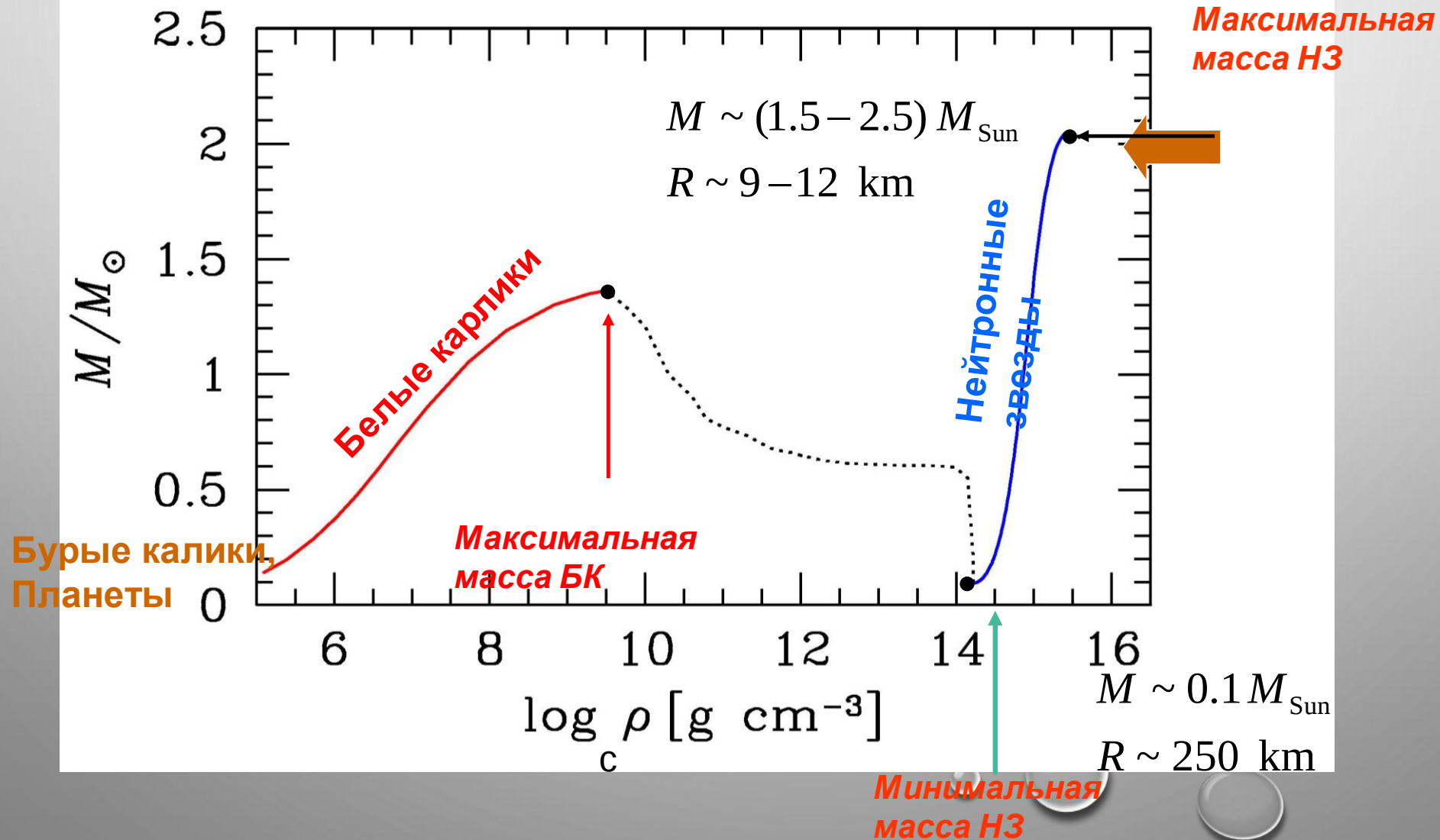


АСТРОФИЗИКА

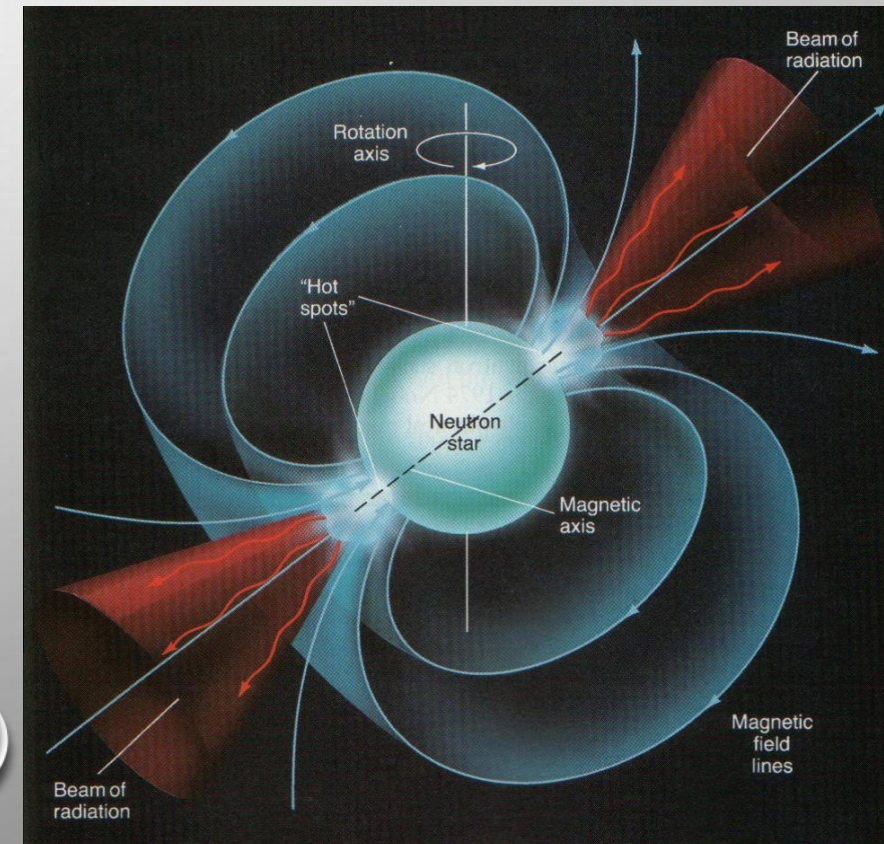
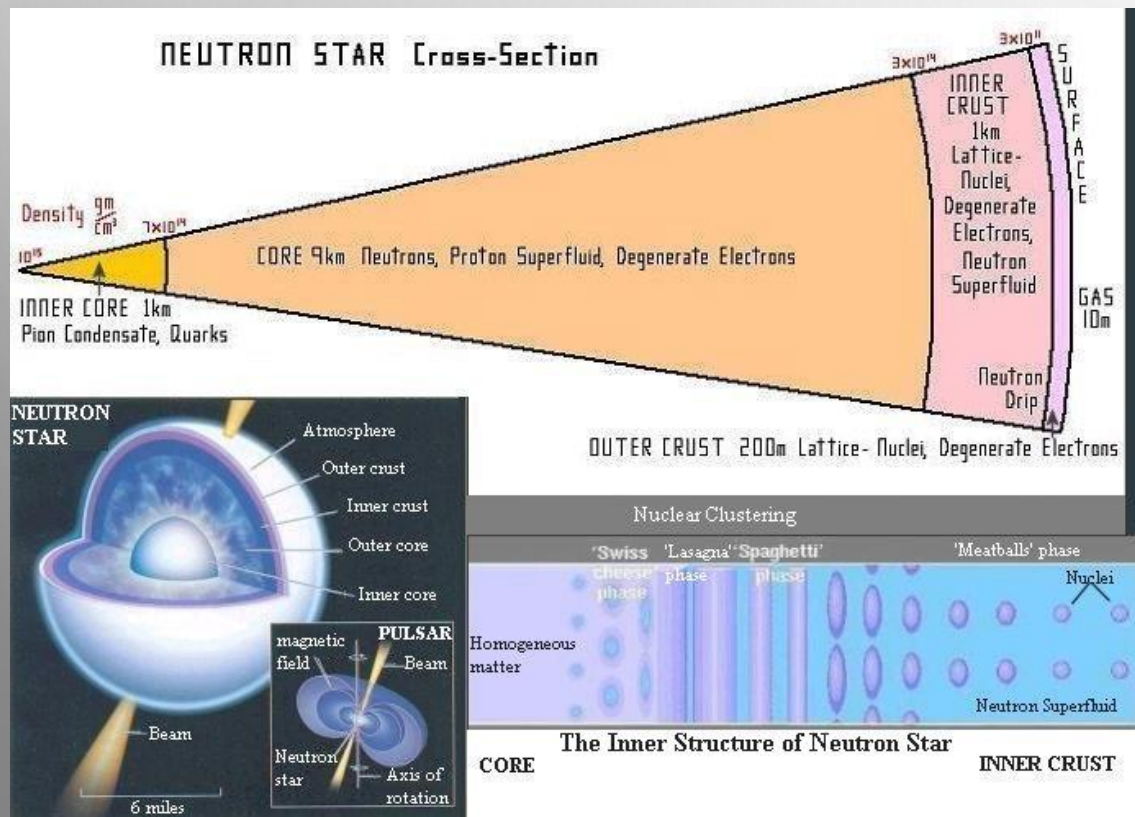
Лекция 8

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



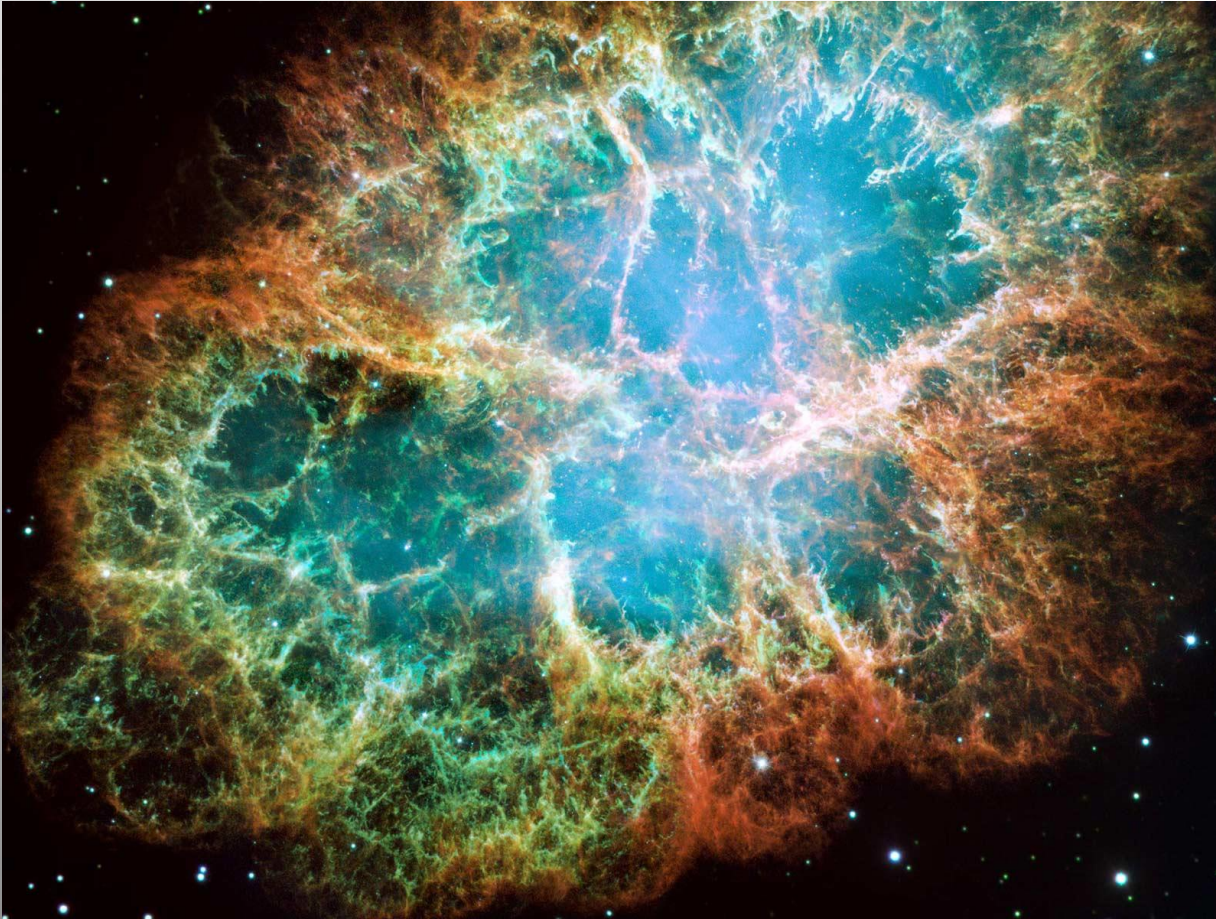
Бааде



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.

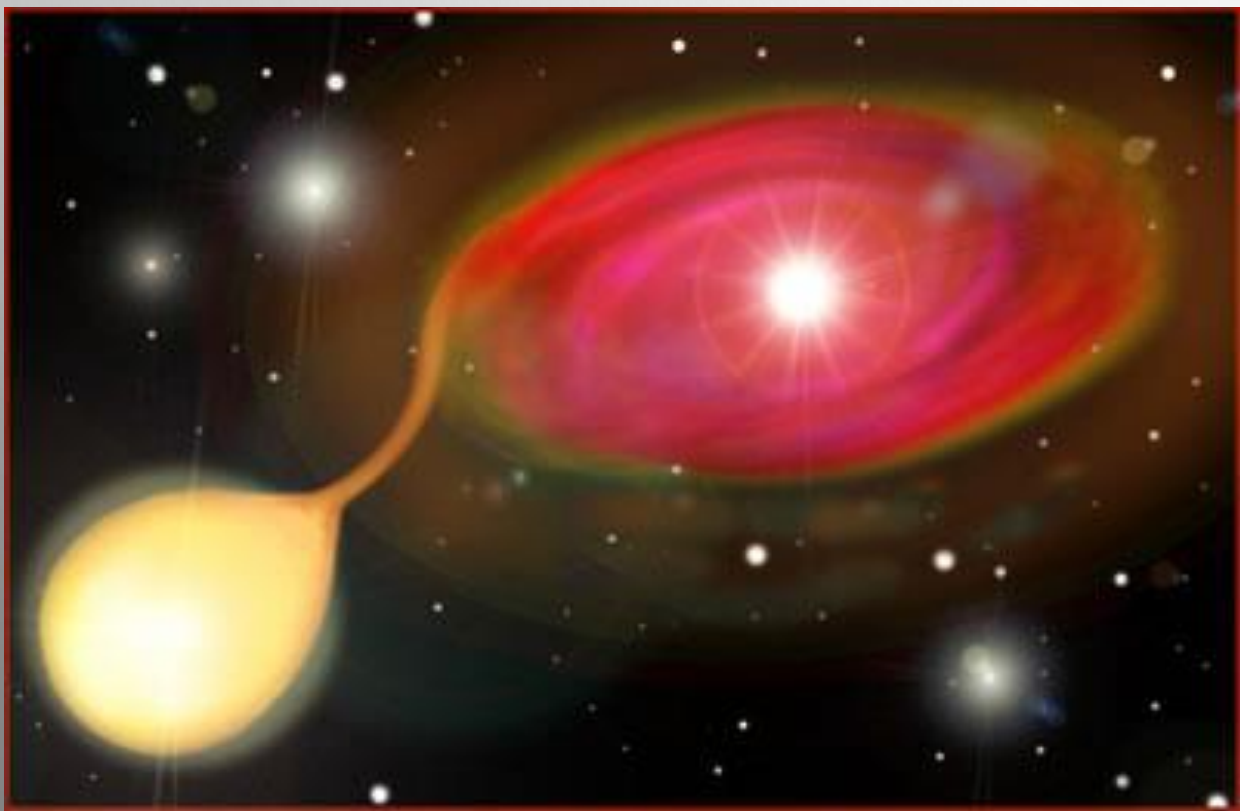
Внутри туманности может
существовать плерион.

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»....

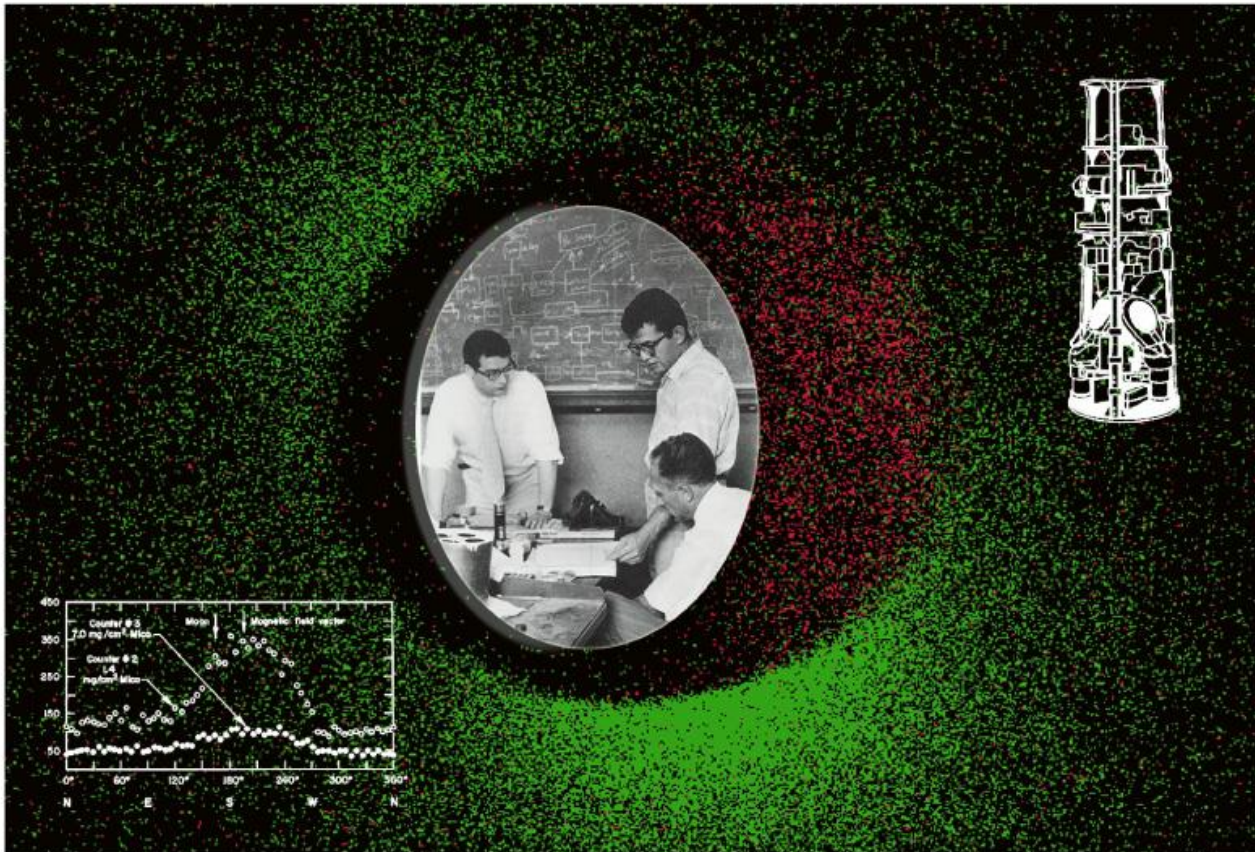


Сейчас известны сотни
рентгеновских двойных
с нейтронными звездами
в нашей и других галактиках.

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.

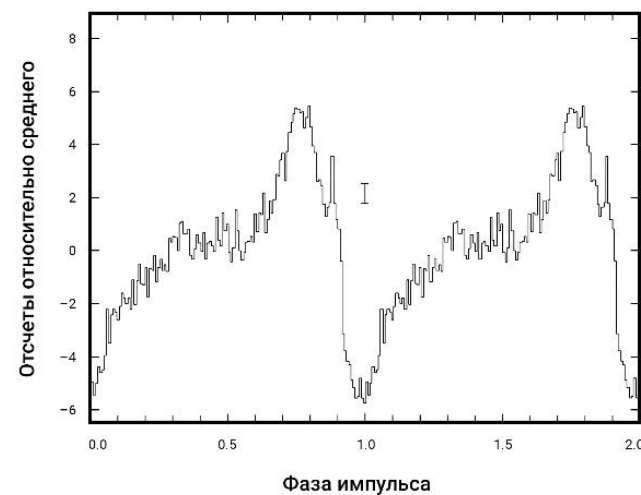
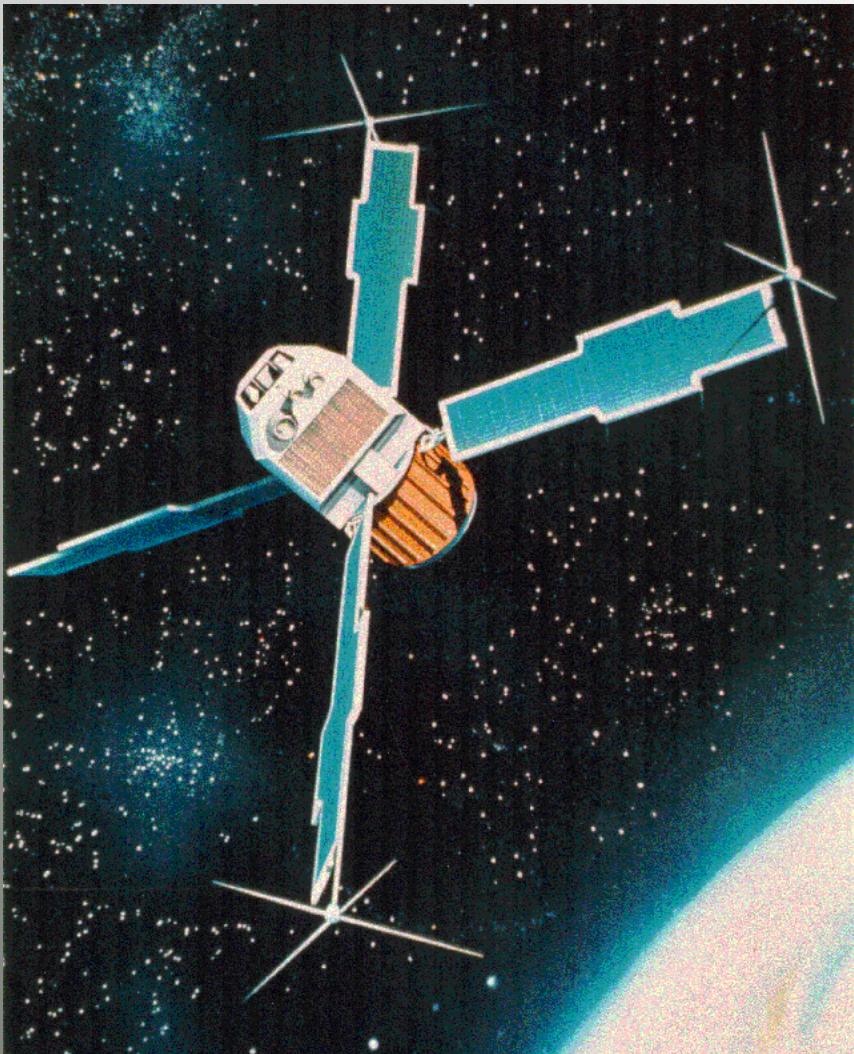
UHURU

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

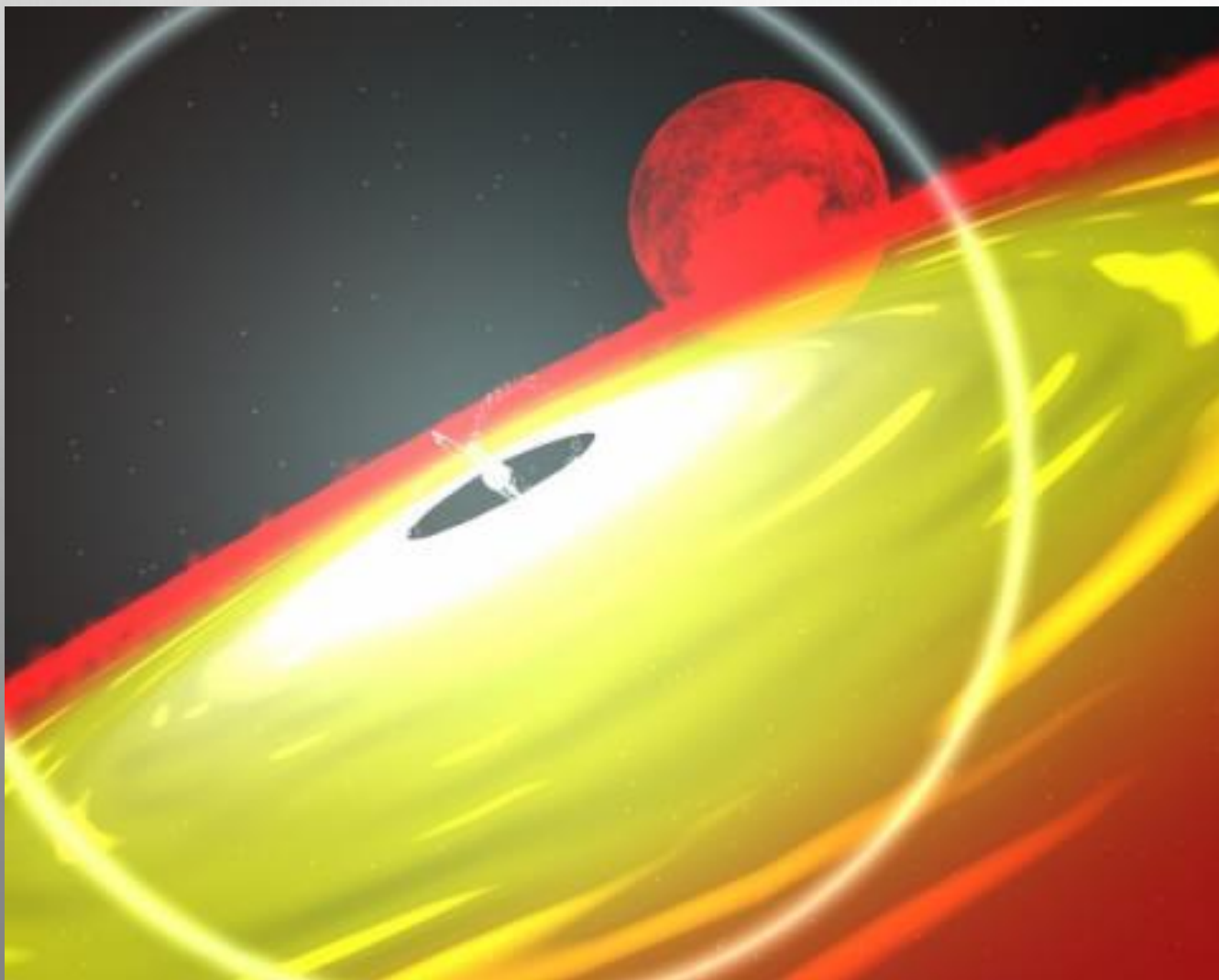
Другое название SAS-1

2-20 кэВ

Первый полный обзор неба.
339 источника.



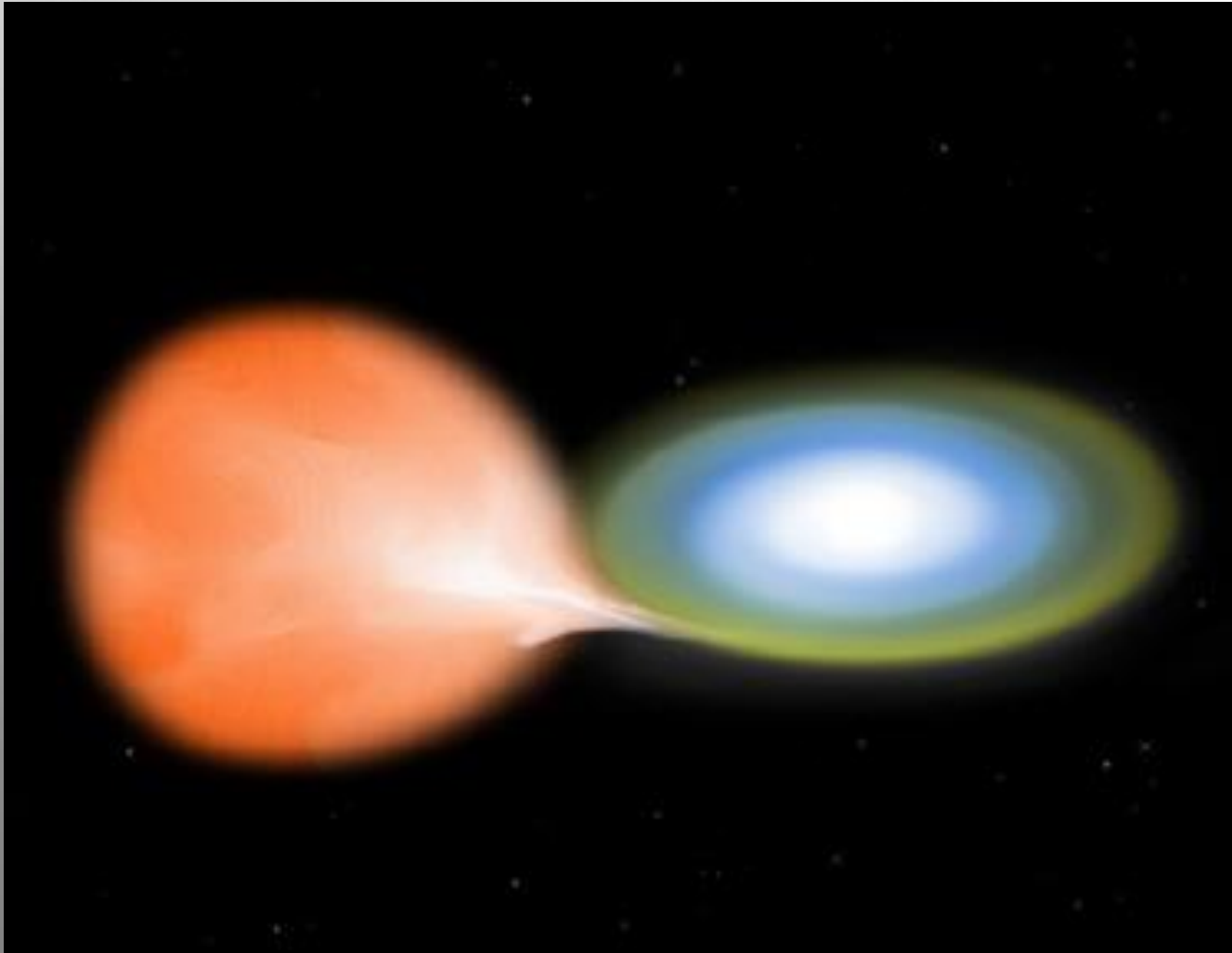
АККРЕЦИЯ В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ



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

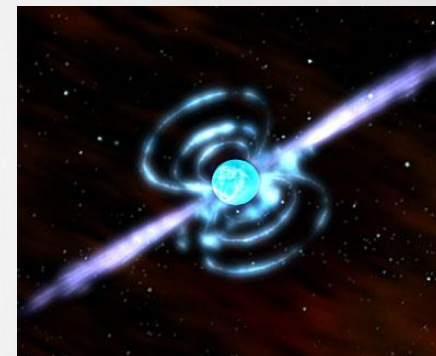
ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ



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

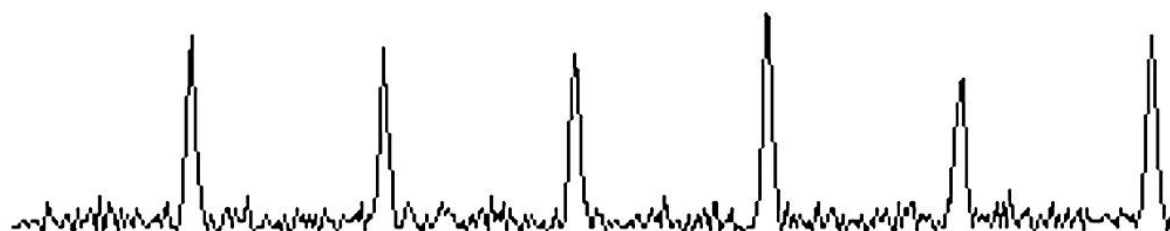
Сейчас в тесных двойных
системах известны многие
сотни нейтронных звезд.

ОТКРЫТИЕ !!!!



1967: Джоселин Белл. Радиопульсары.

Серендипическое открытие.



ПУЛЬСАР В КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

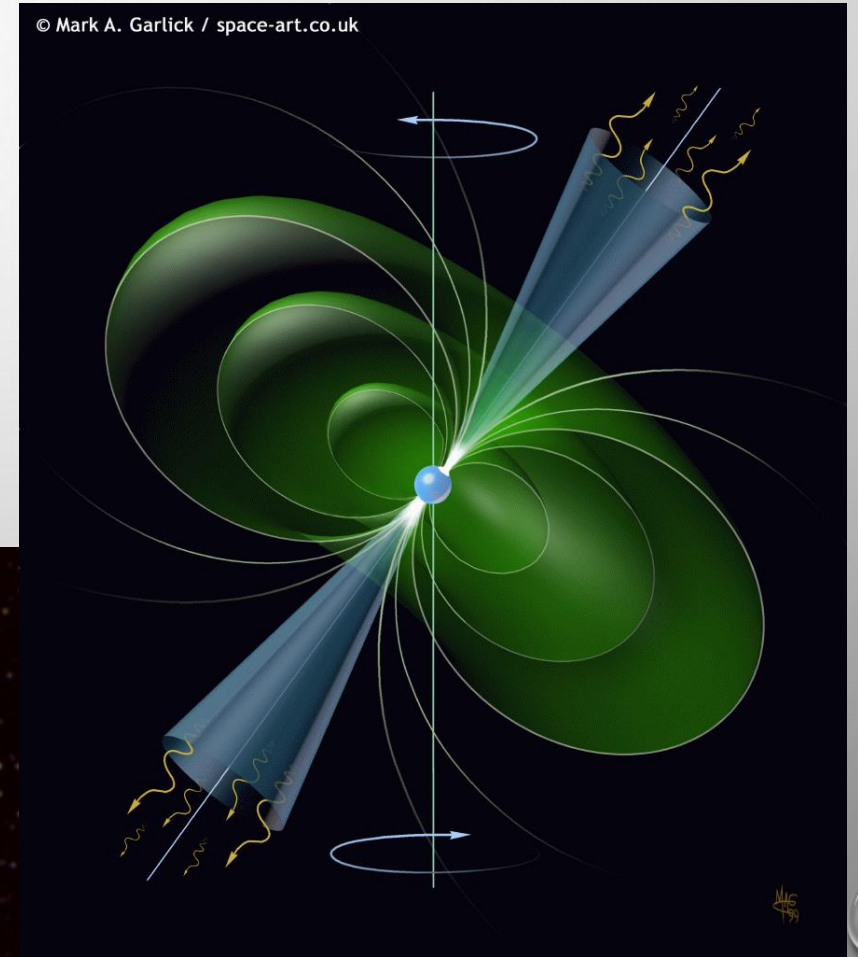
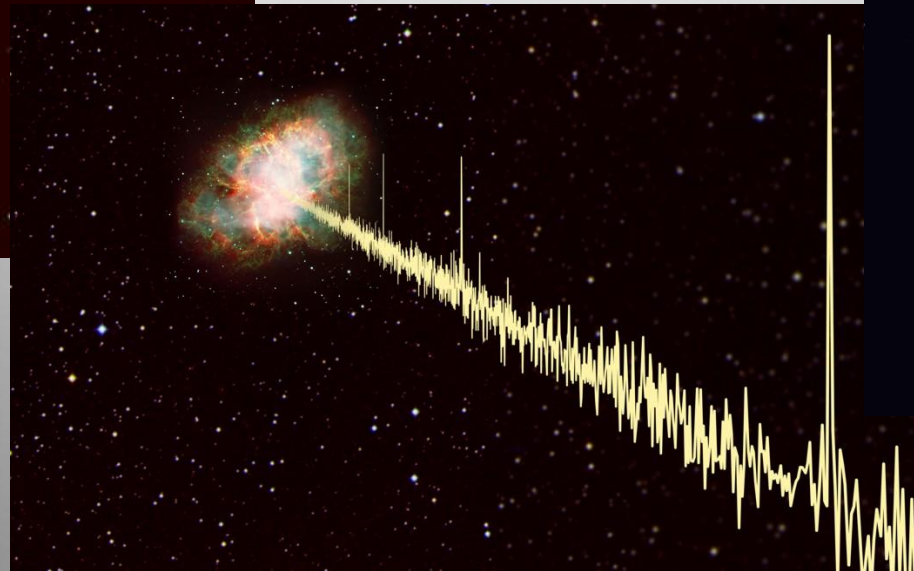
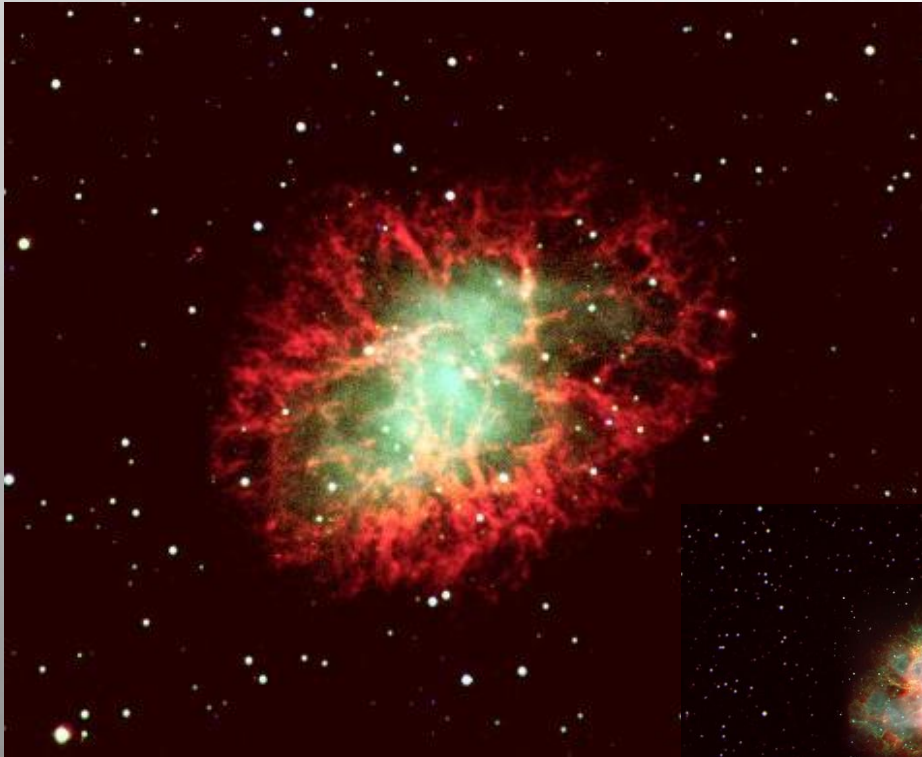
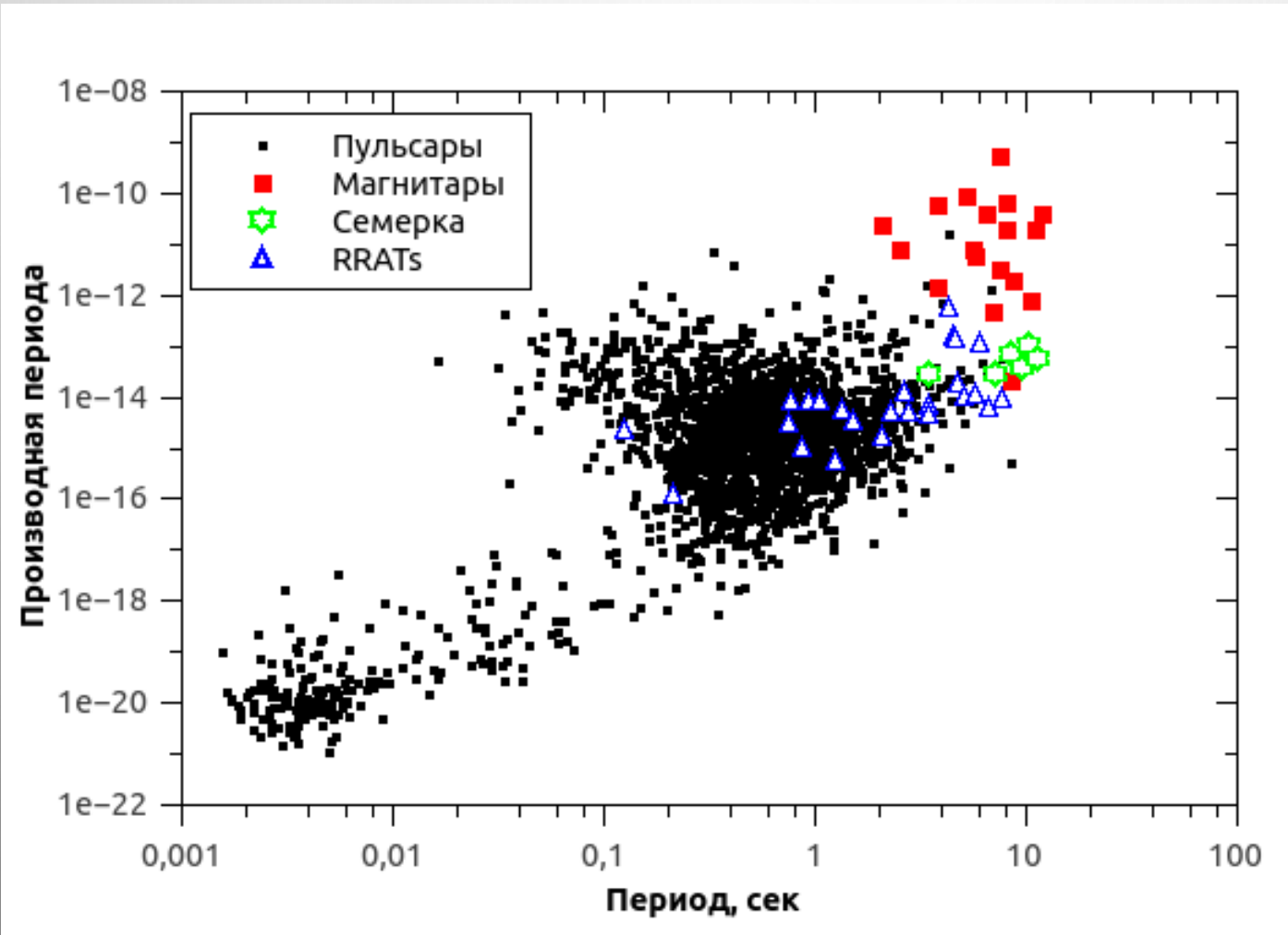
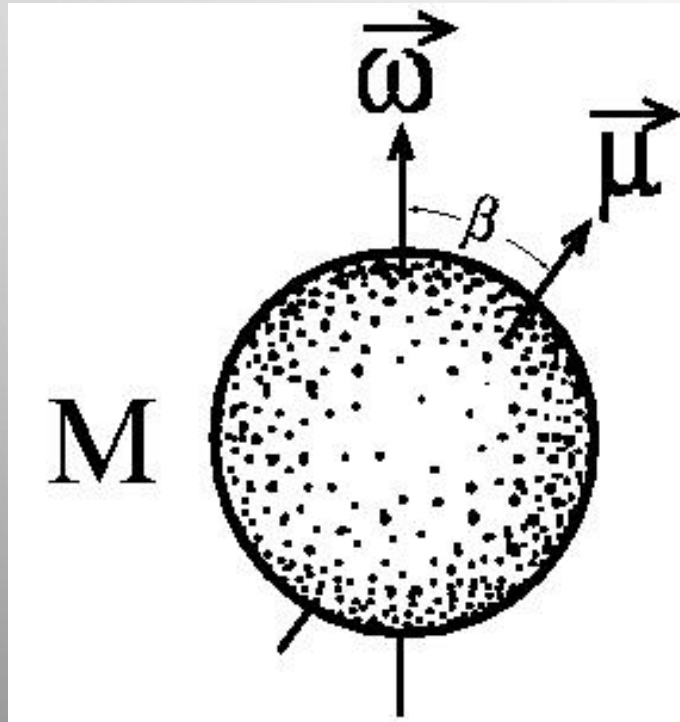


ДИАГРАММА ПЕРИОД – ПРОИЗВОДНАЯ ПЕРИОДА



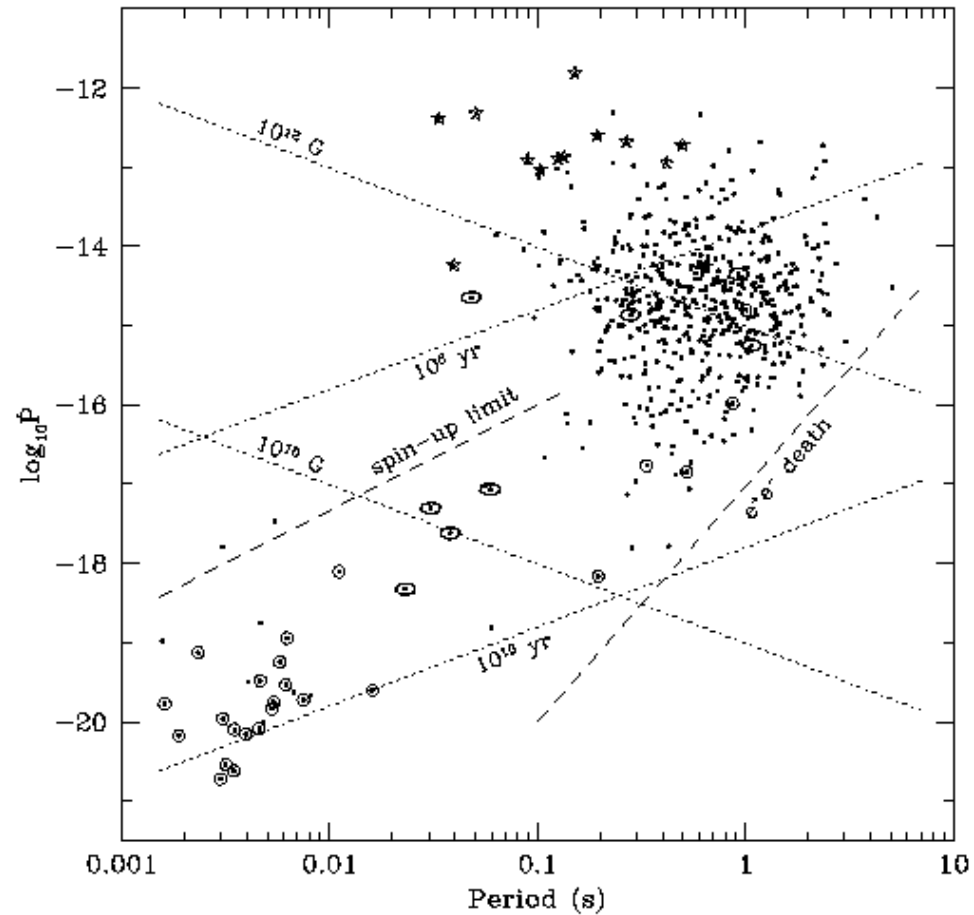
На диаграмме представлены только прямо наблюдаемые величины, которые легко и очень точно измеряются.

МАГНИТНЫЙ РОТАТОР

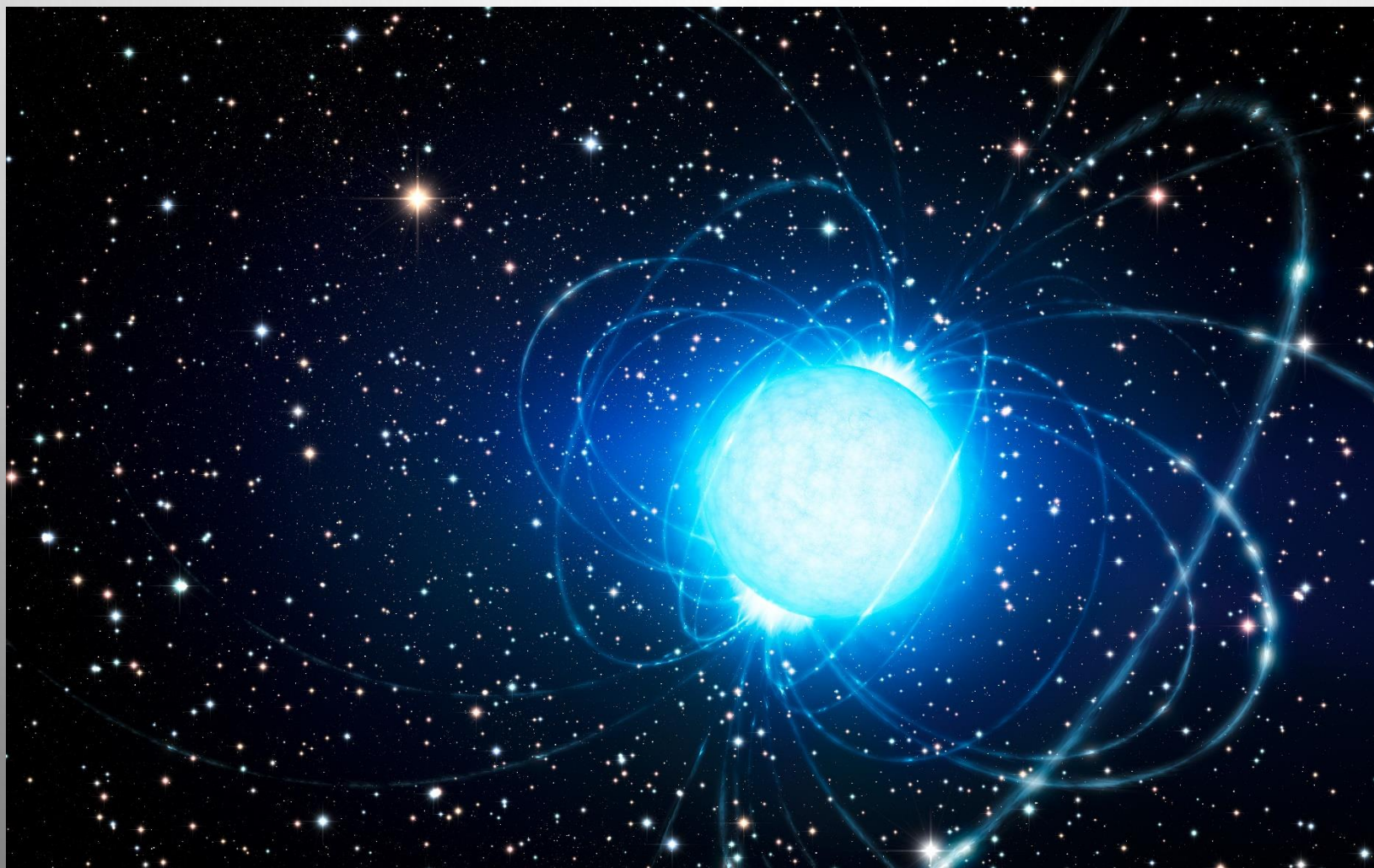


$$L_m = \frac{2}{3} \frac{\mu^2 \omega^4}{c^3} \sin^2 \beta = \kappa_t \frac{\mu^2}{R_l^3} \omega,$$

$$B \sim 3.2 \times 10^{19} (PdP/dt)^{1/2} \text{ G.}$$



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ВРАЩЕНИЕ



$$t_p = \frac{2\tau_c}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{n-1} \right]$$

Характеристический возраст.

Предполагая, что начальный период вращения пульсара мал, а индекс торможения n равен 3 (как в магито-дипольной формуле), мы можем получить оценку возраста.

НОВЫЙ ЗООПАРК НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

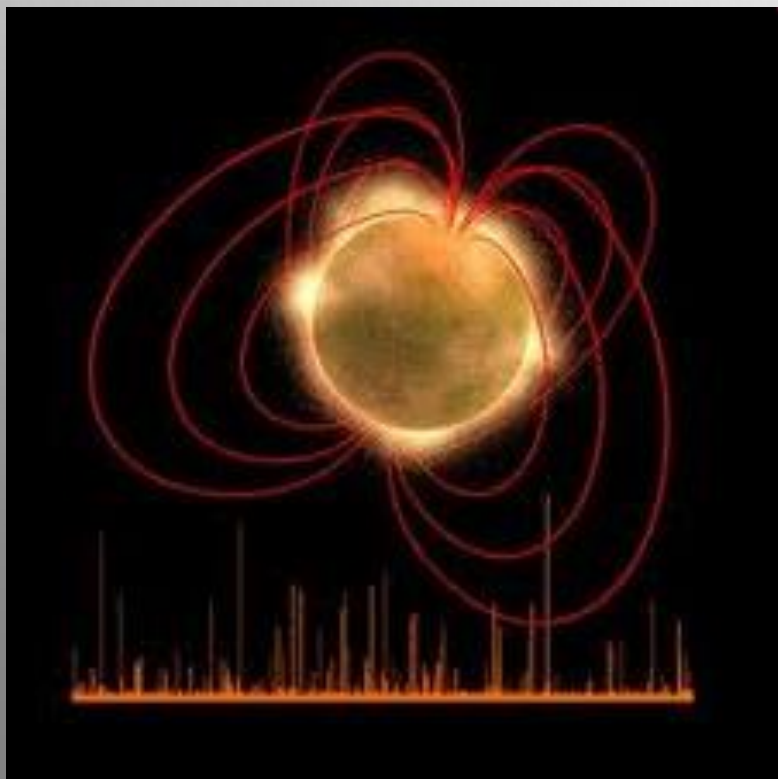


В последние 15 лет стало ясно, что нейтронные звезды могут рождаться очень разными, совсем непохожими на обычные радиопульсары типа Краба.

- 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

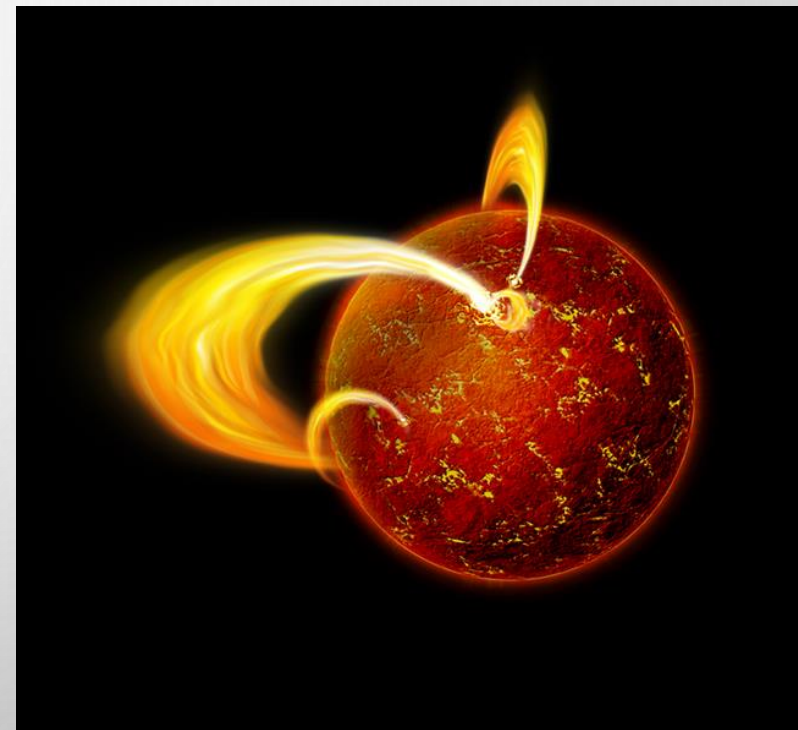
Нейтронные звезды, чья активность в основном связана с выделением энергии магнитного поля. Обычно поля очень велики.



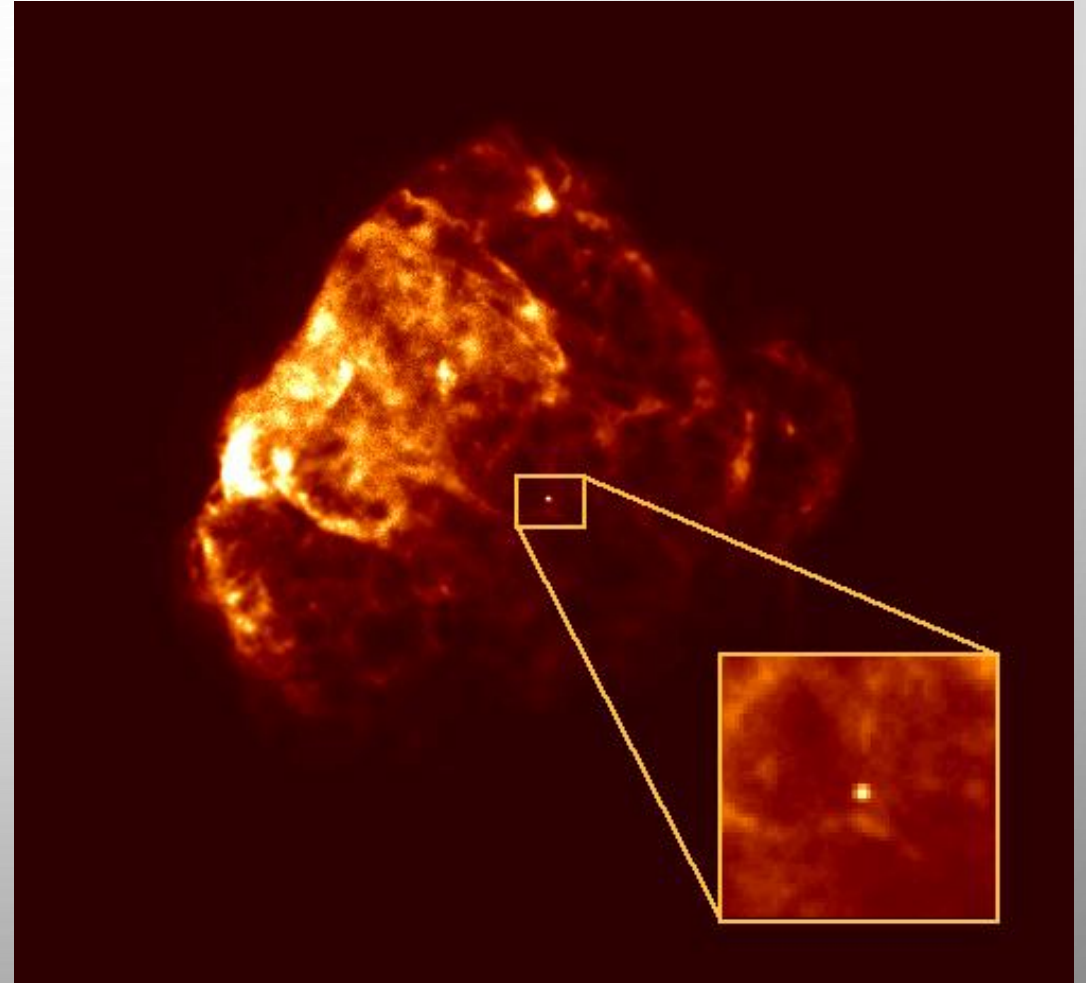
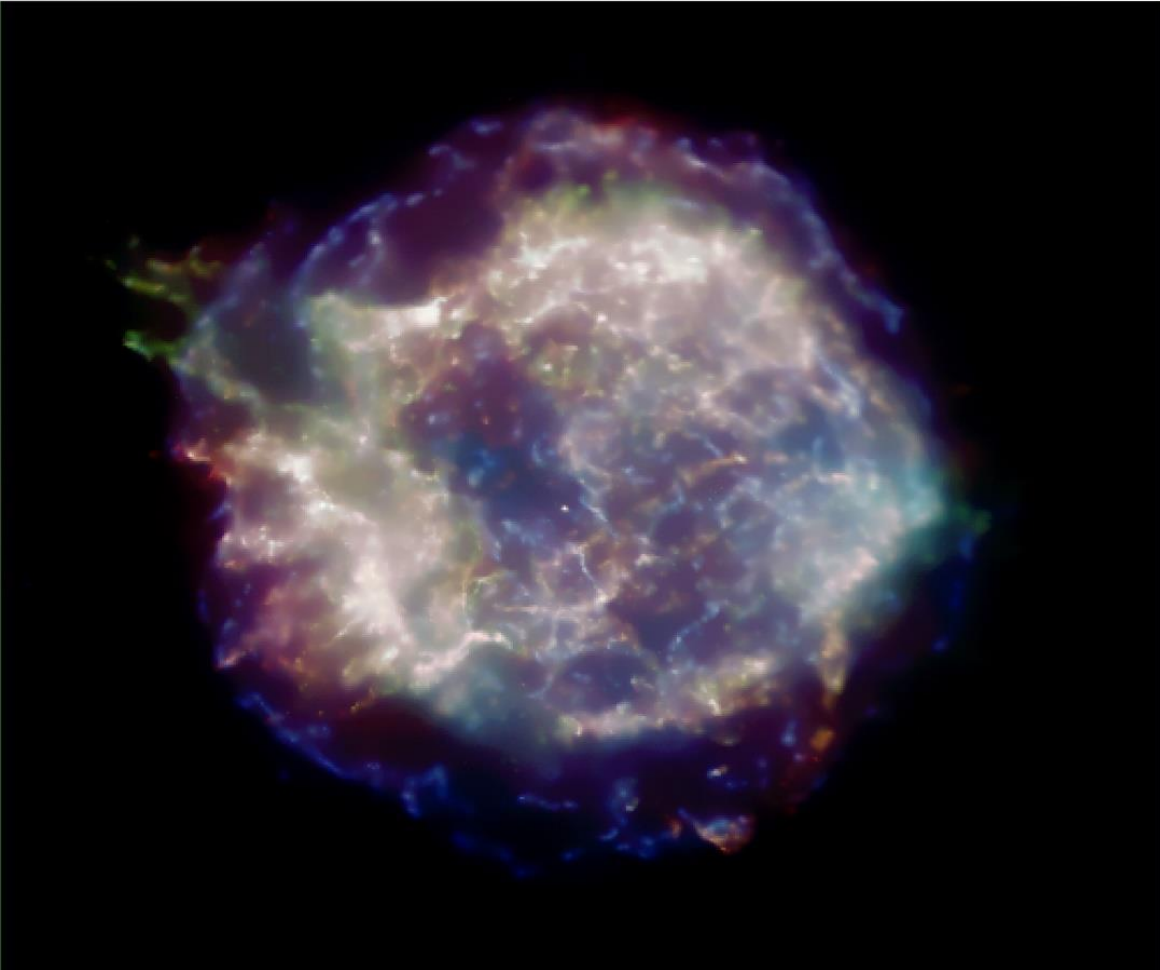
Основными кандидатами в магнитары являются аномальные рентгеновские пульсары и источники мягких повторяющихся гамма-всплесков.

Магнитные поля 10^{14} – 10^{15} Гс

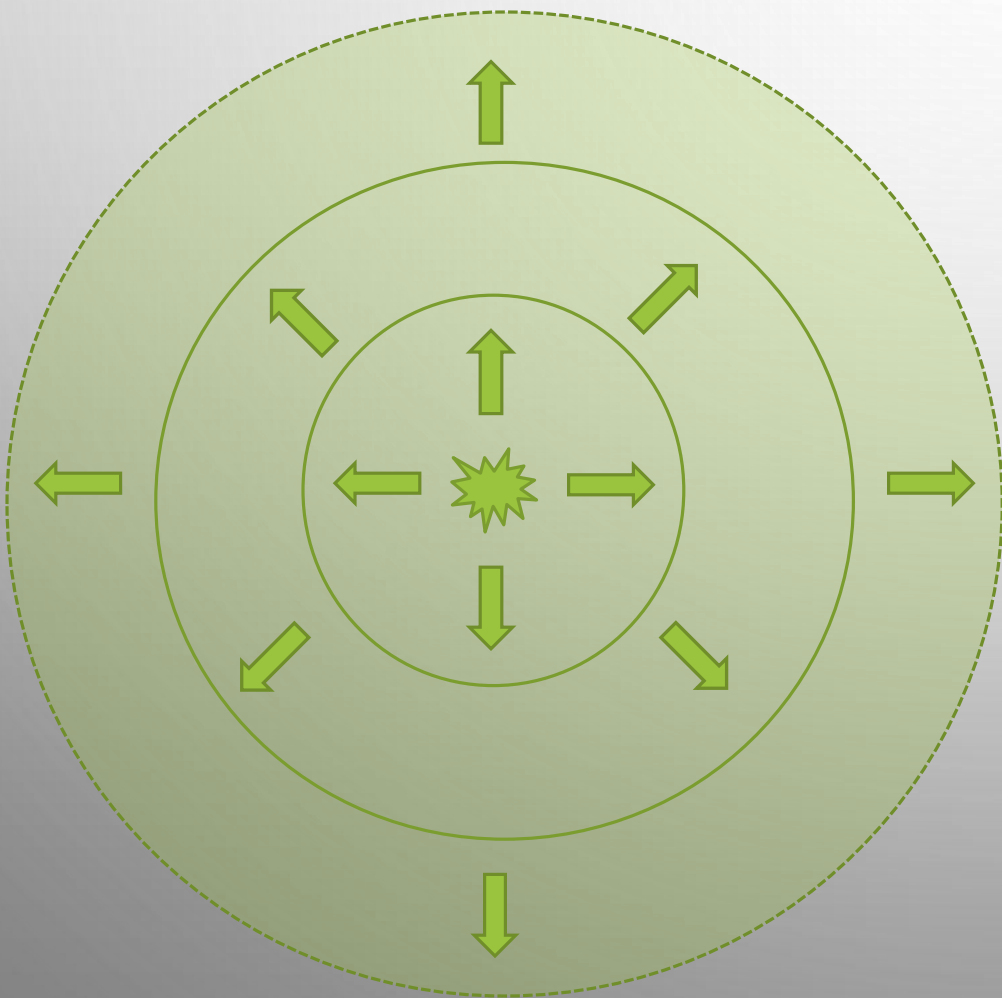
Расходуется энергия магнитного поля. Иногда – постепенно, иногда – в виде вспышек.



ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ В ОСТАТКАХ СВЕРХНОВЫХ



РАСШИРЕНИЕ ОСТАТКА

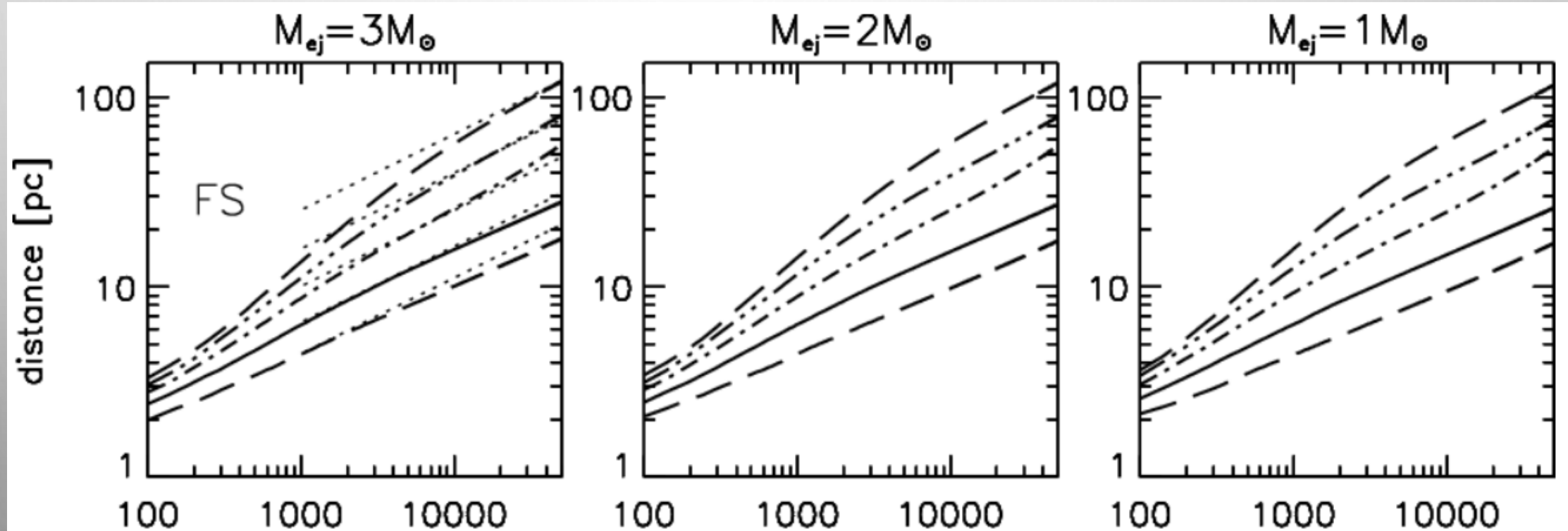


Построены модели для
расширения остатков
в разной среде.

1. Свободный разлет $r \sim t^{6/7}$
2. Нагревание вещества $r \sim t^{2/5}$
3. Торможение

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ

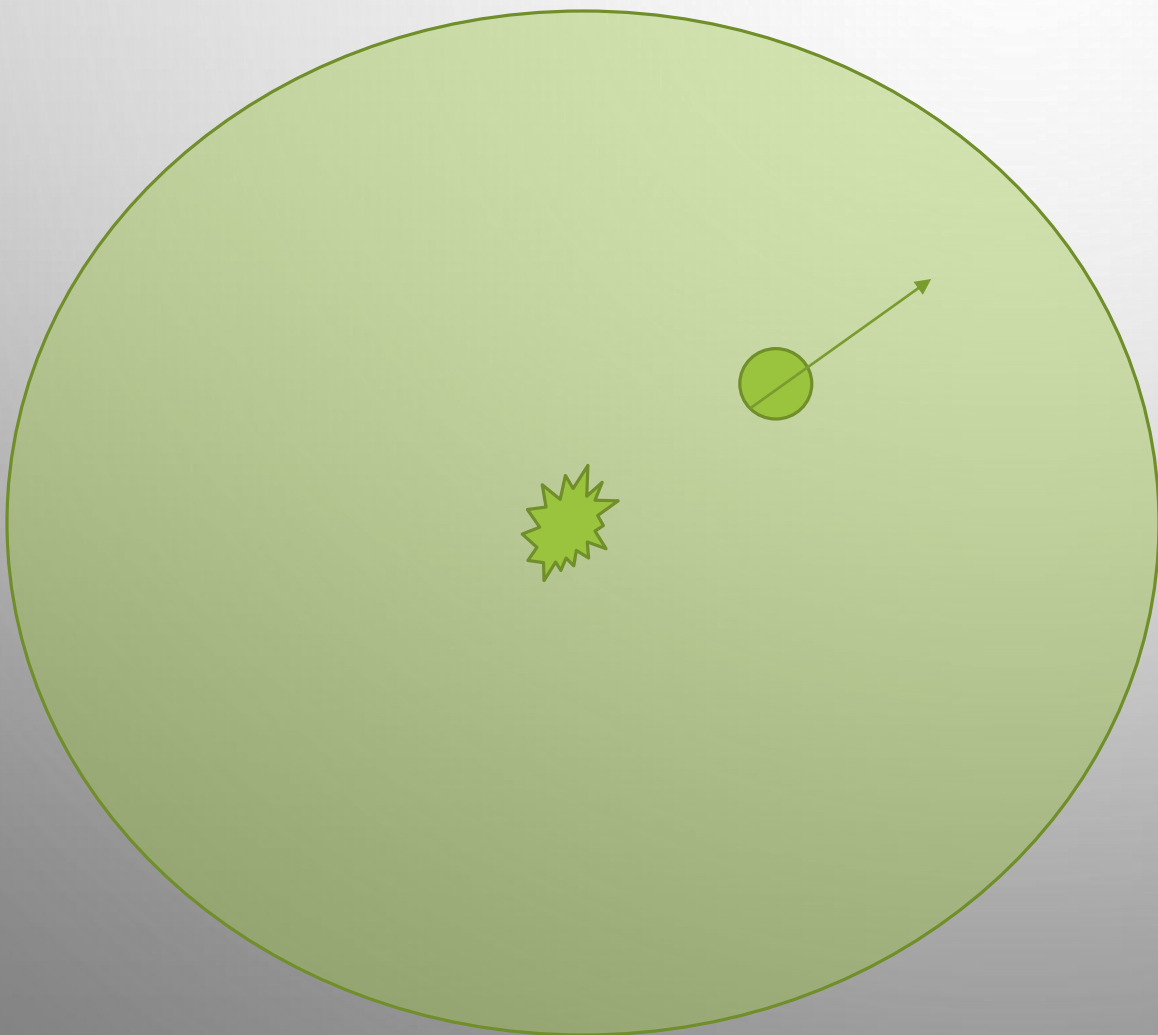
Ferreira, de Jager (2008)



Виден выход на т.н. седовскую стадию (ее наклон показан пунктиром $r \sim t^{2/5}$).
Разные кривые построены для разных плотностей МЗС (от 10^{-23} г/см³).

Наблюдаемые параметры остатка позволяют оценить его возраст.

СМЕЩЕНИЕ НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

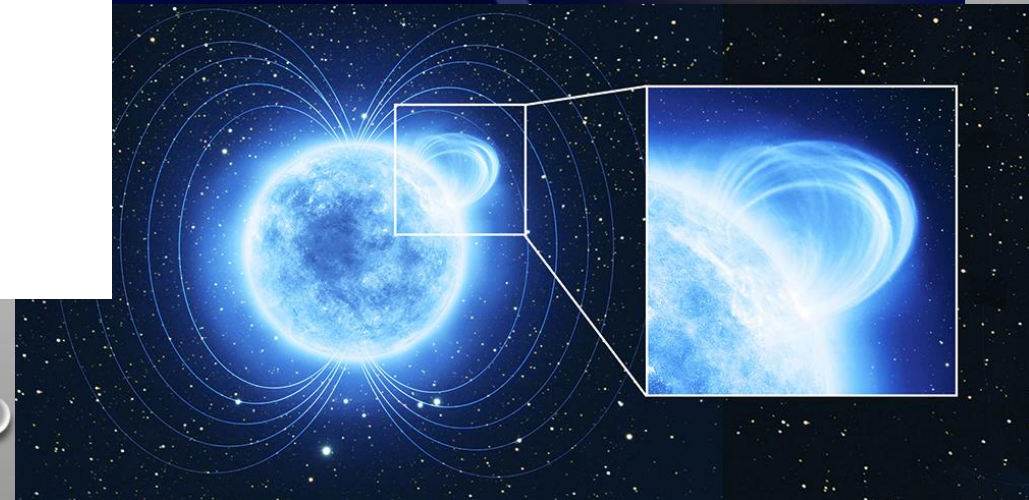
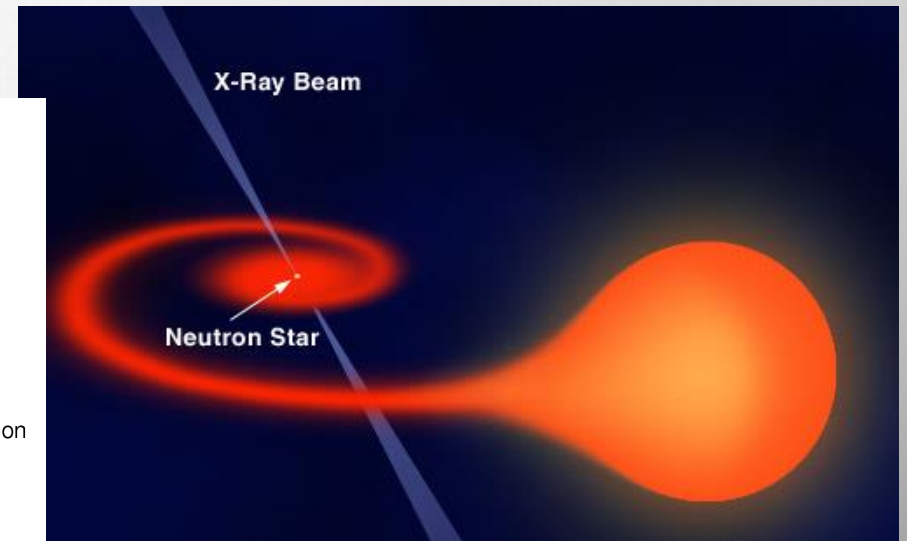
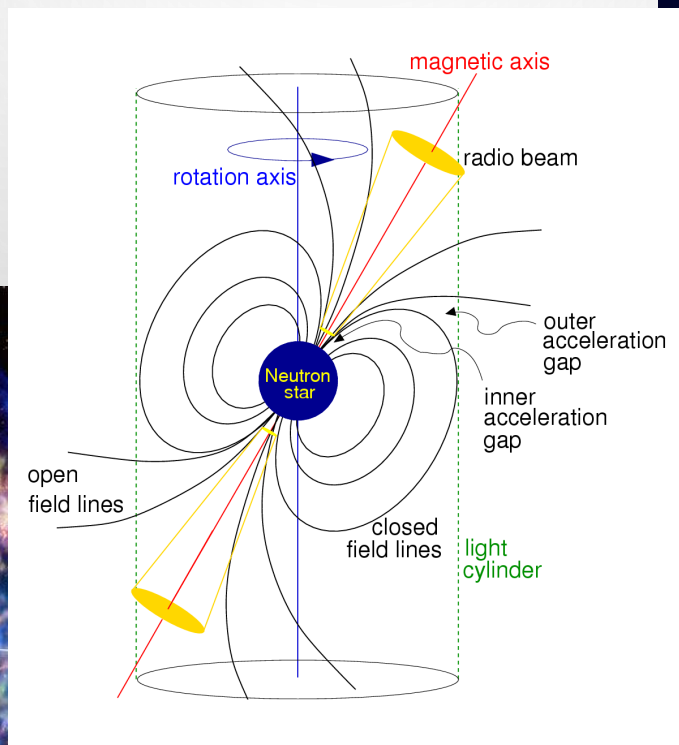
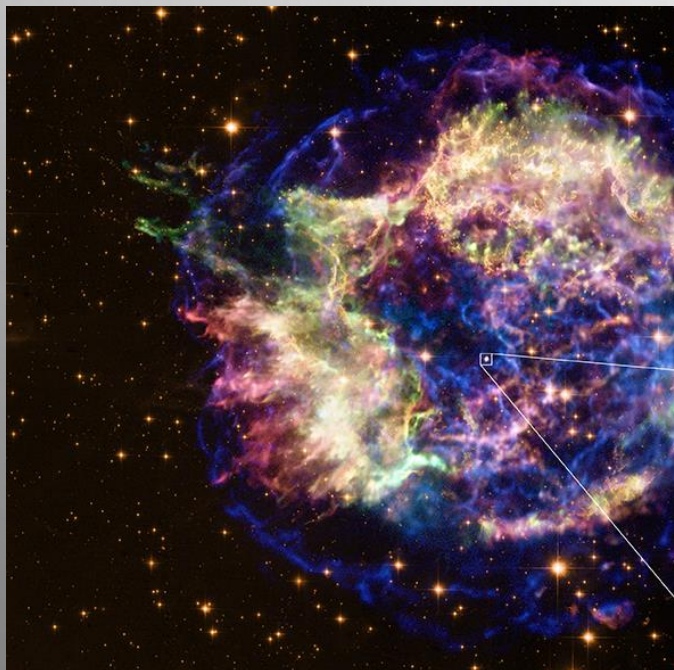


Если можно определить место взрыва,
то можно:

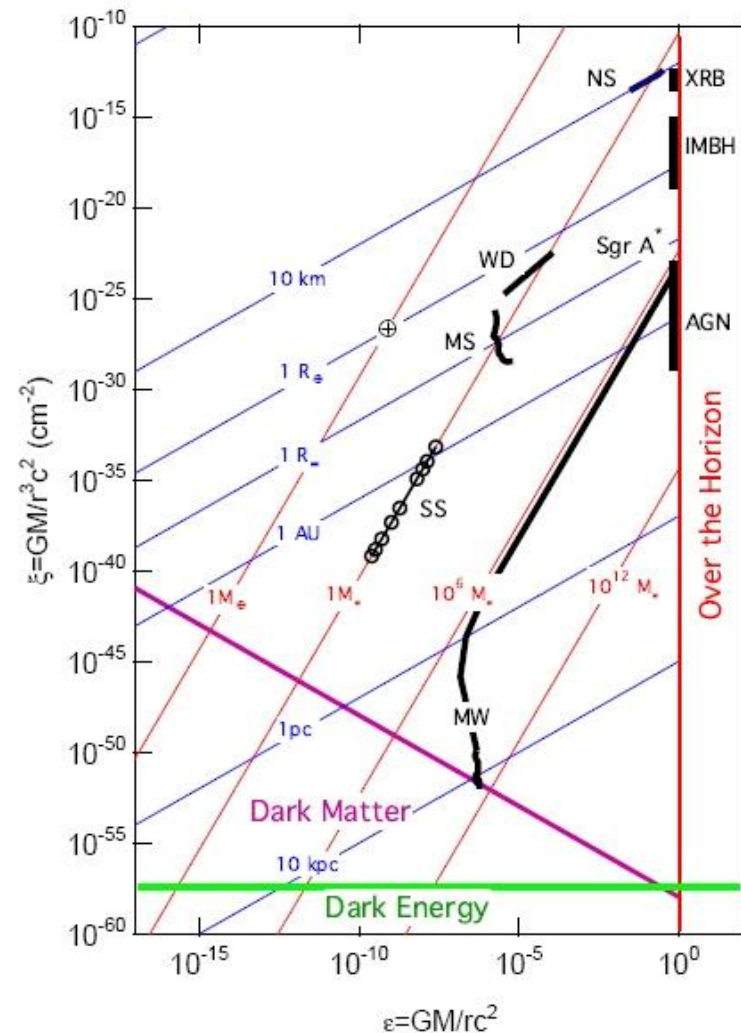
- или, зная возраст, определить скорость,
- или, зная скорость, определить возраст

ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

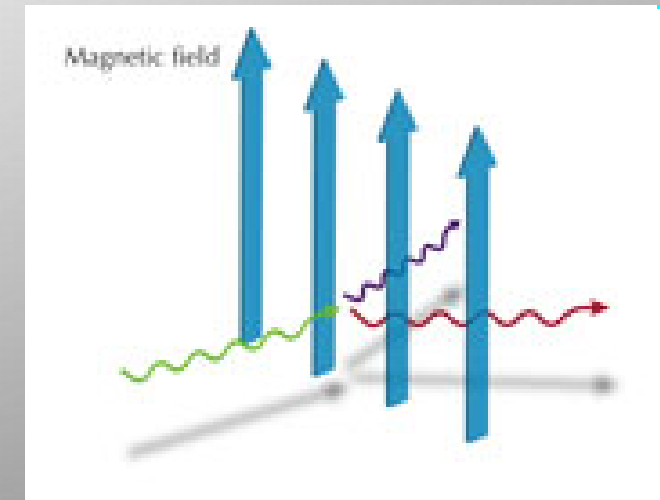
- Вращение
- Аккреция
- Затухание токов (магнитное поле)
- Тепловая энергия



ЧЕМ ВАЖНЫ

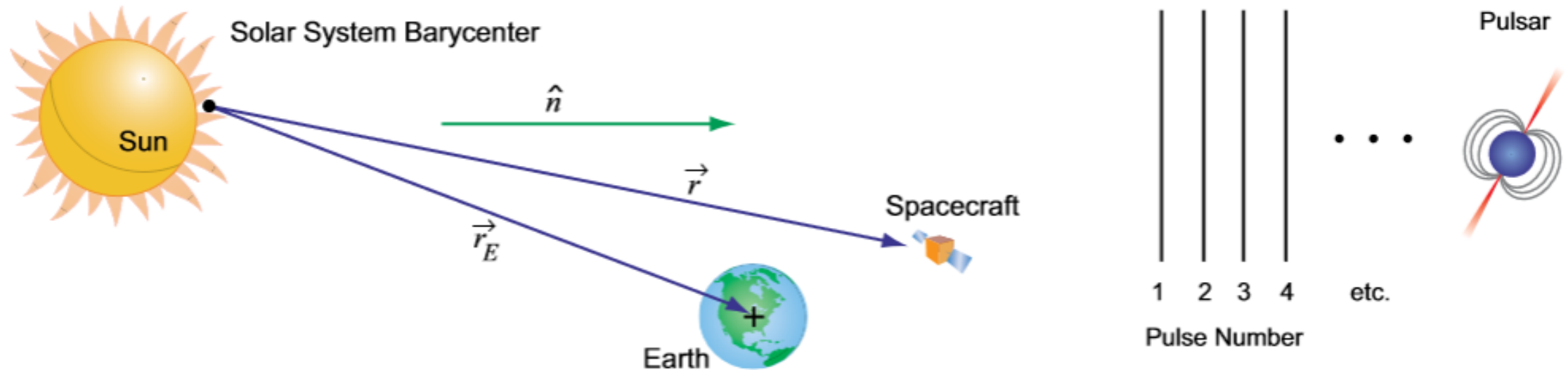


- Инструменты для физиков и астрофизиков
 - радиопульсары – тесты теорий гравитации
 - регистрация гравитационных волн
 - точное время
- Теория поведения вещества при высокой плотности – квантовая хромодинамика
- Процессы в сильном магнитном поле



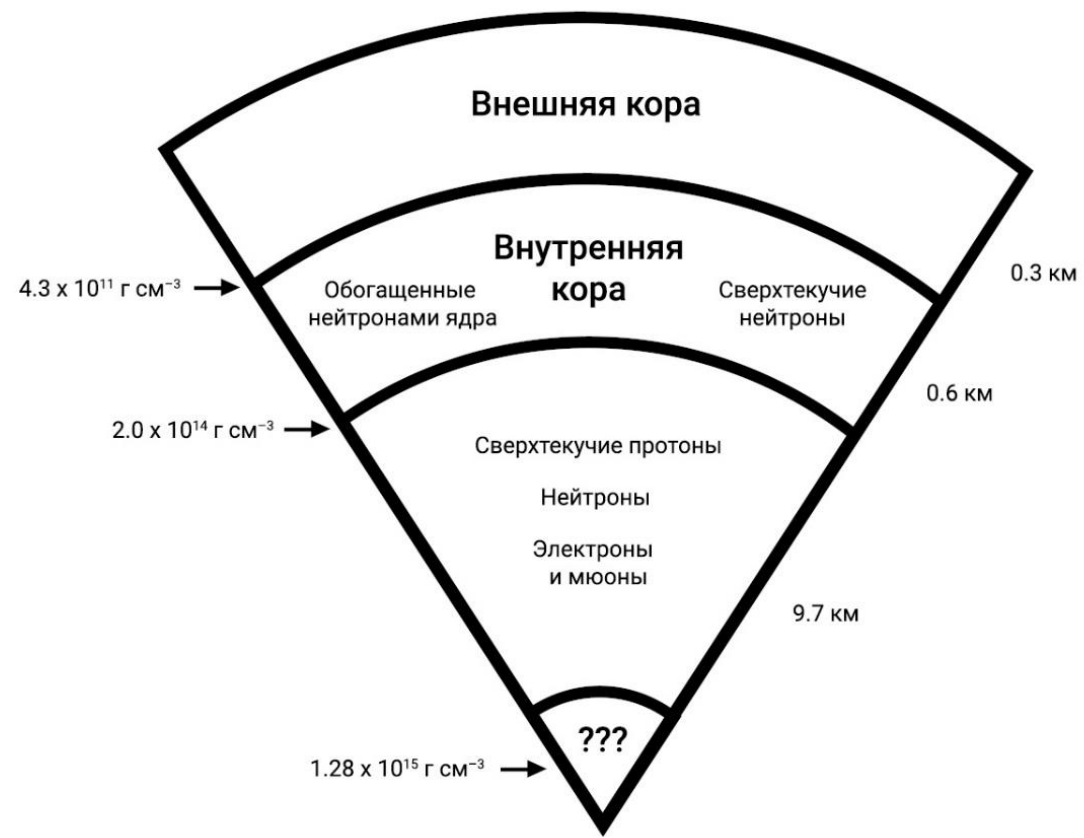
ОРИЕНТАЦИЯ СПУТНИКОВ ПО РЕНТГЕНОВСКИМ ПУЛЬСАРАМ

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

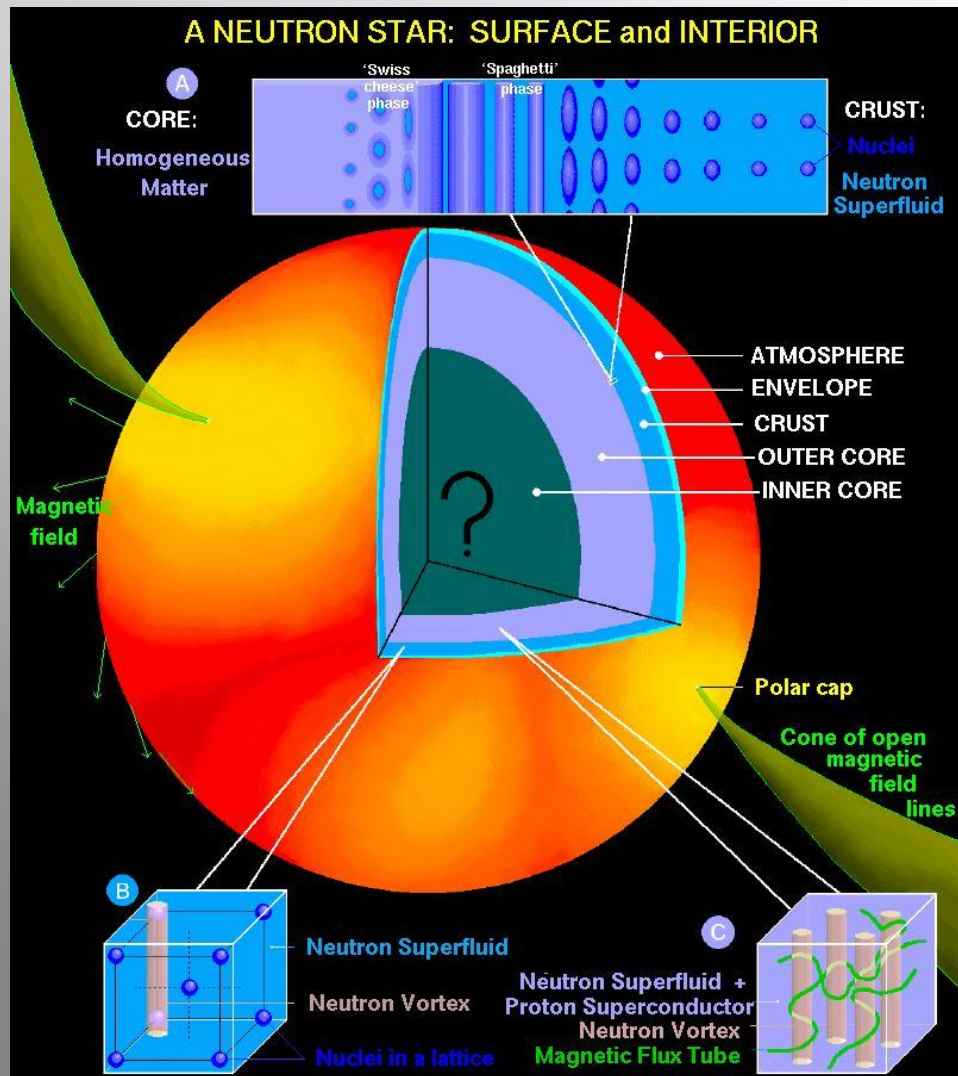


Все ведущие космические агентства в мире (включая российское) сейчас работают над созданием систем навигации, основанных на наблюдении рентгеновского излучения стабильных одиночных пульсаров.

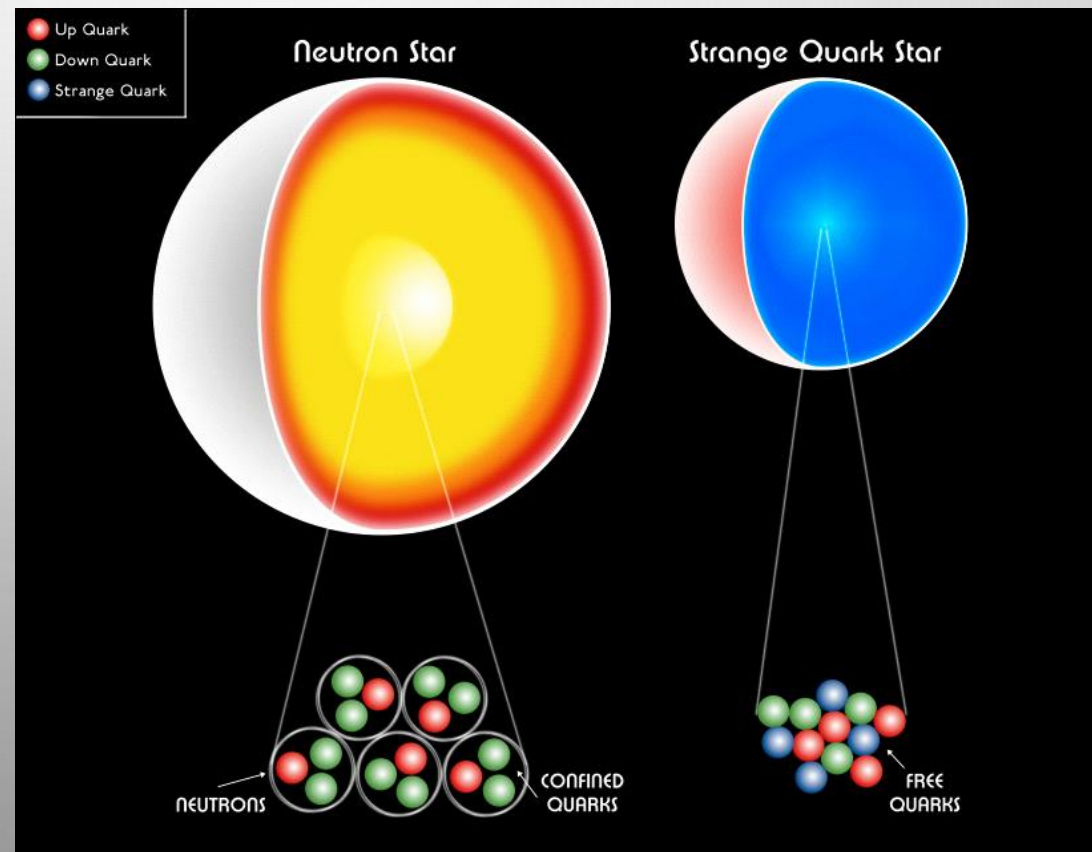
ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ



МНОЖЕСТВО ВАРИАНТОВ И СЛОЕВ



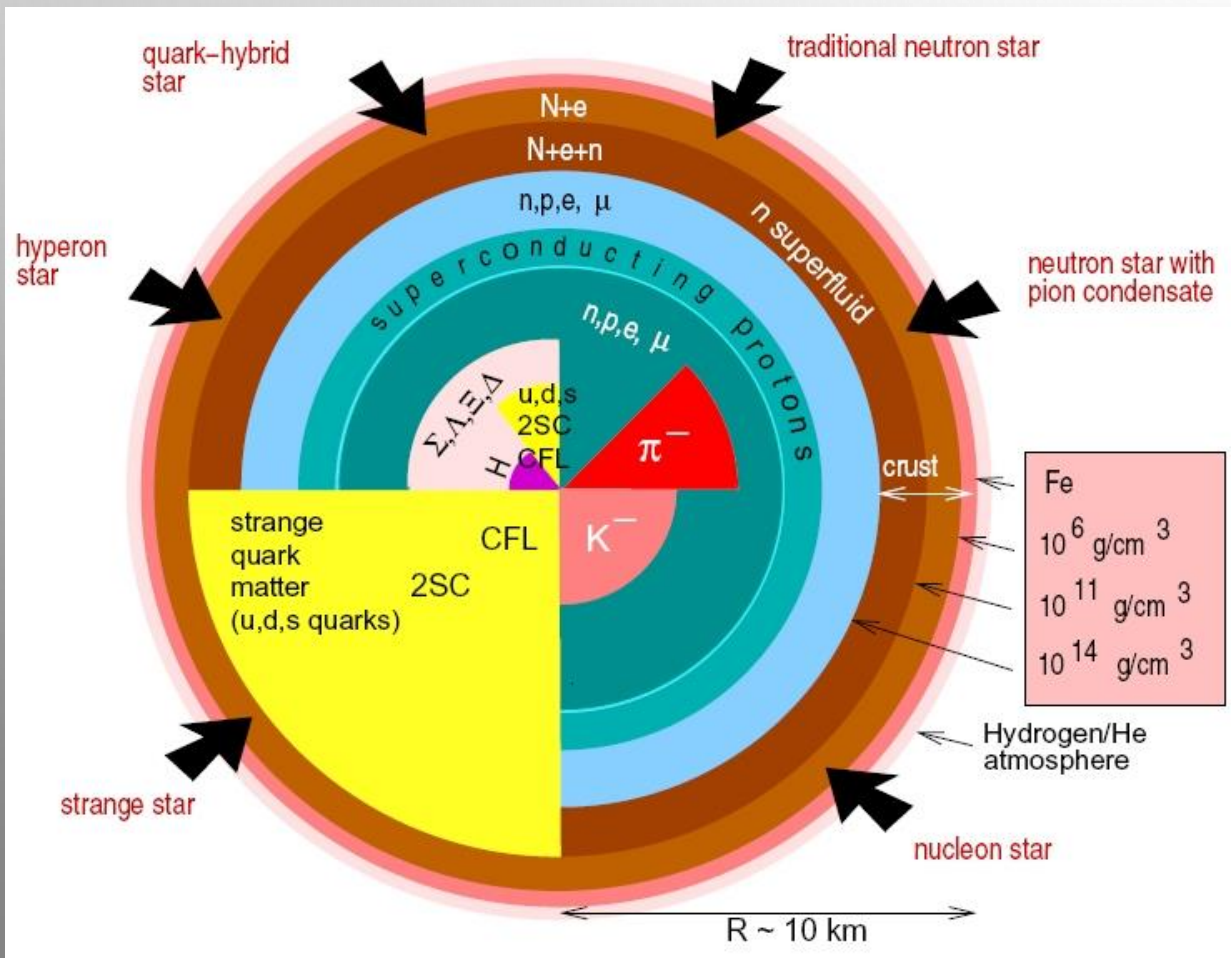
В зависимости от модели
объекты, которые мы называем
нейтронными звездами,
могут иметь очень разное строение



ЗАГАДКА НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

В недрах – очень плотное вещество.

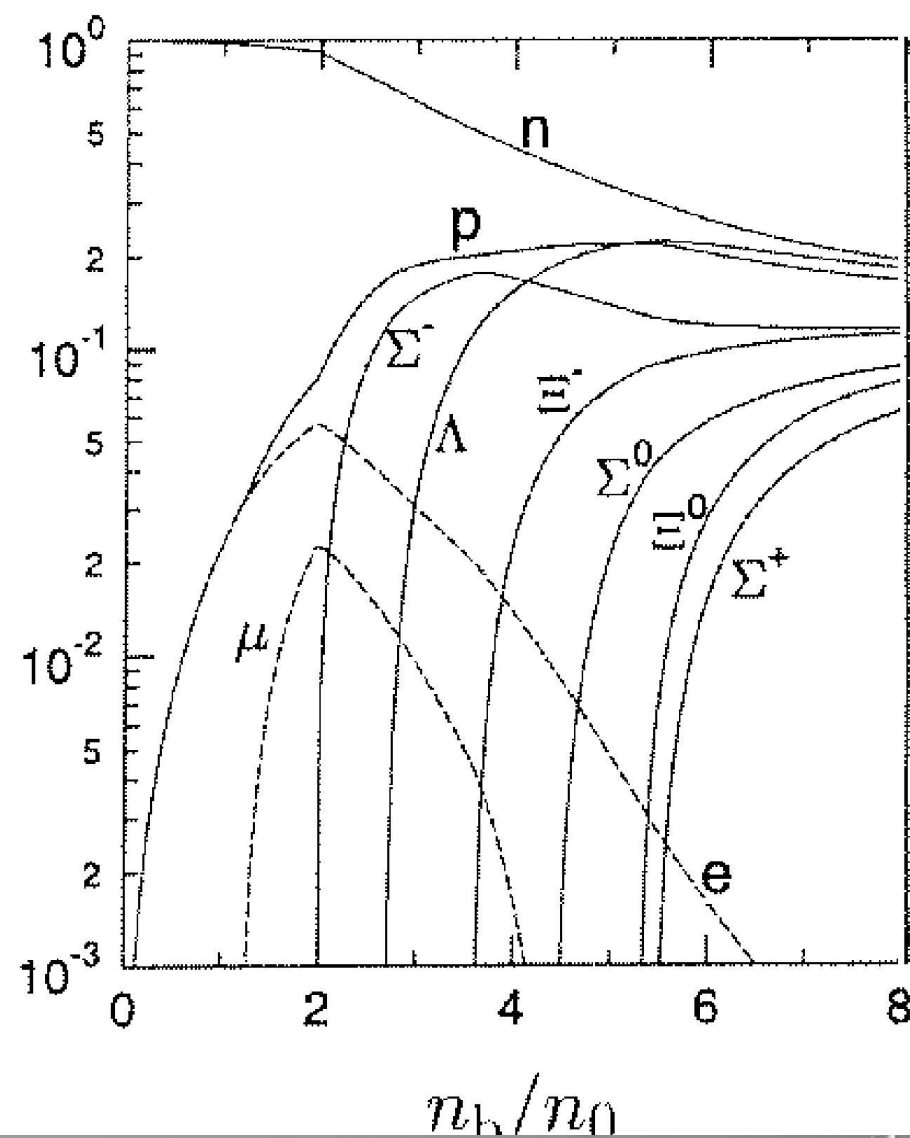
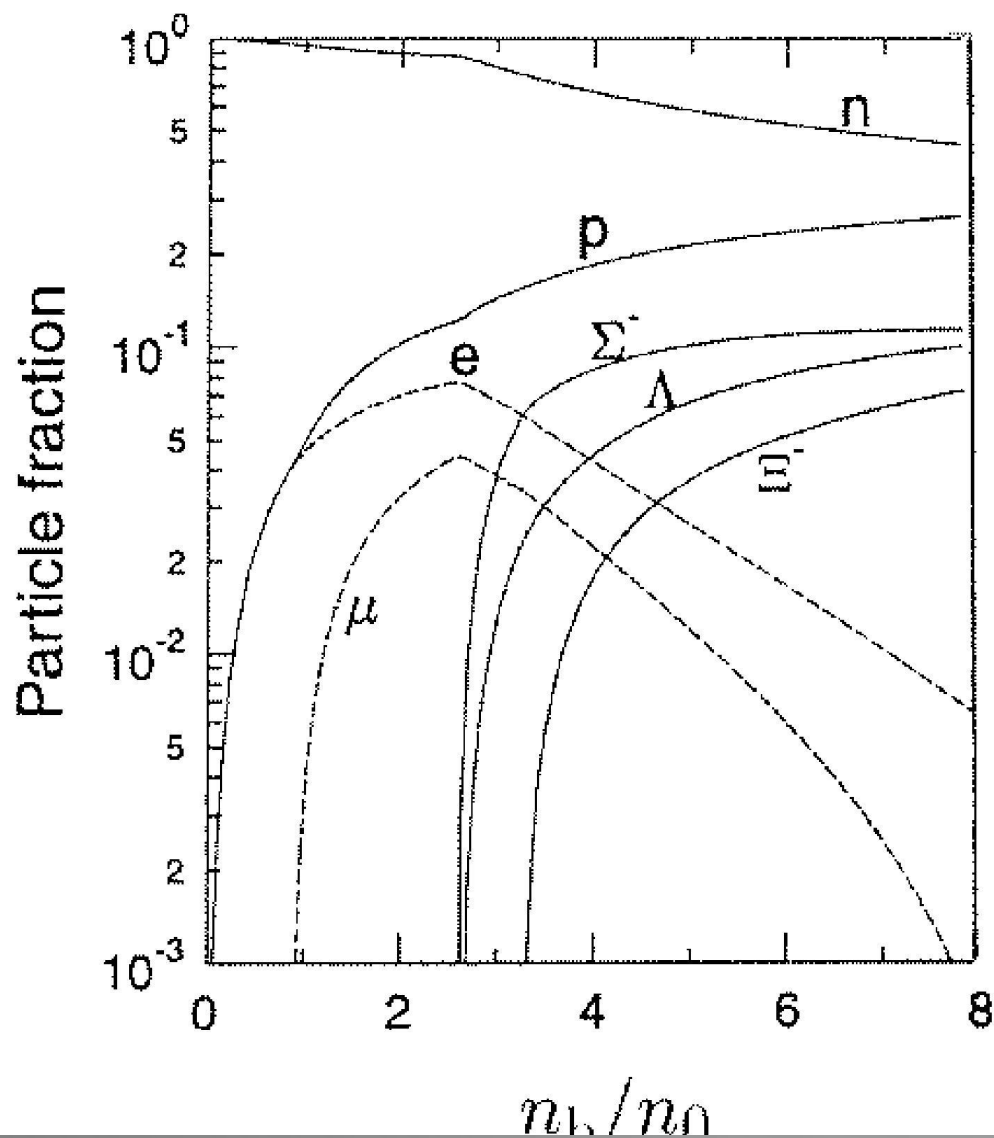
Мы плохо понимаем, как ведет себя вещество при такой плотности.



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

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

ЧАСТИЦЫ ВНУТРИ



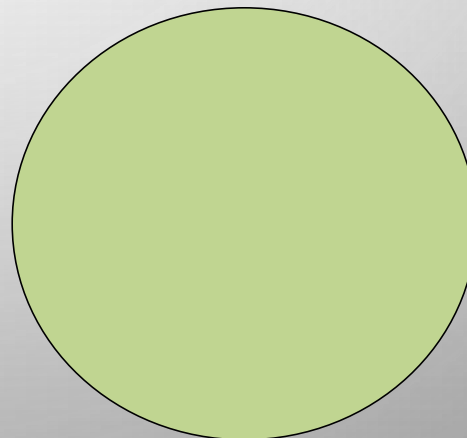
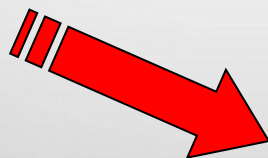
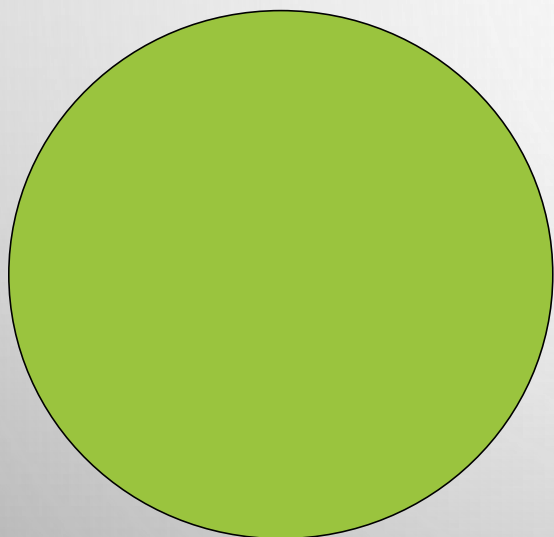
Relativistic mean-field model
TM1 of Sugahara & Toki (1971)

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

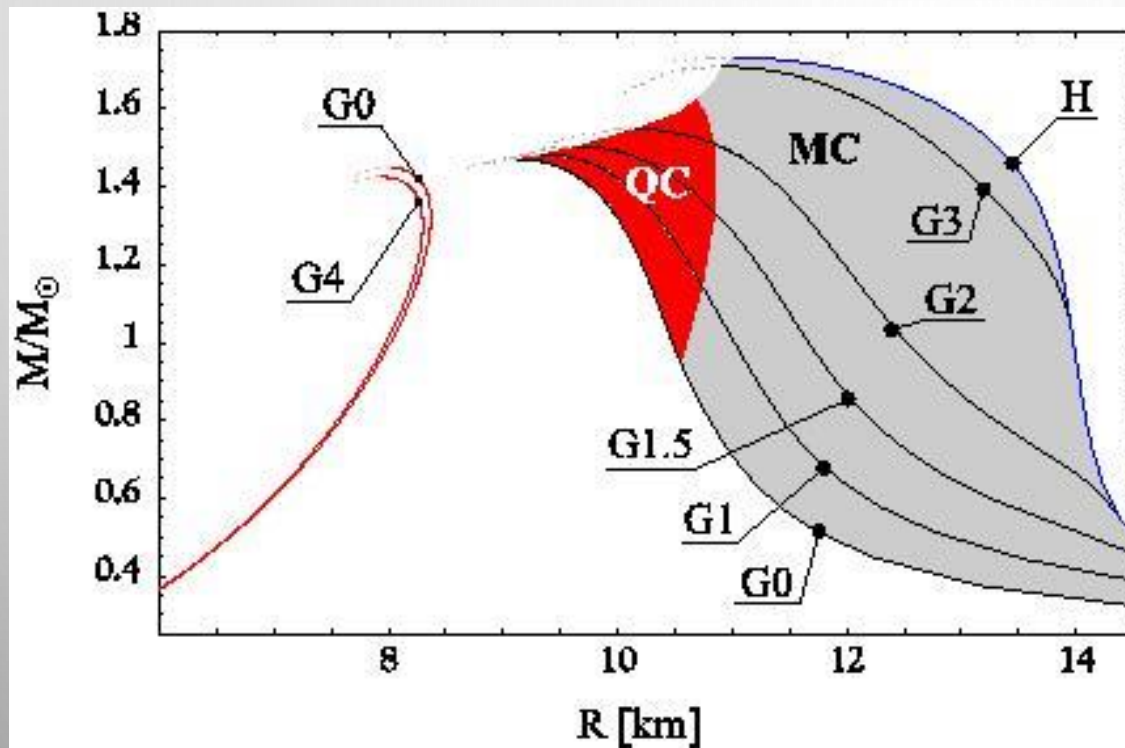
Барионная масса больше гравитационной.
При коллапсе ядра часть его массы
превращается в энергию: $E=mc^2$
И высвечивается.
Похоже на энергию связи атомного ядра.



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



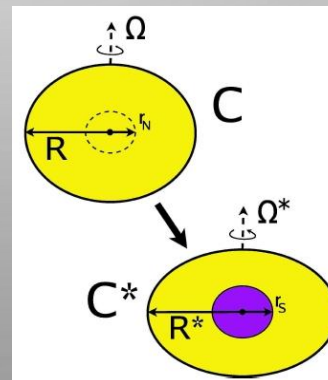
Основные черты

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

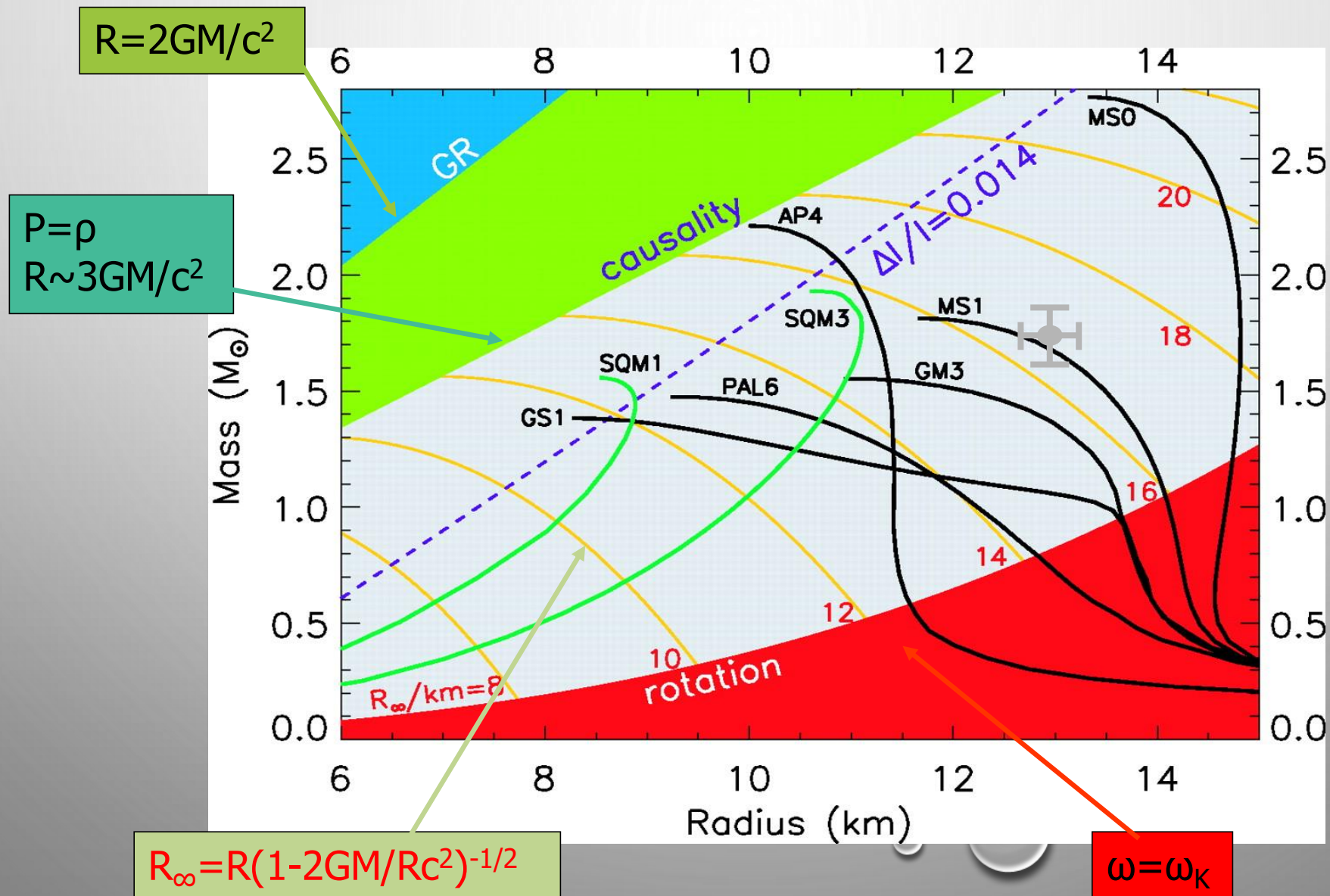
Здесь мы пренебрегли вращением
Вращение влияет на:

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

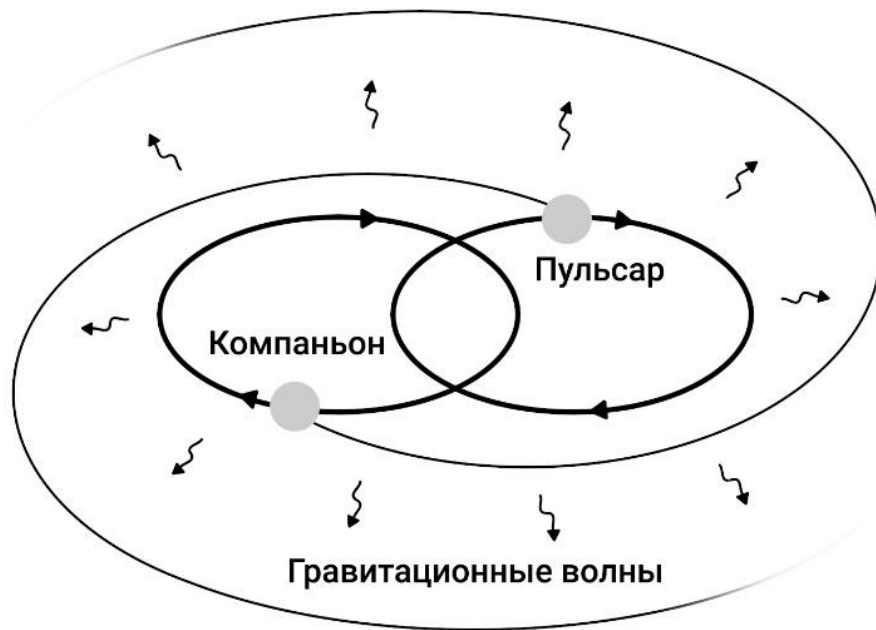
Замедление может вести к фазовому превращению.



МАССА-РАДИУС



ДВОЙНЫЕ ПУЛЬСАРЫ



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

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

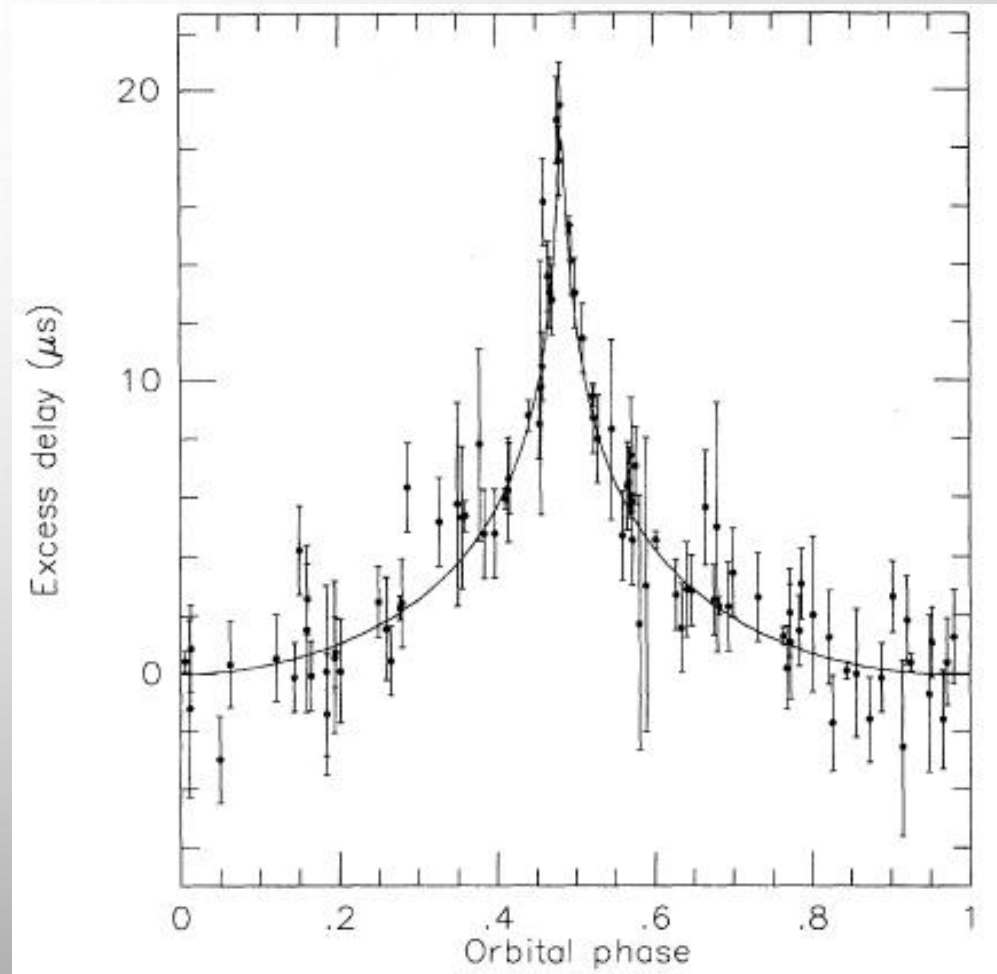
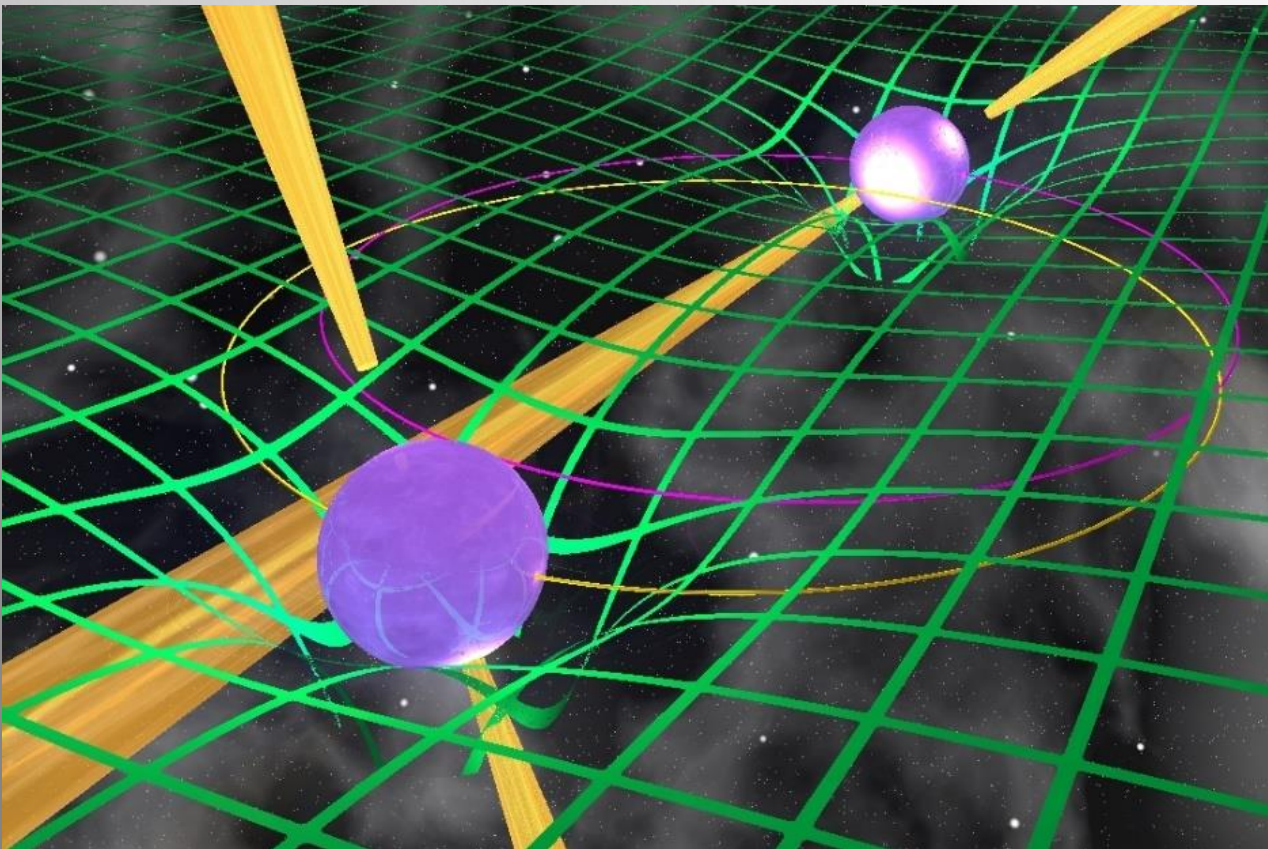
Наблюдения двойных радиопульсаров позволяют определять массы нейтронных звезд с очень высокой точностью благодаря наблюдению ряда эффектов Общем теории относительности.

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

ЗАДЕРЖКА ШАПИРО

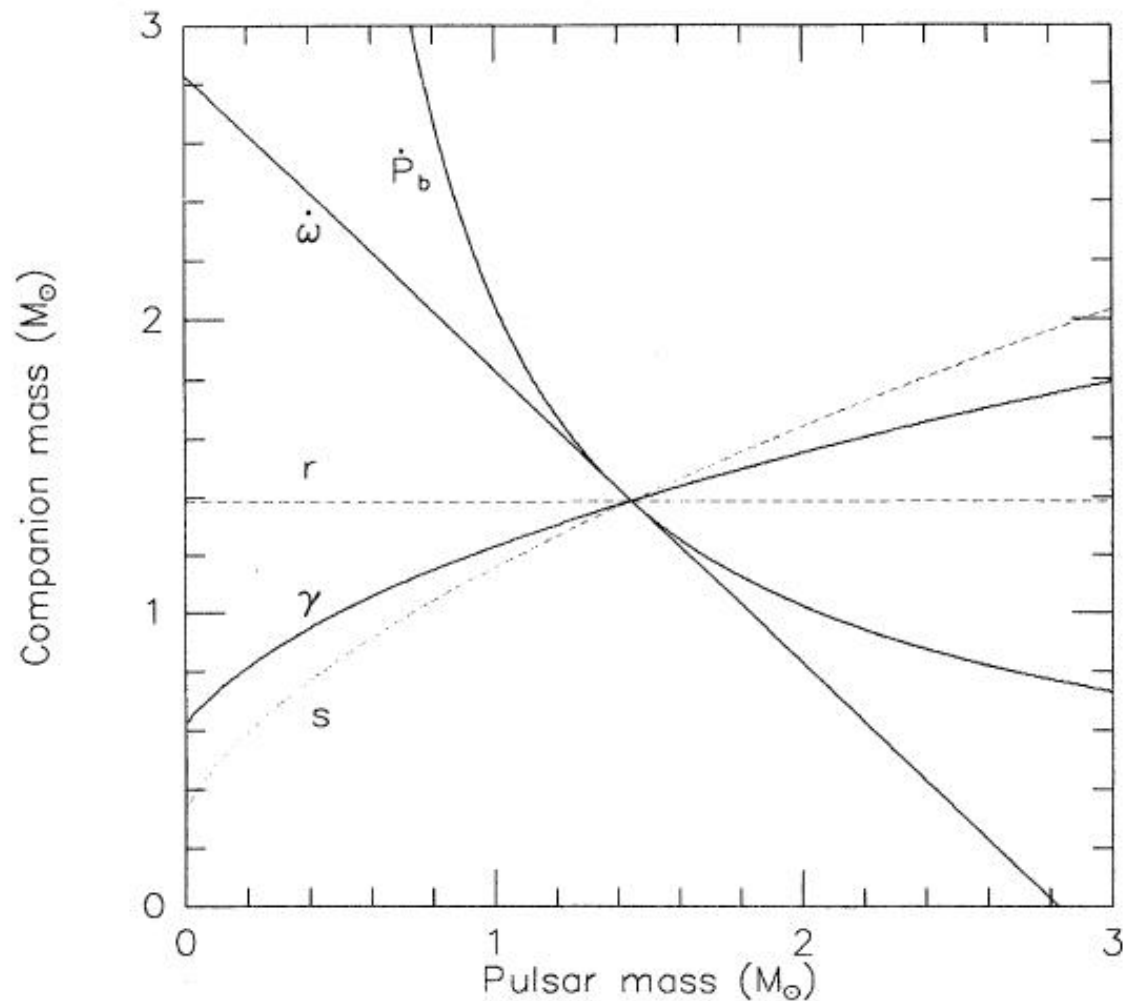
$$\Delta_S = -2r \log(1 - s \cos[2\pi(\phi - \phi_0)])$$

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



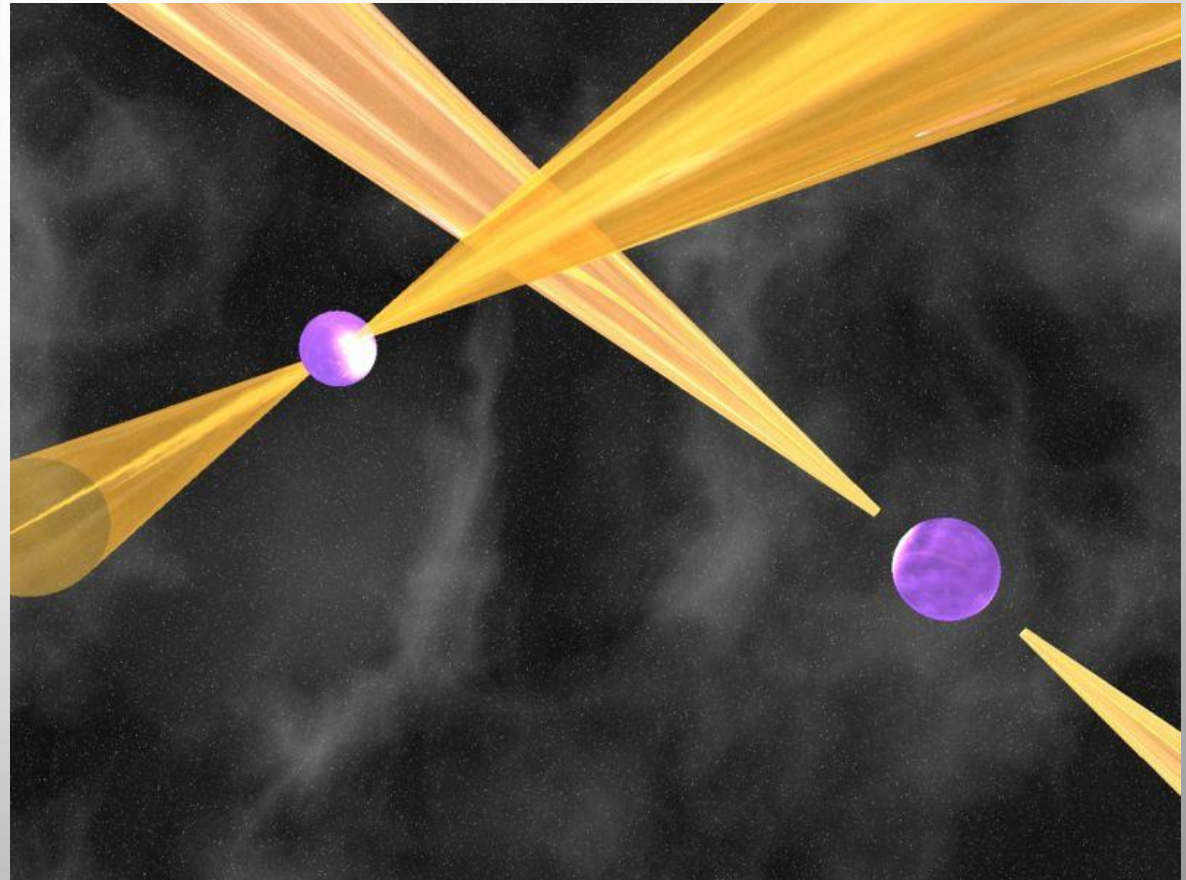
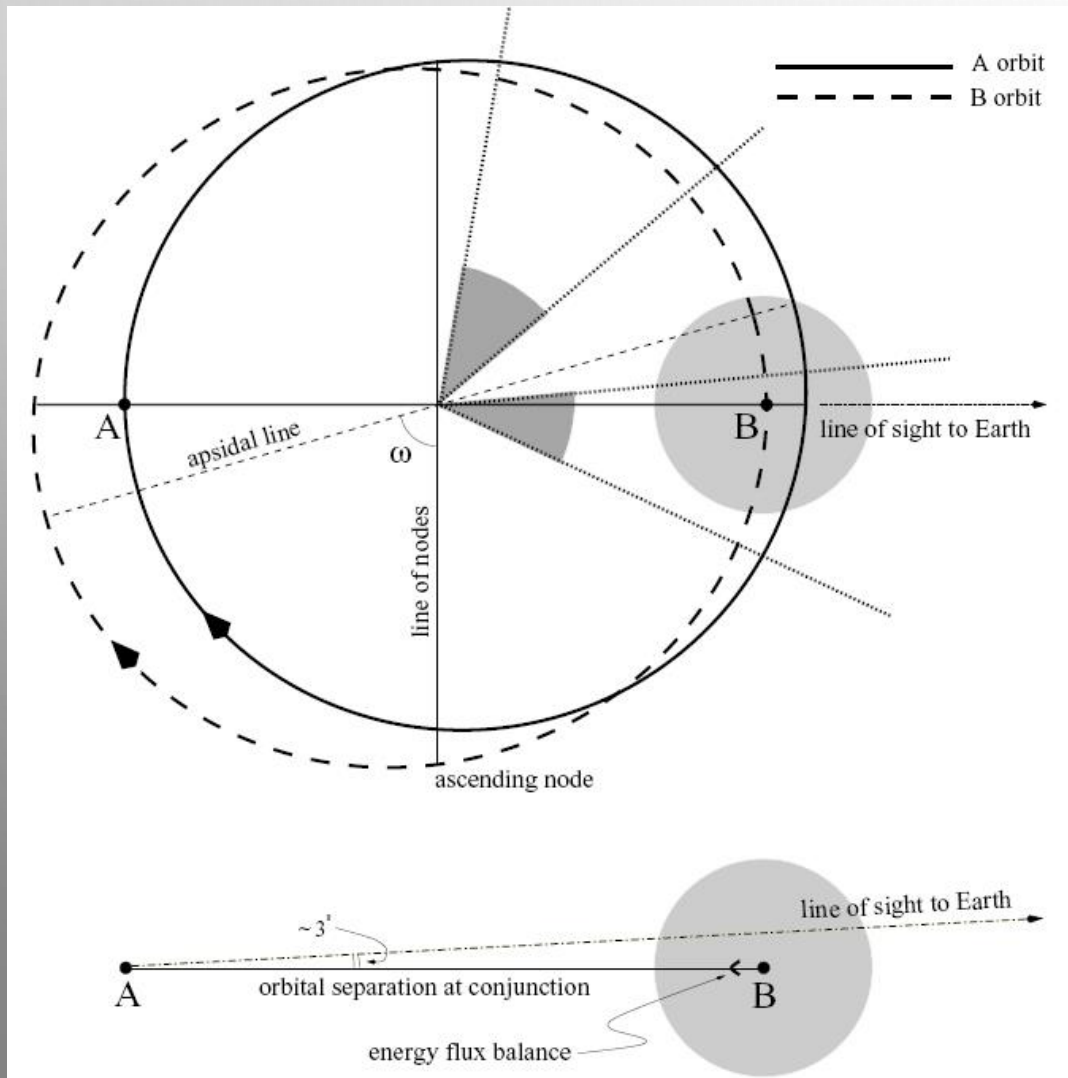
PSR 1855+09 (Taylor, Nobel lecture)

ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ



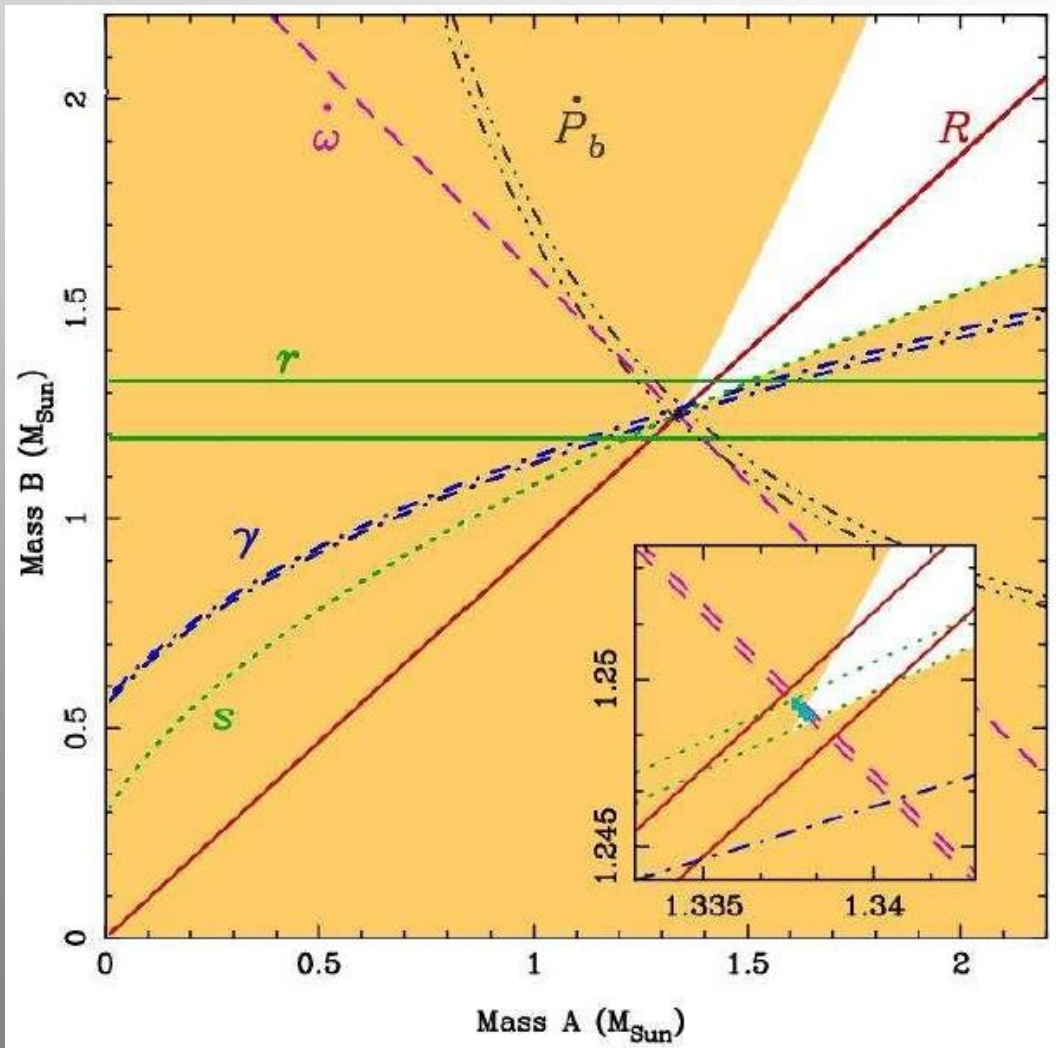
Наблюдение сразу нескольких эффектов позволяет измерить массы обеих звезд с очень высокой точностью. Иногда до 0.001 массы Солнца.

ДВОЙНОЙ PSR J0737-3039



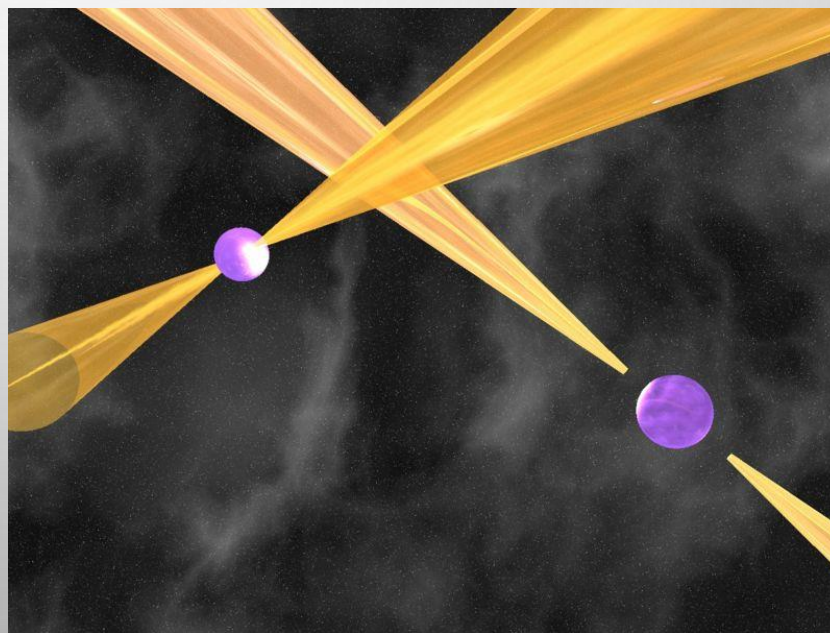
Уникальная система,
открытая в 2003 г.

MACCA PSR J0737-3039

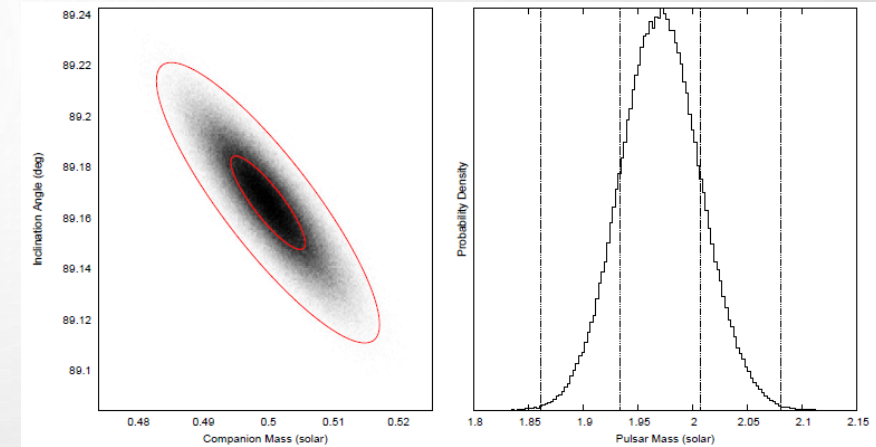
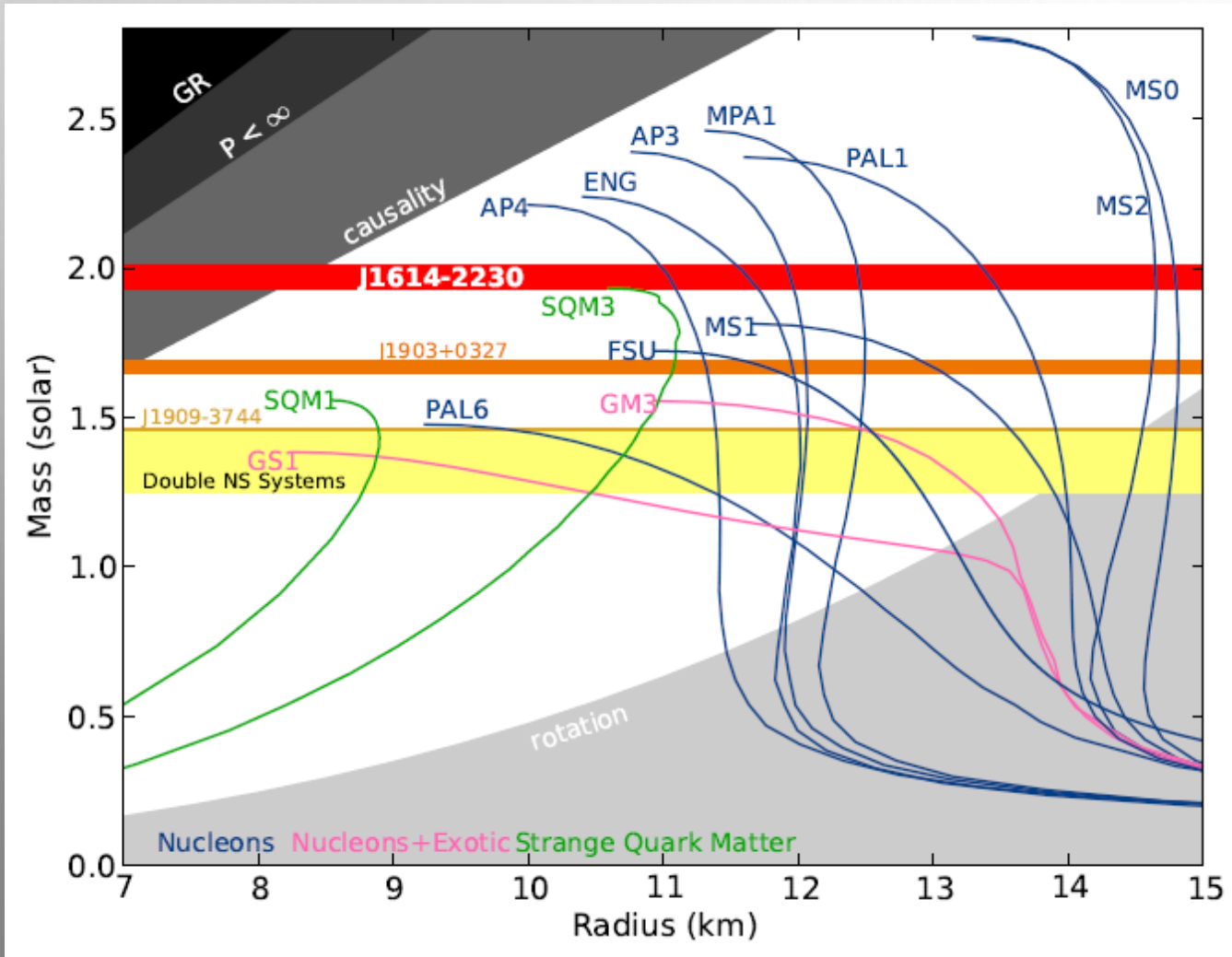


Наиболее точные значения.

Это очень тесная система,
где наблюдается два радиопульсара.



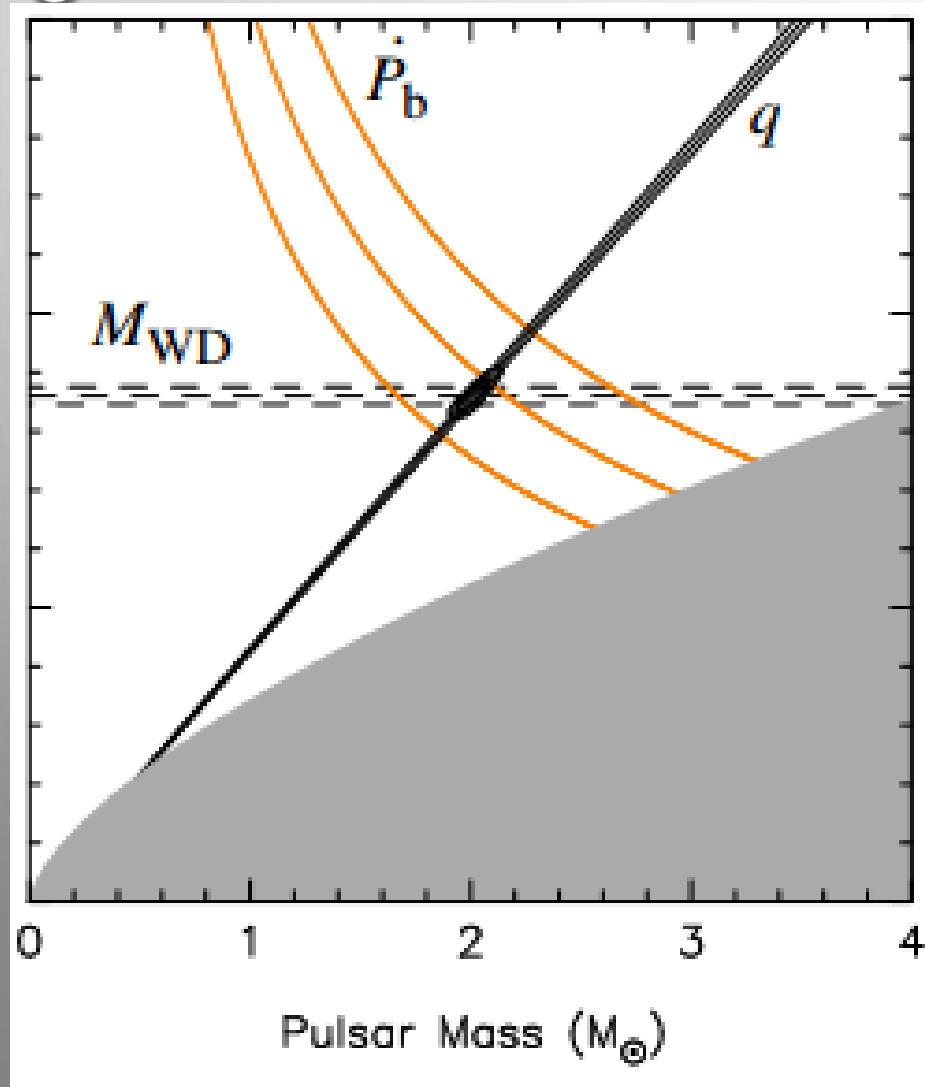
ПОЧЕМУ ВАЖНО ИСКАТЬ МАССИВНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ?



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

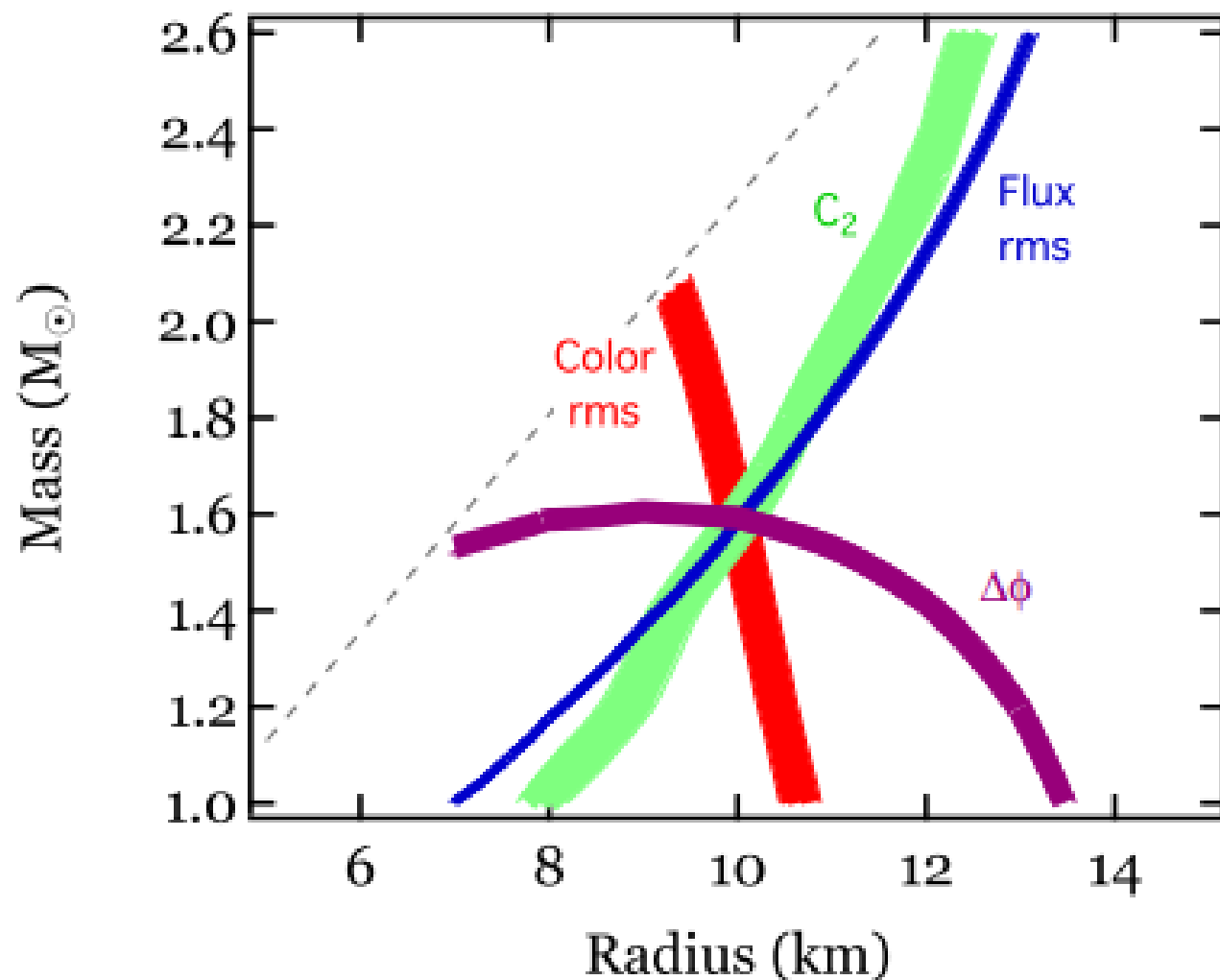
Оценка массы нейтронной звезды:

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



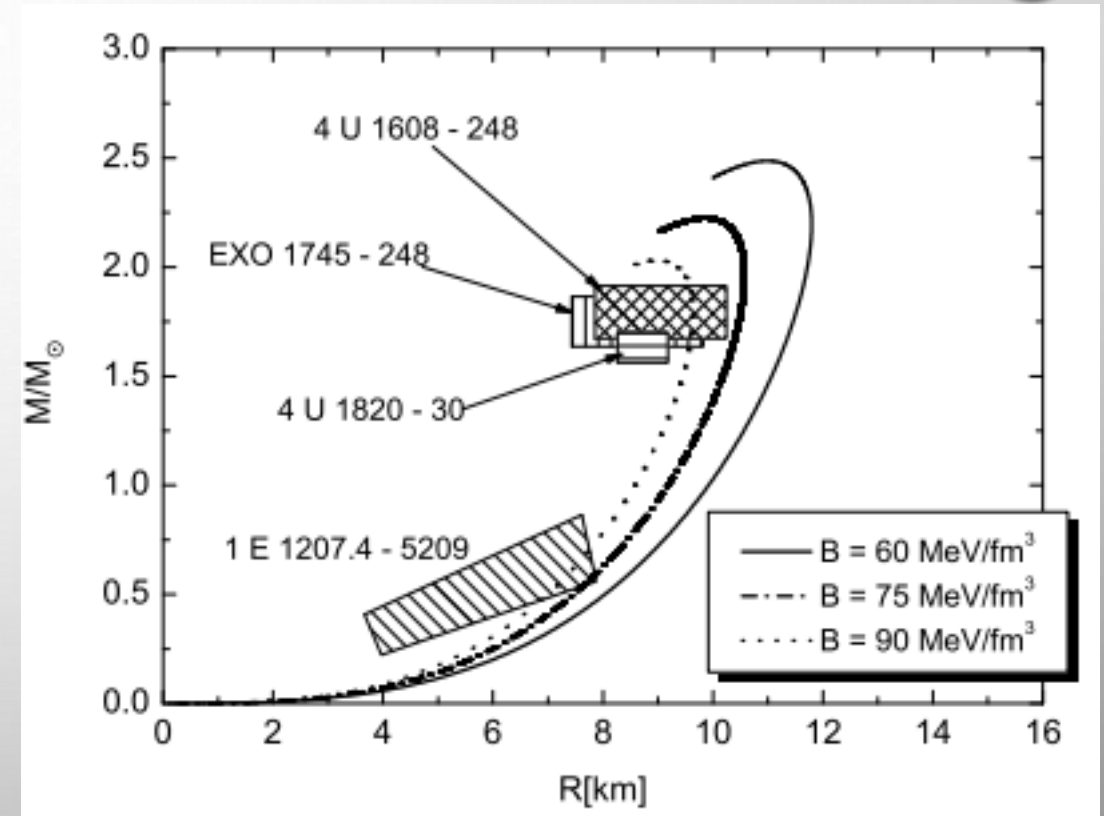
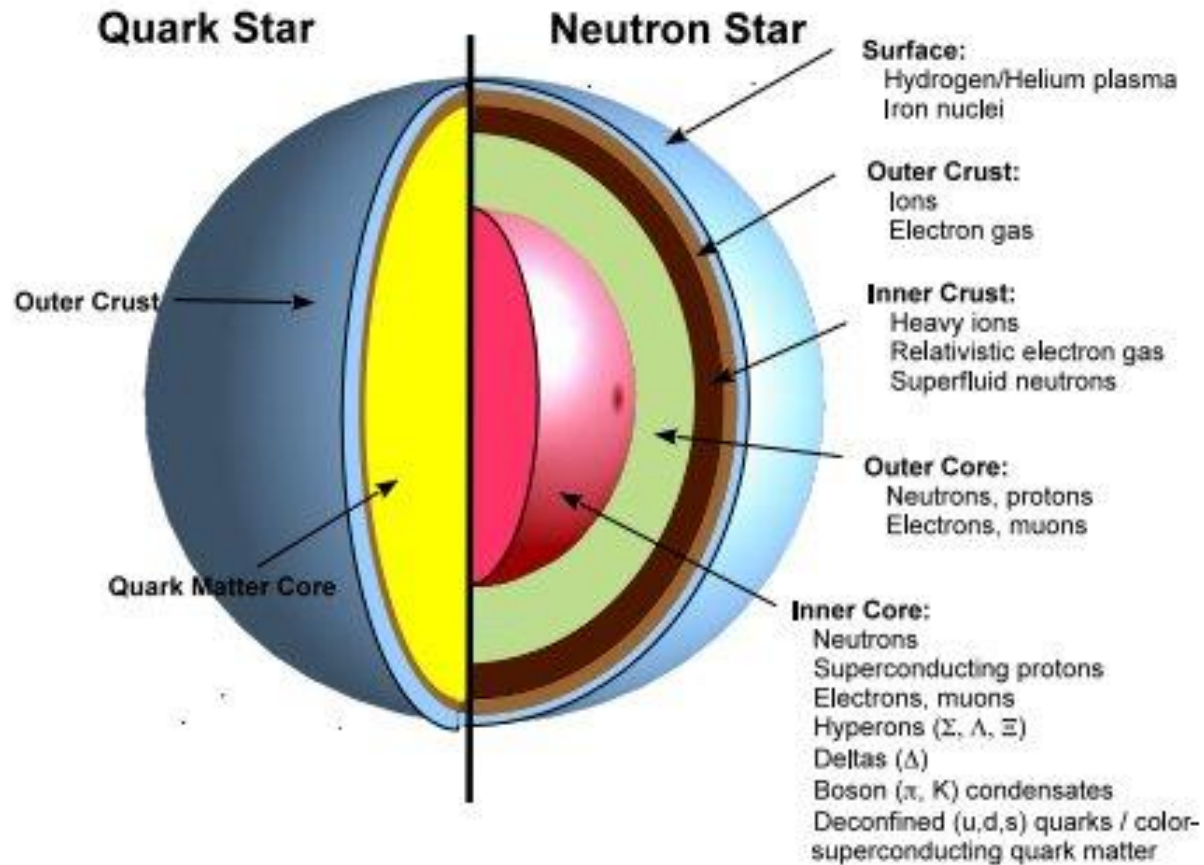
Возможно, что на будущих аппаратах NICER и LOFT можно будет очень точно измерять сразу и массу, и радиус хотя бы для небольшого числа звезд.

Данные основаны в первую очередь на анализе профиля импульса.

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

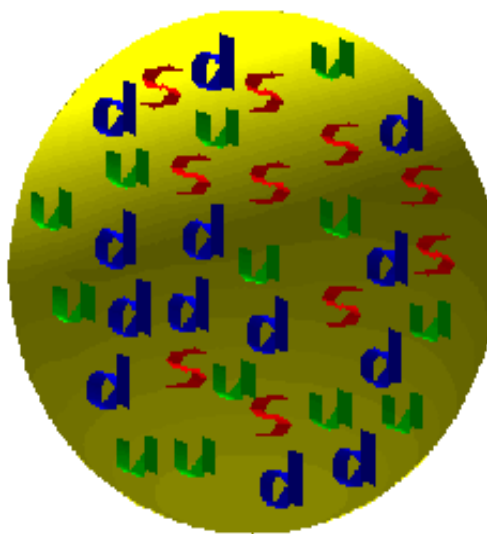
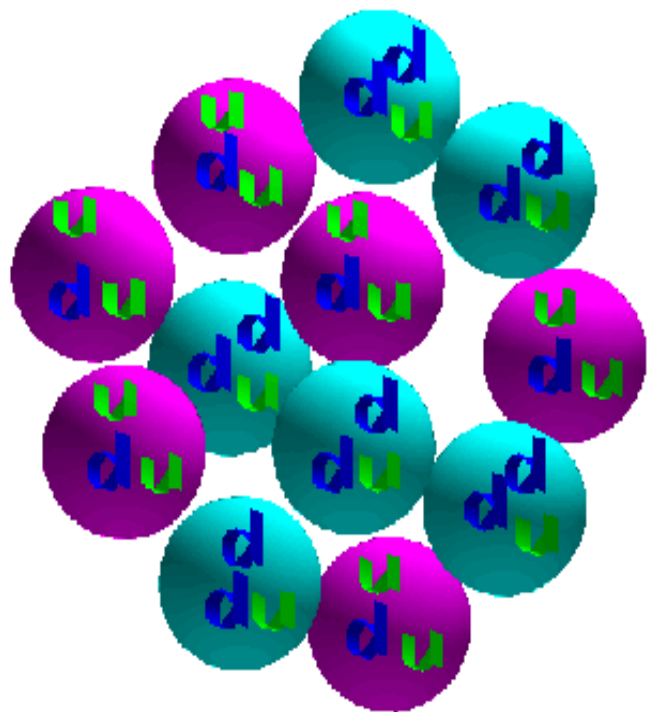
КВАРКОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

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



СТРАННОЕ ВЕЩЕСТВО И СТРАПЕЛЬКИ

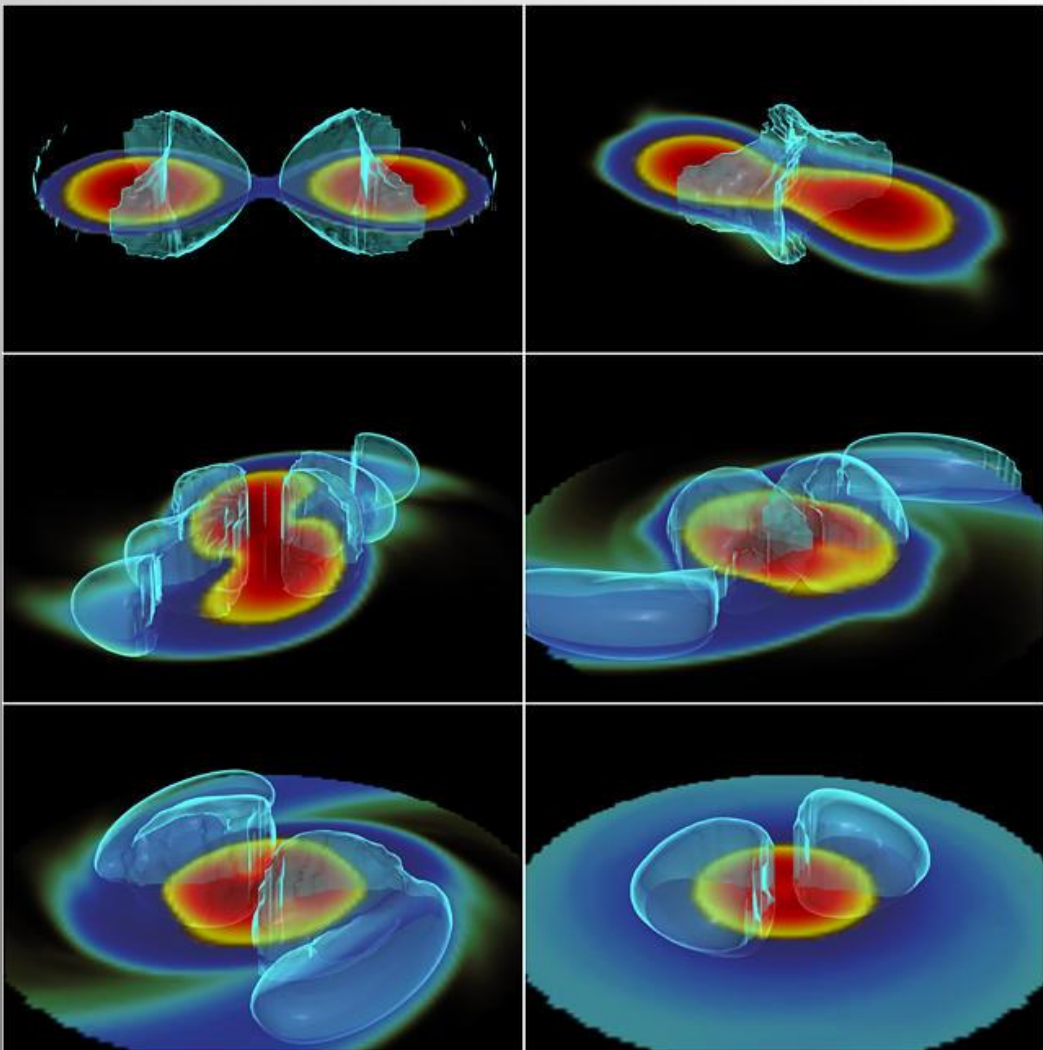
Кварковое вещество — «самодостаточно».
Для его устойчивости не нужна гравитация.
Т.е., могут существовать как странные звезды,
Так и маленькие комочки, капельки.



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

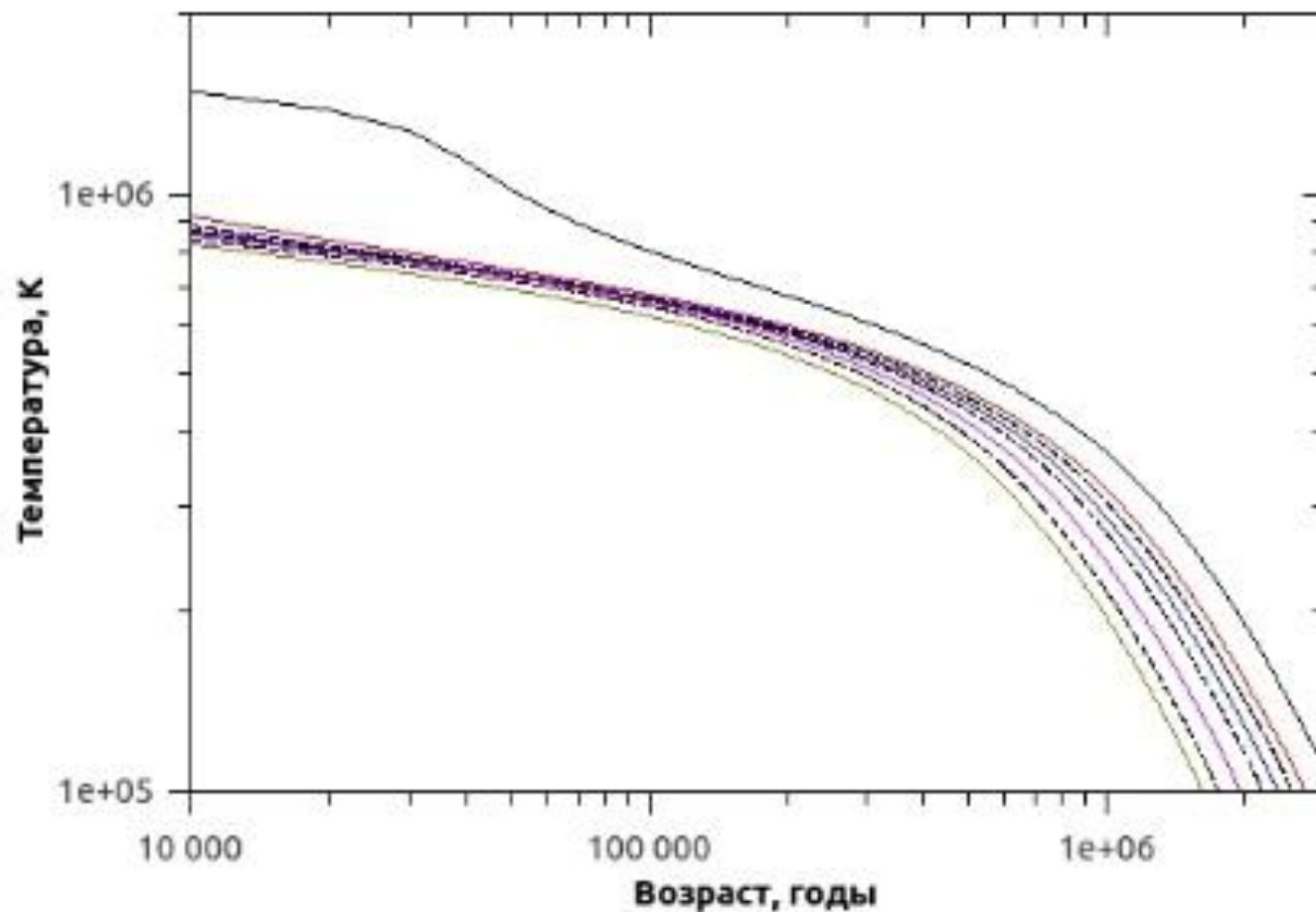
СТРАННАЯ КВАРКОВАЯ ЭПИДЕМИЯ

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



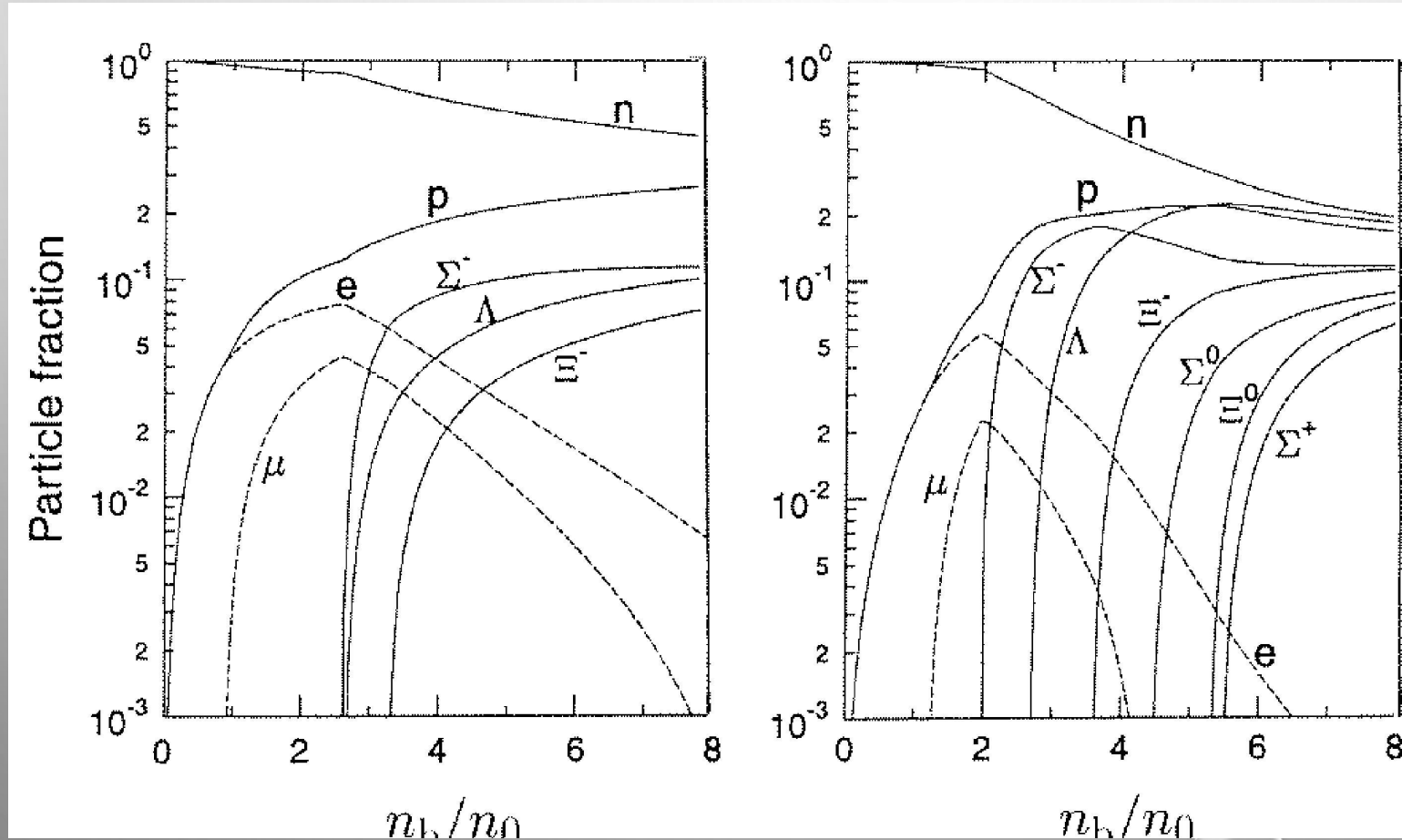
AMS на МКС

ОСТЫВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД



Рождаясь очень горячими, нейтронные звезды остывают со временем в начале за счет излучения нейтрино, а затем — за счет излучения фотонов с поверхности.

ЧАСТИЦЫ ВНУТРИ

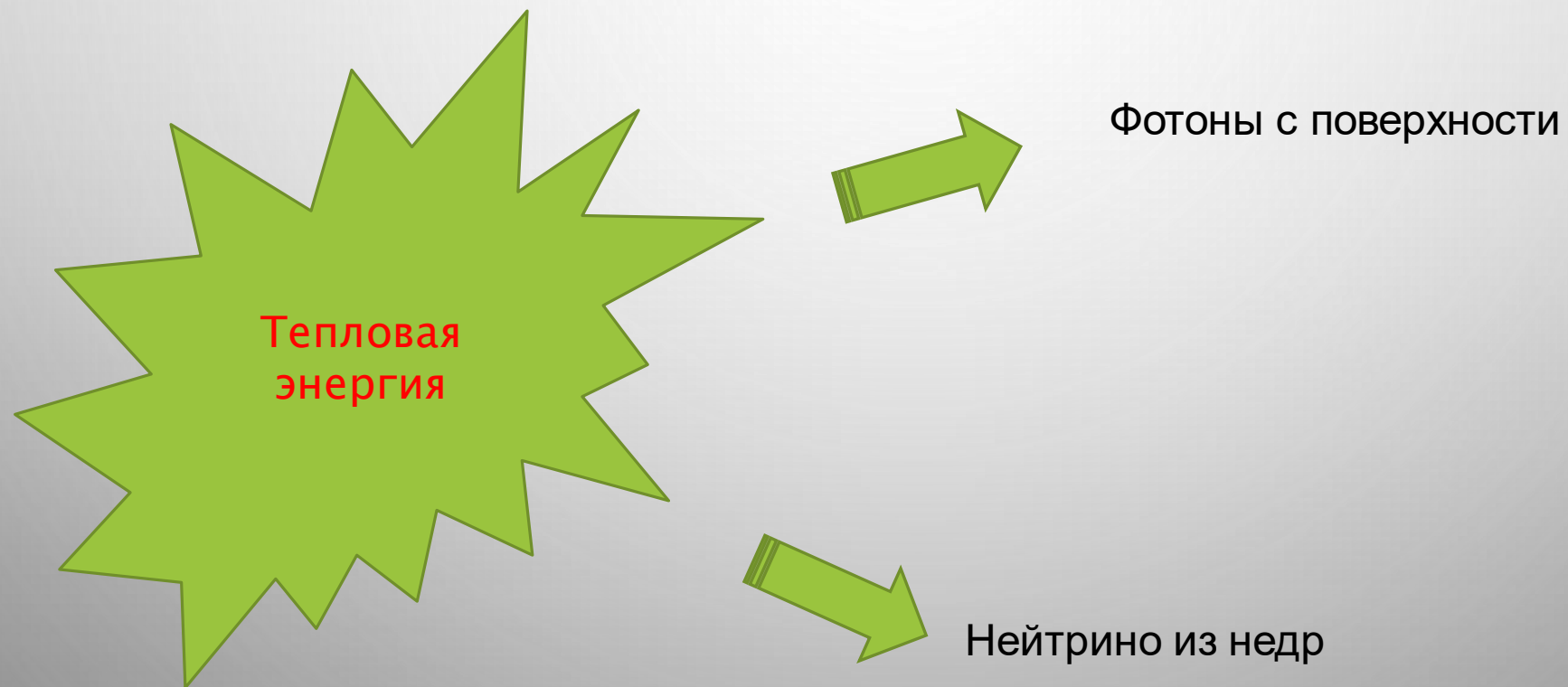


Effective chiral model of
Hanauske et al. (2000)

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

Существует множество моделей внутреннего строения компактных звезд. Каждой из них соответствует своя зависимость содержания разных частиц с глубиной.

ТЕПЛОПОТЕРИ



Недра очень горячие – порядка миллиарда градусов.
Поверхность гораздо холоднее – миллион и меньше.

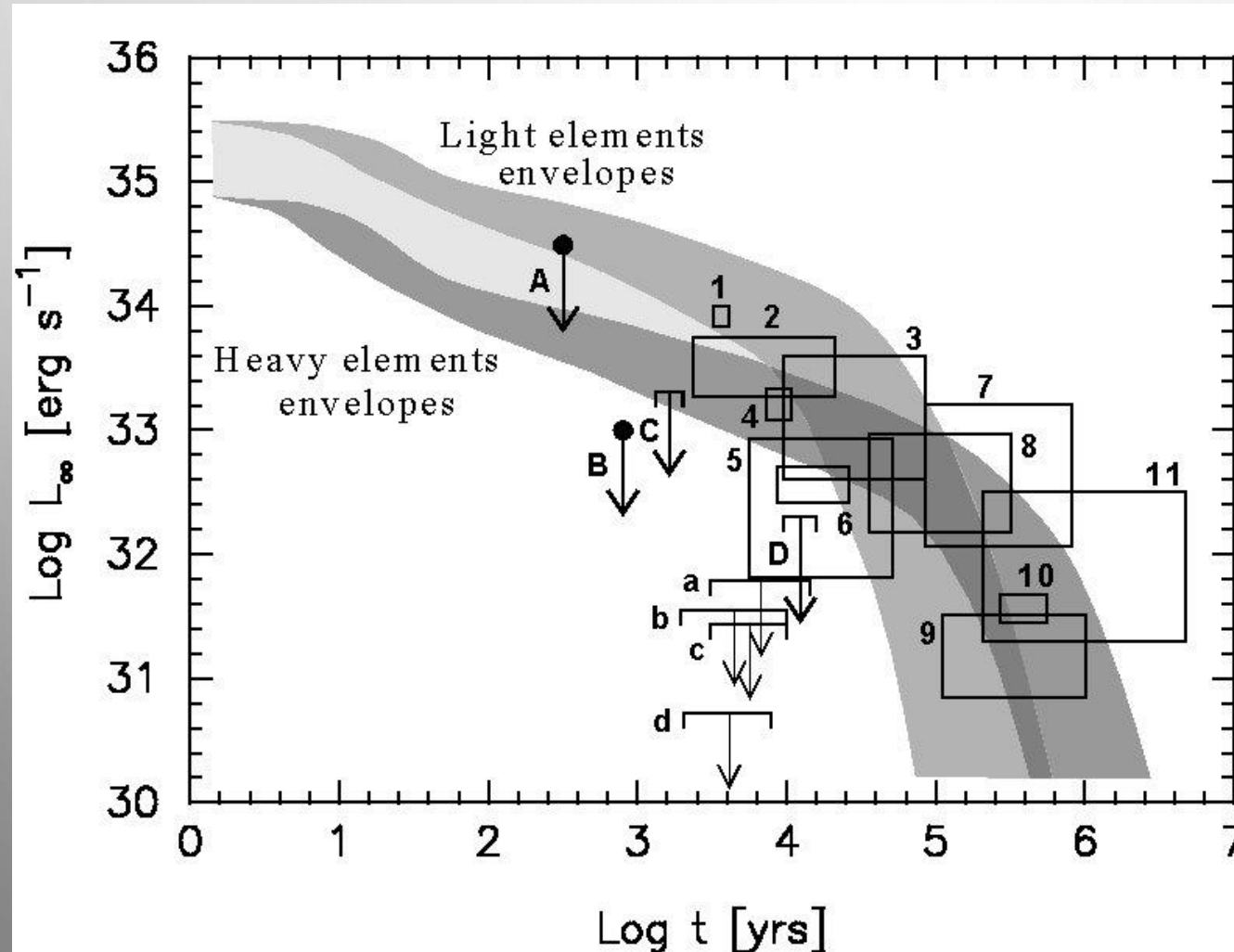
ОСНОВНЫЕ НЕЙТРИННЫЕ ПРОЦЕССЫ

Model	Process	$Q_f, \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$
Nucleon matter	$n \rightarrow pe\bar{\nu} \quad pe \rightarrow n\nu$	$10^{26} - 3 \times 10^{27}$
Pion condensate	$\tilde{N} \rightarrow \tilde{N}e\bar{\nu} \quad \tilde{N}e \rightarrow \tilde{N}\nu$	$10^{23} - 10^{26}$
Kaon condensate	$\tilde{B} \rightarrow \tilde{B}e\bar{\nu} \quad \tilde{B}e \rightarrow \tilde{B}\nu$	$10^{23} - 10^{24}$
Quark matter	$d \rightarrow ue\bar{\nu} \quad ue \rightarrow d\nu$	$10^{23} - 10^{24}$

Process	$Q_s, \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$
Modified Urca $nN \rightarrow pNe\bar{\nu} \quad pNe \rightarrow nN\nu$	$10^{20} - 3 \times 10^{21}$
Bremsstrahlung $NN \rightarrow NN\nu\bar{\nu}$	$10^{19} - 10^{20}$

$$Q_{\text{slow}} = Q_s T_9^8, \quad Q_{\text{fast}} = Q_f T_9^6.$$

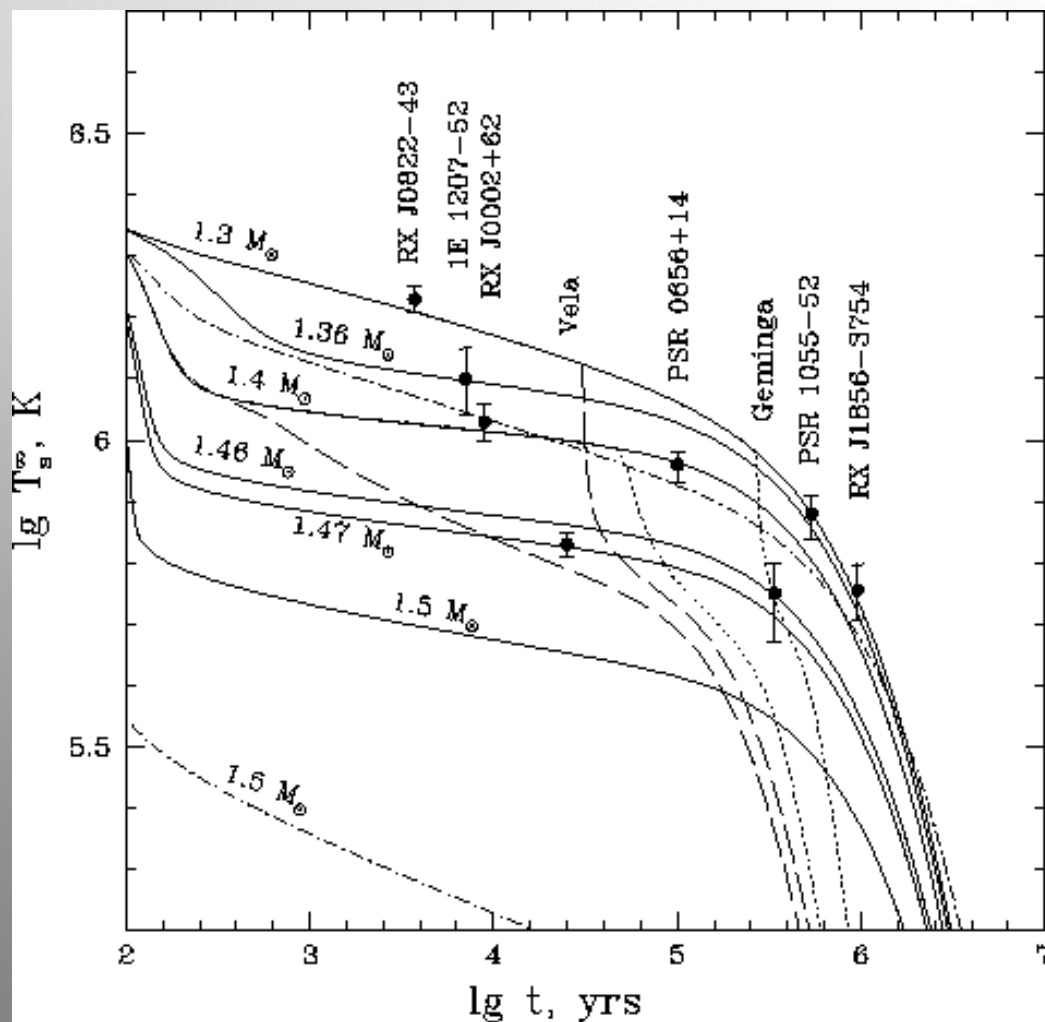
КРИВЫЕ ОСТЫВАНИЯ



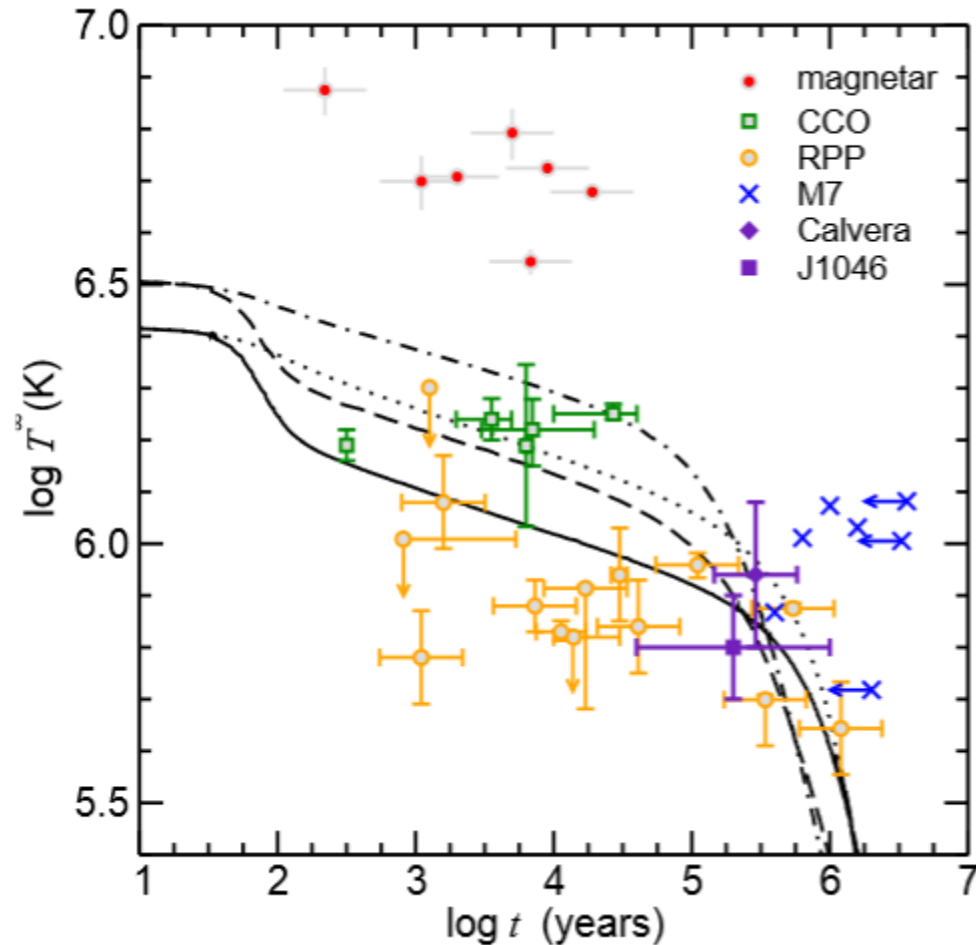
Теоретические кривые
необходимо сопоставлять
с данными наблюдений.

ТЕМПЕРАТУРА И ВОЗРАСТ

В некотором интервале возрастов измерение температуры может дать возможность оценить возраст звезды.



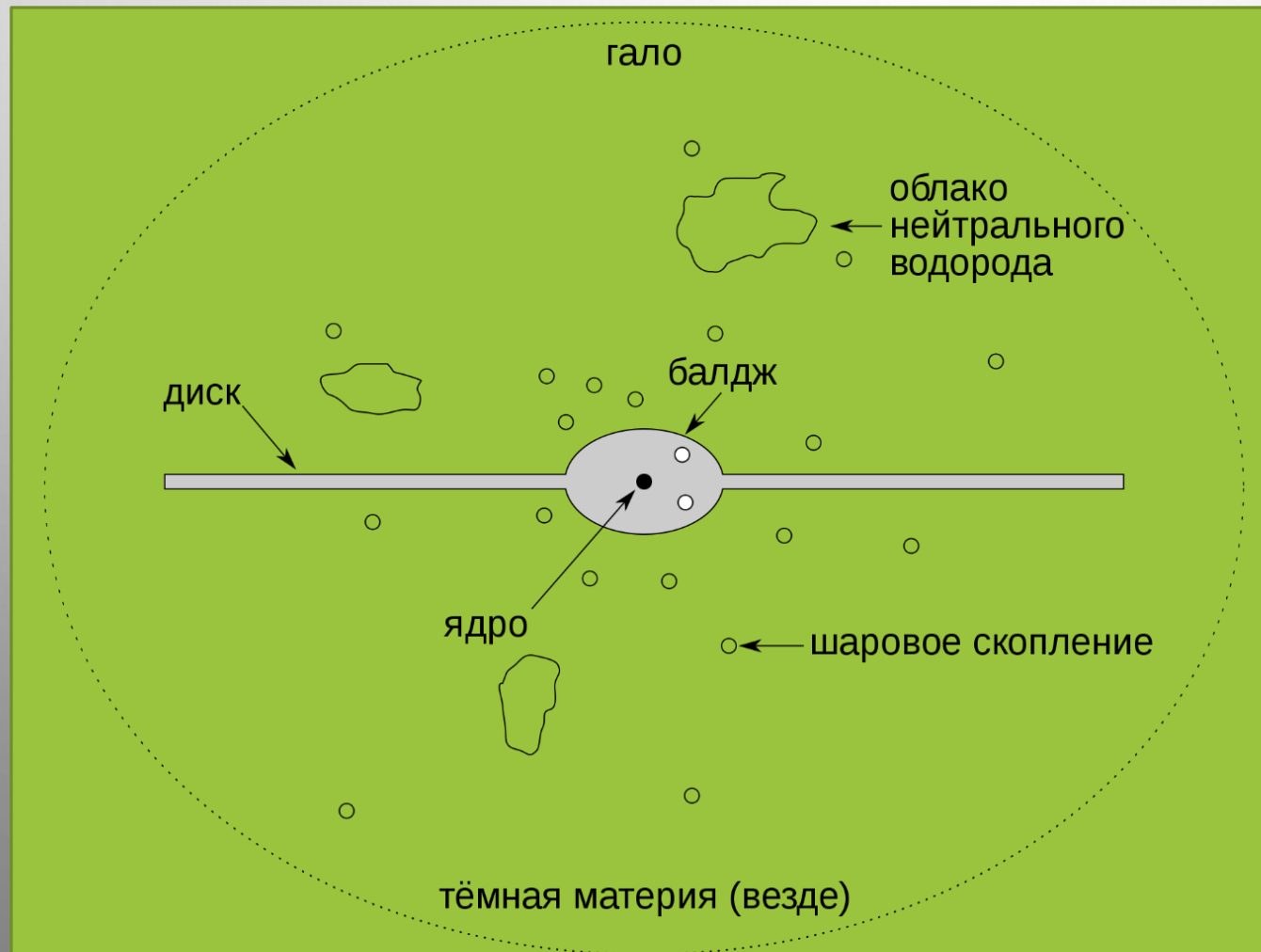
НАГРЕВ



Возраст по температуре
нельзя оценить, если у
нейтронной звезды есть
дополнительный подогрев.

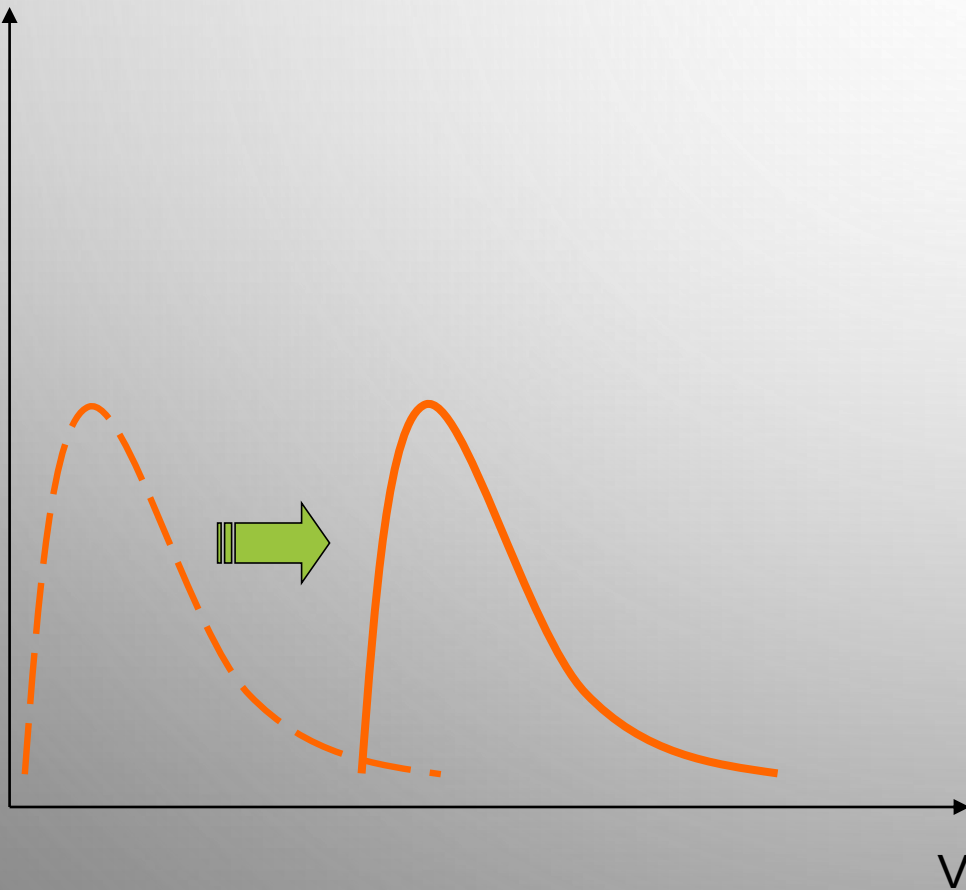
Такой есть у магнитаров.
Он связан с затуханием
электрических токов,
текущих в коре этих
нейтронных звезд.

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ ВОЗРАСТ

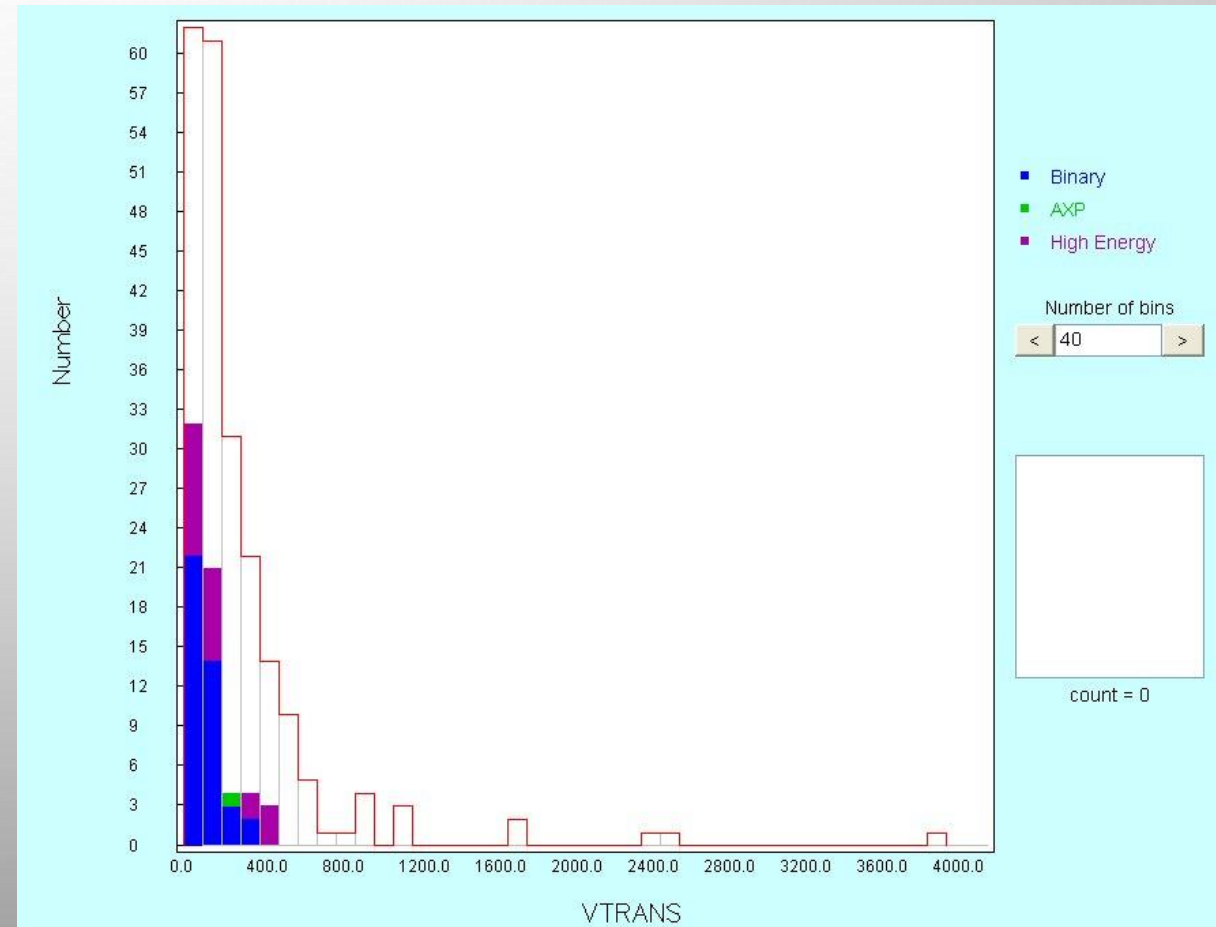


Если мы знаем, где объекты родились, то по их современному положению и скоростям можно определить возраст.

СКОРОСТИ

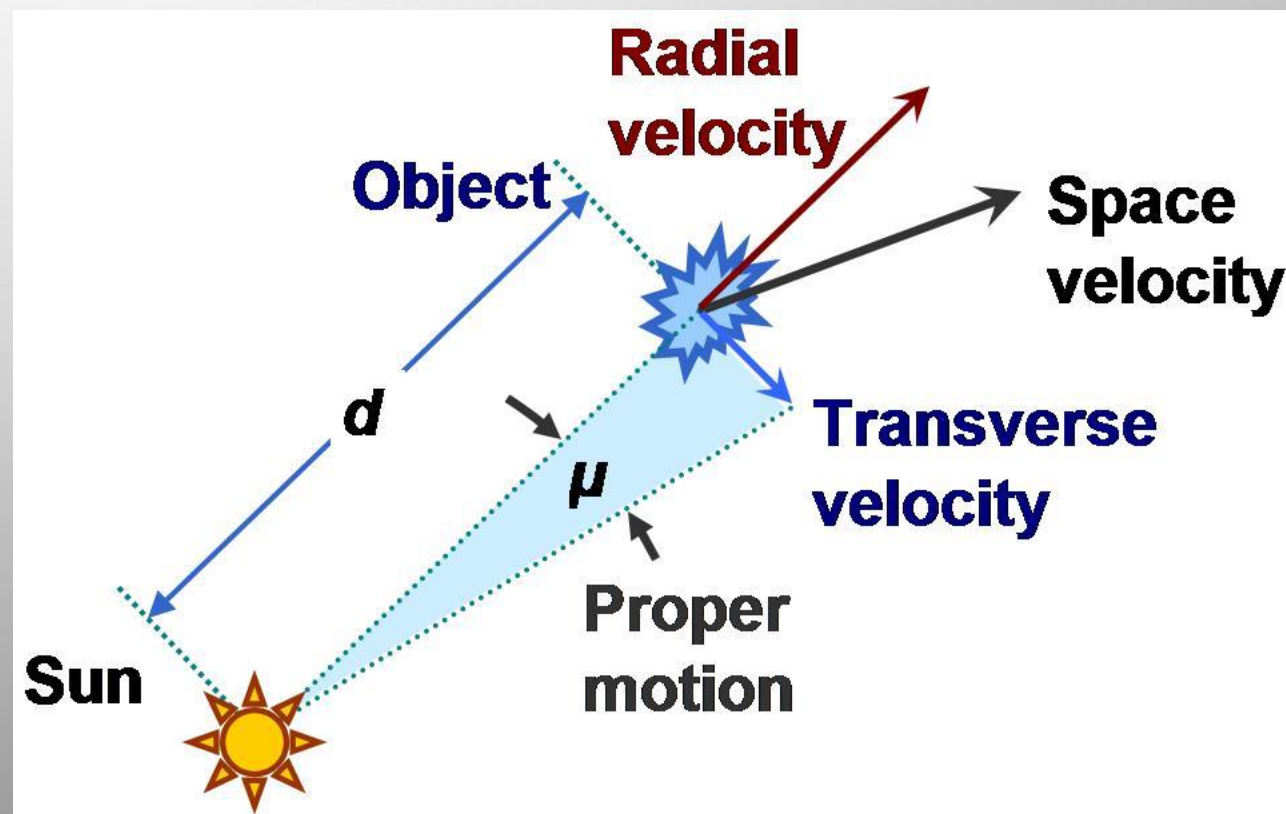
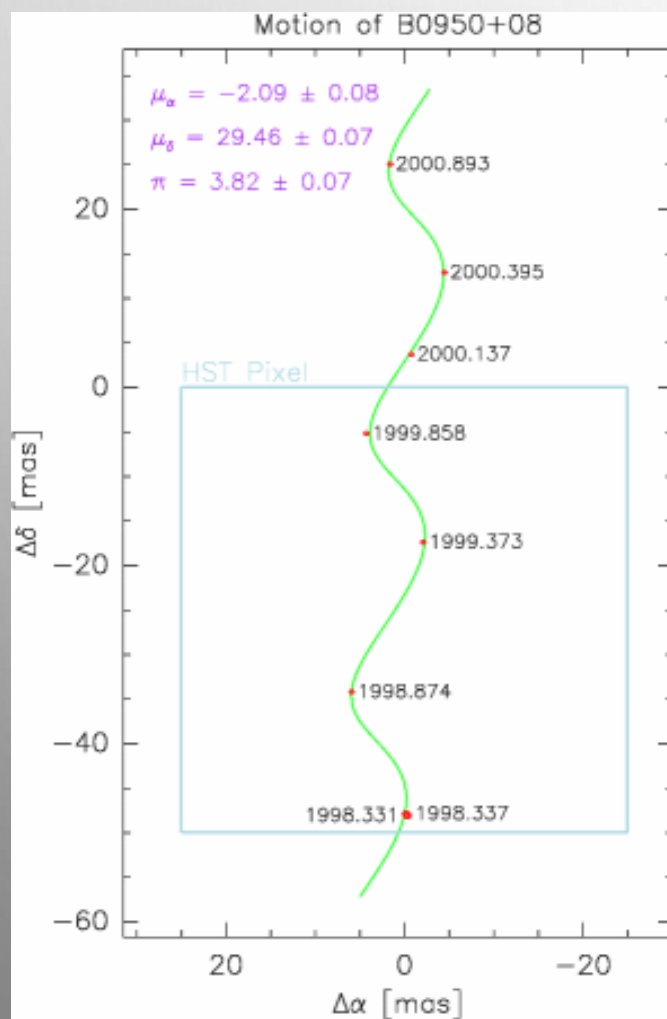


Прародители имеют скорости $\sim 10\text{-}30$ км/с
А пульсары имеют скорости $\sim 100\text{-}500$ км/с

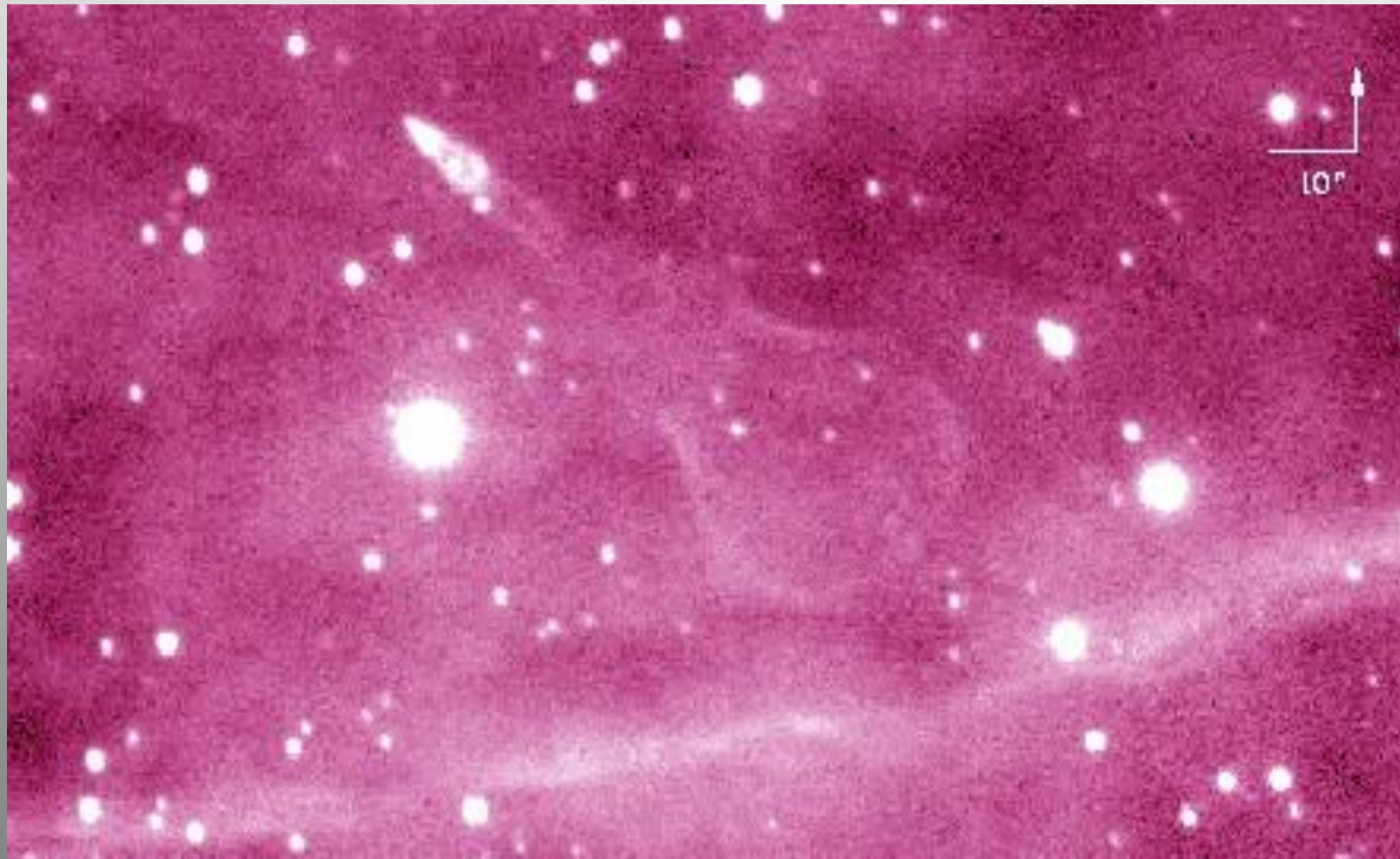


ДВИЖЕНИЕ ПУЛЬСАРОВ

Пульсары имеют большие скорости.
Это измеряют по их собственному движению.

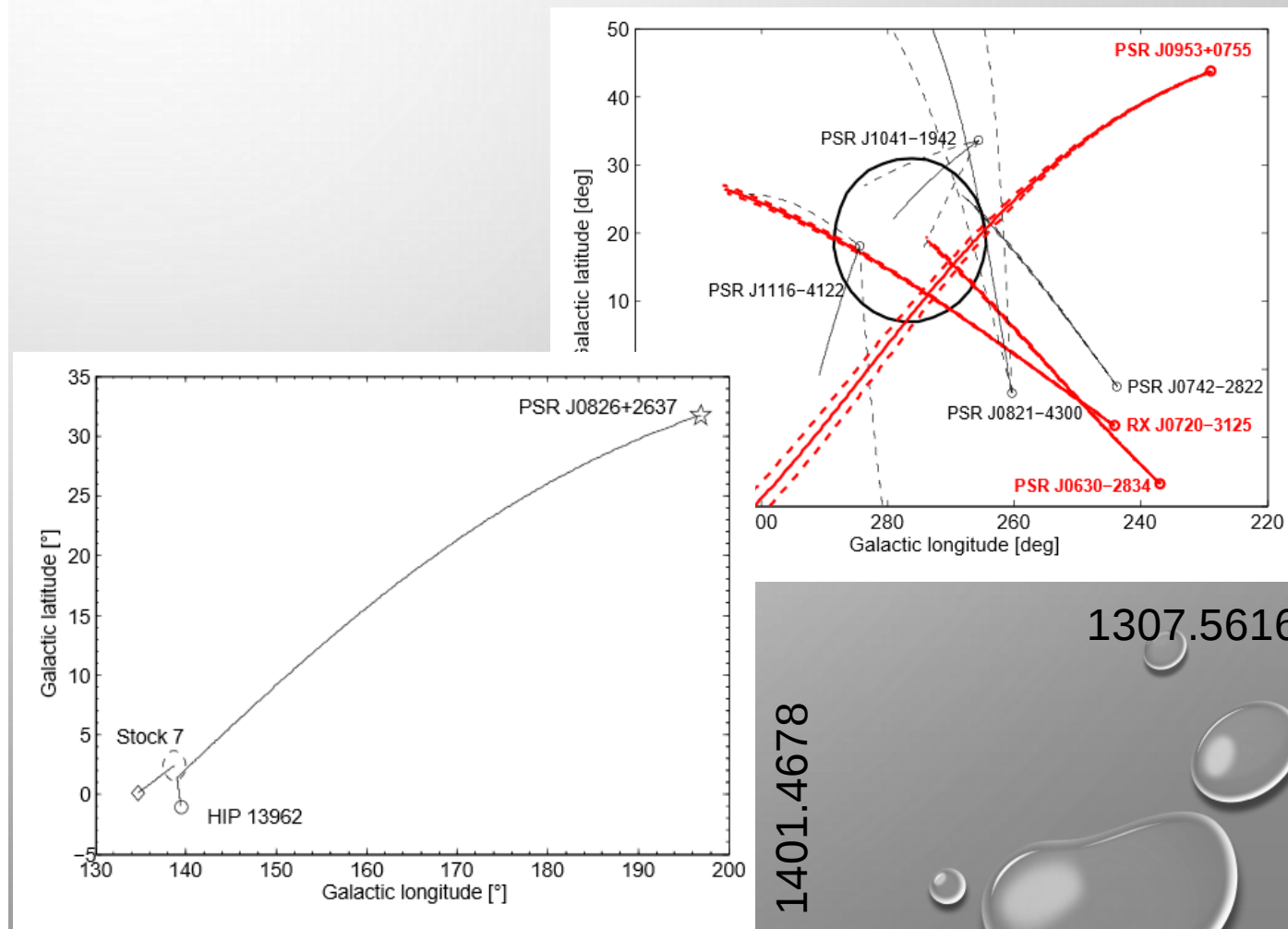
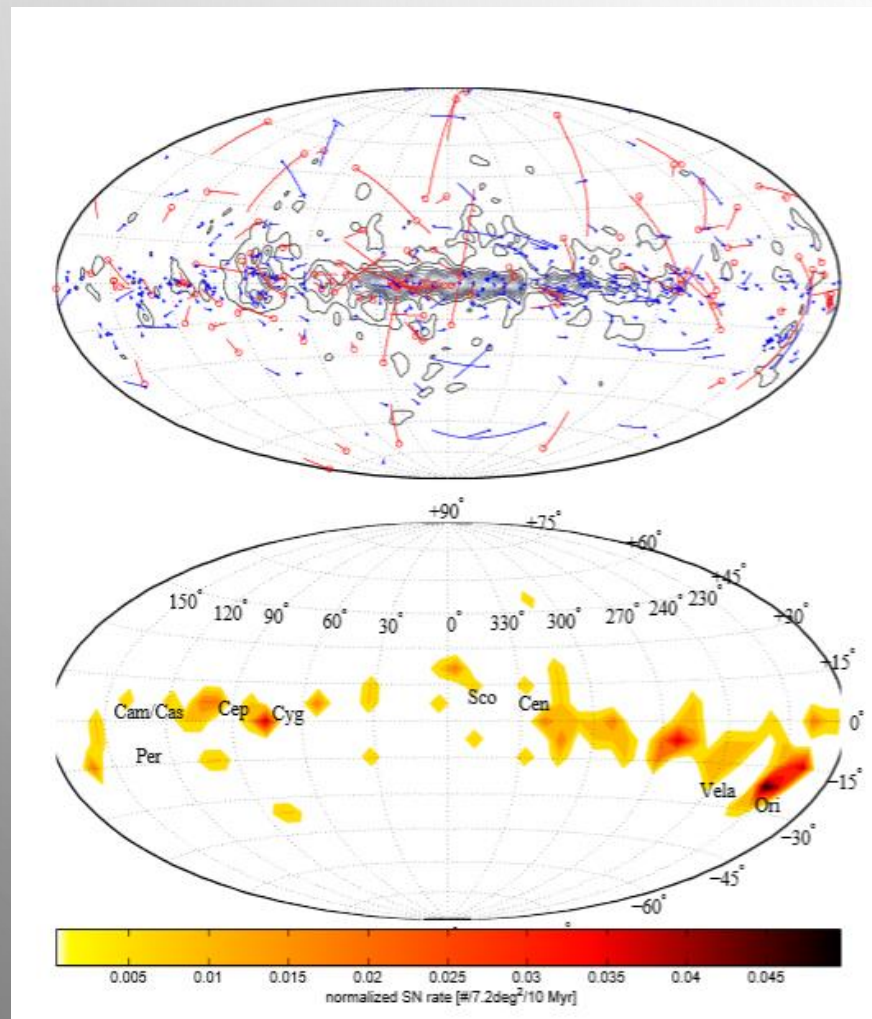


СКОРОСТИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД В ТУМАННОСТЯХ



Также можно измерять скорости нейтронных звезд по свойствам туманности, по смещению от центра остатка и по рентгеновским наблюдениям.

ТРАЕКТОРИИ И МЕСТА РОЖДЕНИЯ

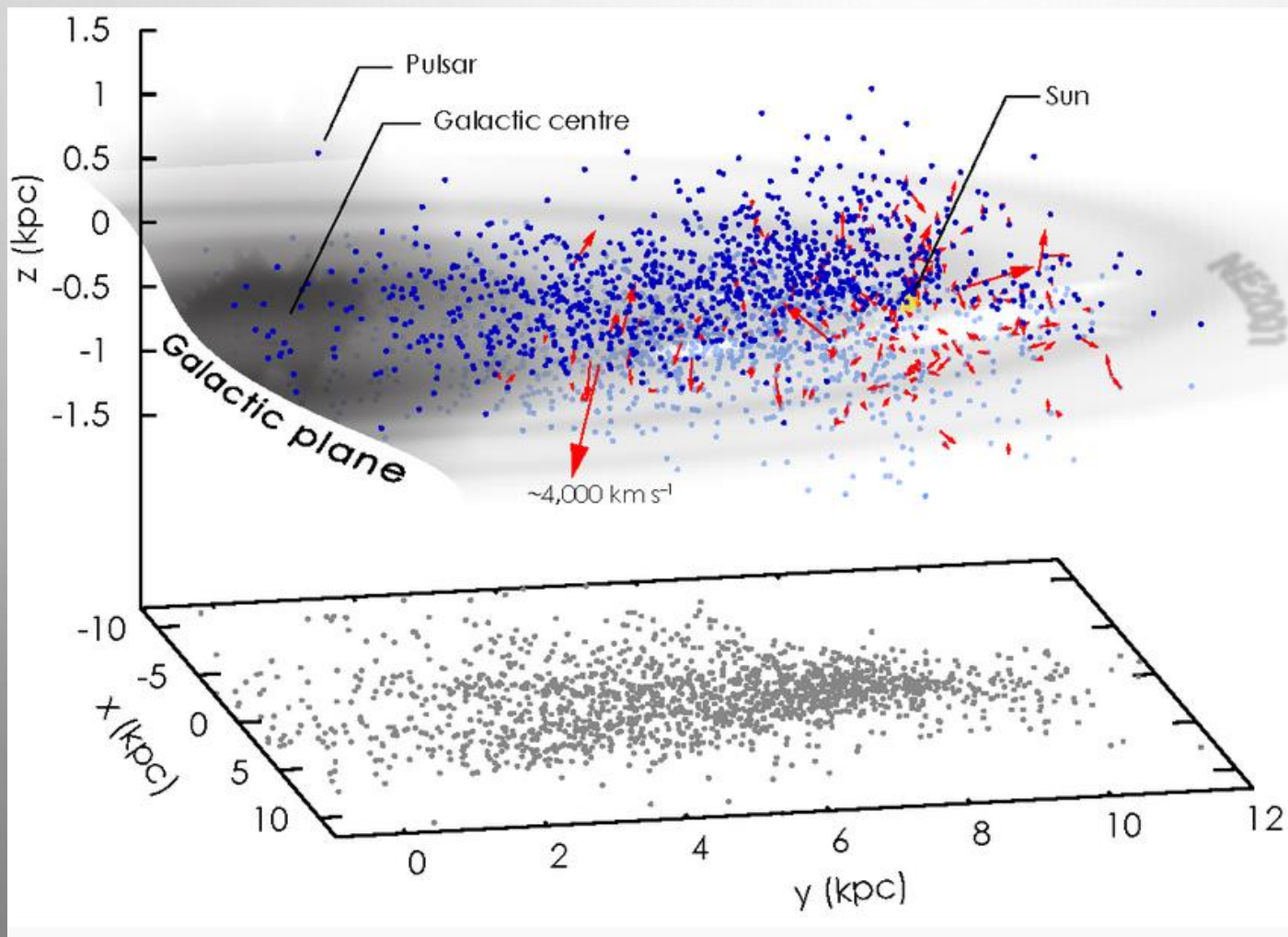


1202.1388

1401.4678

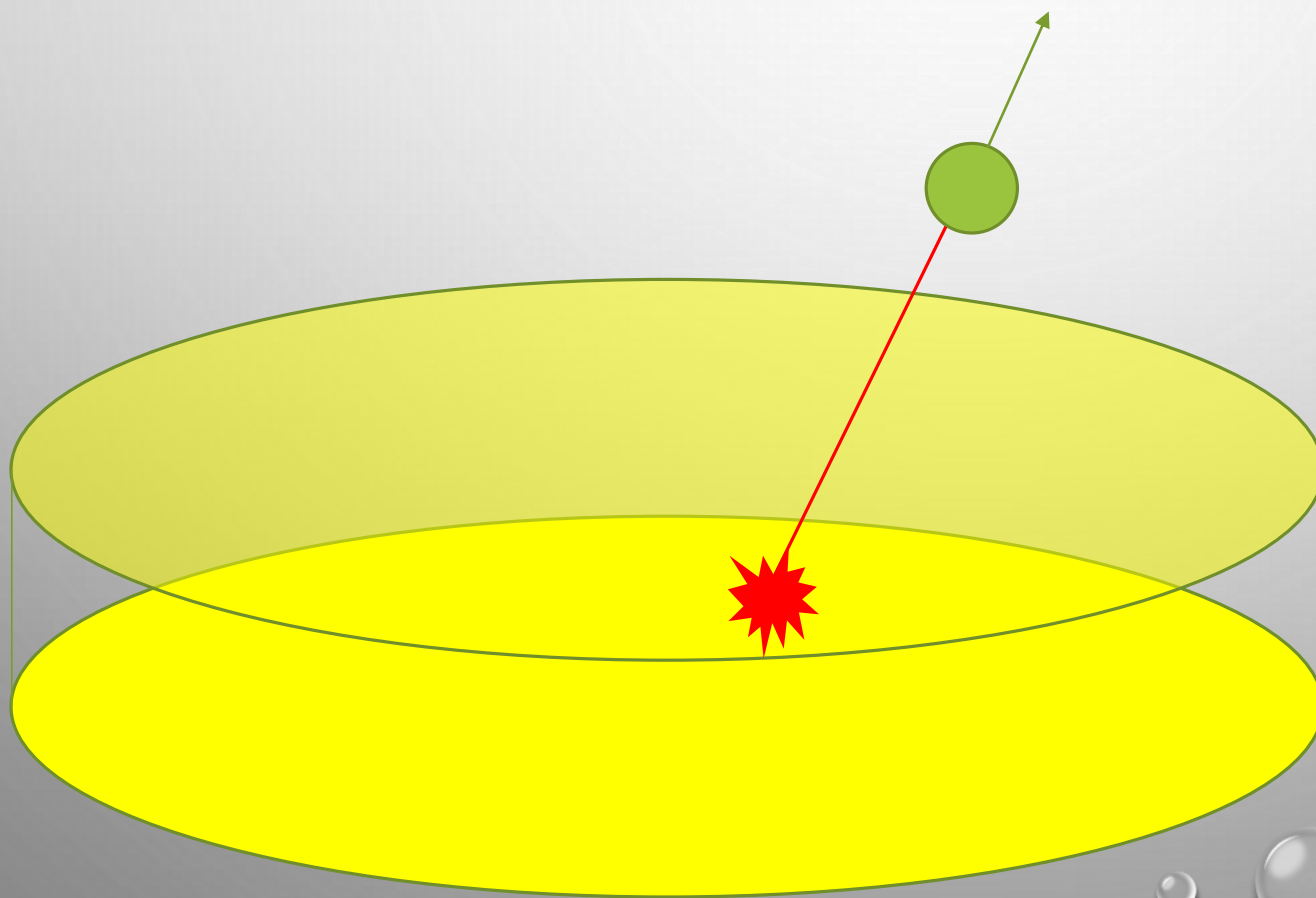
1307.5616

ПУЛЬСАРЫ В ГАЛАКТИКЕ



Пульсары рождаются в диске.
А в диске они концентрируются
к спиральным ветвям.

ПУЛЬСАРЫ ИЗ ДИСКА



Для оценки кинематического возраста часто удобно считать, что пульсар родился в плоскости Галактики.

Т.о., зная современное положение нейтронной звезды, ее скорость и место рождения, можно определить ее возраст.