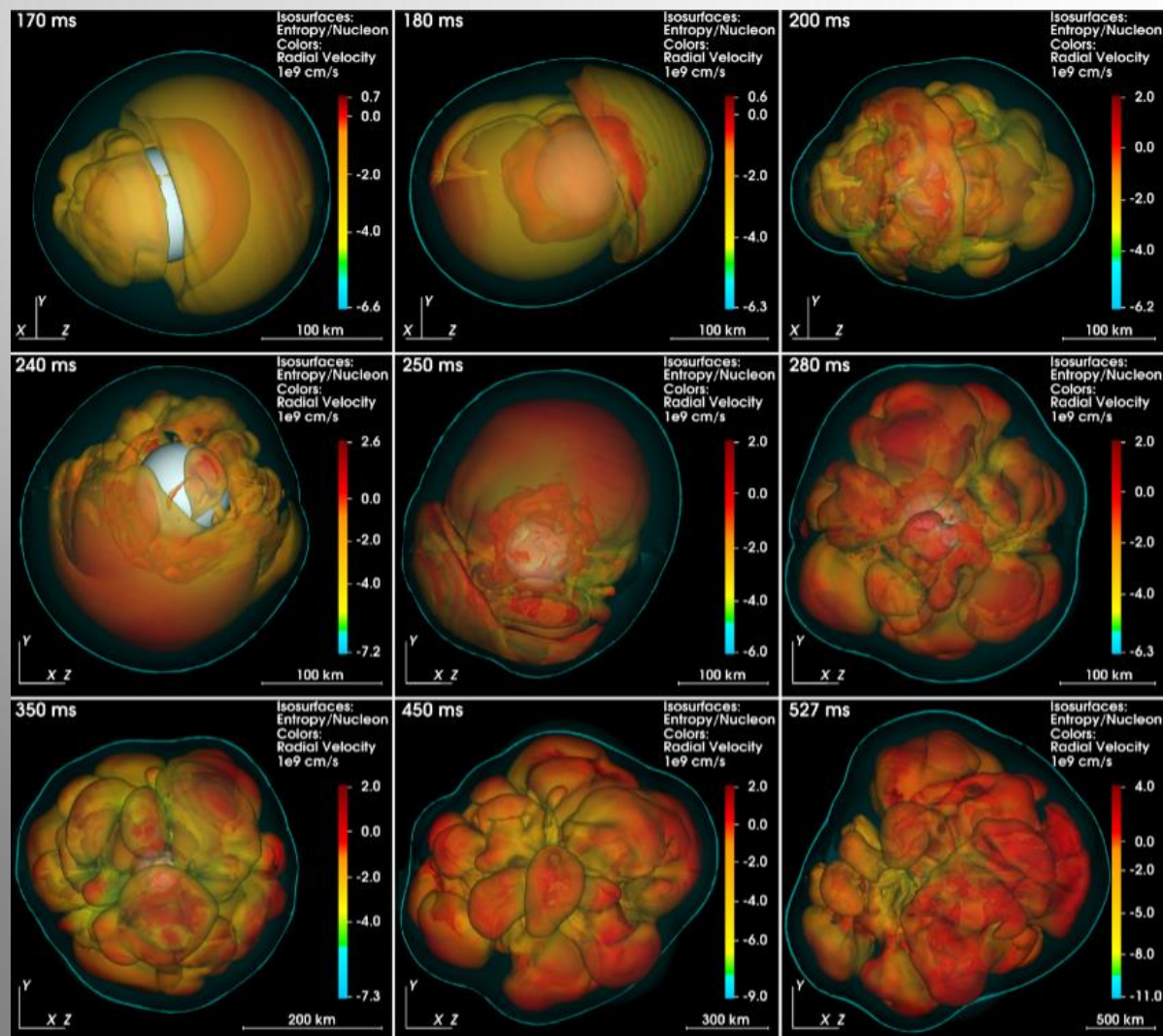
НАКОНЕЦ-ТО СВЕРХНОВАЯ ВЗОРВАЛАСЬ В КОМПЬЮТЕРЕ!

Учет эффектов ОТО позволил
получить взрыв сверхновой
в рамках новых двумерных расчетов.

Но в трехмерных расчетах
не все так хорошо.



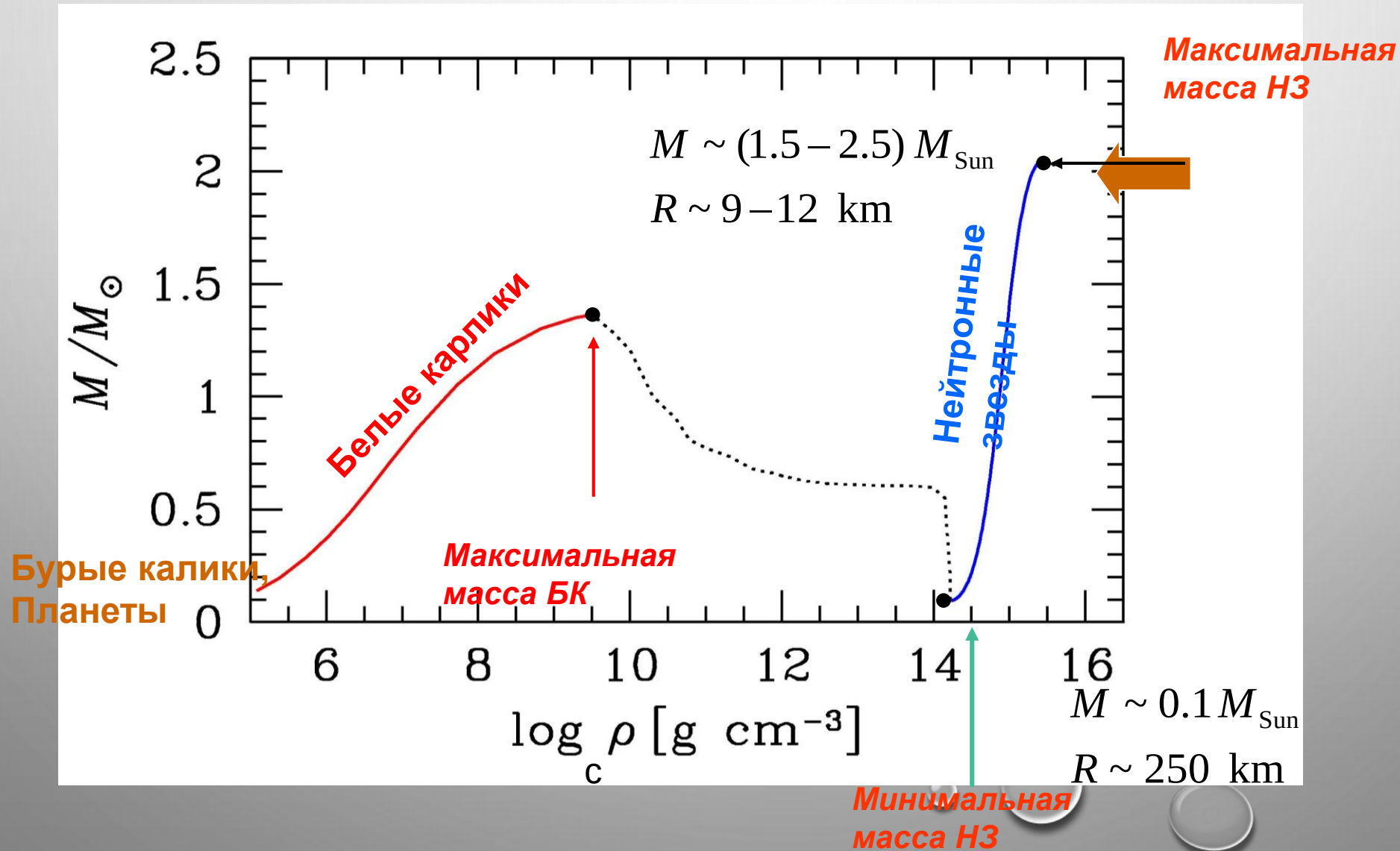
СТРАННЫЕ КВАРКИ И СВЕРХНОВЫЕ



Авторы добавили в расчеты процессы с участием странных кварков.

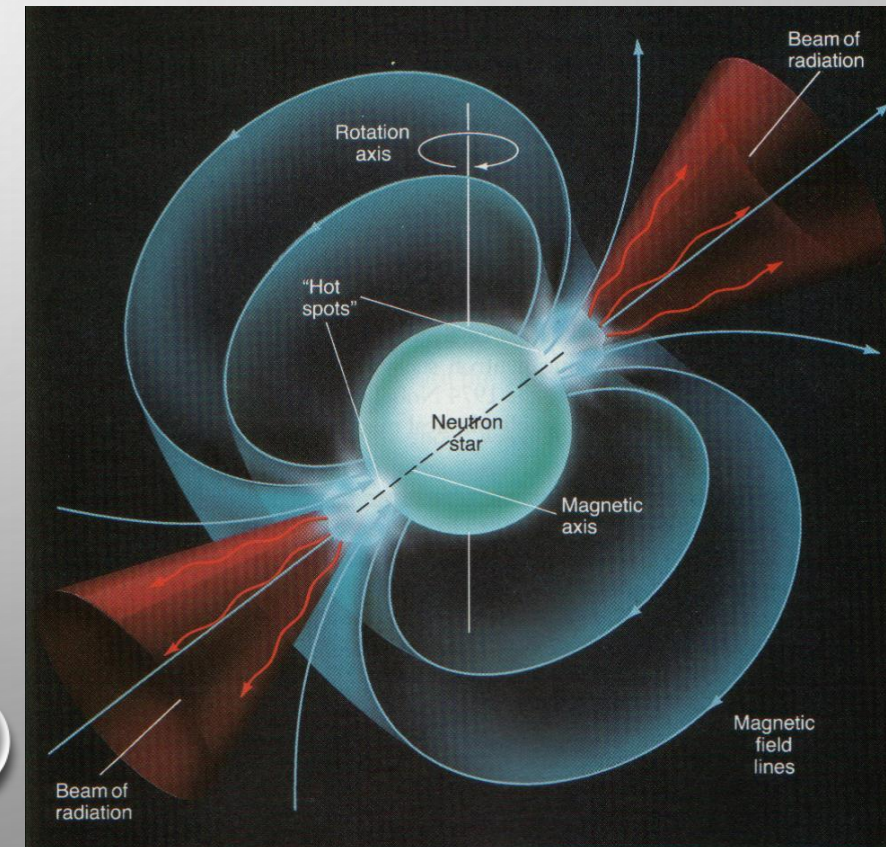
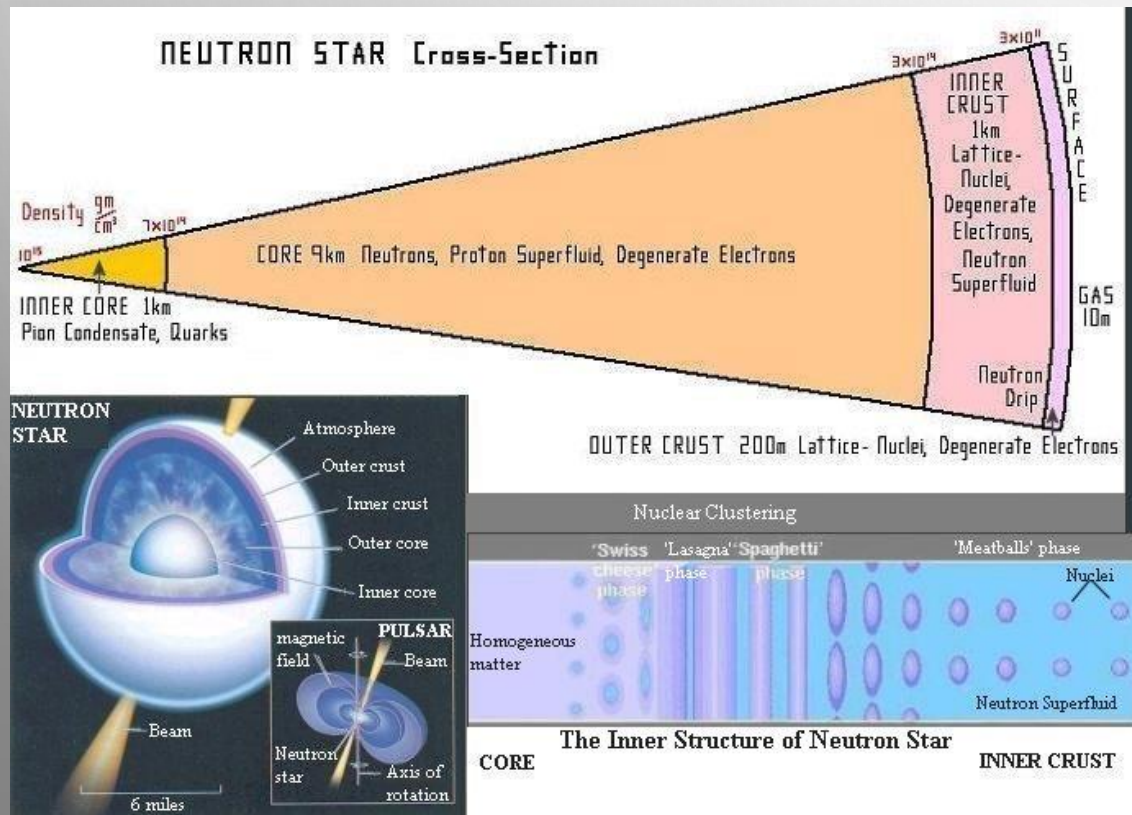
Это помогло взорвать звезду с массой 20 солнечных в трехмерном (!) расчете.

МАССЫ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД И БЕЛЫХ КАРЛИКОВ



НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ – ЭКСТРЕМАЛЬНЫЕ ИСТОЧНИКИ

- Сверхсильные магнитные поля (больше швингеровского)
- Сильная гравитация (радиус порядка 3-4 шварцшильдовских)
- Сверхплотное вещество (в центре плотность выше ядерной)



ПРЕДСКАЗАНИЕ ...

Нейтронные звезды были предсказаны в 30-е гг.

Л.Д. Ландау: Звезда-ядро

Бааде и Цвикки: нейтронные звезды и сверхновые



Ландау



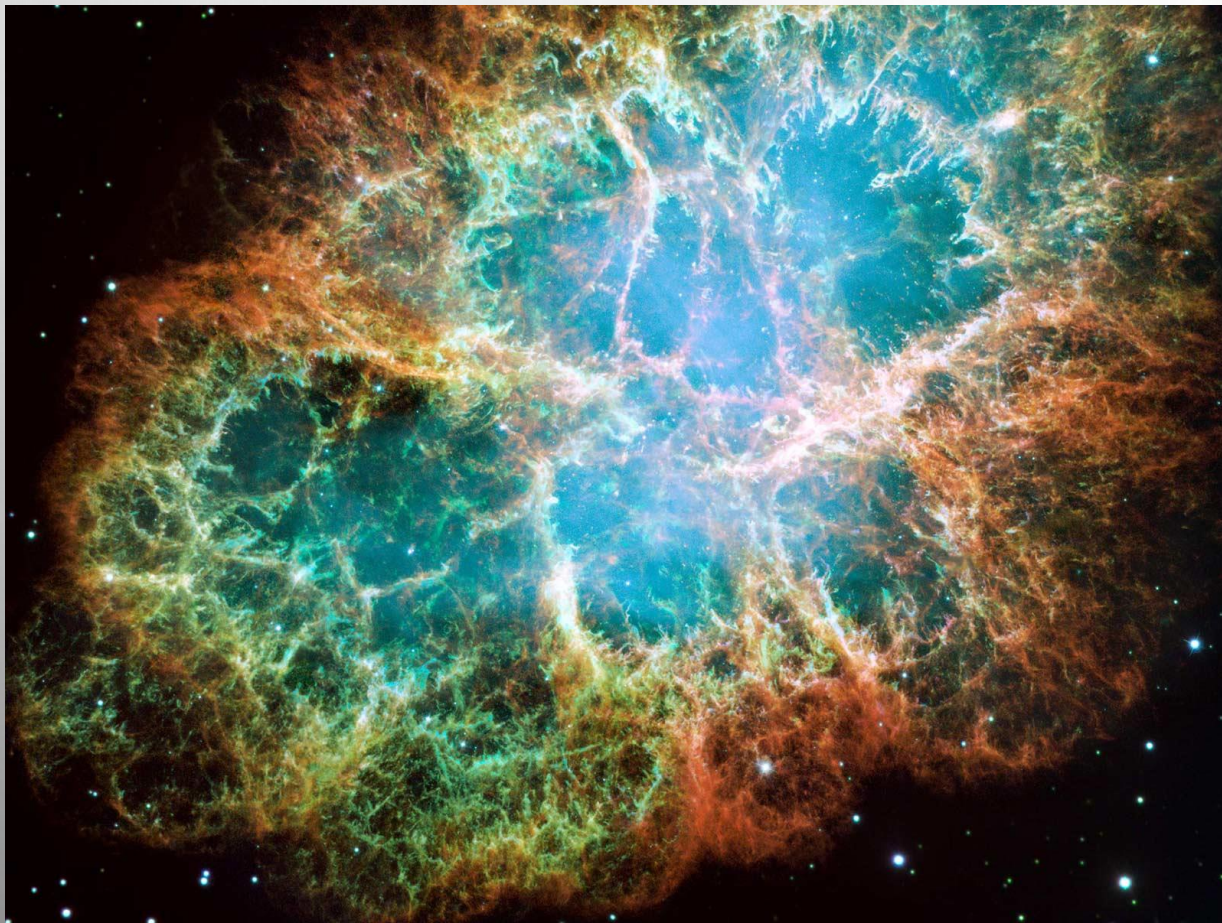
Бааде



Цвикки

История предсказания
хорошо описана в статье
Яковлев и др. 2013
<http://ufn.ru/ru/articles/2013/3/f/>

РОЖДЕНИЕ



Крабовидная туманность – плерион.
Внутри находится один из самых
известных радиопульсаров.

Нейтронные звезды рождаются
в результате взрыва ядра
массивной звезды в конце ее
эволюции.

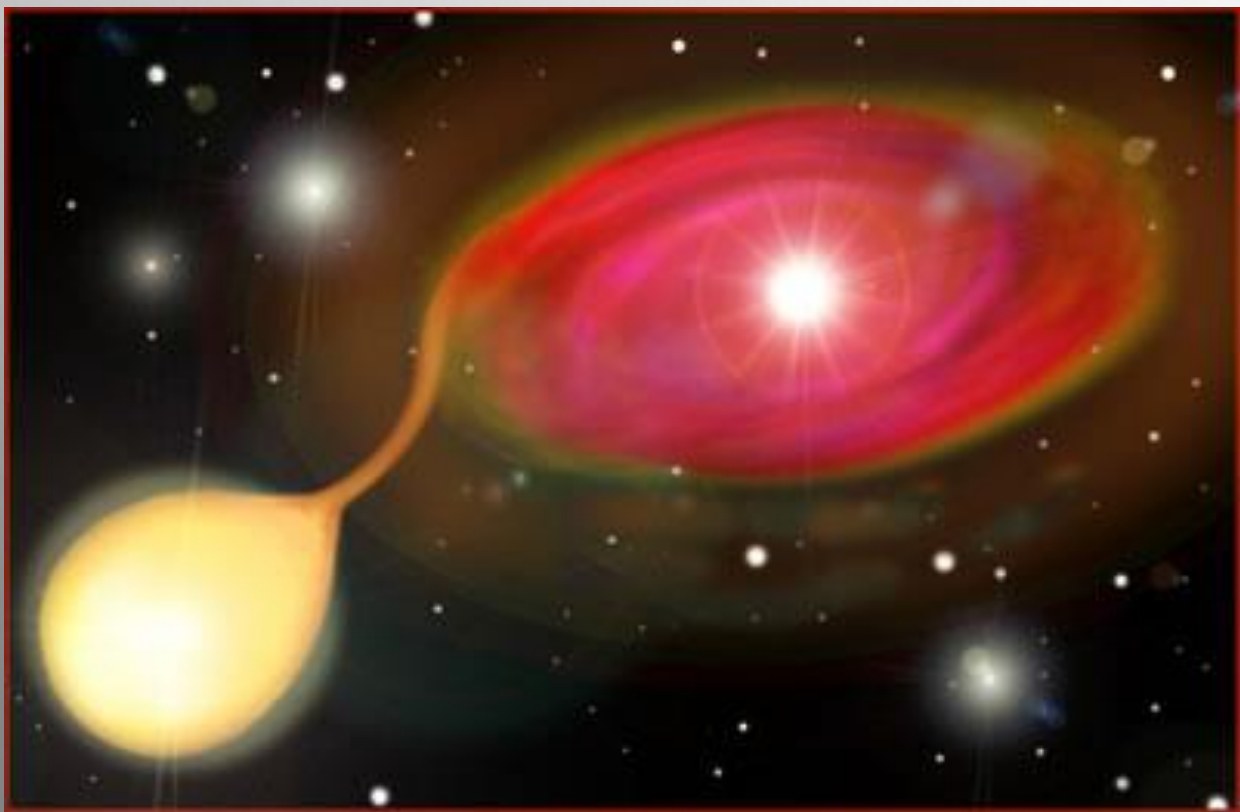
Это называют сверхновой.

На месте взрыва остается
компактный объект – например,
нейтронная звезда и т.н.
остаток взрыва сверхновой –
расширяющаяся туманность.
Внутри туманности может
существовать плерион.
Эта часть туманности видна
из-за накачки энергии
нейтронной звездой

СТАРЫЙ ЗООПАРК НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

В 60-е гг. были открыты первые рентгеновские источники.

Это были НЗ в тесных двойных системах, НО ...
.... их «не узнали»....

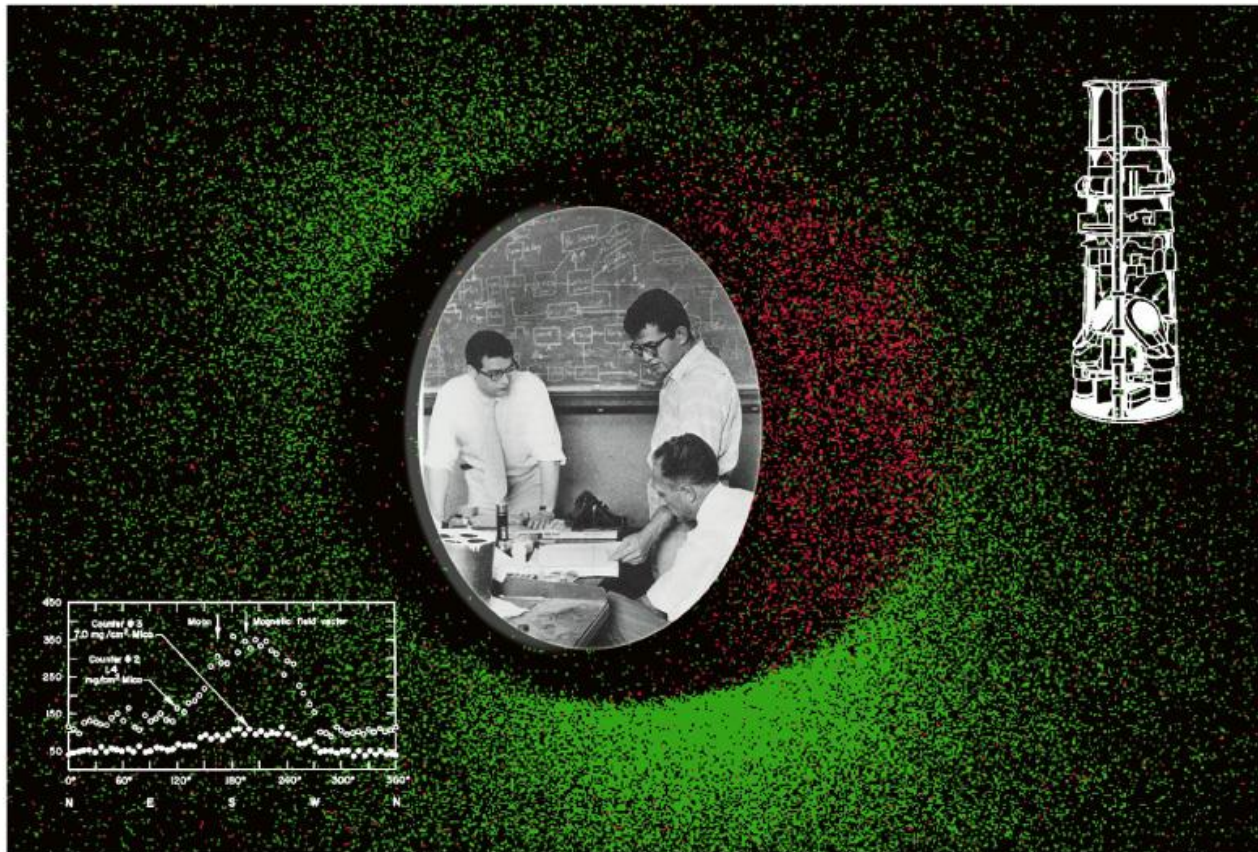


Сейчас известны сотни
рентгеновских двойных
с нейтронными звездами
в нашей и других галактиках.

РАКЕТНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ SCO X-1

ROSAT Januar 2003

Max-Planck-Institut für
extraterrestrische Physik



Giacconi, Gursky et al.
1962 год

В 2002 г. Р.Джиаккони
получил Нобелевскую
премию по физике.

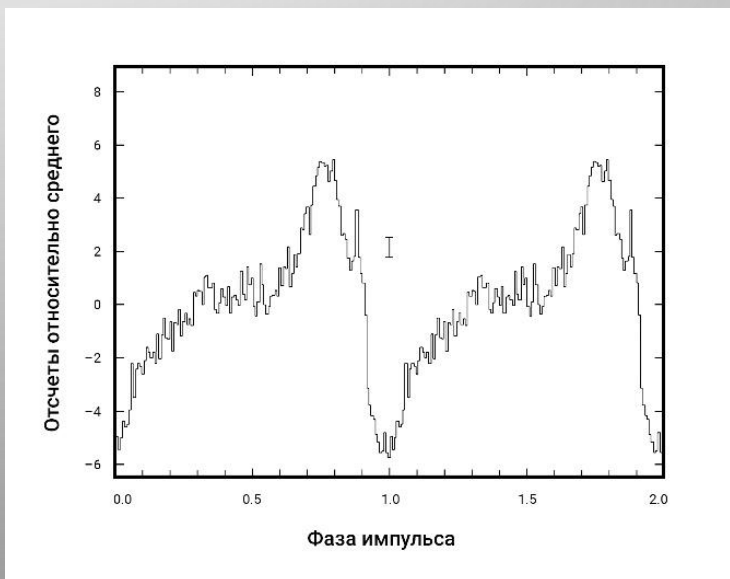
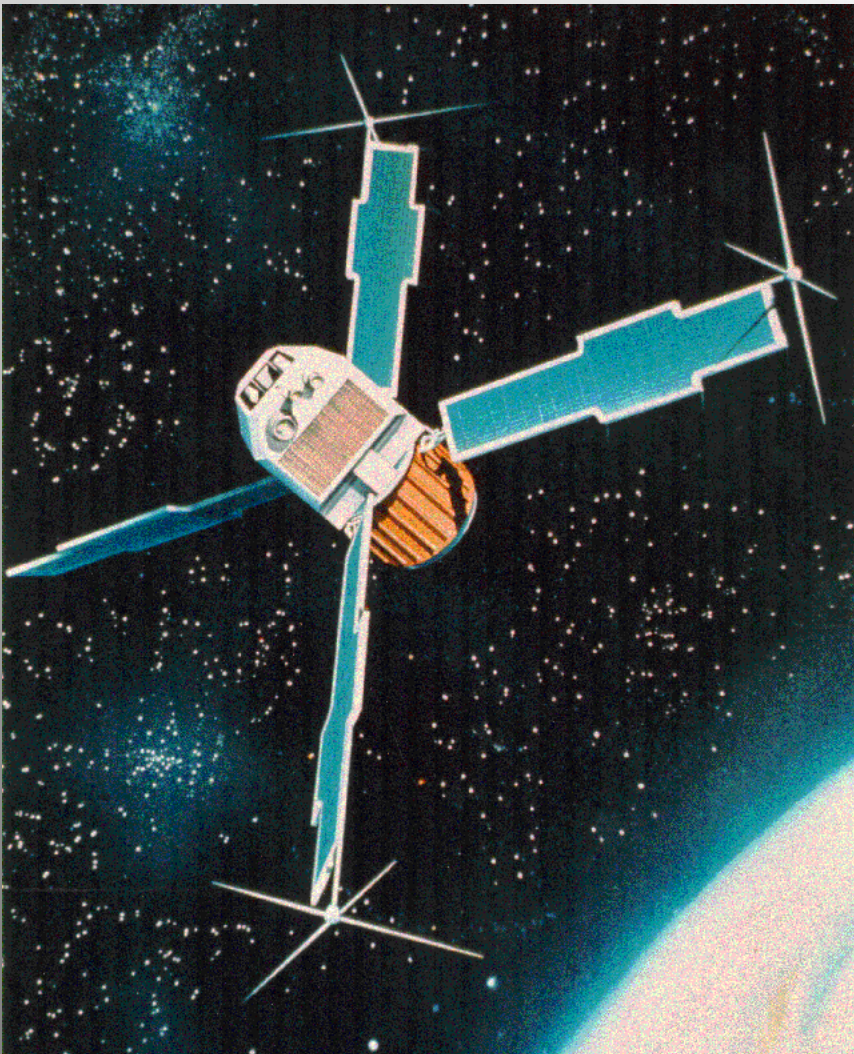
UHURU

Спутник запущен 12 декабря 1970 г.
Закончил работу в марте 1973 г.

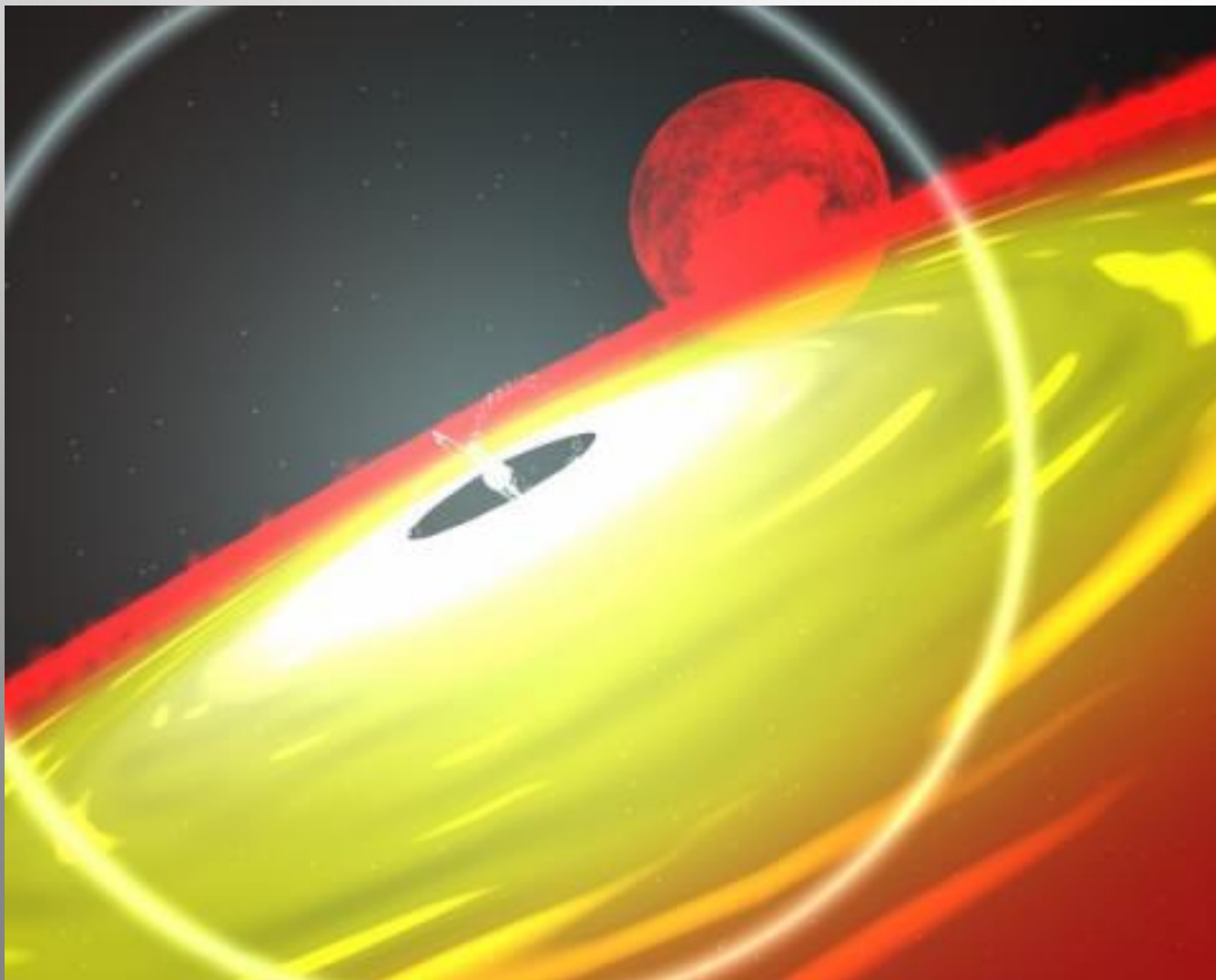
Другое название SAS-1

2-20 кэВ

Первый полный обзор неба.
339 источника.



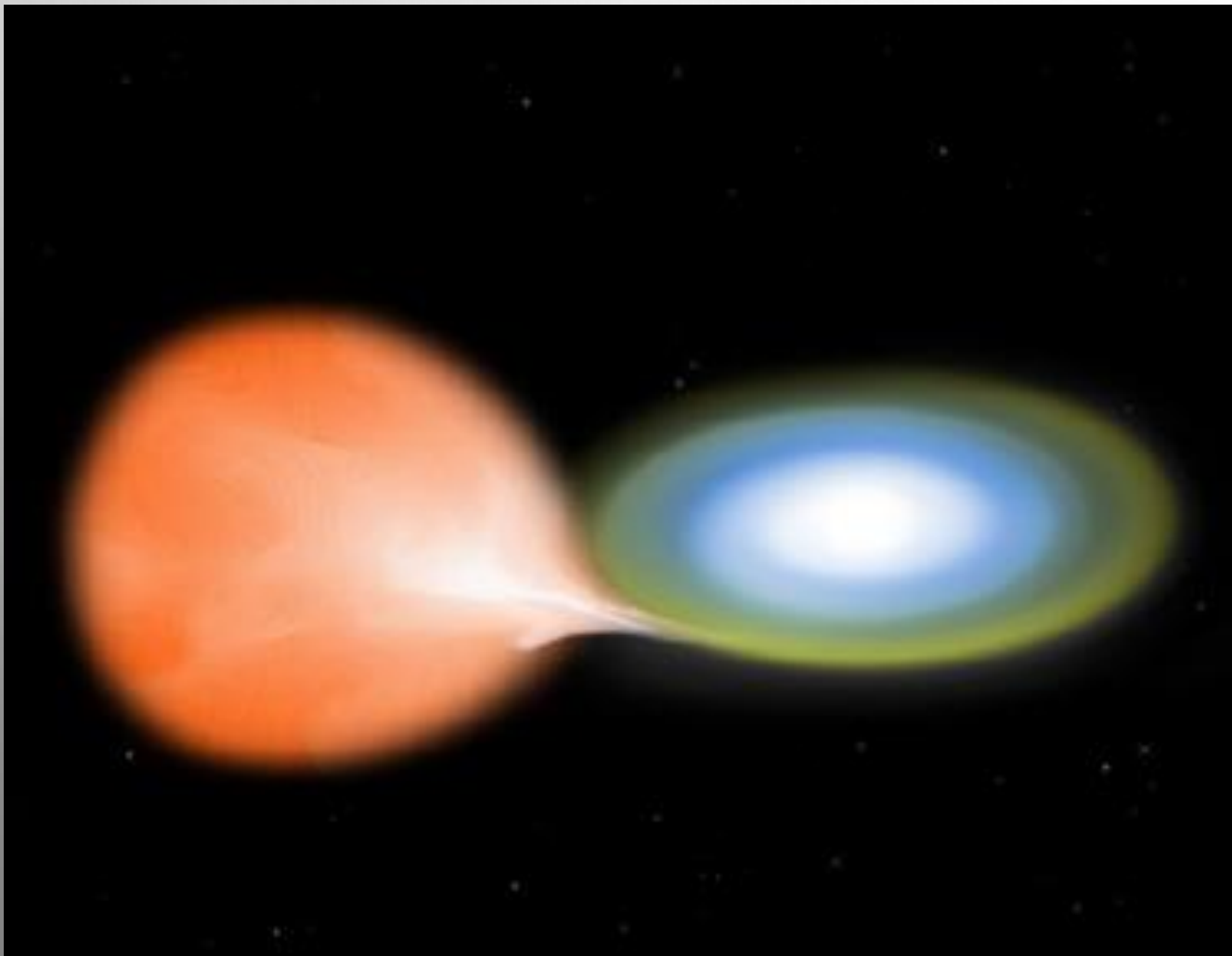
АККРЕЦИЯ В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ



Аккреция – самый мощный источник энергии в мире из тех, что могут давать большой выход энергии.

При падении вещества на нейтронную звезду выделяется до 10% от mc^2

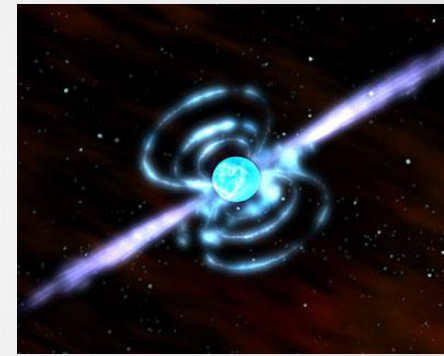
ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ



Около $\frac{1}{2}$ массивных звезд
входит в двойные системы.

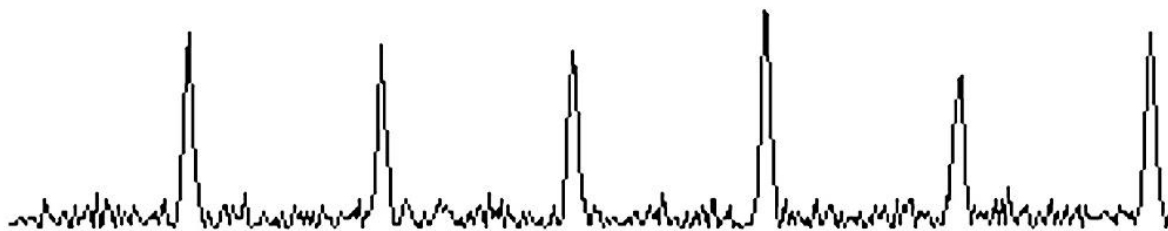
Сейчас в тесных двойных
системах известны многие
сотни нейтронных звезд.

ОТКРЫТИЕ !!!!

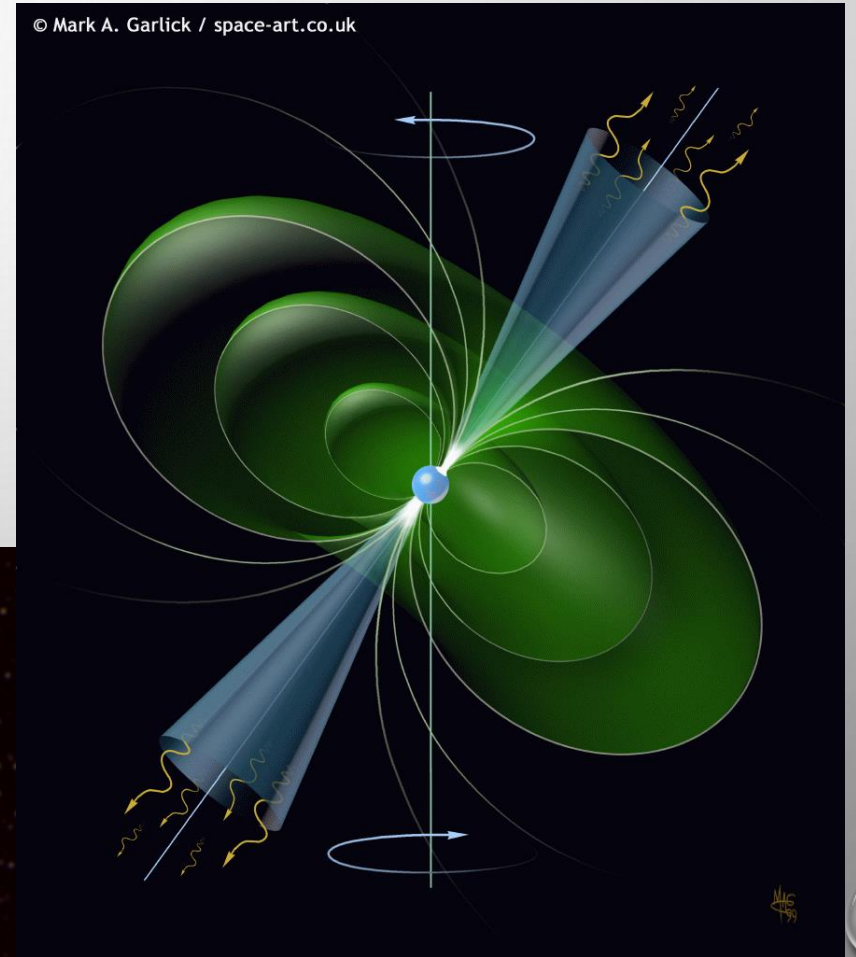
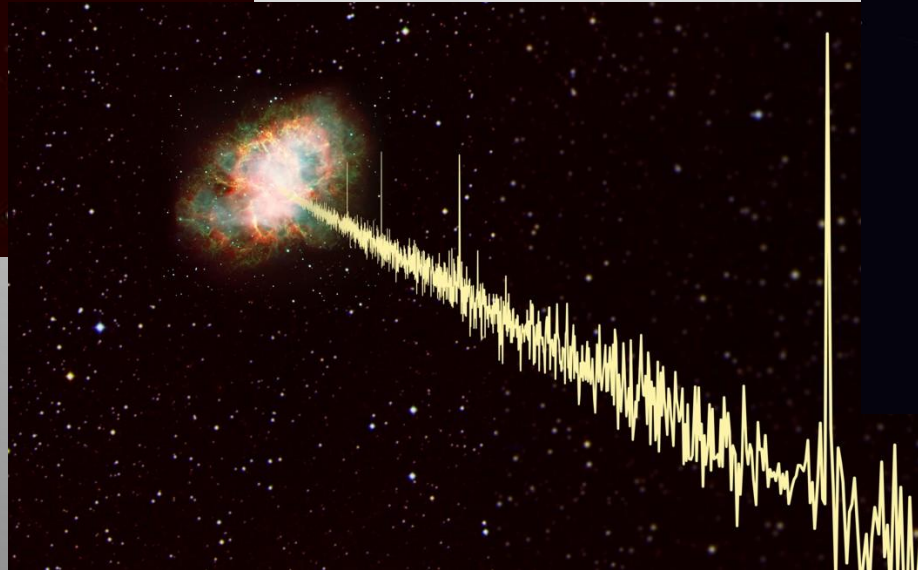
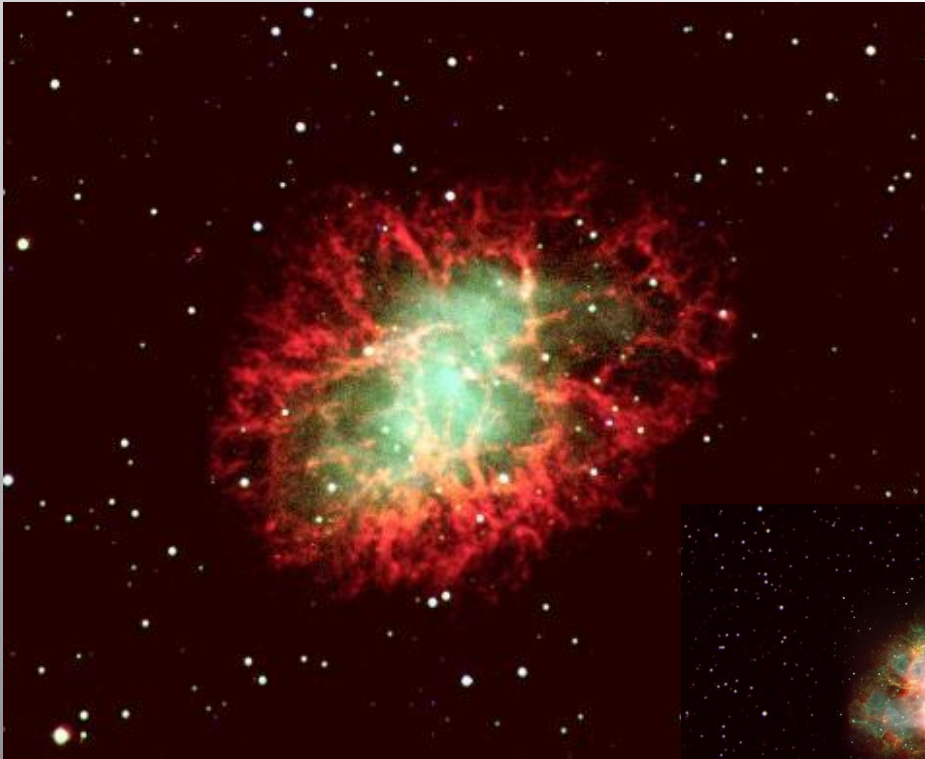


1967: Джоселин Белл. Радиопульсары.

Серендипическое открытие.



ПУЛЬСАР В КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ



НОВЫЙ ЗООПАРК НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД



В последние 15 лет стало ясно, что нейтронные звезды могут рождаться очень разными, совсем непохожими на обычные радиопульсары типа Краба.

- о Компактные рентгеновские источники в остатках сверхновых
- о Аномальные рентгенов. пульсары
- о Источники мягких повторяющихся гамма-всплесков
- о Великолепная семерка
- о Гамма источники
- о Транзиентные радиоисточники...

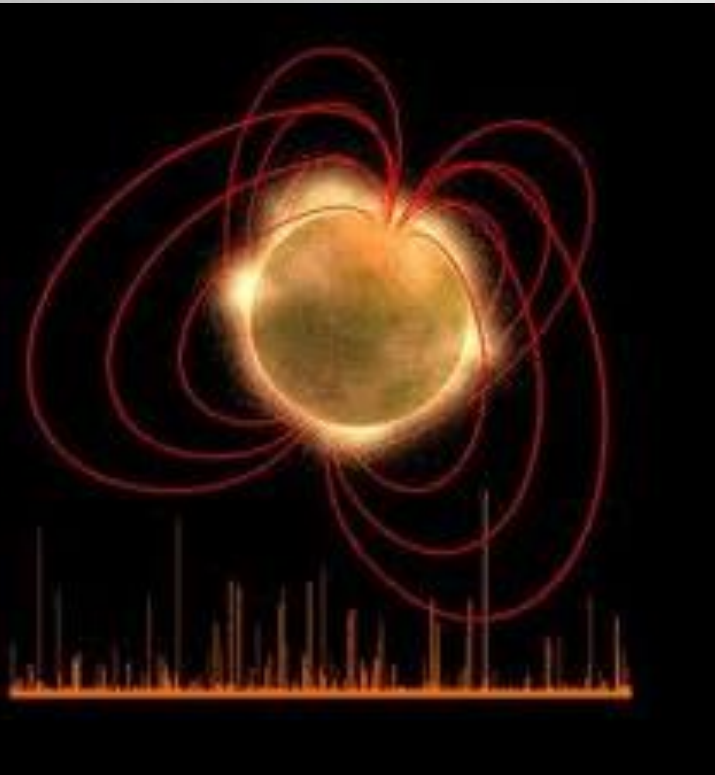
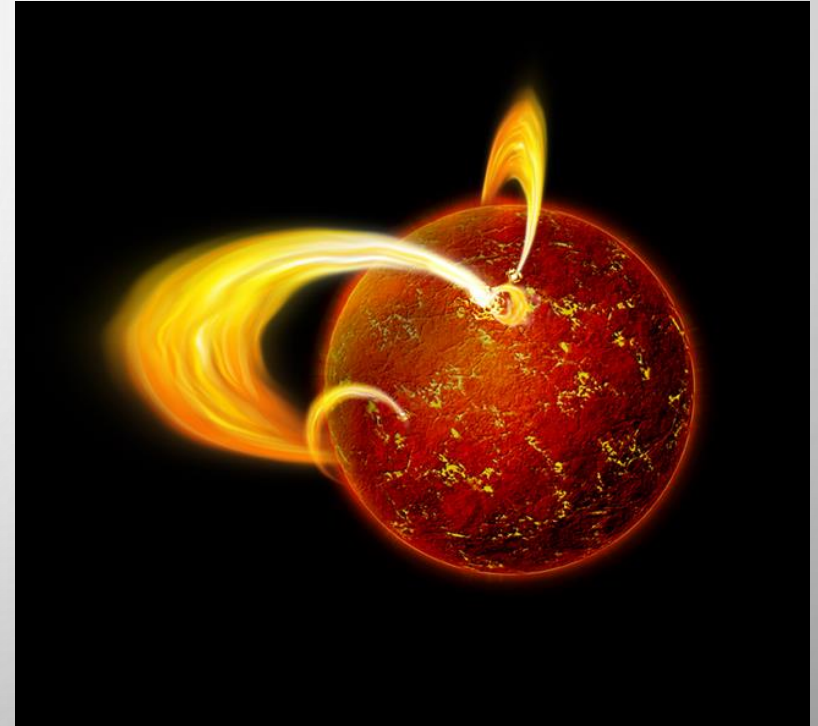
МАГНИТАРЫ

Нейтронные звезды, чья активность в основном связана с выделением энергии магнитного поля. Обычно поля очень велики.

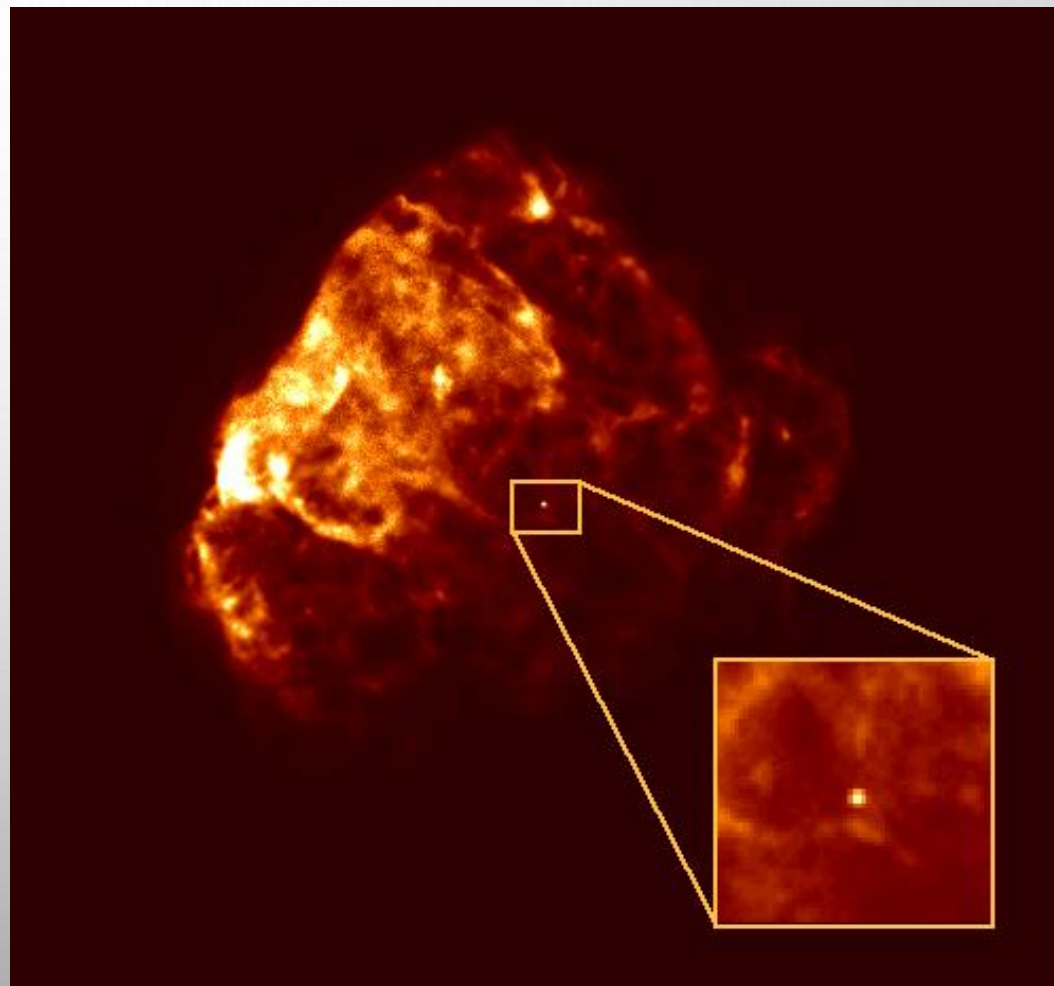
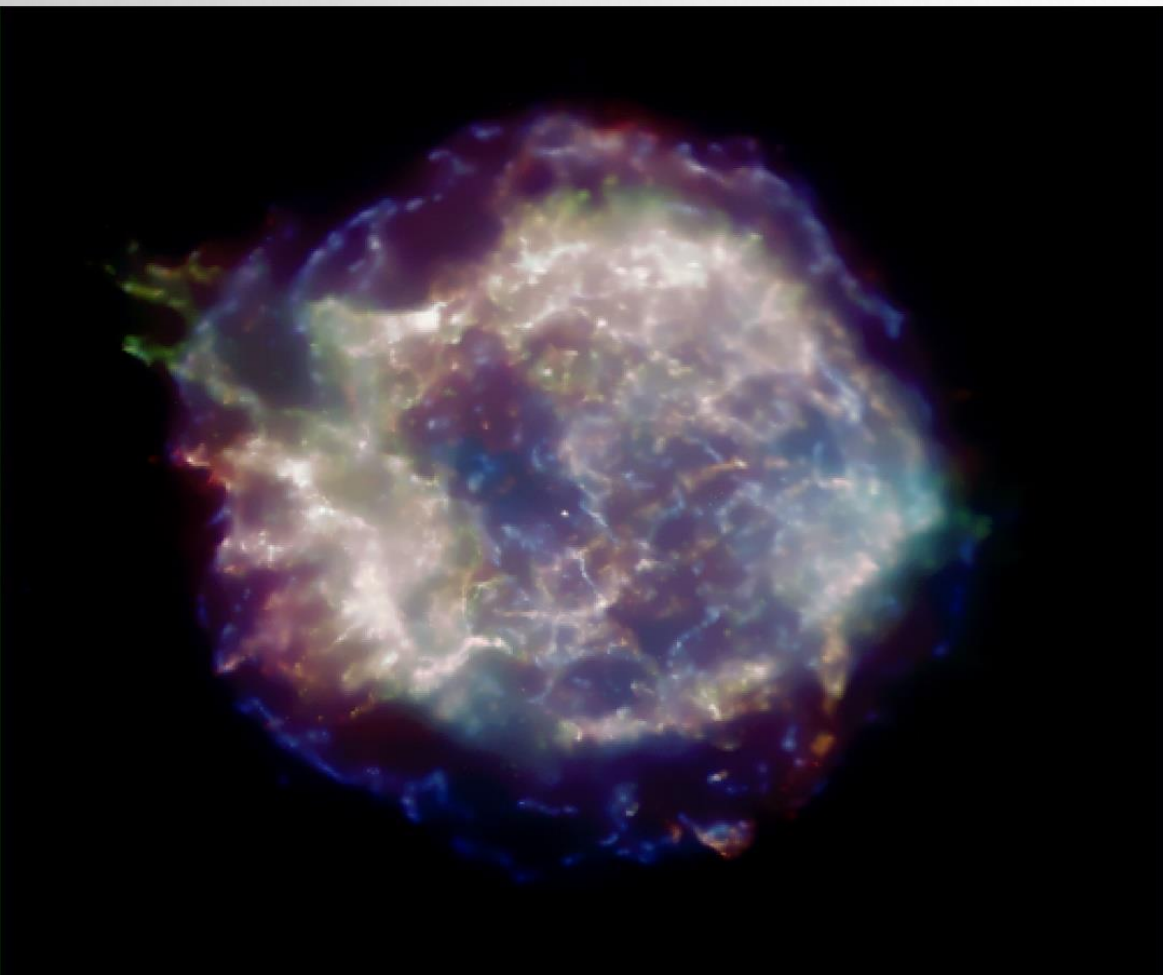
Основными кандидатами в магнитары являются аномальные рентгеновские пульсары и источники мягких повторяющихся гамма-всплесков.

Магнитные поля 10^{14} – 10^{15} Гс

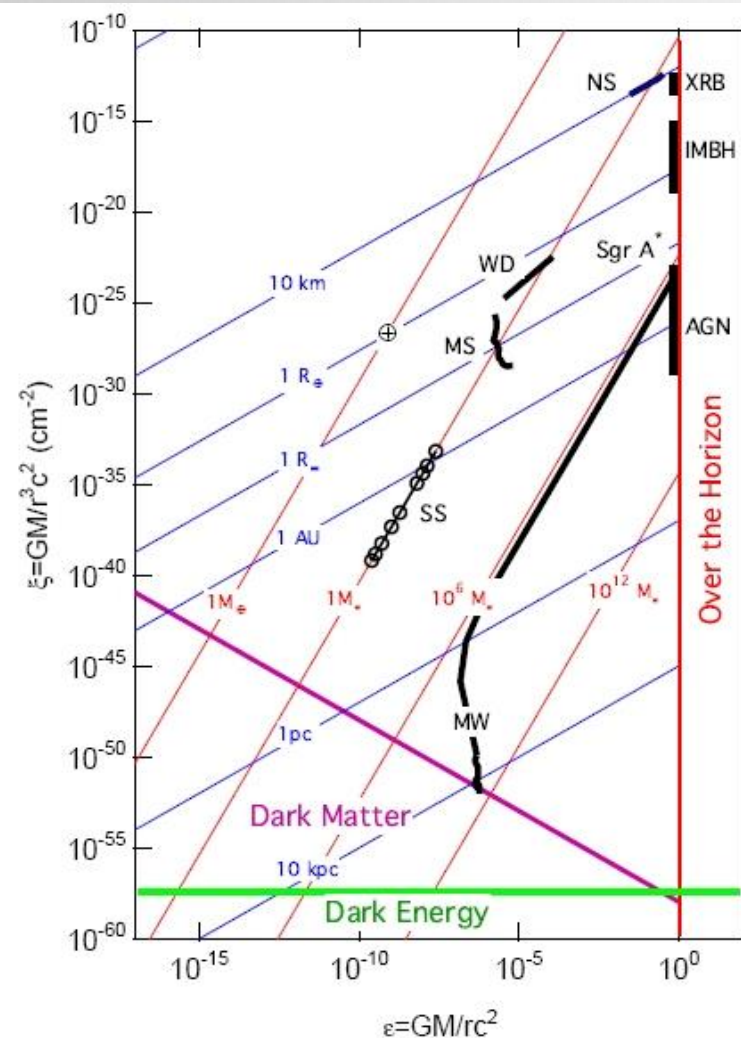
Расходуется энергия магнитного поля. Иногда – постепенно, иногда – в виде вспышек.



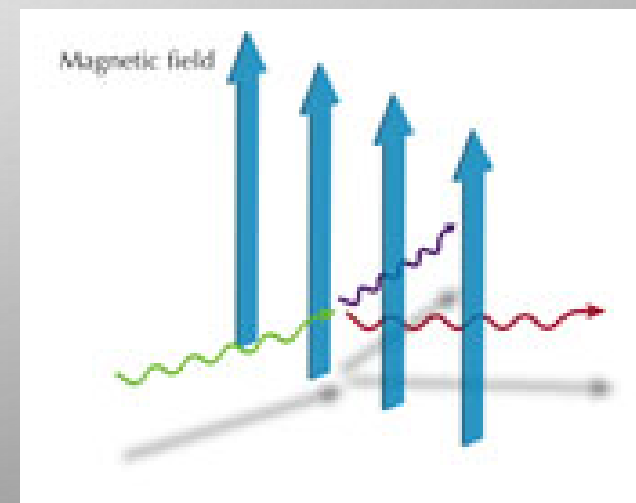
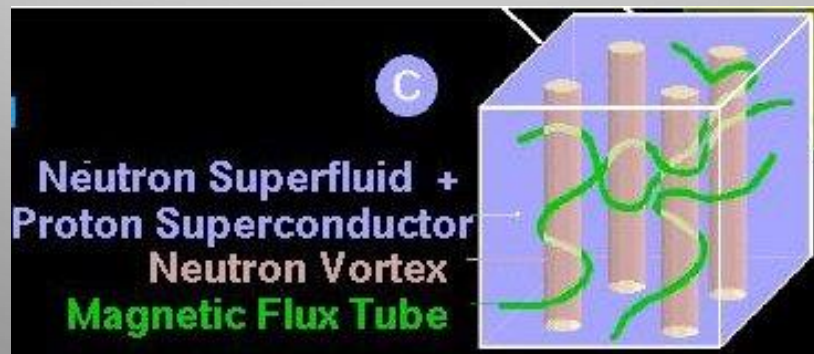
ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ В ОСТАТКАХ СВЕРХНОВЫХ



ЧЕМ ВАЖНЫ

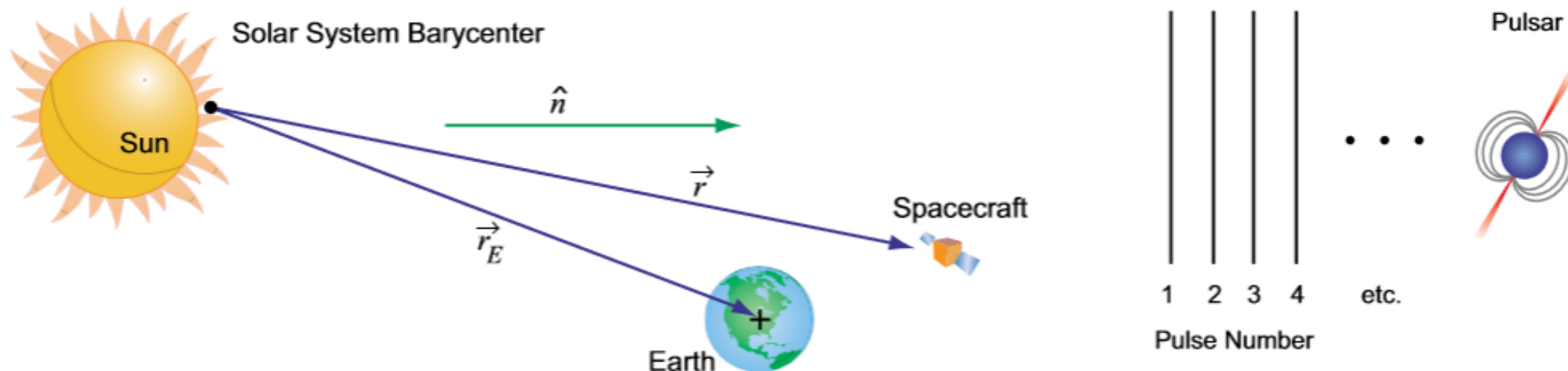


- Инструменты для физиков и астрофизиков
 - радиопульсары – тесты теорий гравитации
 - регистрация гравитационных волн
 - точное время
- Теория поведения вещества при высокой плотности – квантовая хромодинамика
- Процессы в сильном магнитном поле



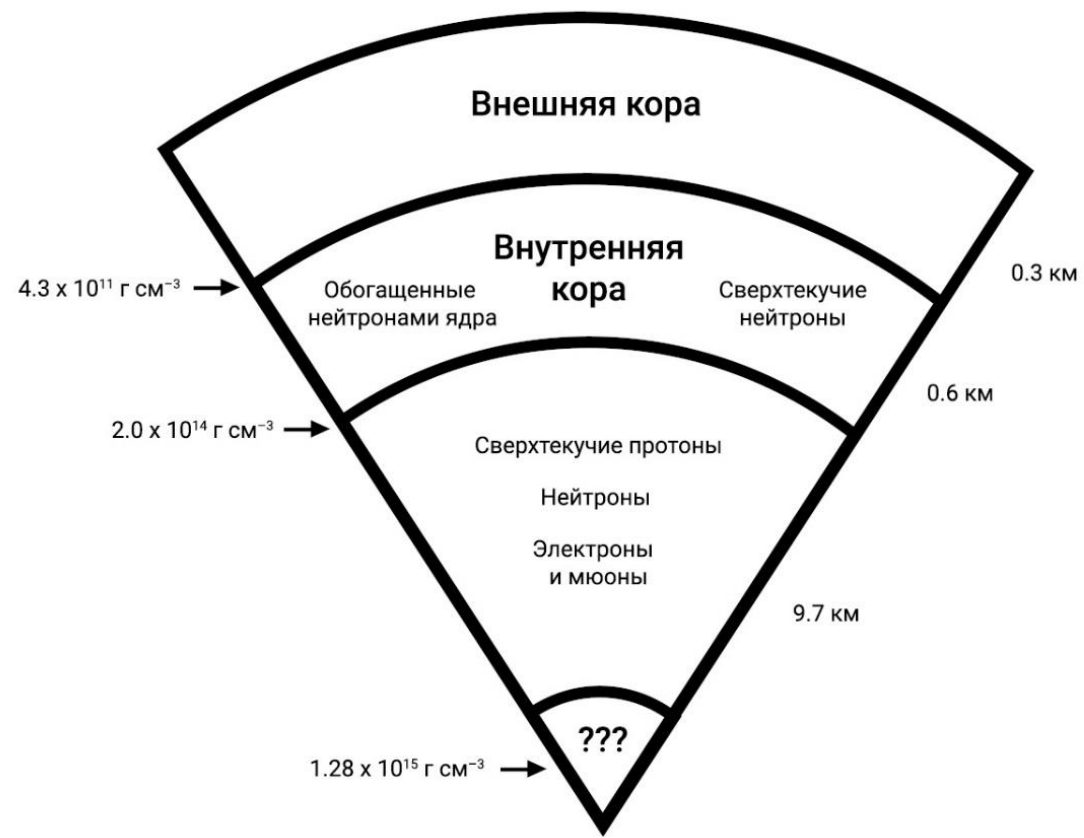
ОРИЕНТАЦИЯ СПУТНИКОВ ПО РЕНТГЕНОВСКИМ ПУЛЬСАРАМ

<http://www.nrl.navy.mil>

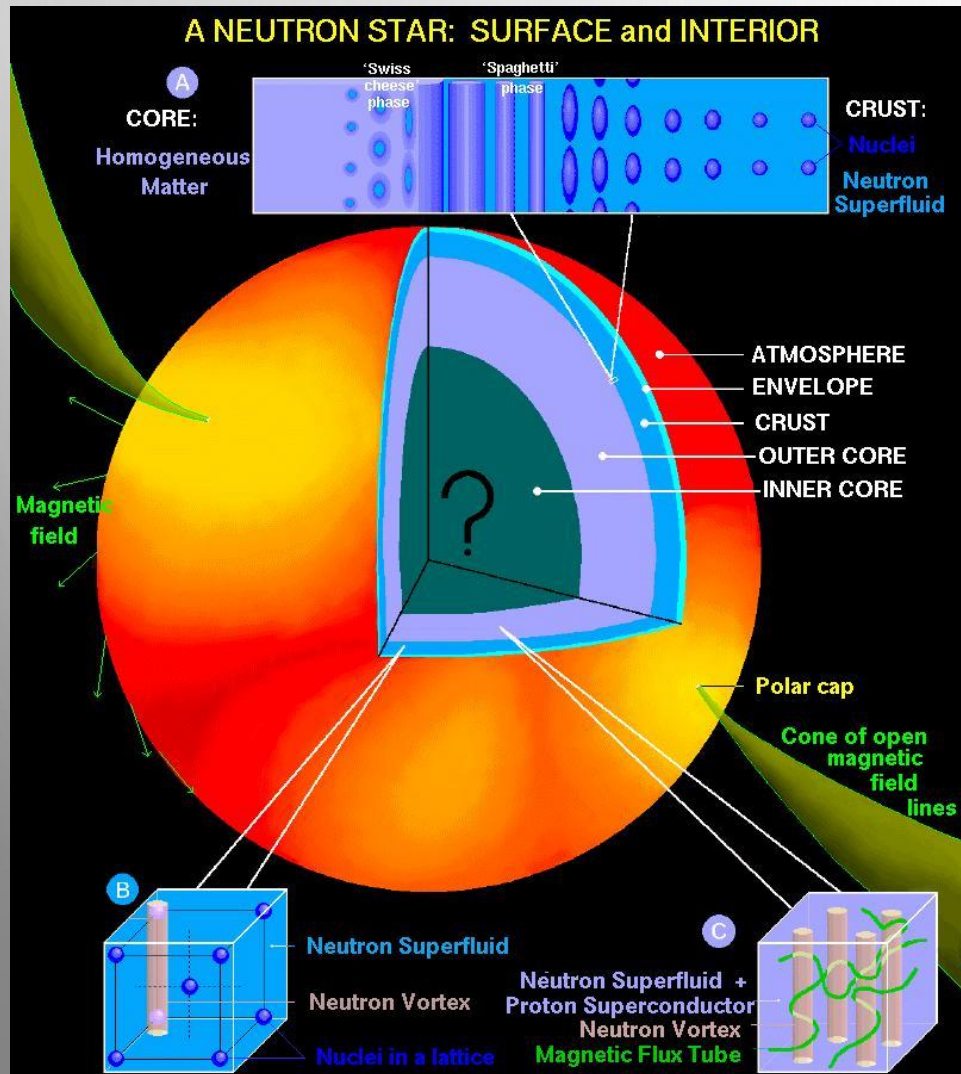


Все ведущие космические агентства в мире (включая российское) сейчас работают над созданием систем навигации, основанных на наблюдении рентгеновского излучения стабильных одиночных пульсаров.

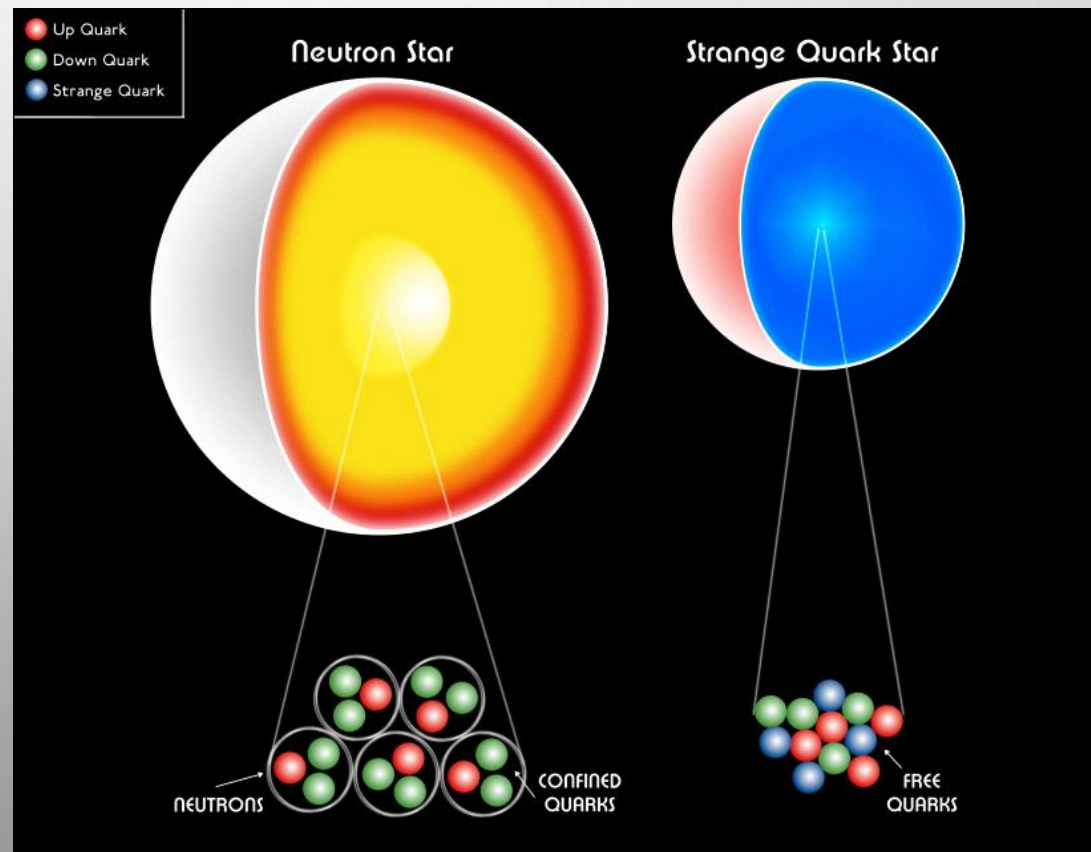
ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ



МНОЖЕСТВО ВАРИАНТОВ И СЛОЕВ



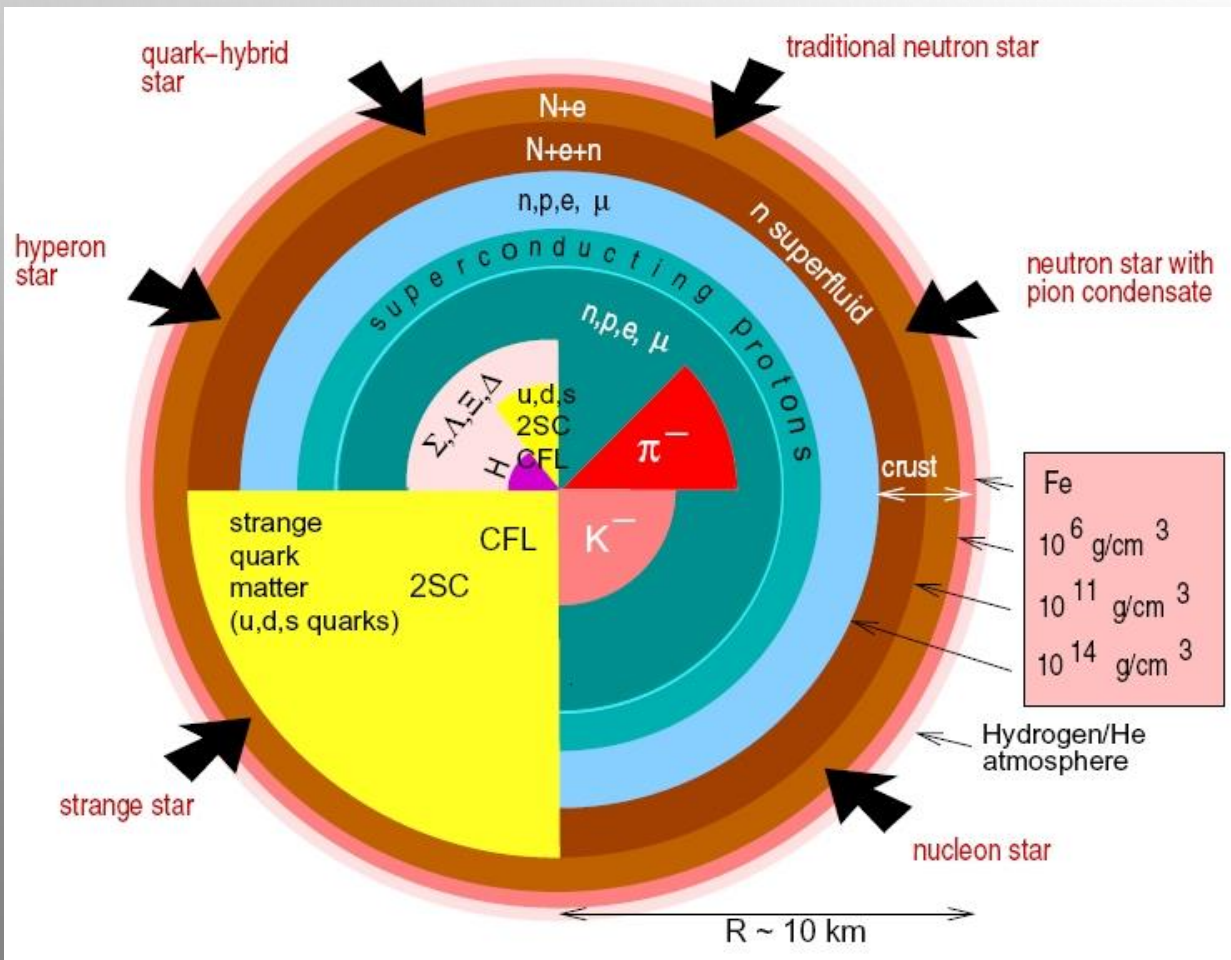
В зависимости от модели
объекты, которые мы называем
нейтронными звездами,
могут иметь очень разное строение



ЗАГАДКА НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

В недрах – очень плотное вещество.

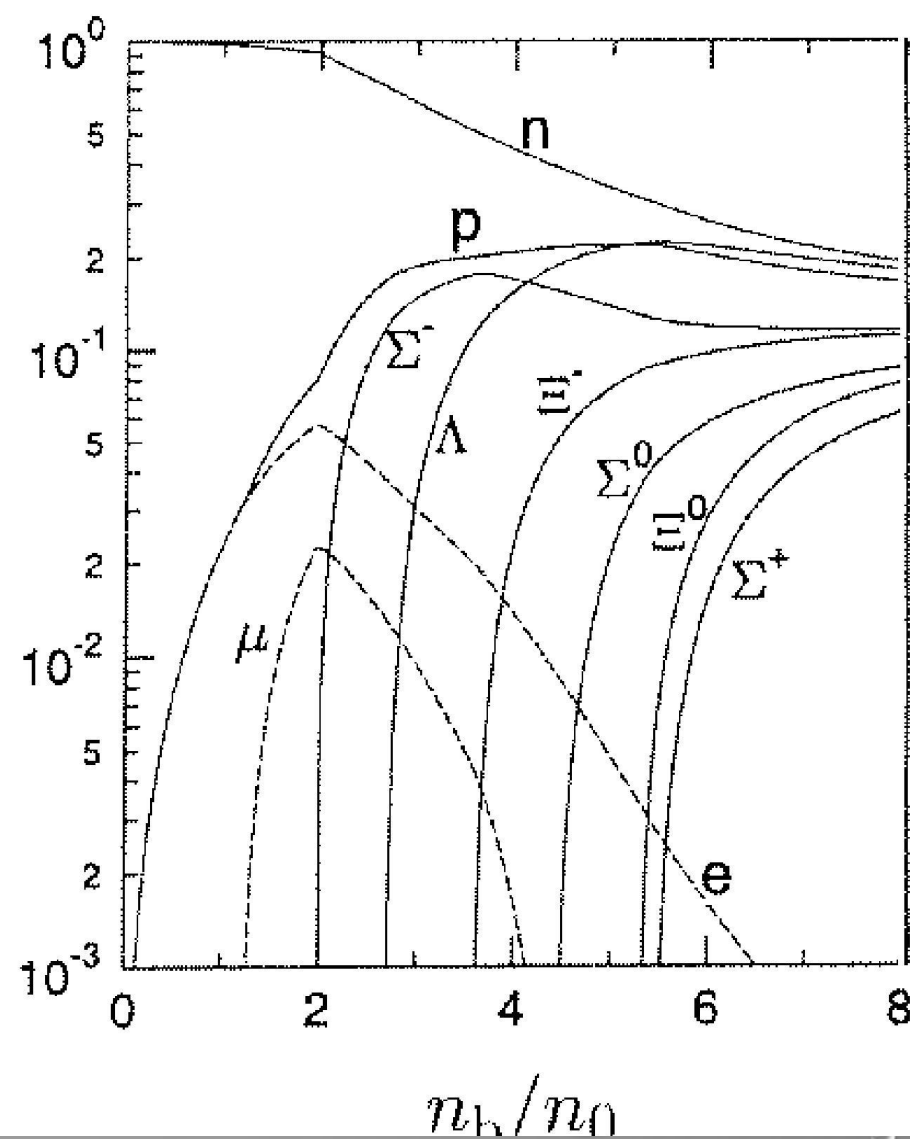
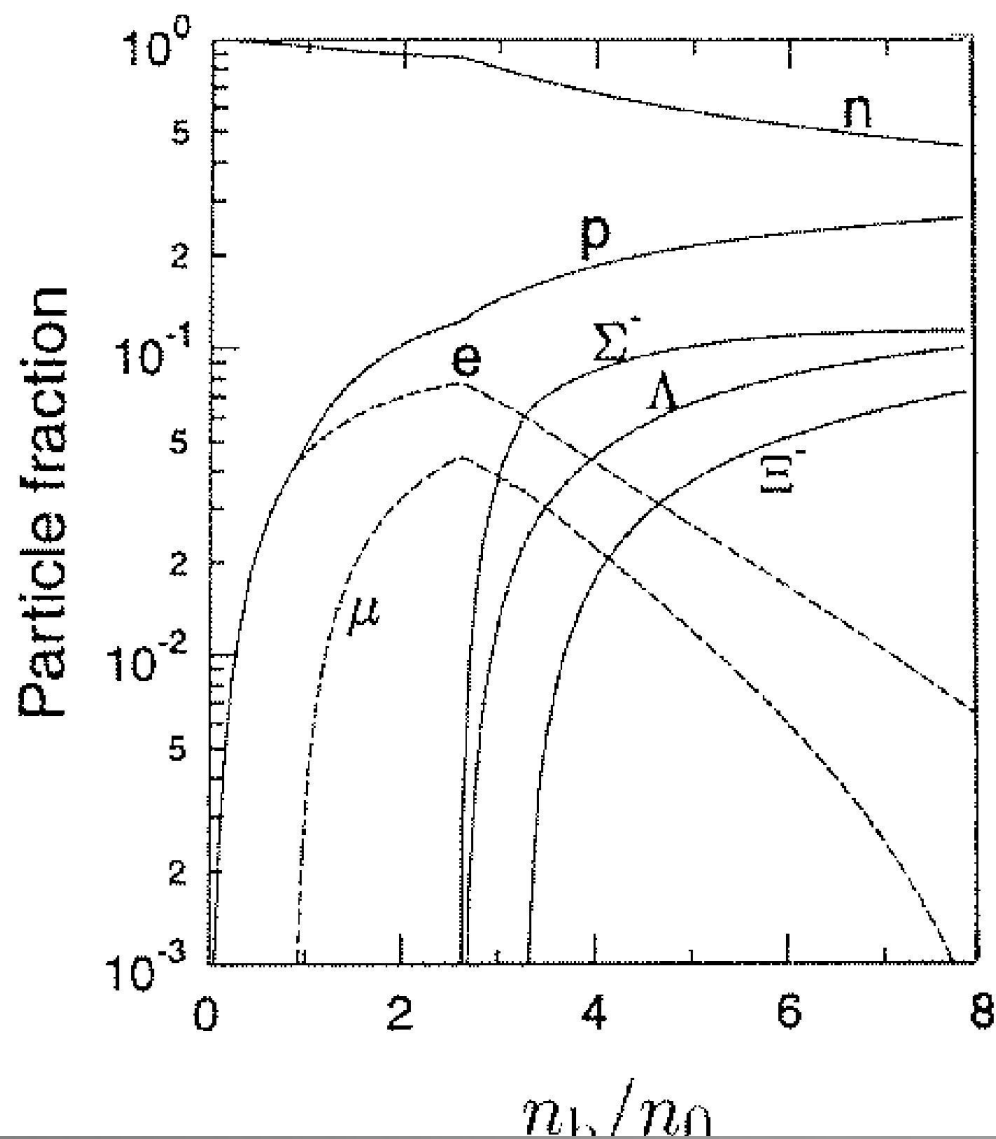
Мы плохо понимаем, как ведет себя вещество при такой плотности.



- Обычные нейтронные звезды
- Пионный конденсат
- Каонный конденсат
- Странные звезды
- Гиперонные звезды
- Гибридные звезды

Как же устроено вещество при очень высокой плотности и «низкой» температуре?

ЧАСТИЦЫ ВНУТРИ



Relativistic mean-field model
TM1 of Sugahara & Toki (1971)

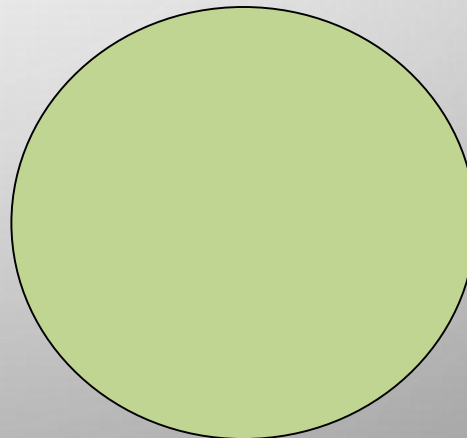
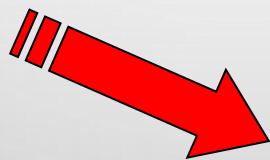
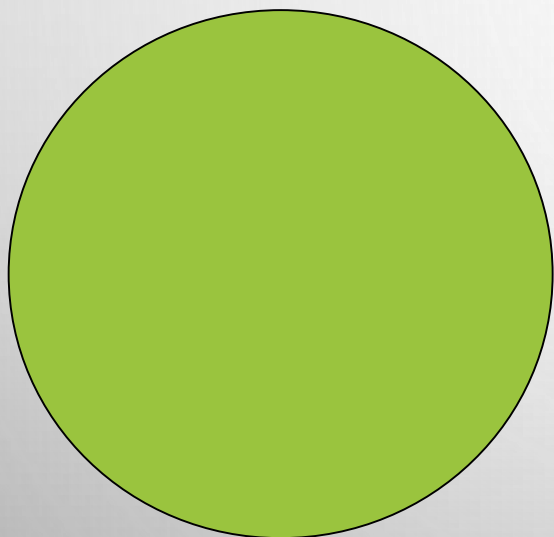
Effective chiral model of
Hanuske et al. (2000)

АСТРОФИЗИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

- **Масса** ➡ В двойных, особенно с радиопульсарами.
В будущем – и по линзированию.
- **Радиус** ➡ У одиночных остывающих НЗ,
у барстеров в двойных, у двойных с QPO.
- **Красное
смещение (M/R)** ➡ По наблюдениям спектральных линий
- **Температура** ➡ Одиночные остывающие НЗ и
некоторые двойные (прогрев коры)
- **Момент инерции** ➡ По радиопульсарам (в будущем)
- **Гравитационная
и барионная массы** ➡ В системах из двух нейтронных звезд,
если будут хорошие данные по звездам.
- **Предельное вращ.** ➡ Миллисекундные пульсары

ДЕФЕКТ МАСС

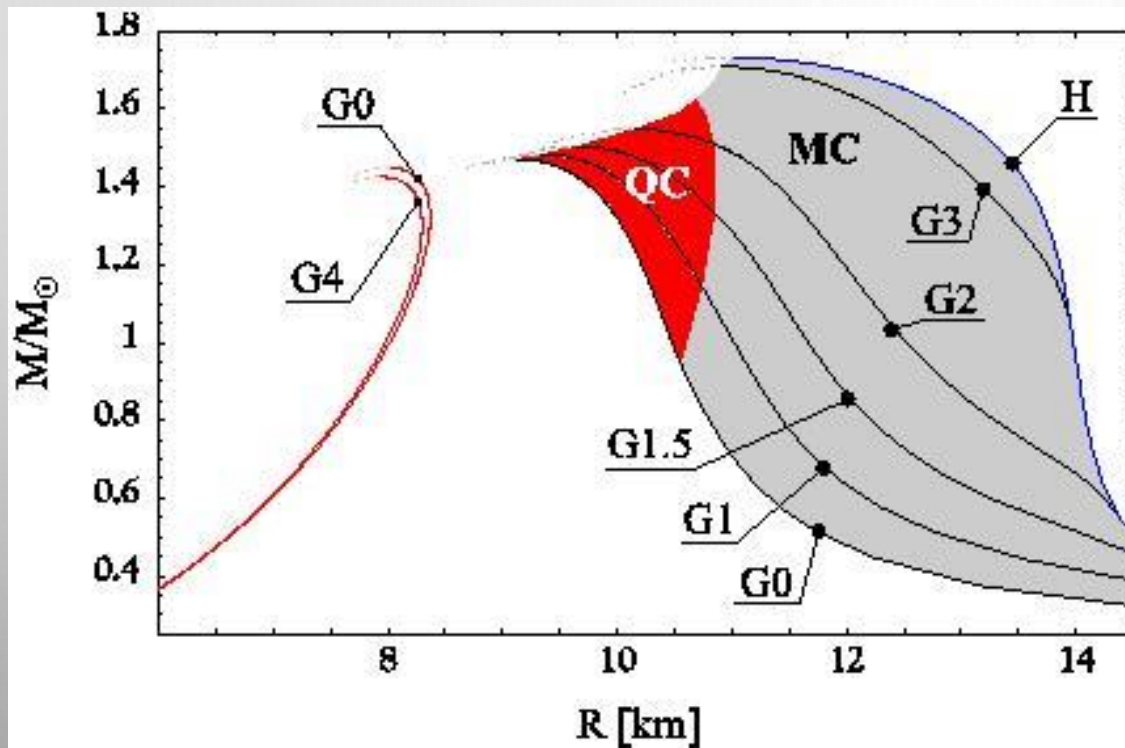
Барионная масса больше гравитационной.
При коллапсе ядра часть его массы
превращается в энергию: $E=mc^2$
И высвечивается.
Похоже на энергию связи атомного ядра.



В итоге, получившийся компактный объект
имеет гравитационную массу
существенно меньше барионной

Если мы точно сможем измерить дефект масс,
то узнаем, из чего состоит нейтронная звезда.

ЗАВИСИМОСТЬ МАССА–РАДИУС



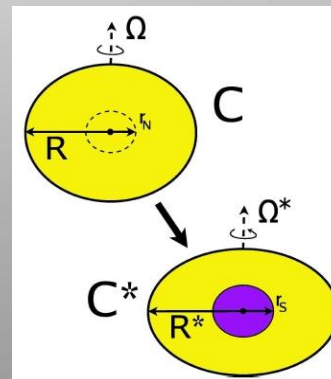
Основные черты

- Максимальная масса
- Разные семейства (кварковые и адронные)
- Жесткие и мягкие EoS
- Небольшая разница при реалистичных параметрах
- Смягчение уравнения состояния про росте массы

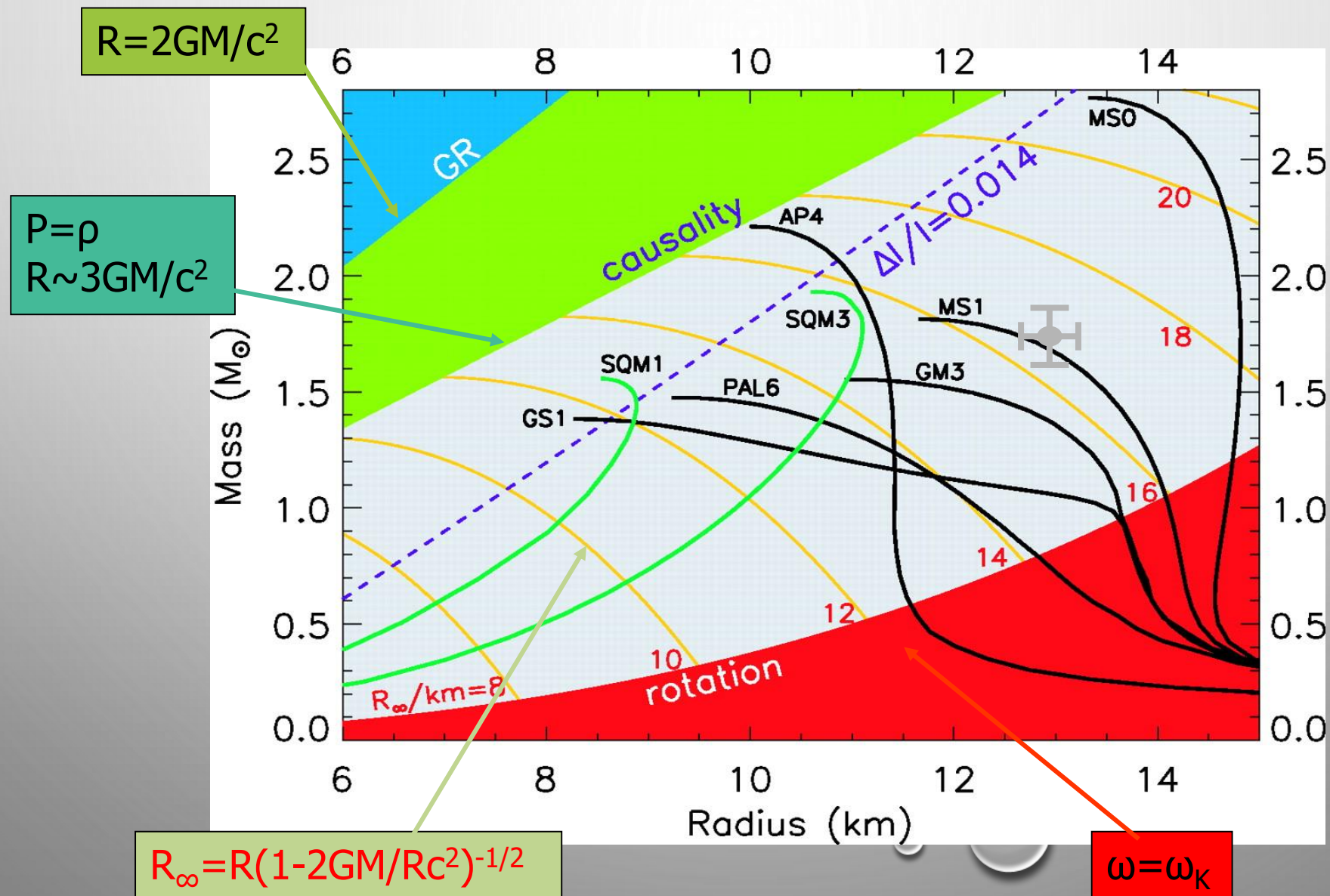
Здесь мы пренебрегли вращением
Вращение влияет на:

- максимальную массу (растет)
- экваториальный радиус (растет)

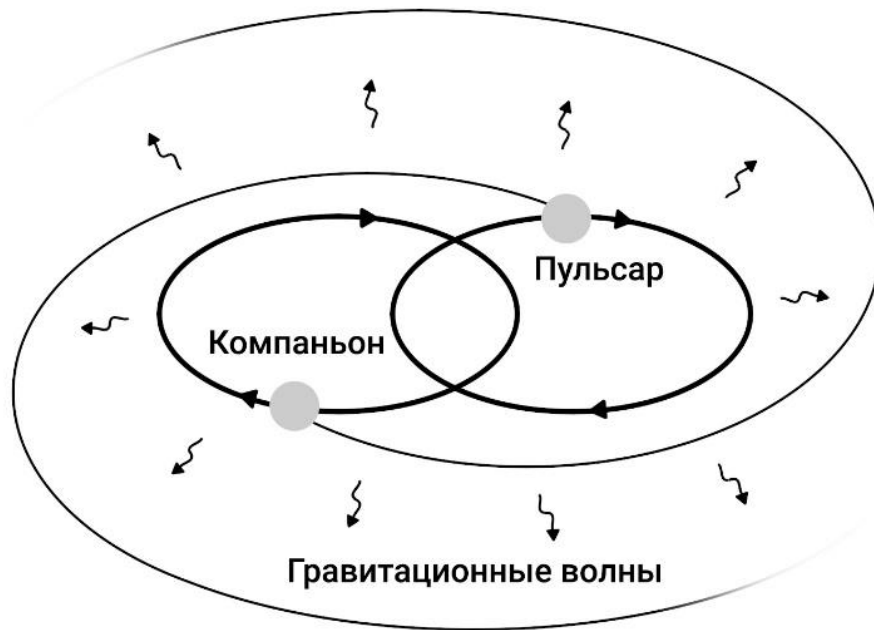
Замедление может вести к фазовому превращению.



МАССА-РАДИУС



ДВОЙНЫЕ ПУЛЬСАРЫ



$$\frac{d\Delta_{E\odot}}{dt} = \sum_i \frac{Gm_i}{c^2 r_i} + \frac{v_{\oplus}^2}{2c^2} - \text{constant}.$$

$$\Delta_{S\odot} = -\frac{2GM_{\odot}}{c^3} \log(1 + \cos \theta),$$

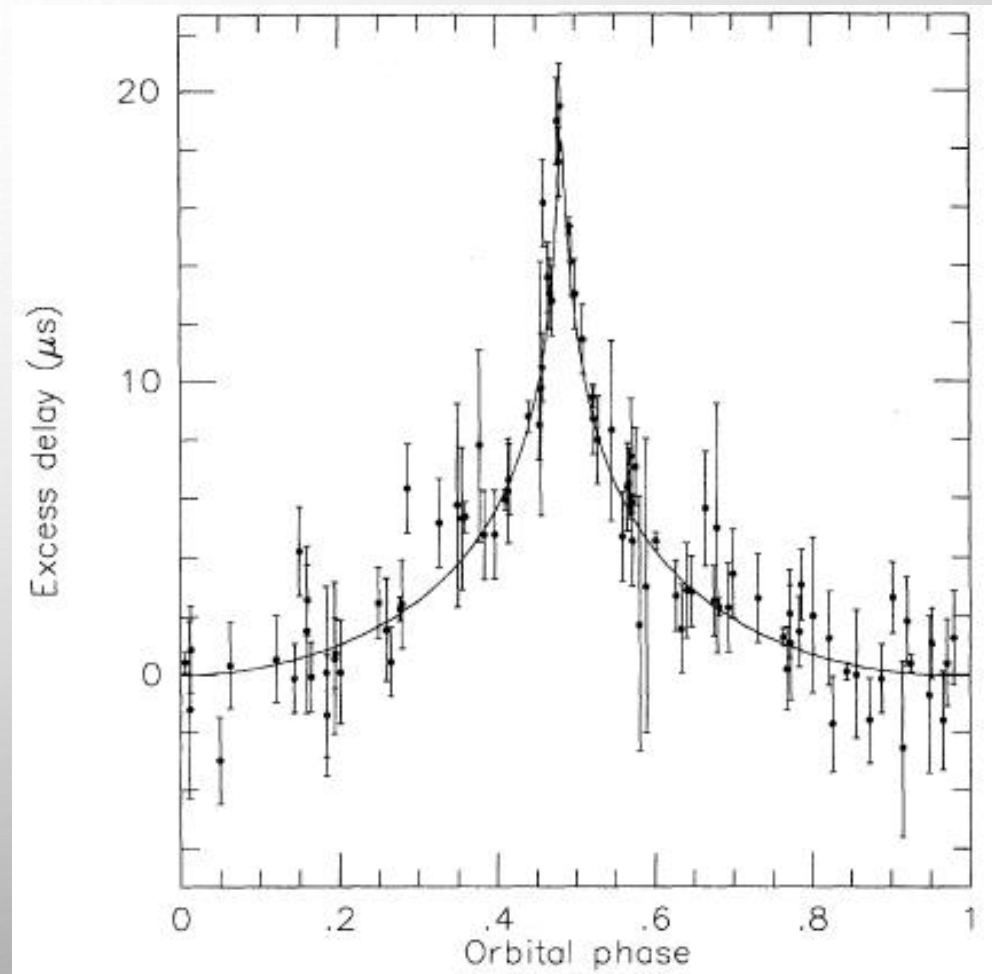
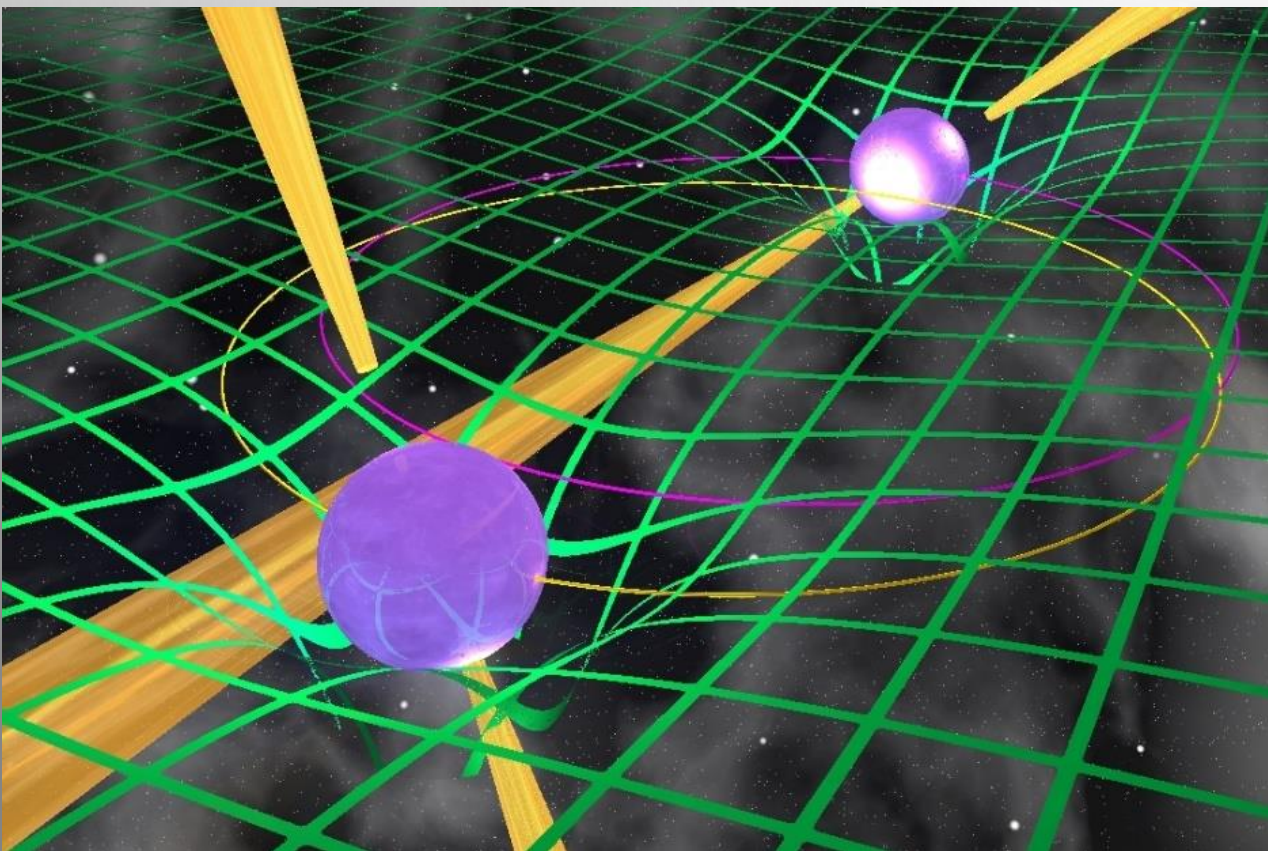
Наблюдения двойных радиопульсаров позволяют определять массы нейтронных звезд с очень высокой точностью благодаря наблюдению ряда эффектов Общем теории относительности.

$$T = t_{\text{obs}} - t_0 + \Delta_C - D/f^2 + \Delta_{R\odot}(\alpha, \delta, \mu_{\alpha}, \mu_{\delta}, \pi) \\ + \Delta_{E\odot} - \Delta_{S\odot}(\alpha, \delta) \\ - \Delta_R(x, e, P_b, T_0, \omega, \dot{\omega}, \dot{P}_b) - \Delta_E(\gamma) - \Delta_S(r, s)$$

ЗАДЕРЖКА ШАПИРО

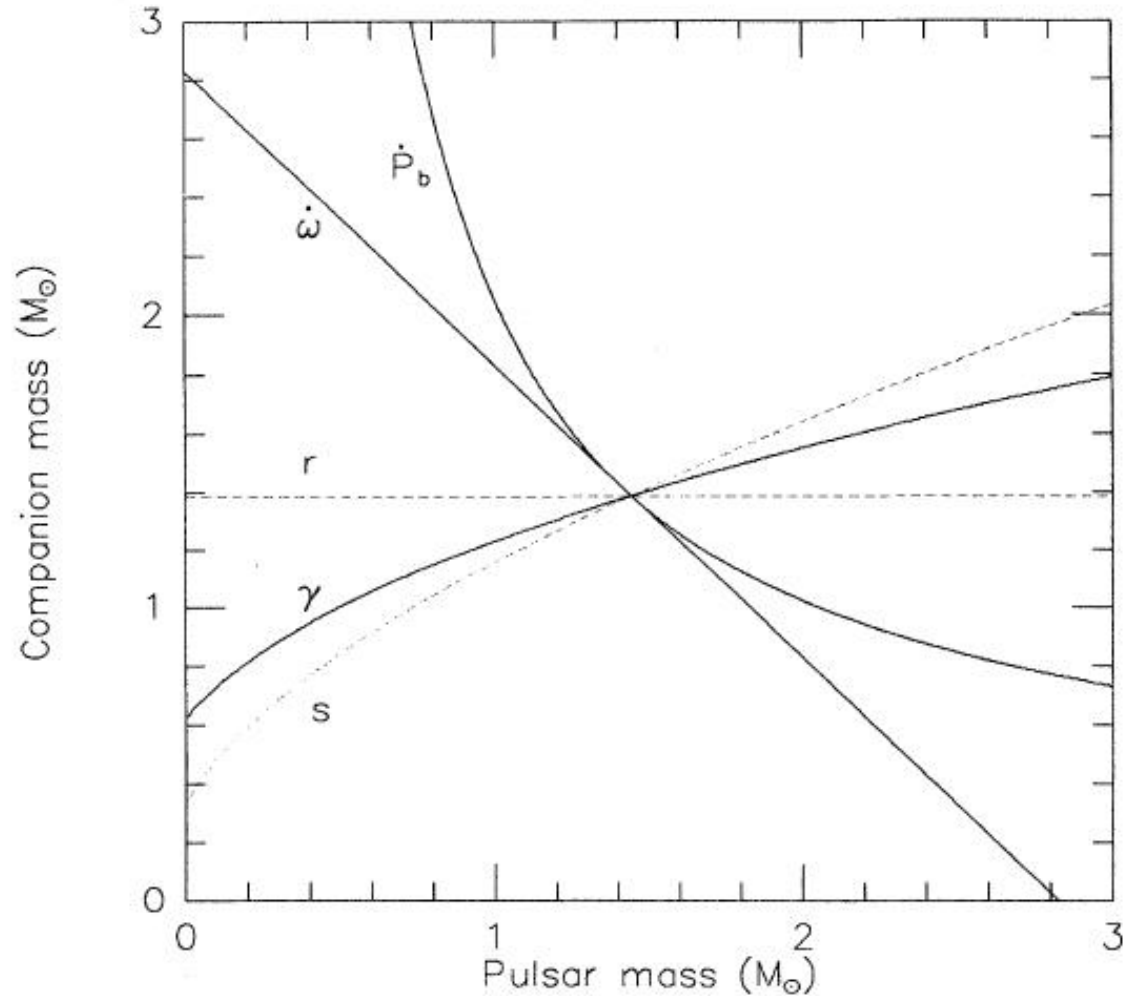
$$\Delta_S = -2r \log(1 - s \cos[2\pi(\phi - \phi_0)])$$

Электромагнитным волнам требуется больше времени, чтобы достичь наблюдателя, если пространство искривлено.



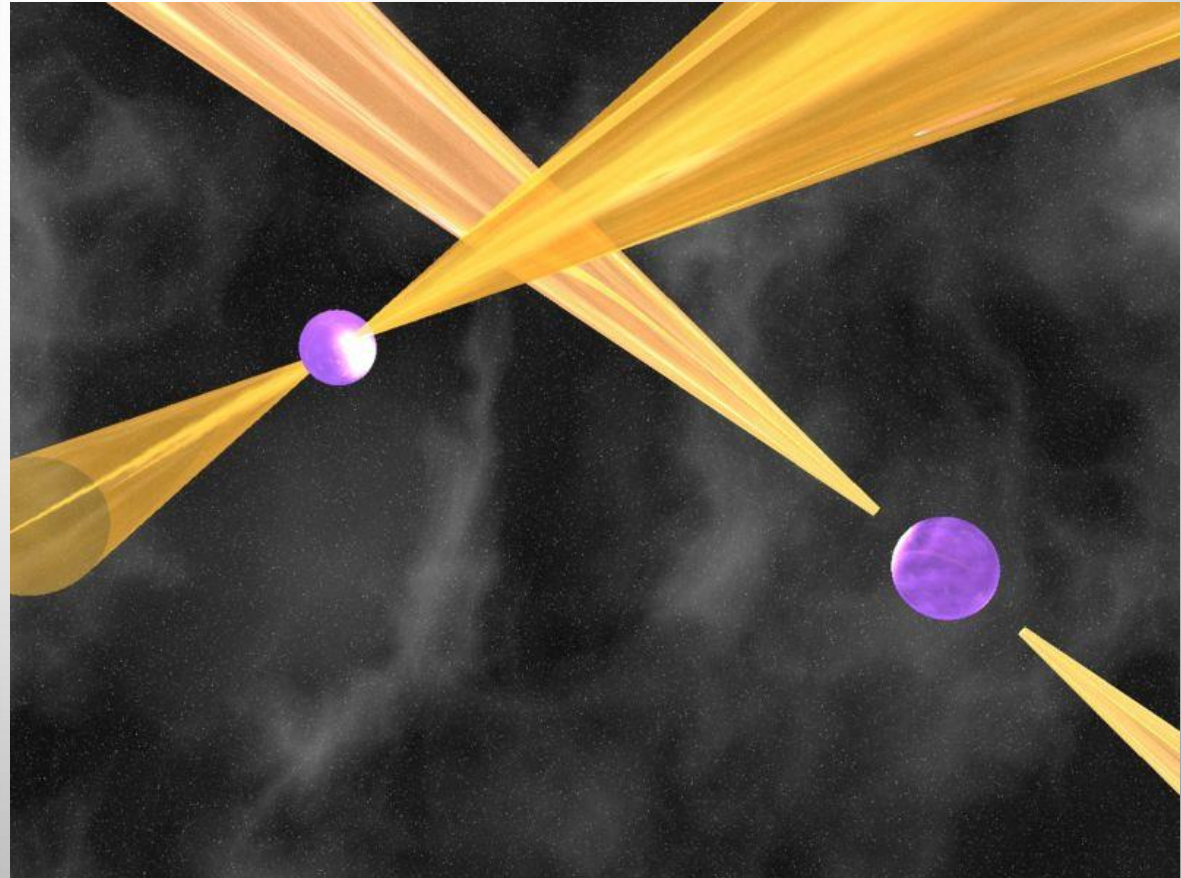
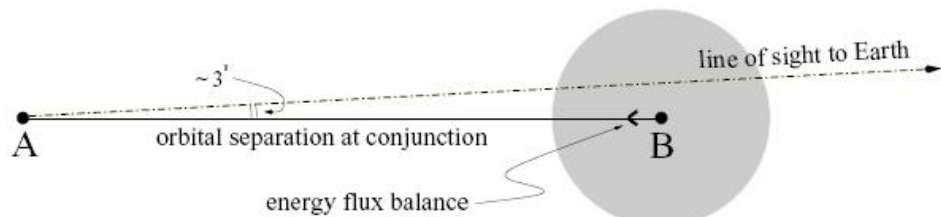
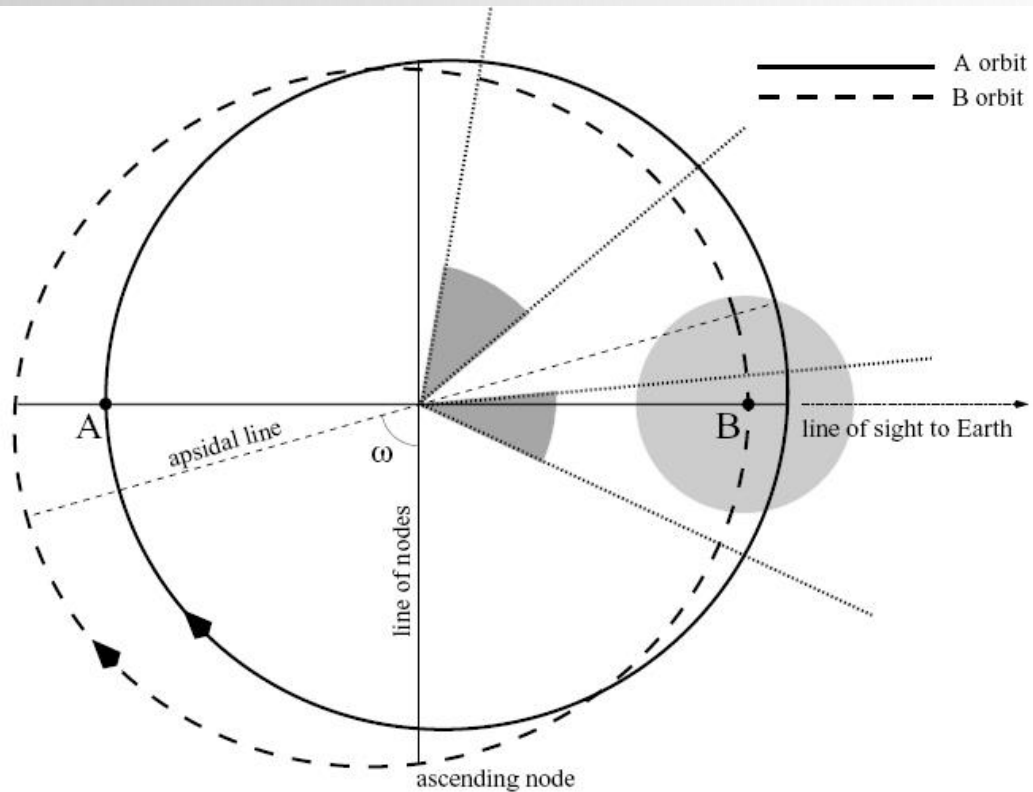
PSR 1855+09 (Taylor, Nobel lecture)

ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ



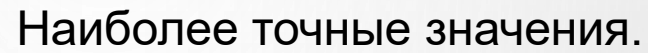
Наблюдение сразу
нескольких эффектов
позволяет измерить
массы обеих звезд с
очень высокой точностью.
Иногда до 0.001 массы Солнца.

ДВОЙНОЙ PSR J0737-3039

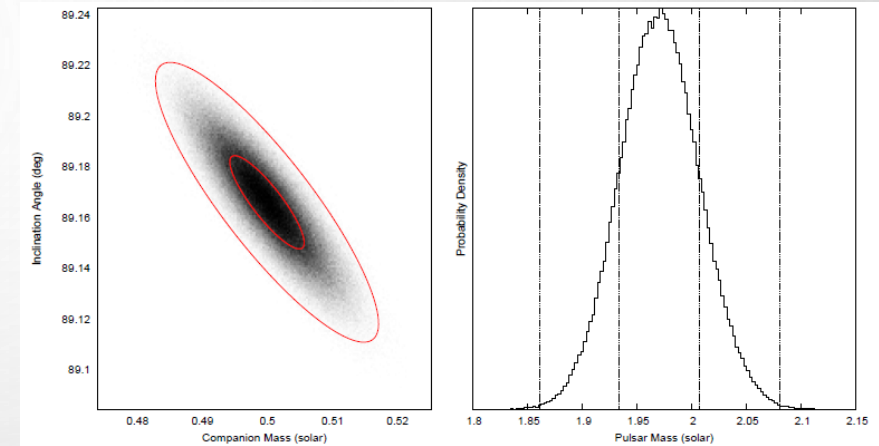
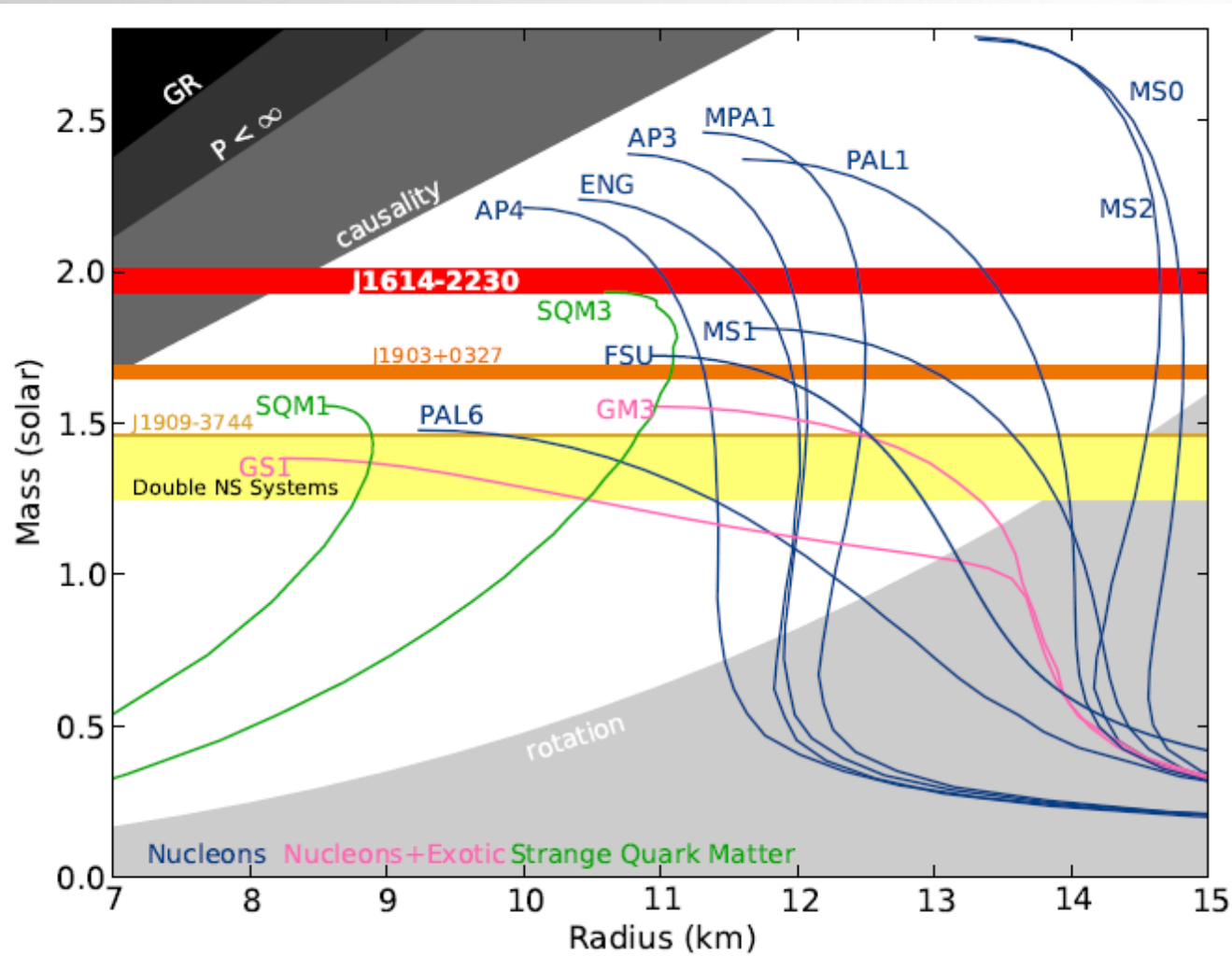


Уникальная система,
открытая в 2003 г.

astro-ph/0609417



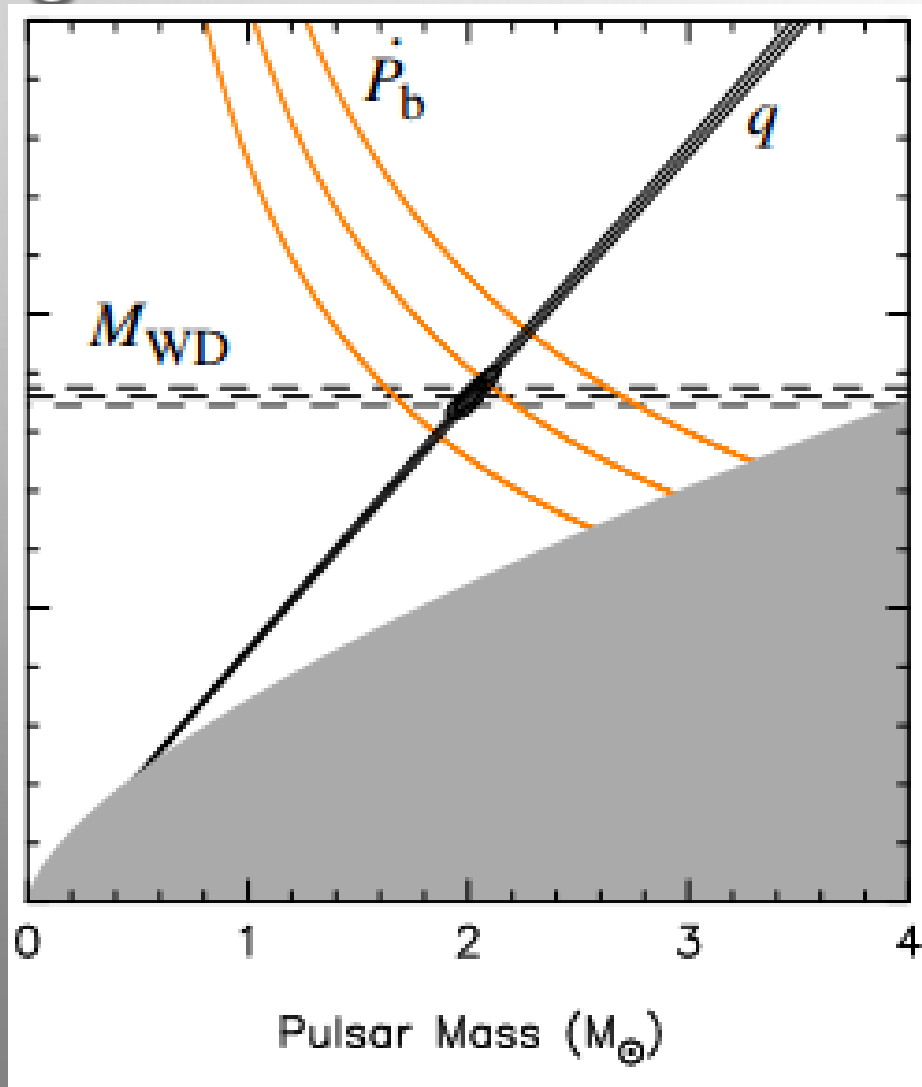
ПОЧЕМУ ВАЖНО ИСКАТЬ МАССИВНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ?



Чем больше масса – тем сильнее сжато вещество в недрах нейтронной звезды.

Мы плохо знаем, как ведет себя вещество при плотности в 10-20 раз выше ядерной.
Сколько выдержит до коллапса в черную дыру?

НЕЙТРОННАЯ ЗВЕЗДА С МАССОЙ 2.01 МАССЫ СОЛНЦА



PSR J0348+0432

39 мсек, 2.46 часа - орбитальный
Компаньон – белый карлик

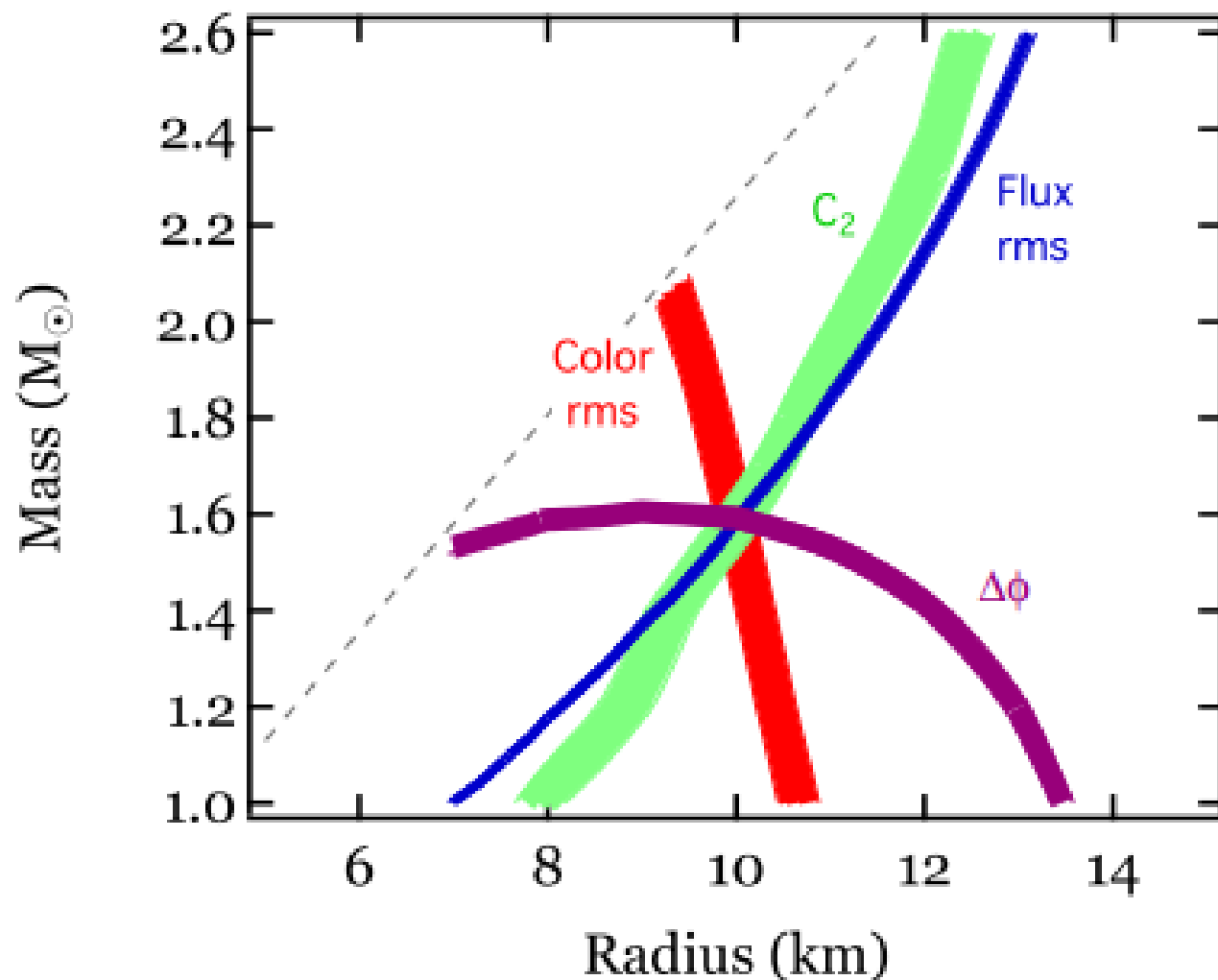
Оценка массы нейтронной звезды:

1.97 – 2.05 масс Солнца (68.27%)

1.90 – 2.18 масс Солнца (99.73%)

Система идеальна для проверок
теорий гравитации, т.к.
очень компактна.

БУДУЩИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ



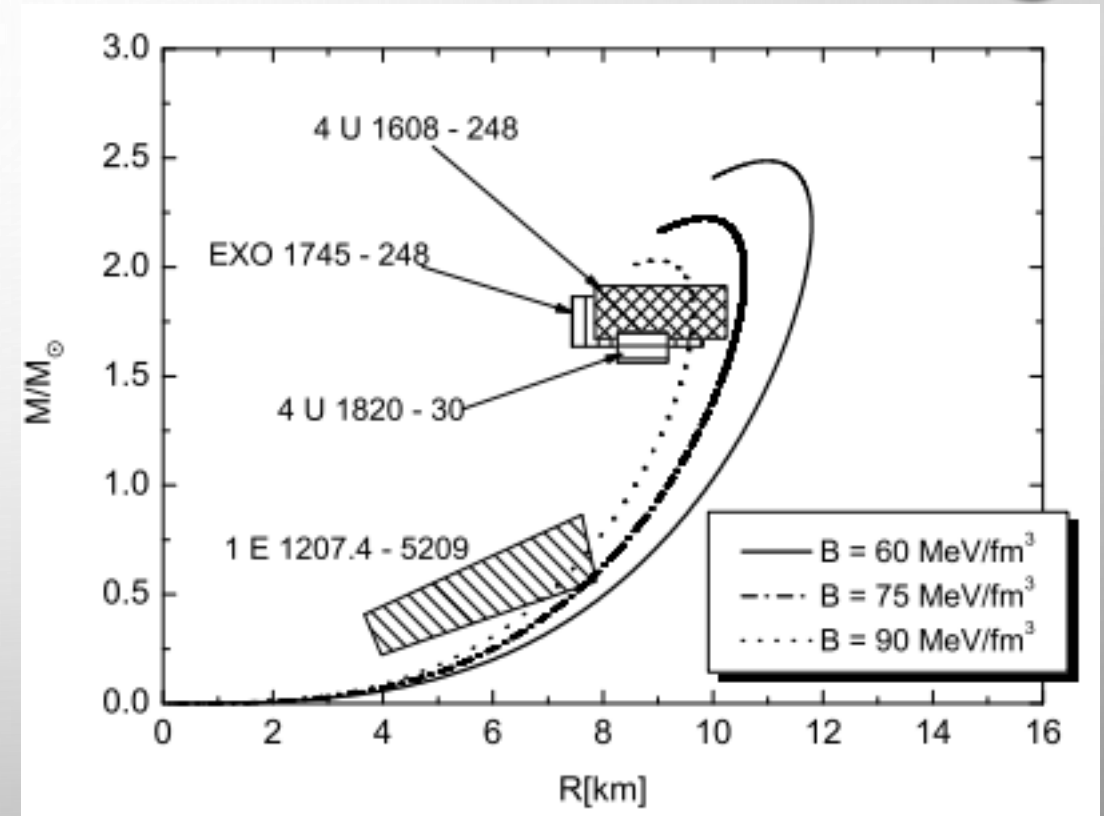
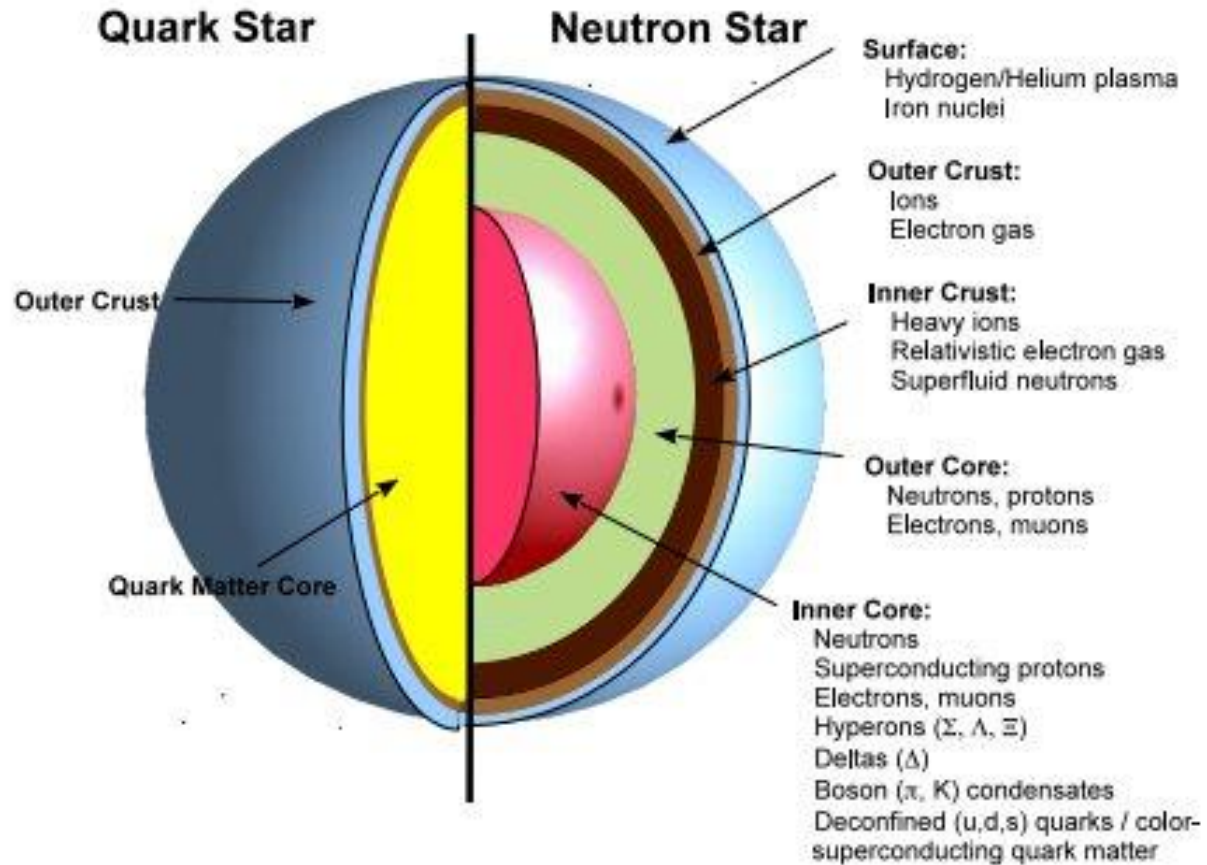
Возможно, что на будущих аппаратах NICER и LOFT можно будет очень точно измерять сразу и массу, и радиус хотя бы для небольшого числа звезд.

Данные основаны в первую очередь на анализе профиля импульса.

Надо наблюдать звезды с короткими периодами и накопить от них очень много фотонов (~миллион).

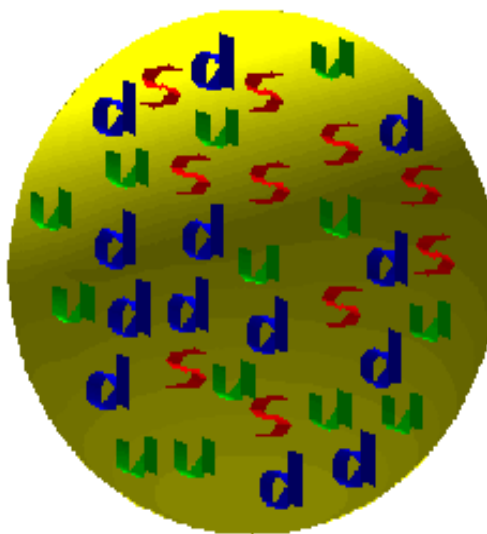
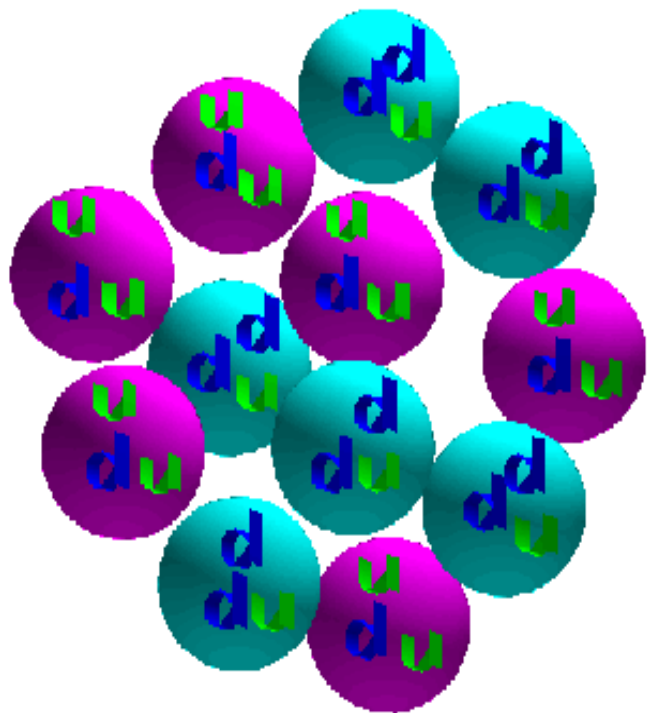
КВАРКОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

В отличие от нейтронных звезд кварковые удерживаются не гравитацией, а ядерными силами. Нет минимальной массы.



СТРАННОЕ ВЕЩЕСТВО И СТРАПЕЛЬКИ

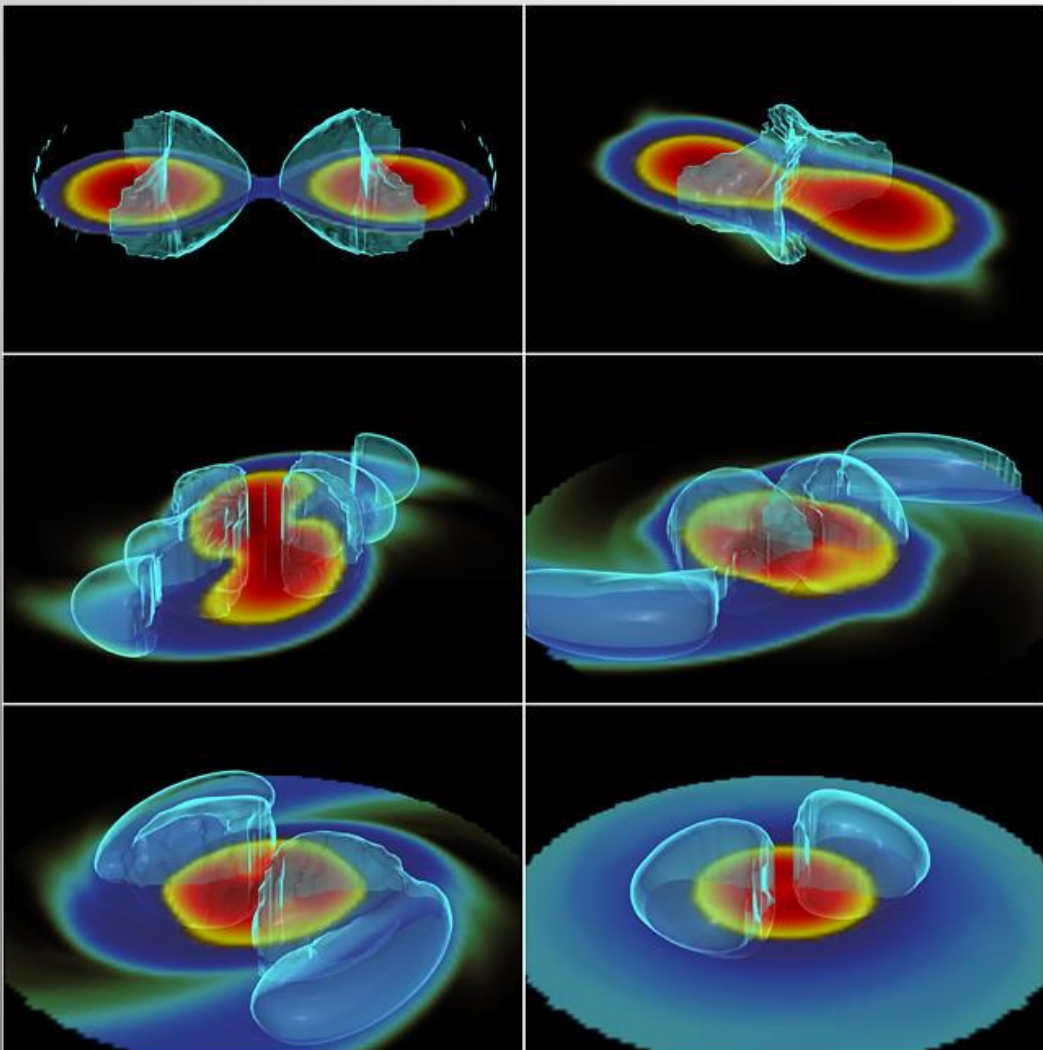
Кварковое вещество — «самодостаточно».
Для его устойчивости не нужна гравитация.
Т.е., могут существовать как странные звезды,
Так и маленькие комочки, капельки.



Страпельки могут встречаться
в космических лучах.
Это будут частицы с
большой массой, но с зарядом
относительно небольшим.

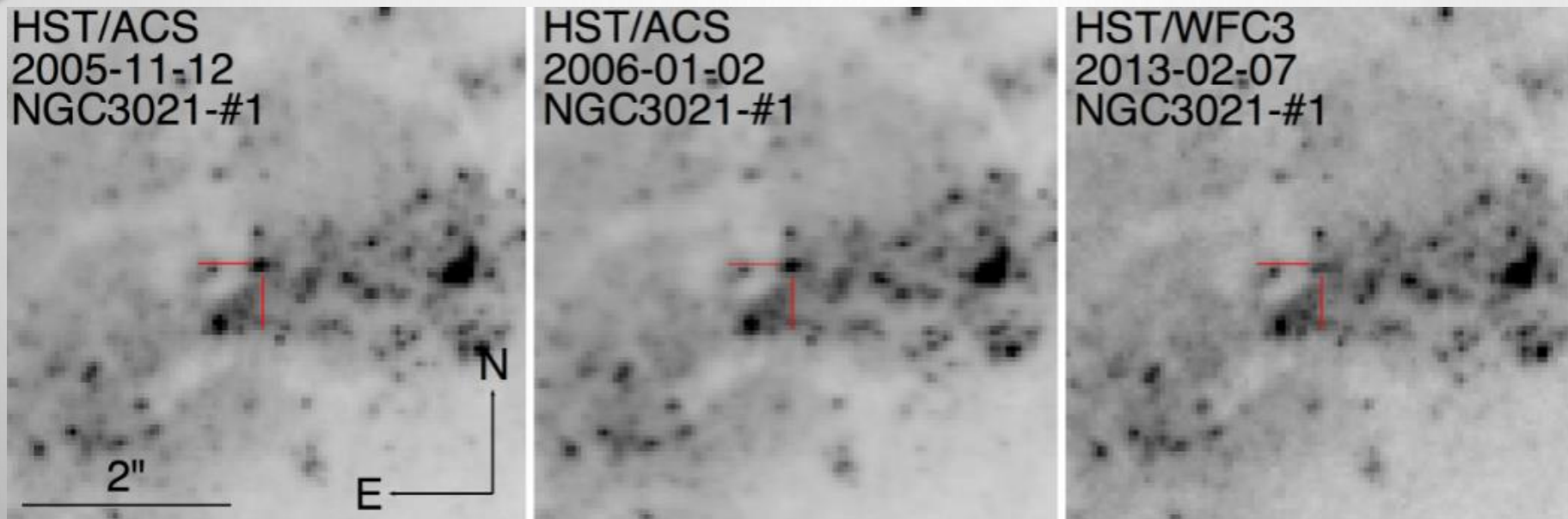
СТРАННАЯ КВАРКОВАЯ ЭПИДЕМИЯ

Если в недрах компактных объектов есть кварковое вещество, то после слияний оно будет выбрасываться. Далее, стрепельки могут попадать в другие нейтронные звезды, превращая их в кварковые...



AMS на МКС

УШЕДШИЕ БЕЗ ШУМА



Звезда
исчезла
без взрыва
сверхновой.

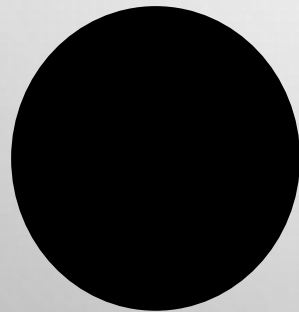
1507.05823

Авторы искали и нашли случай, когда массивная звезда исчезла, а никакой сверхновой не было видно. Они используют архивные данные Хаббловского телескопа для поиска исчезнувших (без взрыва) массивных звезд. Исследовано 15 галактик. Выделено несколько кандидатов. Детальный анализ показал, что одно событие действительно очень похоже на исчезновение желтого сверхгиганта (масса около 25-30 масс Солнца) без взрыва. Это примерно то, что и ожидалось, т.е., пусть и на очень низкой статистике, но подтверждает идею о "тихом коллапсе" некоторых массивных звезд. Хотя в статье приведен лишь один хороший кандидат, доля таких событий может быть довольно большой.

ЧТО ТАКОЕ ЧЕРНАЯ ДЫРА?

Для физика

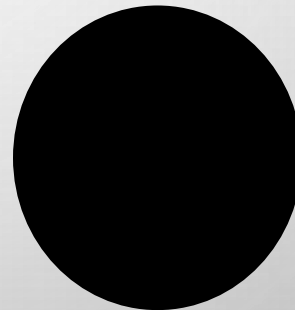
Обладает определенными внутренними свойствами



Объект, обладающий горизонтом.

Для астронома

Обладает определенными внешними проявлениями



Компактное (размер горизонта) массивное тело, не проявляющее признаков наличия поверхности, и чьи недра недоступны для наблюдений.

ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЧЕРНЫХ ДЫР: ДВА РЕАЛЬНЫХ И ДВА ГИПОТЕТИЧЕСКИХ



Звездные массы

Первичные



Сверхмассивные

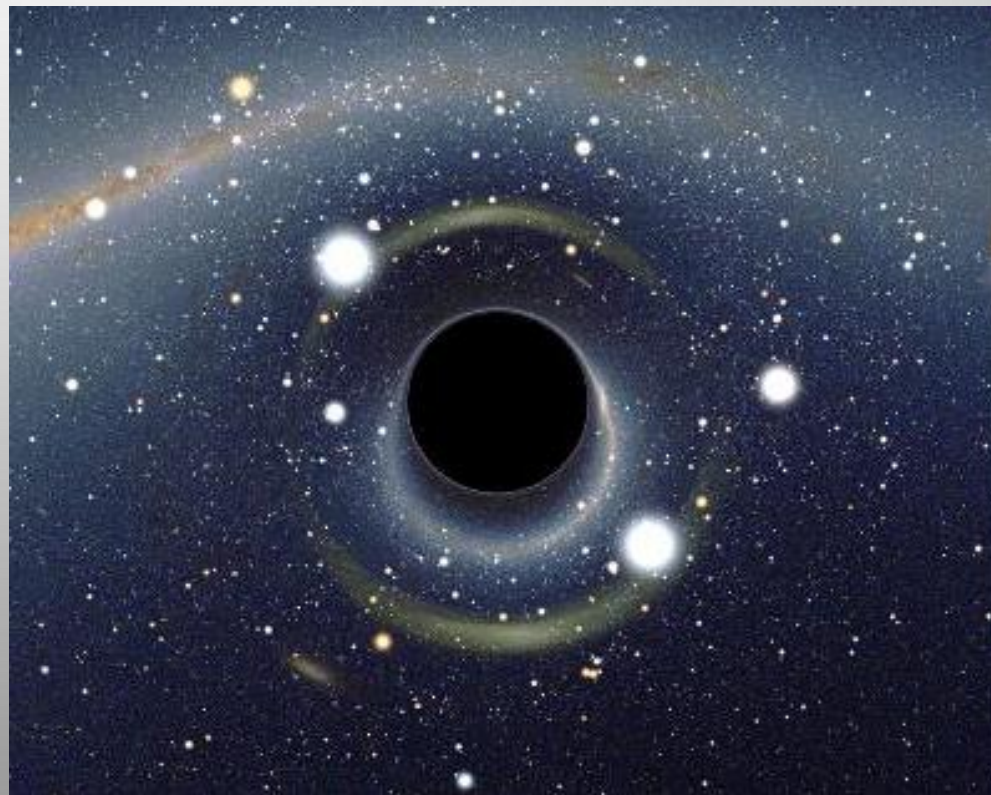


Промежуточные

ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ В ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ



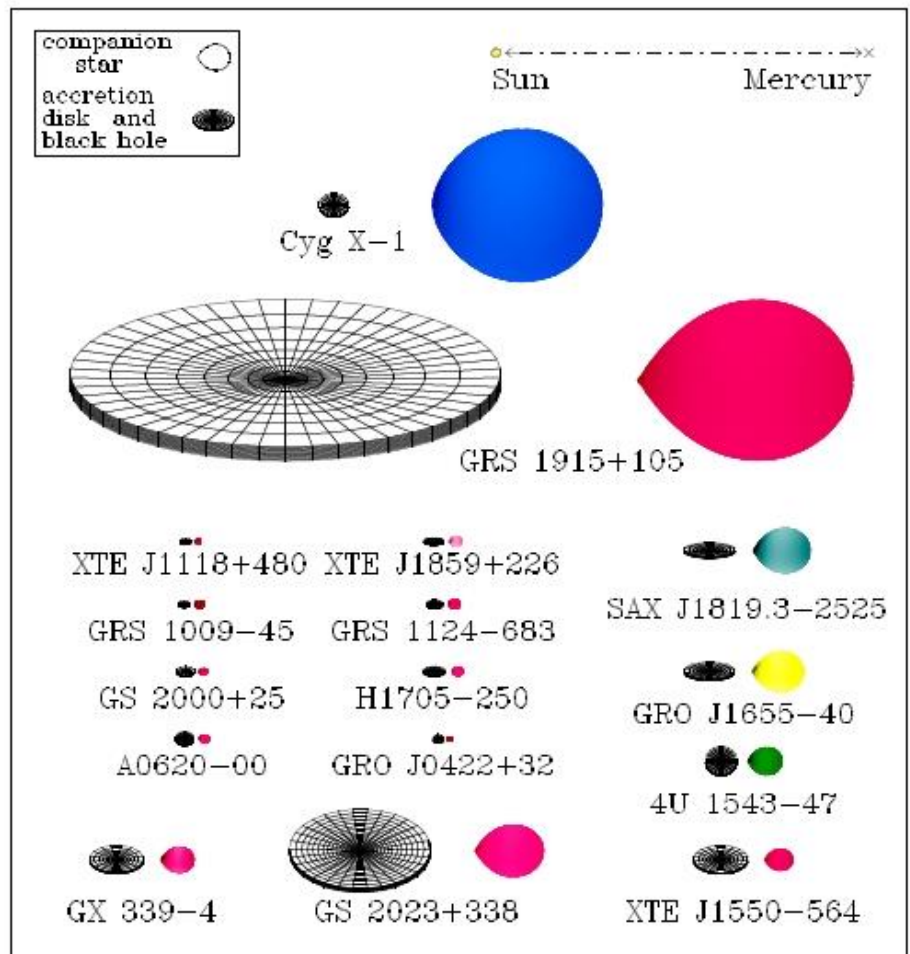
Система Лебедь X-1 была
выделена как кандидат
в двойную с черной дырой
в начале 70-х гг.



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

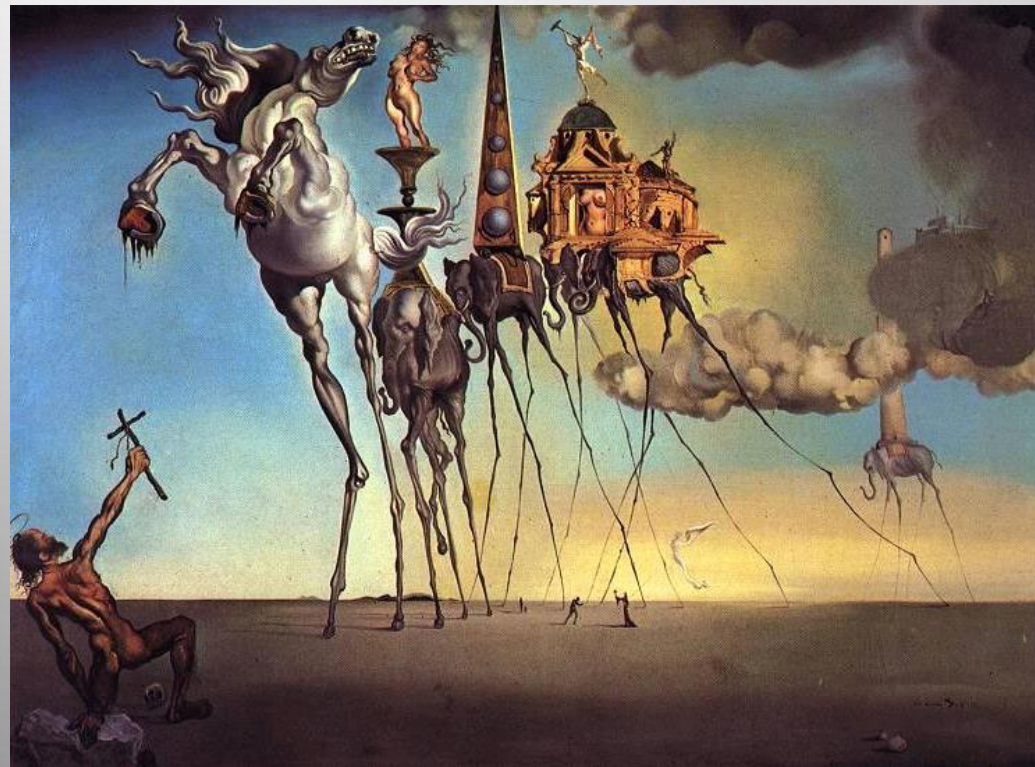
КАНДИДАТЫ В ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ

Black Hole Binaries in the Milky Way

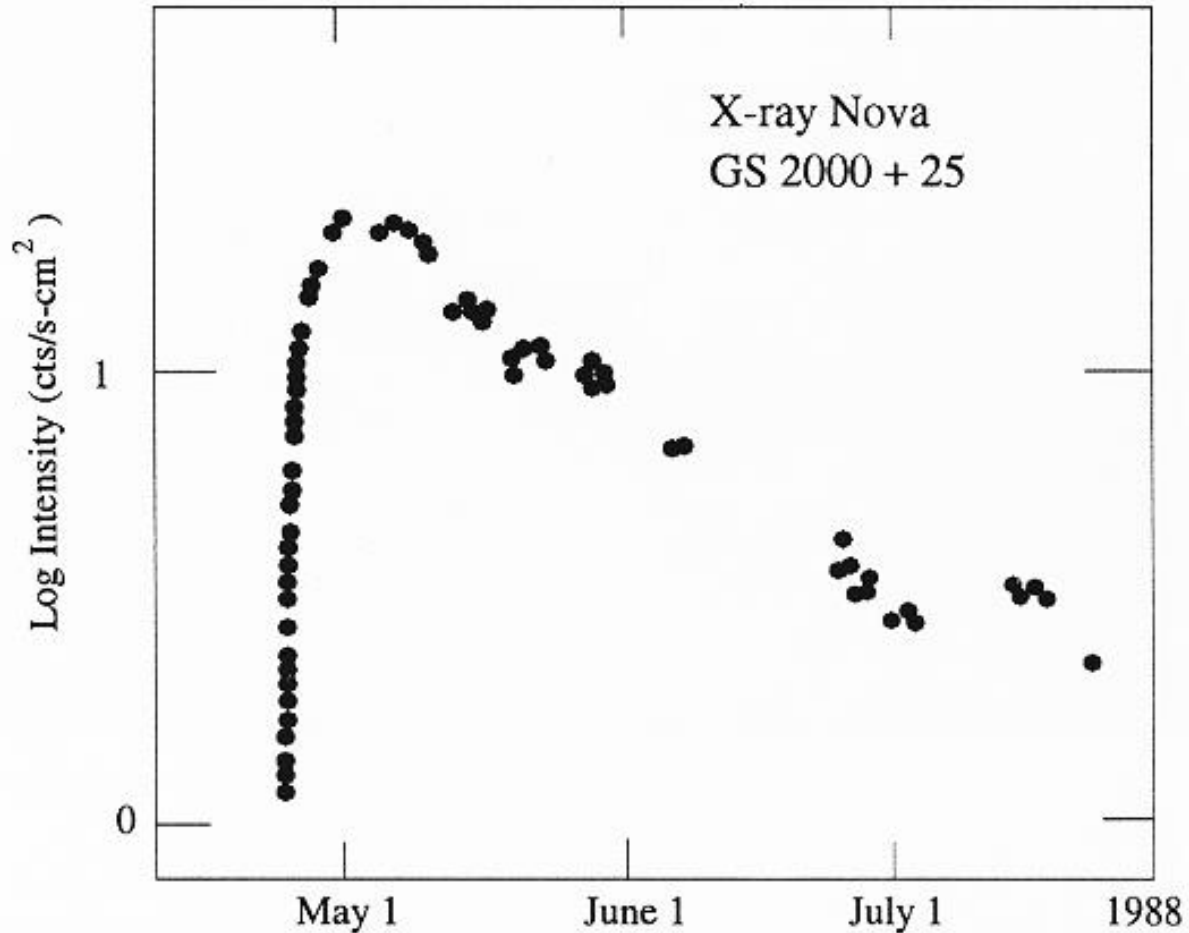


Почему считаем их кандидатами?

- нет пульсаций
- особенности излучения
- ТЯЖЕЛЫЕ!



РЕНТГЕНОВСКИЕ НОВЫЕ

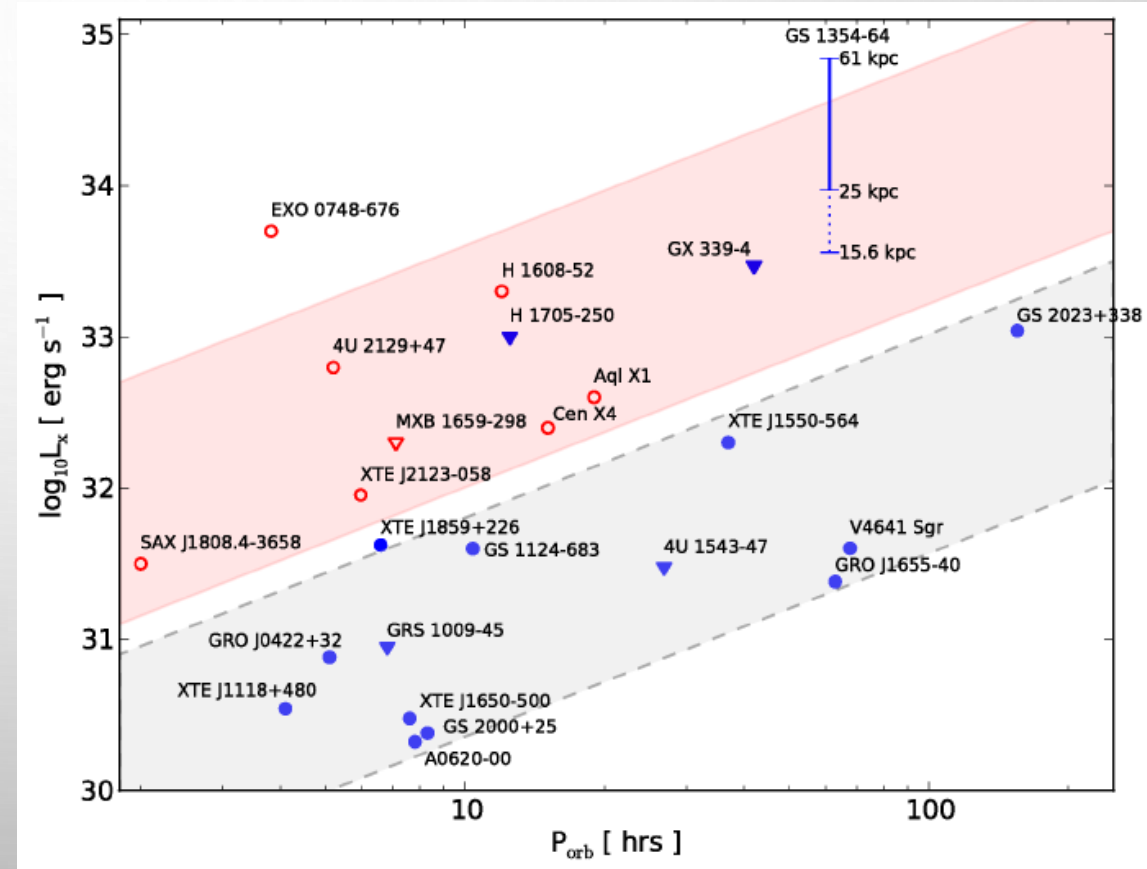
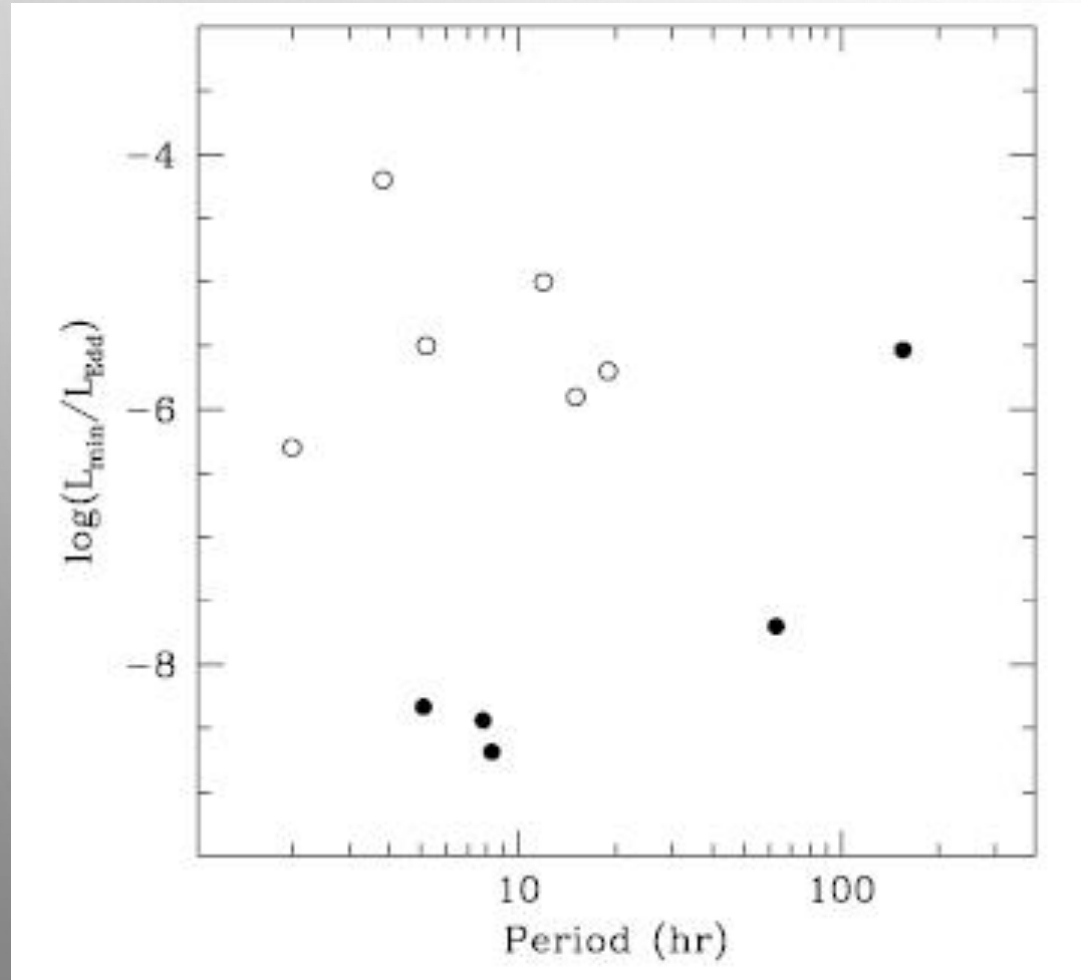


Маломассивные
рентгеновские двойные
с черными дырами.

Лучшие кандидаты.

В минимуме можно
увидеть вторичный
компонент, что
позволяет получить
хорошую оценку массы
черной дыры.

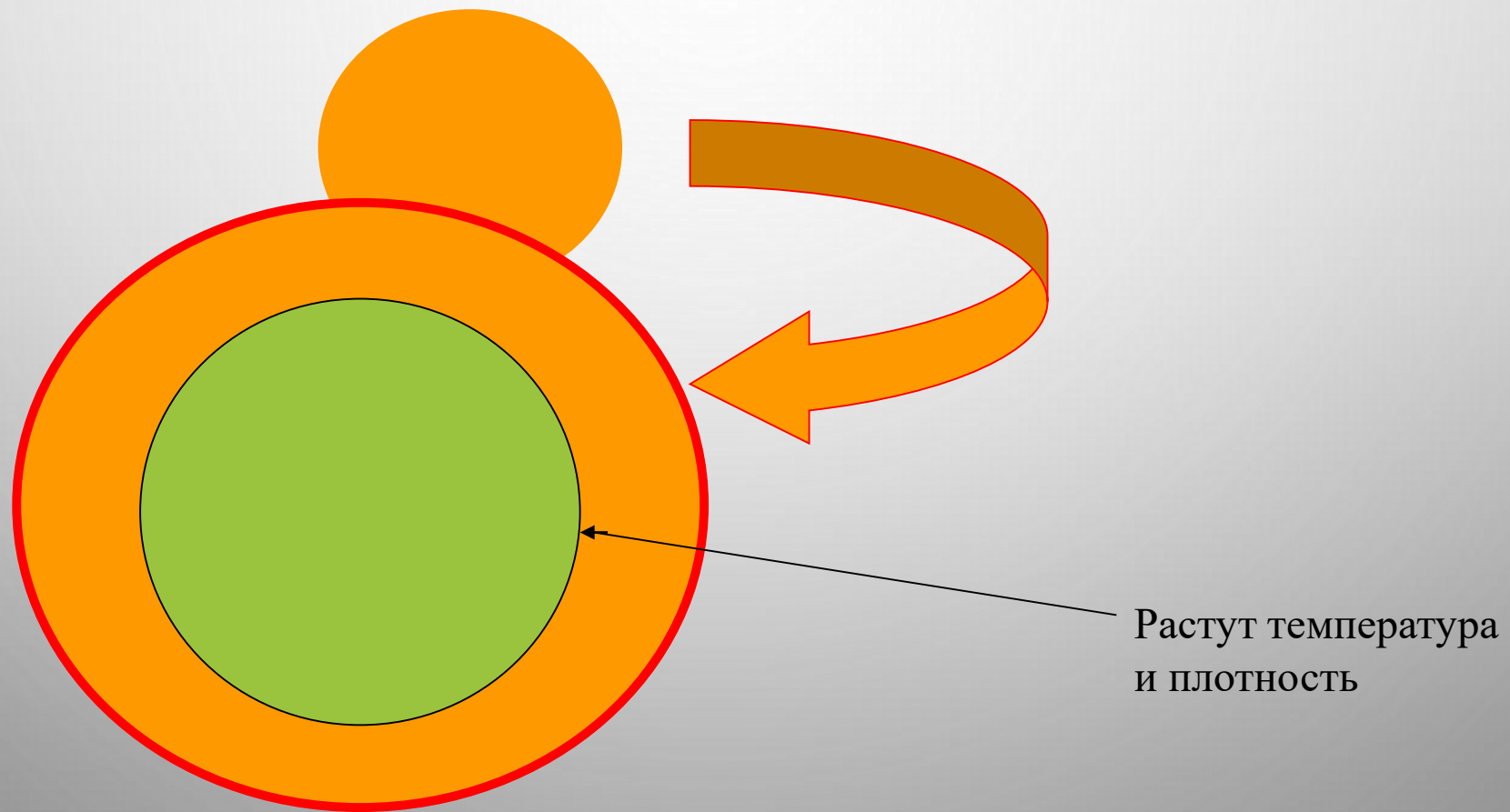
СВЕТИМОСТЬ В СПОКОЙНОМ СОСТОЯНИИ



Красный – системы с нейтронными звездами
Синие – системы с черными дырами

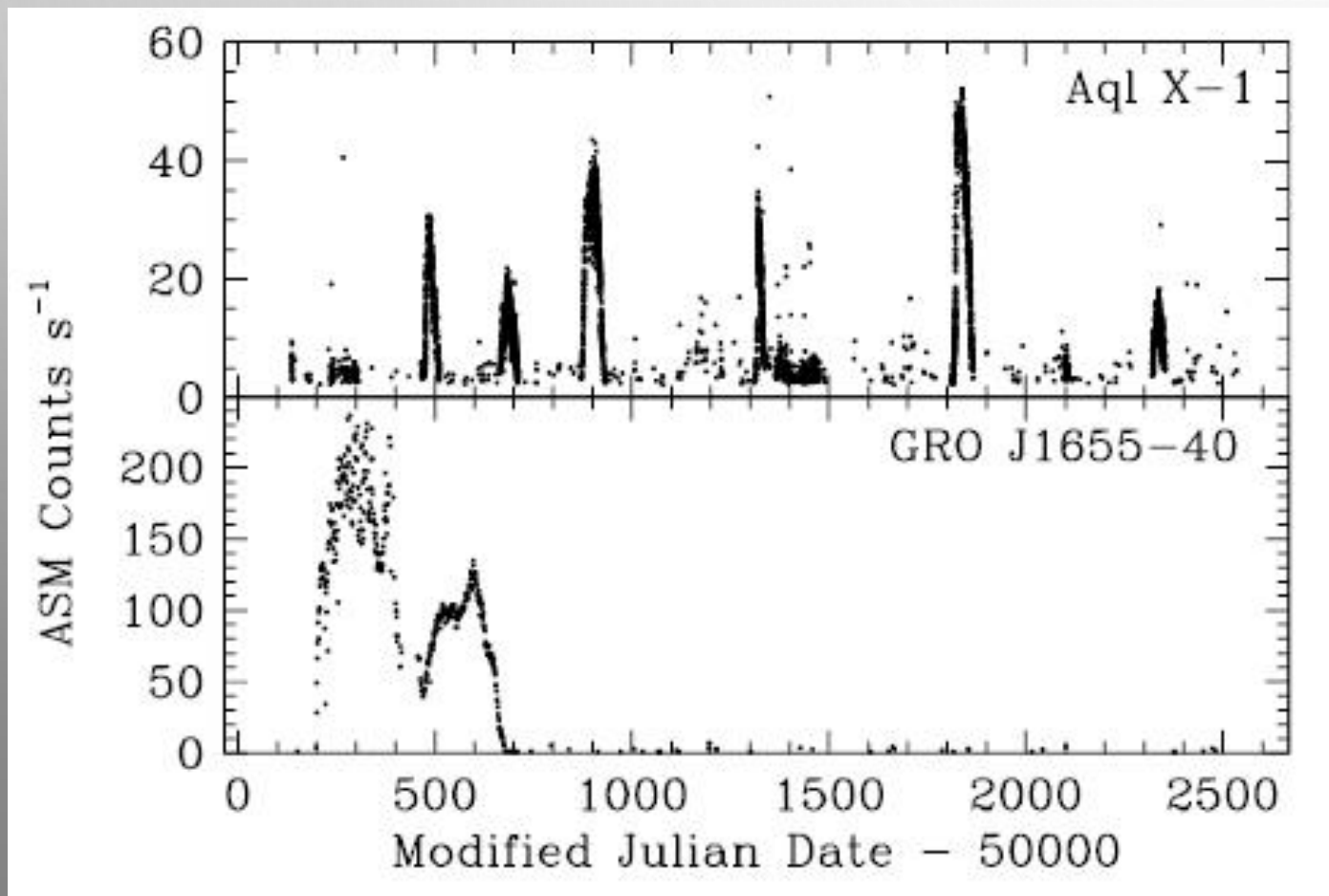
белые – нейтронные звезды черные – черные дыры

РЕНТГЕНОВСКИЙ БАРСТЕР



ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ С ДЫРАМИ И БЕЗ

У кандидатов в черные дыры нет барстерных вспышек, хотя, если бы не было горизонта, то они должны были бы быть в ряде потенциальных альтернативных моделей.



НЗ
←

ЧД
←

