

НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

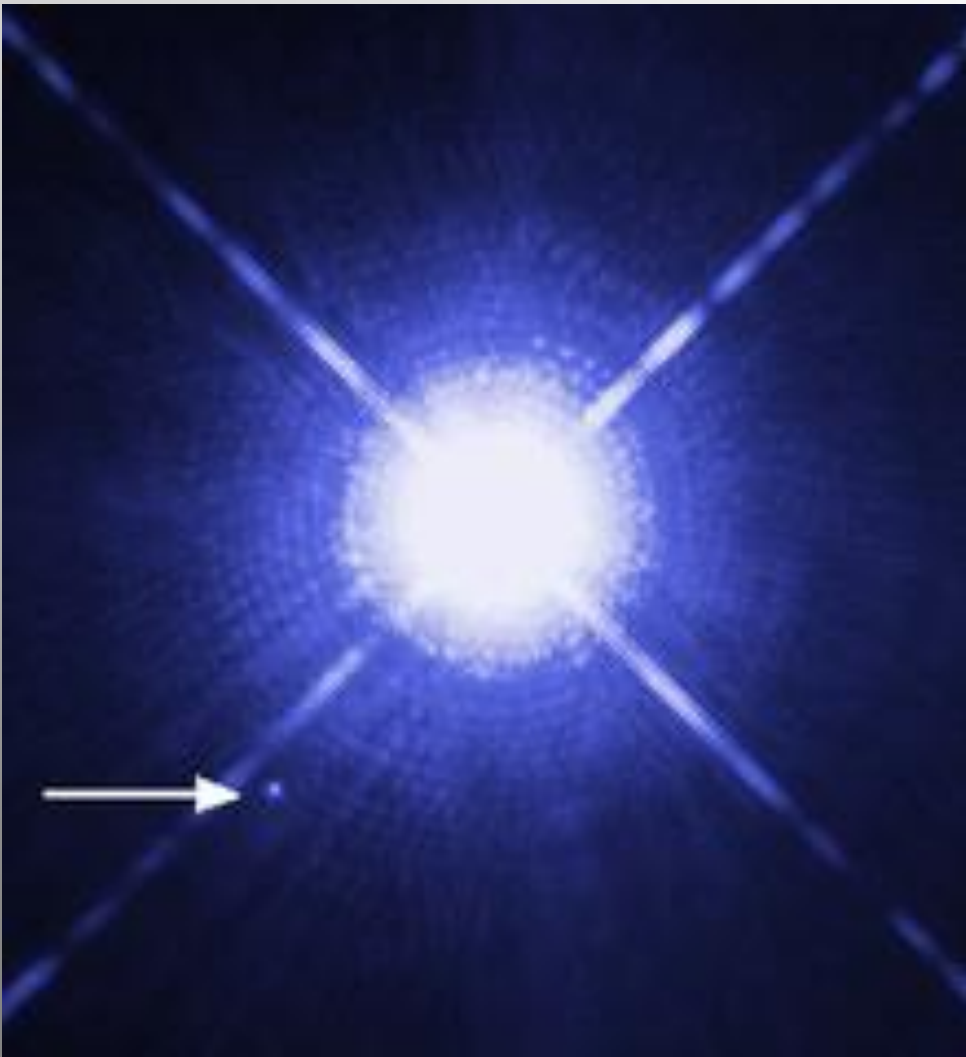
СЕРГЕЙ ПОПОВ
(ГАИШ МГУ)

НЕОБЫЧНЫЕ КОМПАКТНЫЕ ЗВЕЗДЫ

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

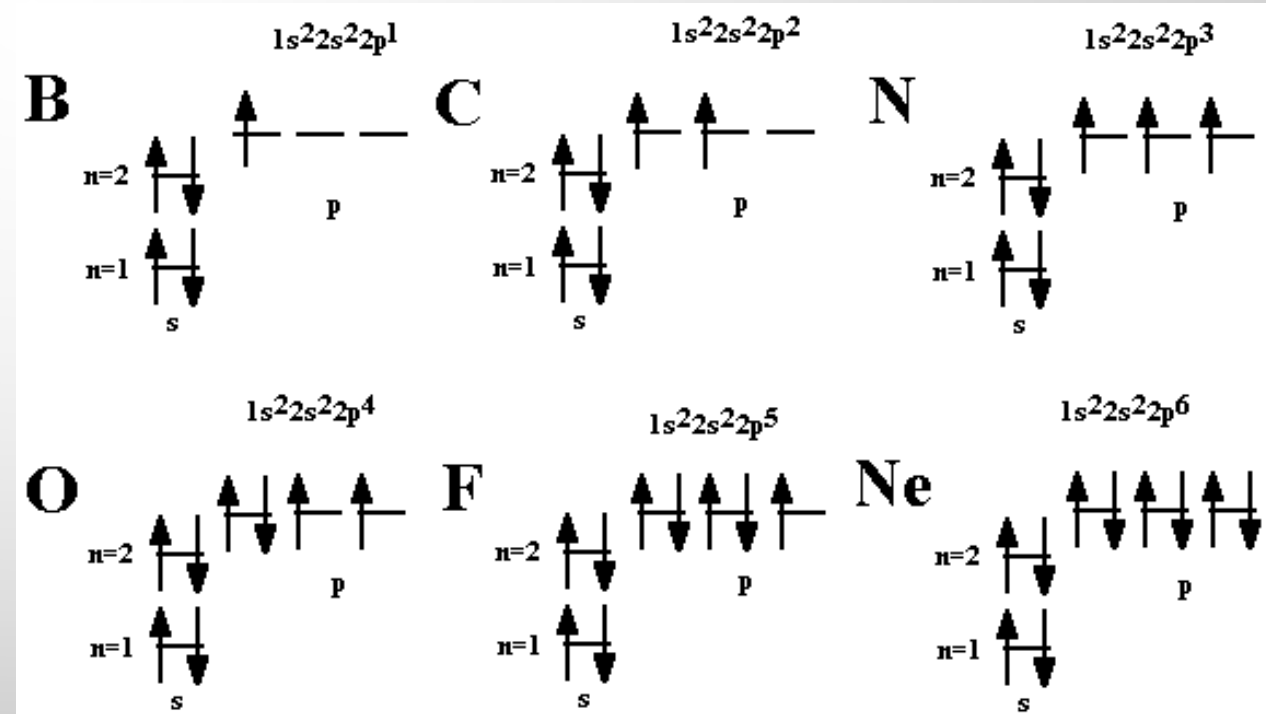
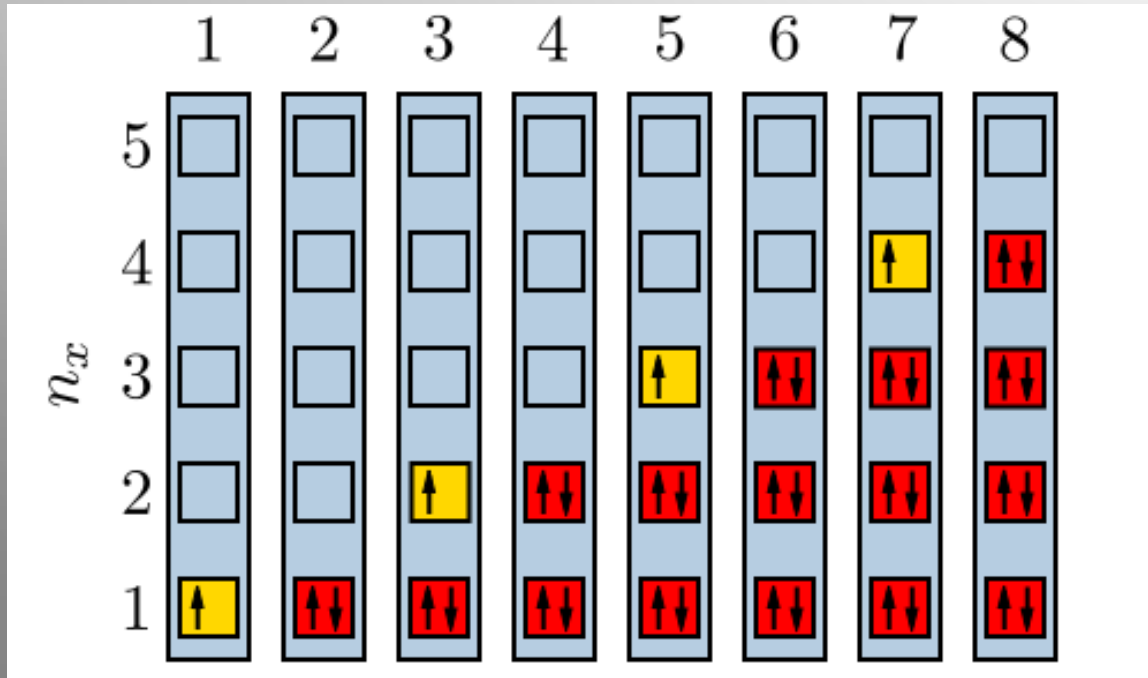
При массе порядка солнечной они имеют массу порядка земной.

Для объяснения природы этих объектов понадобилась квантовая механика.

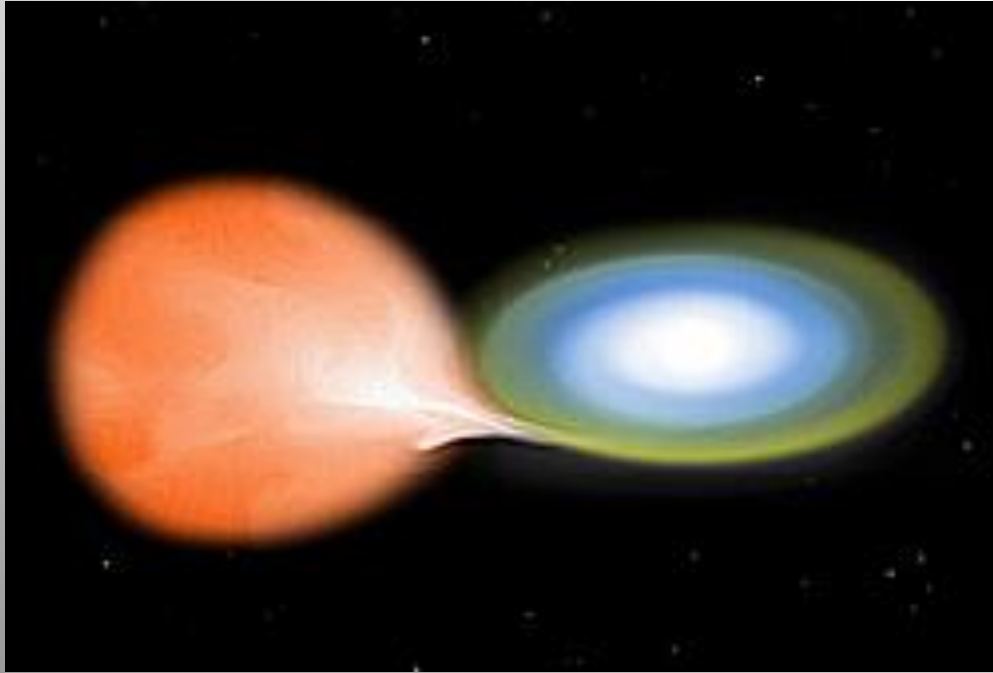


ЗАПРЕТ ПАУЛИ

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

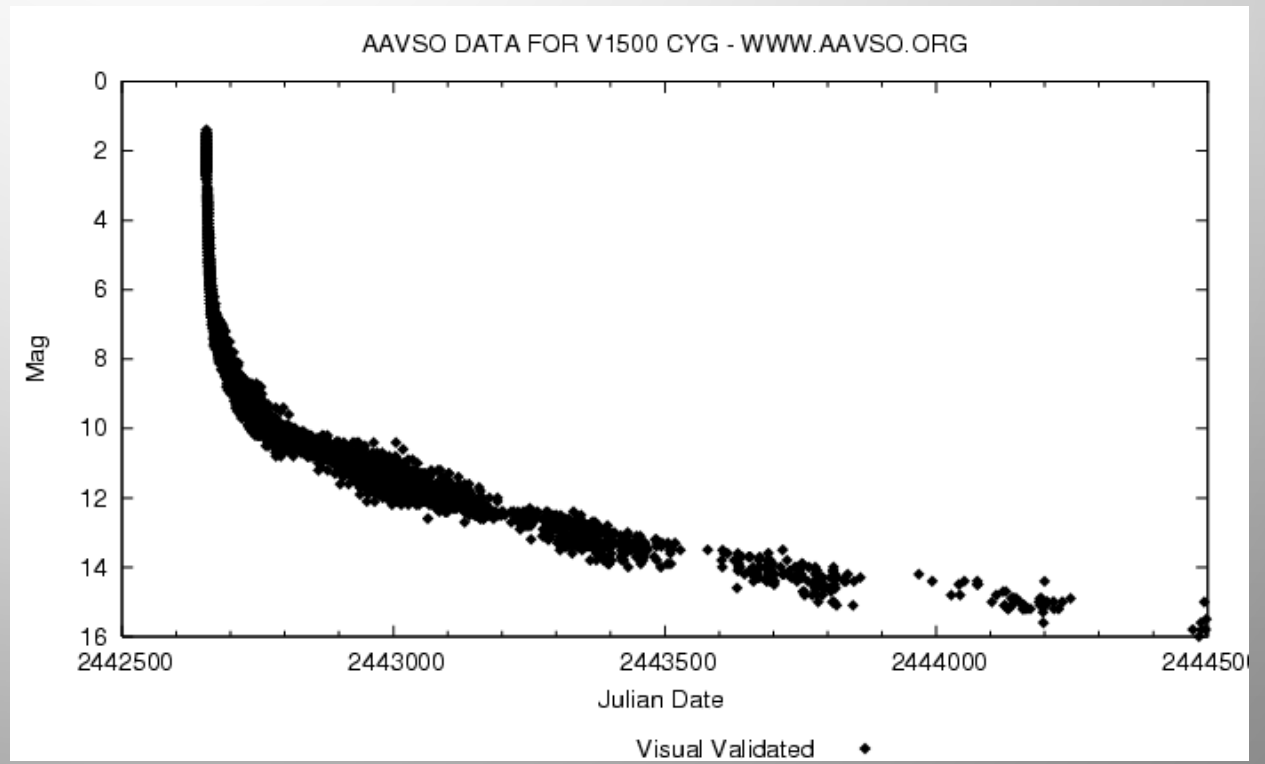


НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

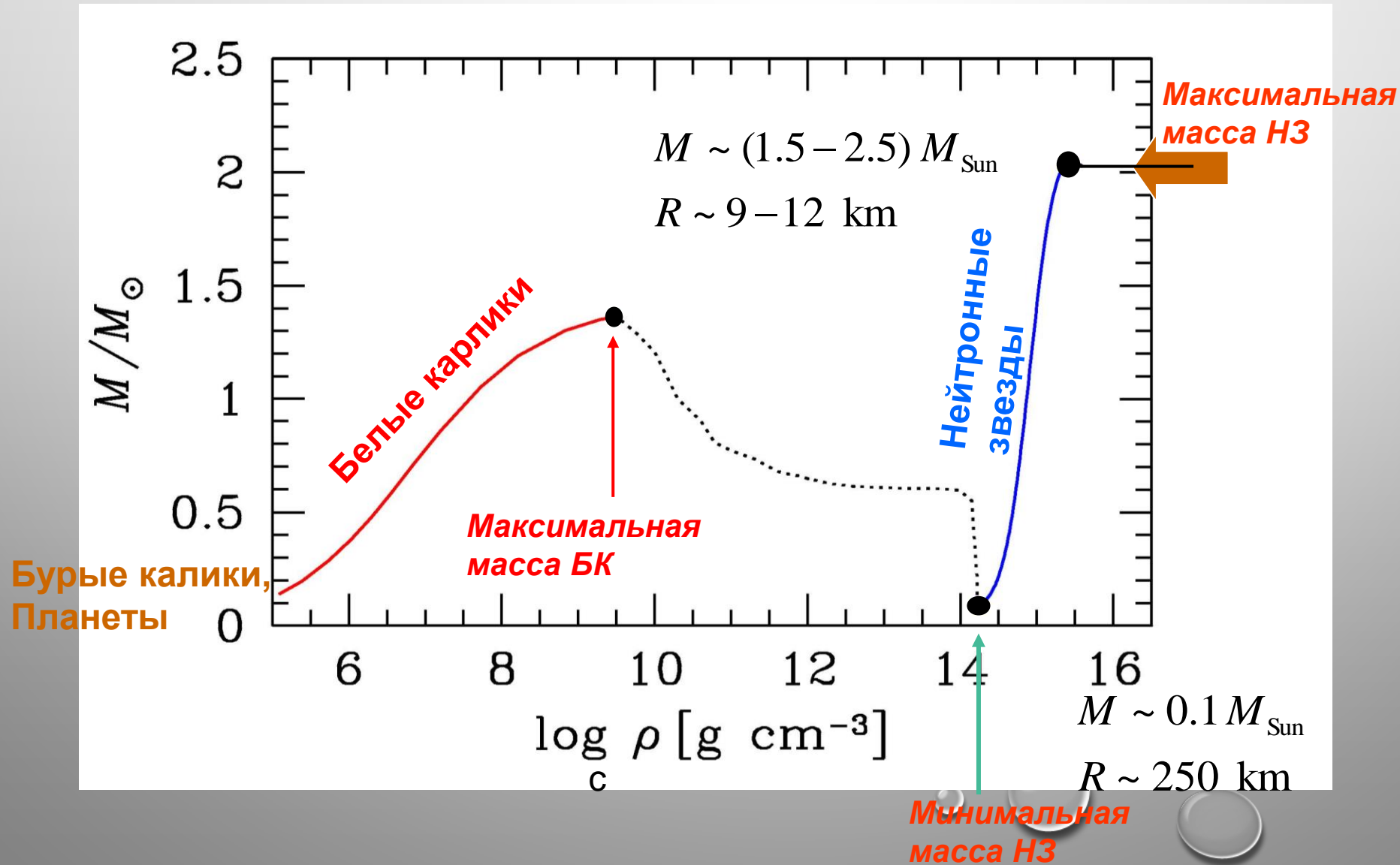


Перетекающее вещество накапливается на поверхности белого карлика, пока не происходит взрыв.

Термоядерное взрывное горение водорода

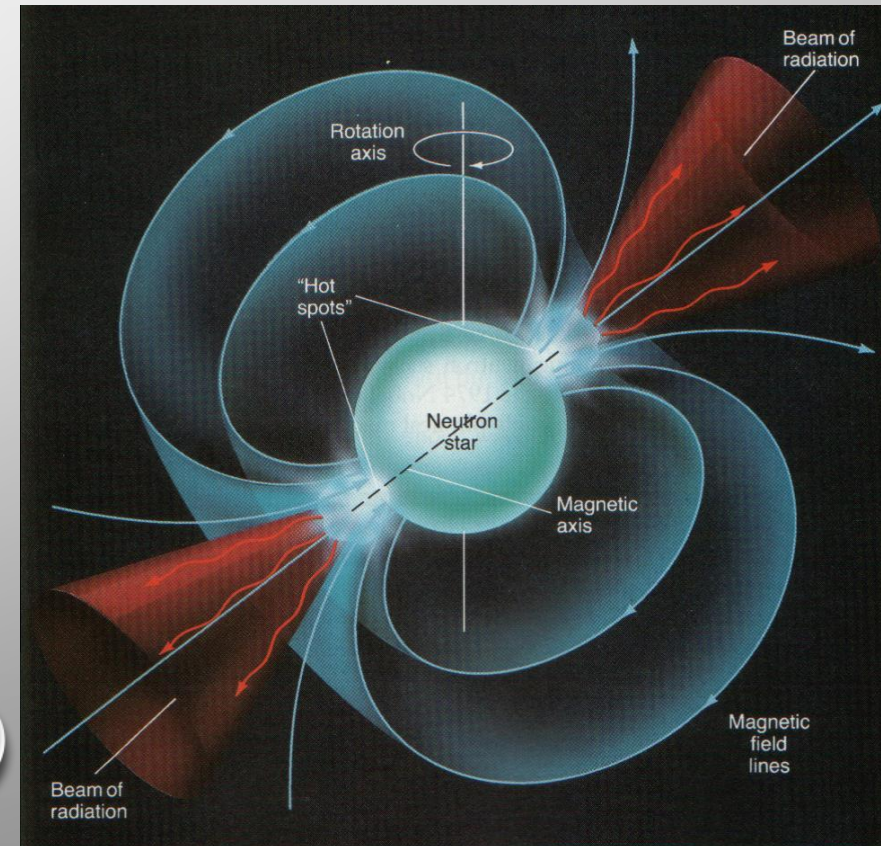
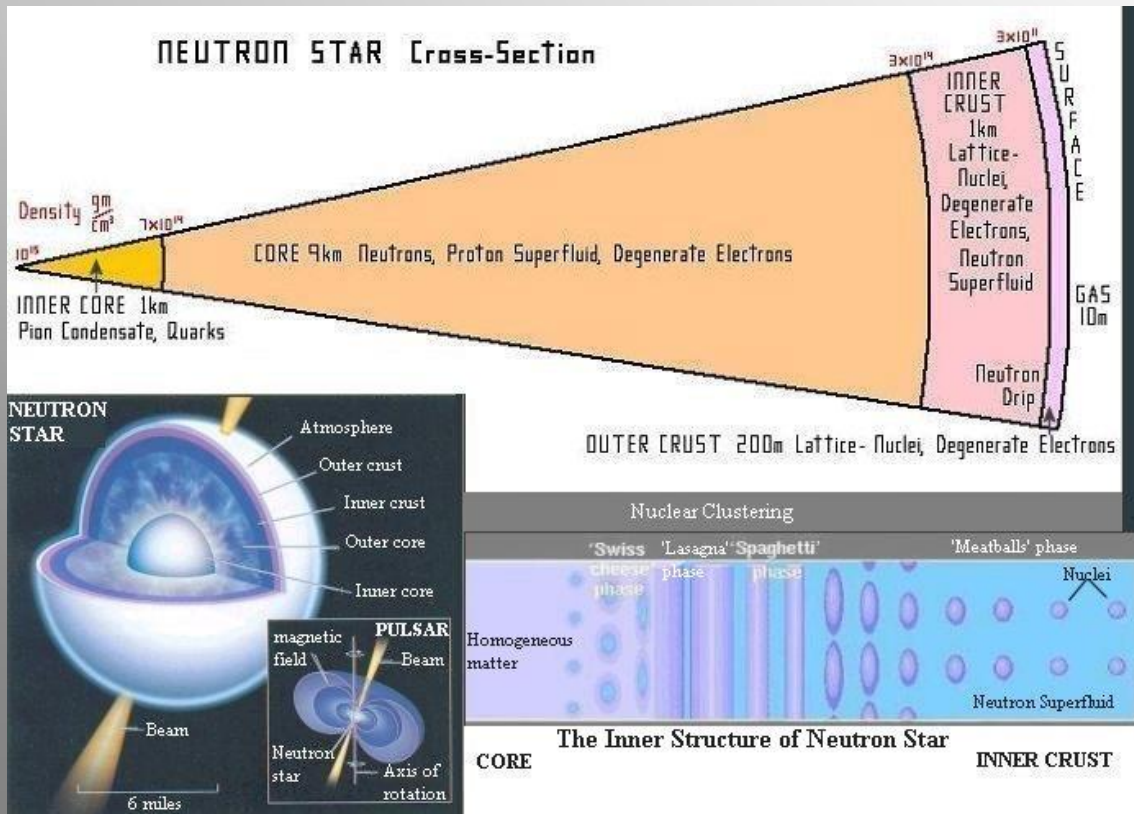


МАССЫ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД И БЕЛЫХ КАРЛИКОВ



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



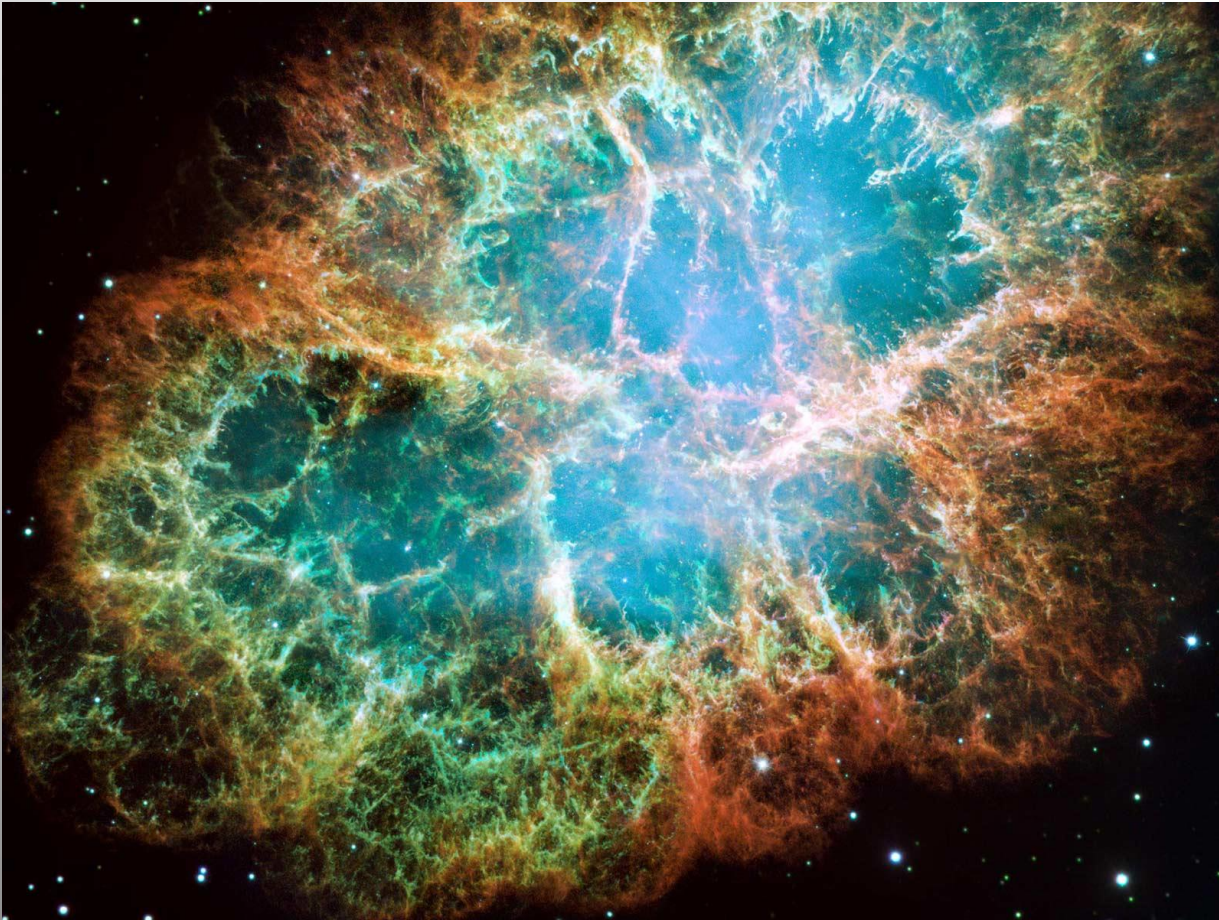
Бааде



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.

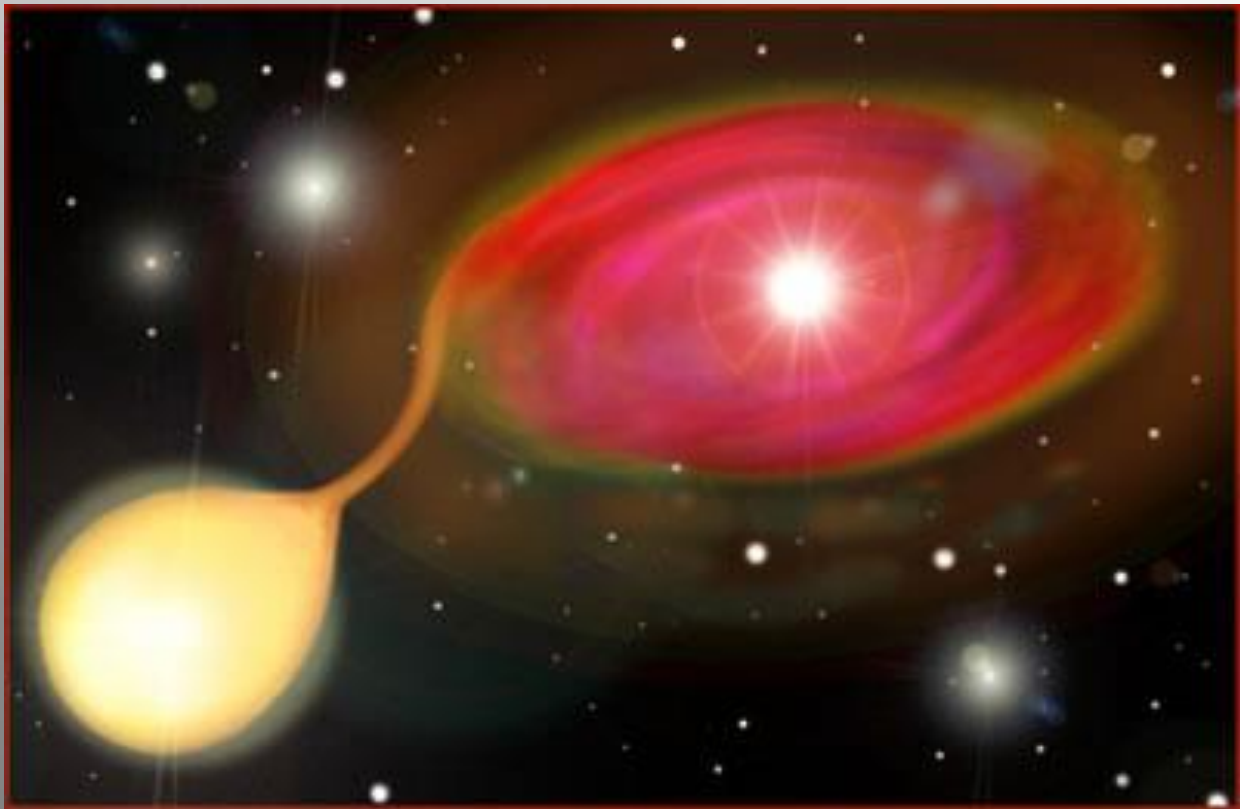
Внутри туманности может
существовать плерион.

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»....

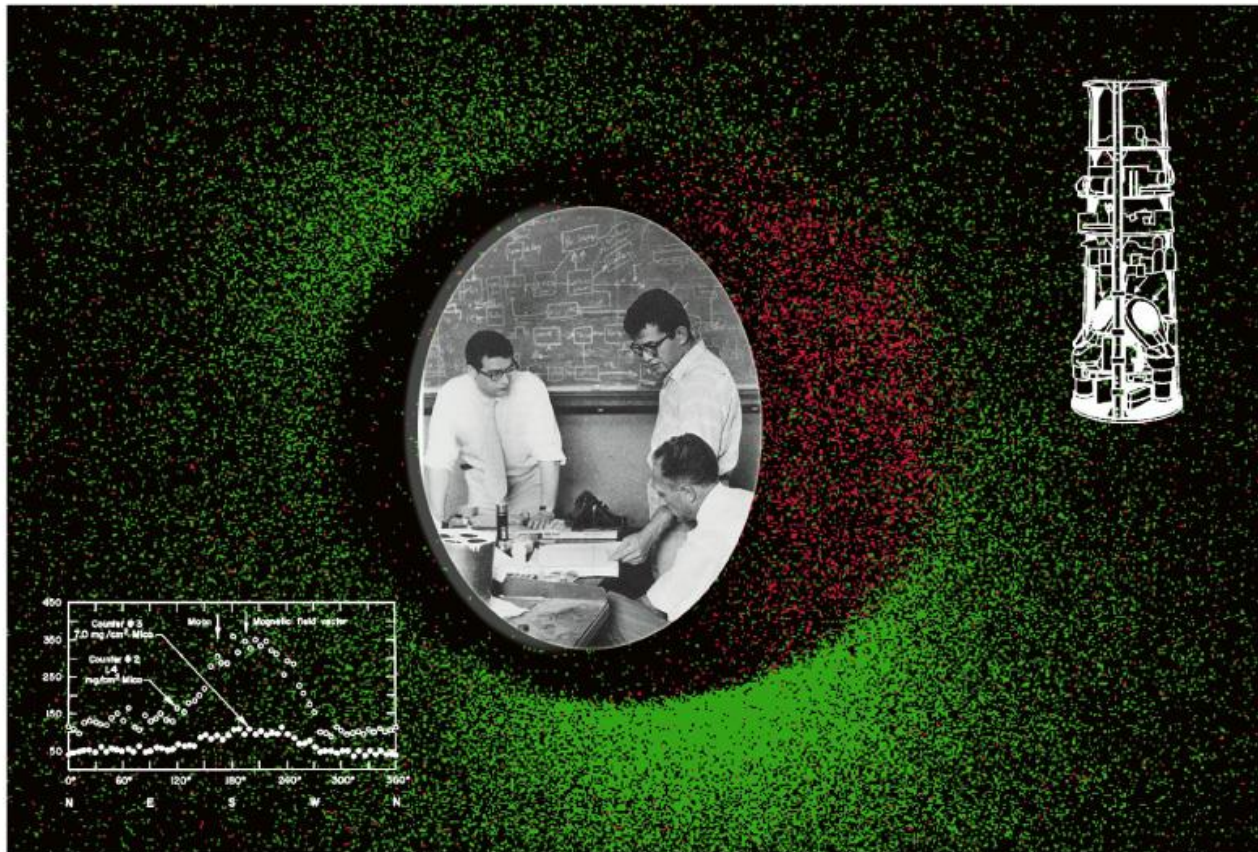


Сейчас известны сотни рентгеновских двойных с нейтронными звездами в нашей и других галактиках.

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.

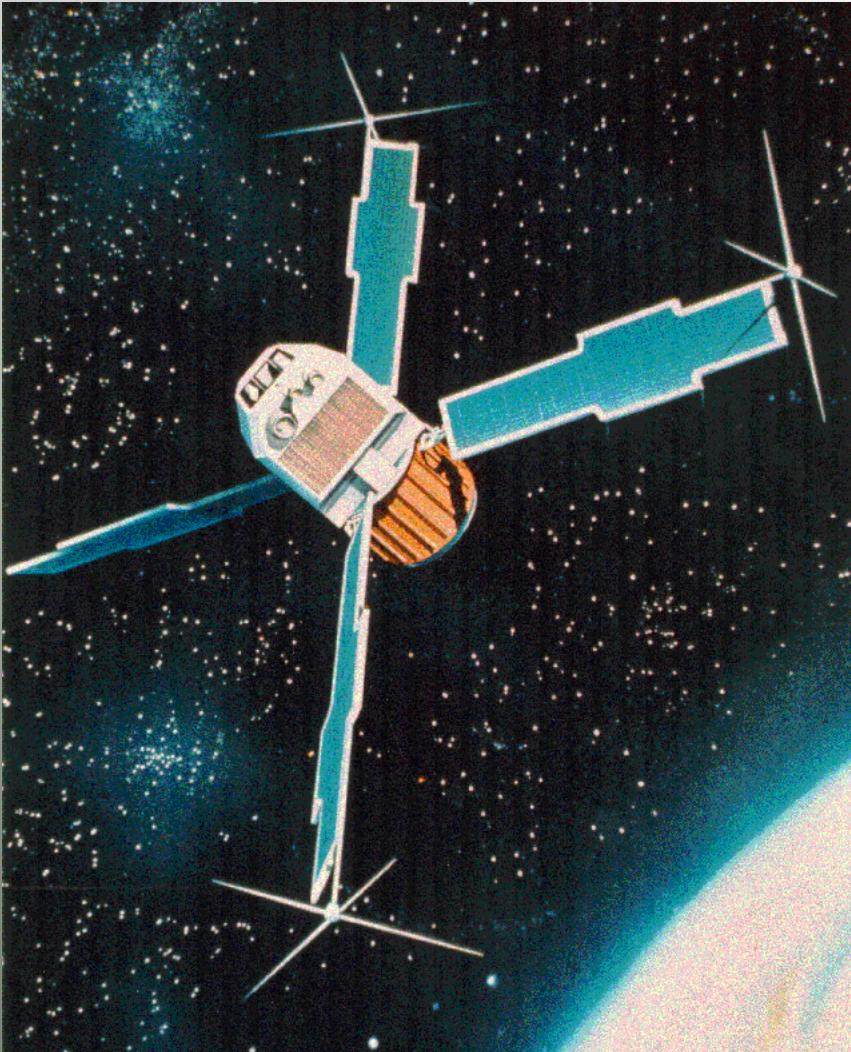
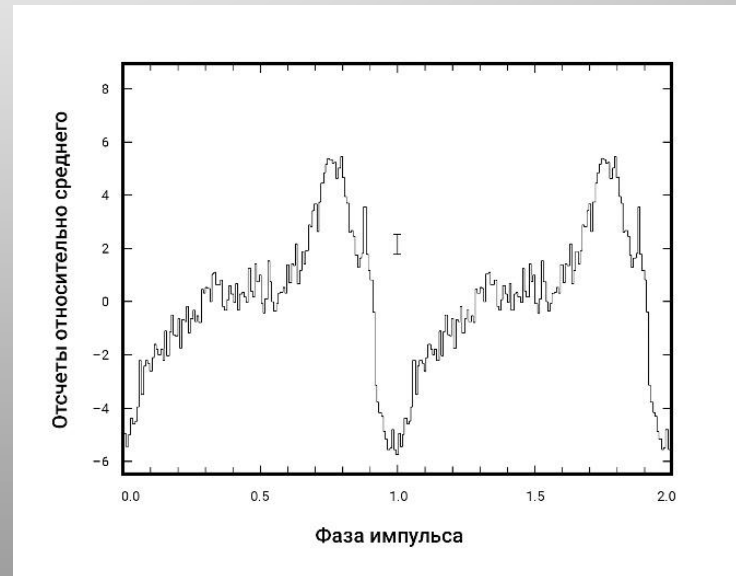
UHURU

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

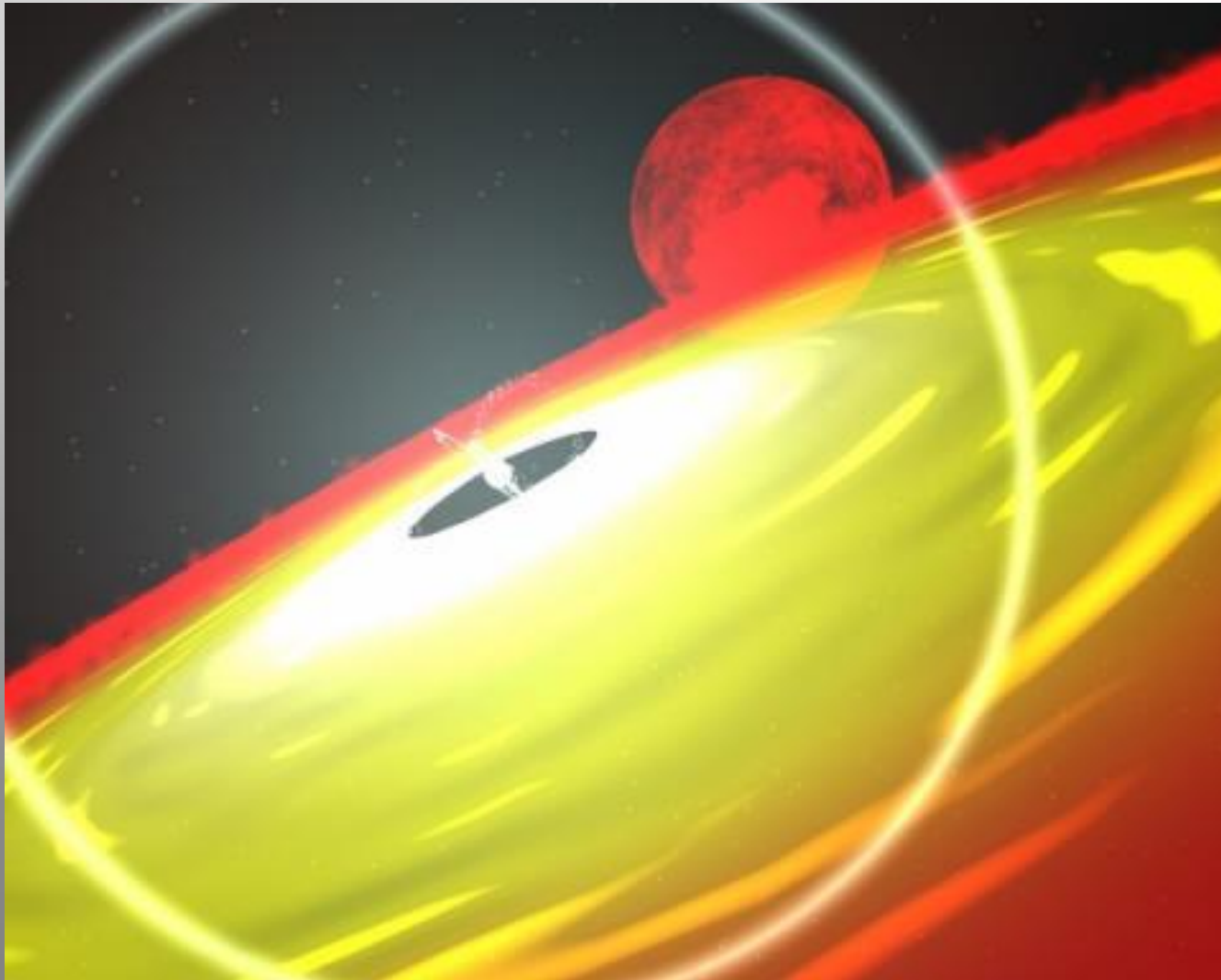
Другое название SAS-1

2-20 кэВ

Первый полный обзор неба.
339 источника.



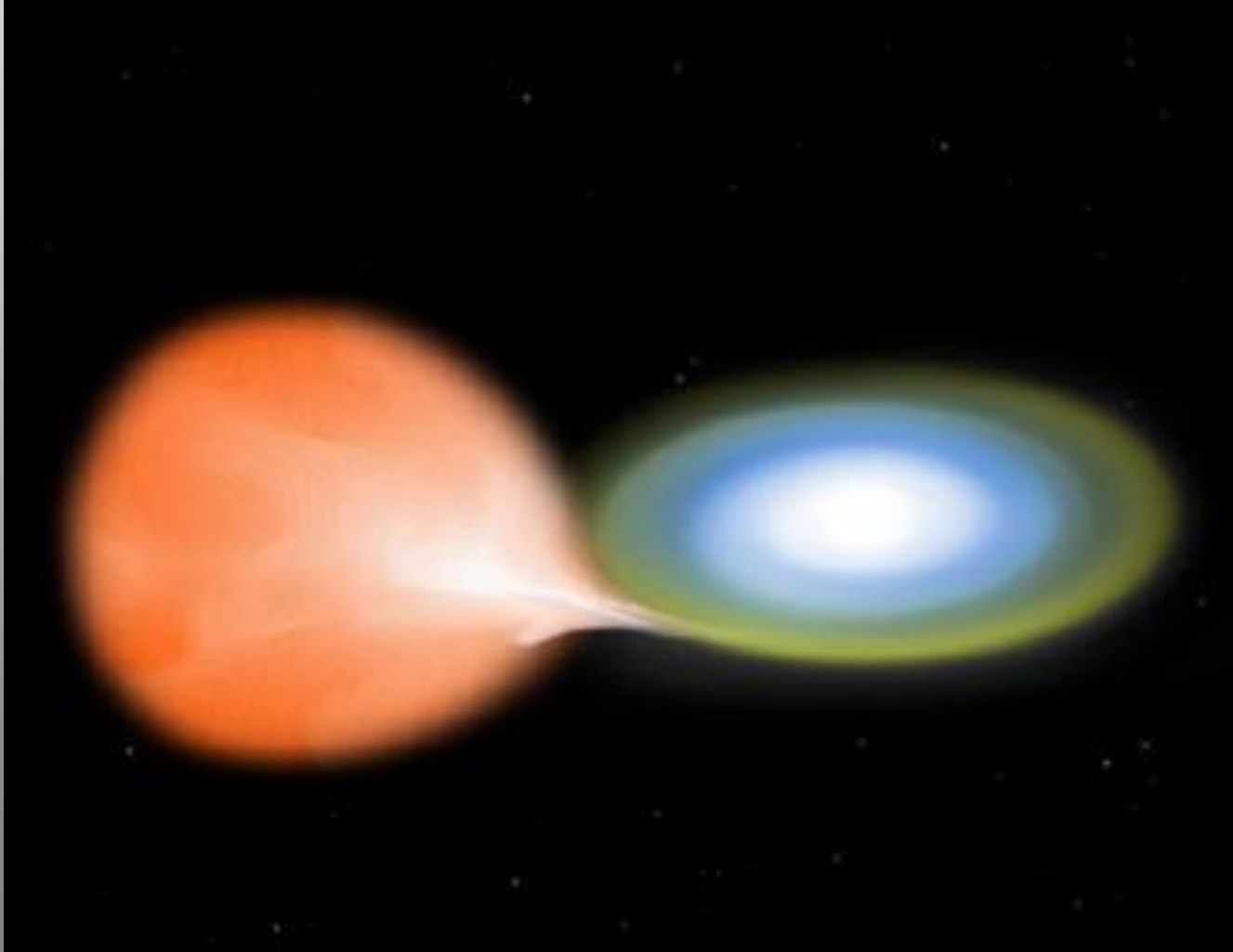
АККРЕЦИЯ В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ



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

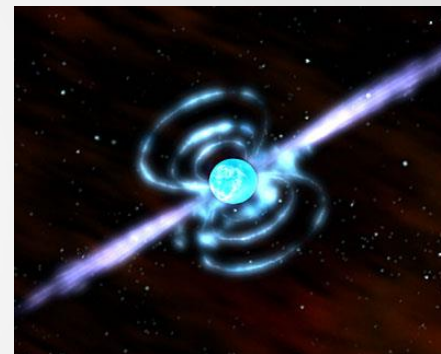
ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ



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

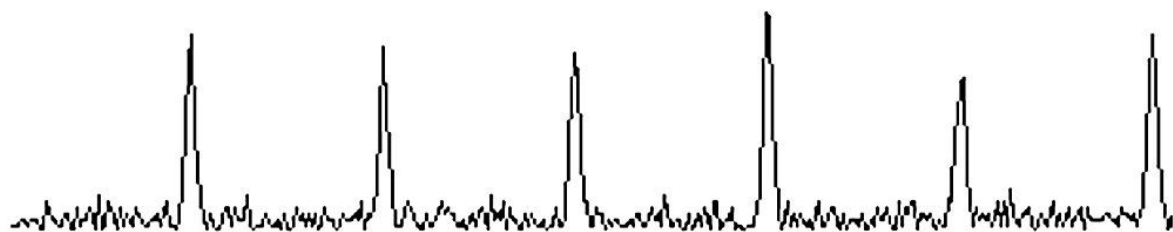
Сейчас в тесных двойных
системах известны многие
сотни нейтронных звезд.

ОТКРЫТИЕ !!!!



1967: Джоселин Белл. Радиопульсары.

Серендипическое открытие.



ПУЛЬСАР В КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

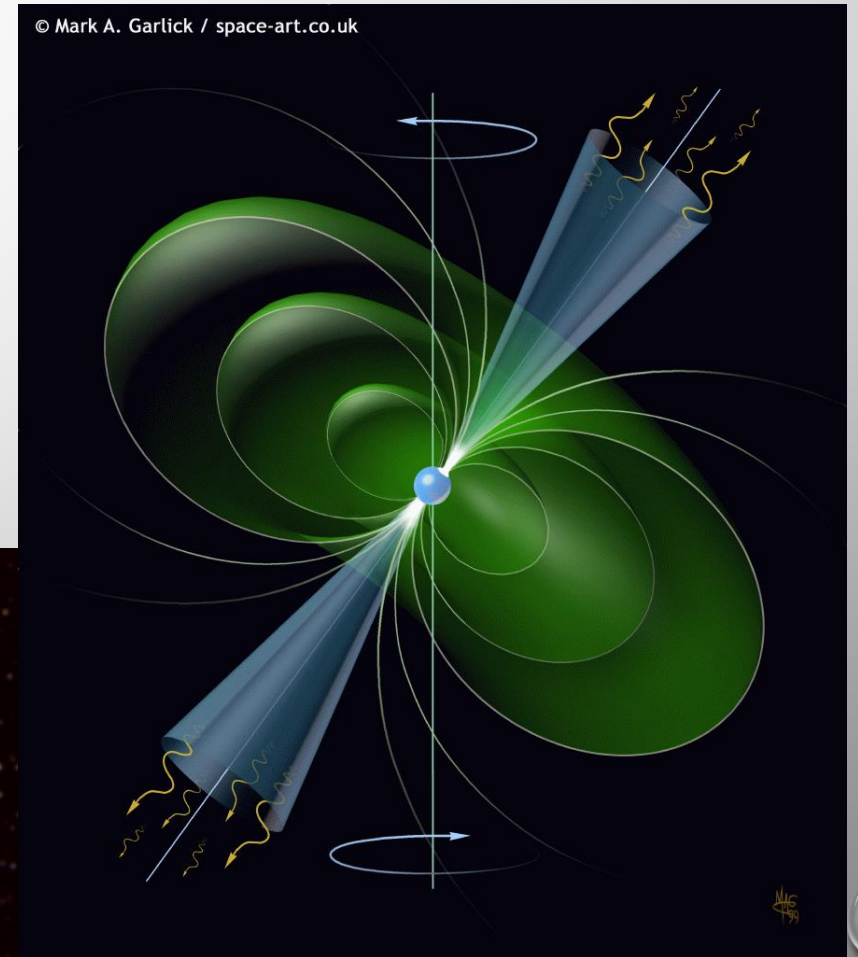
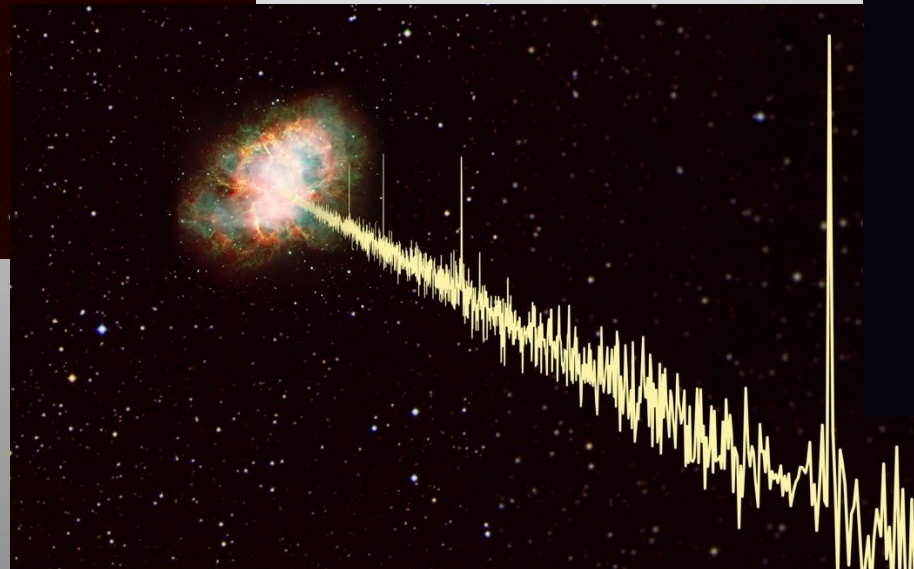
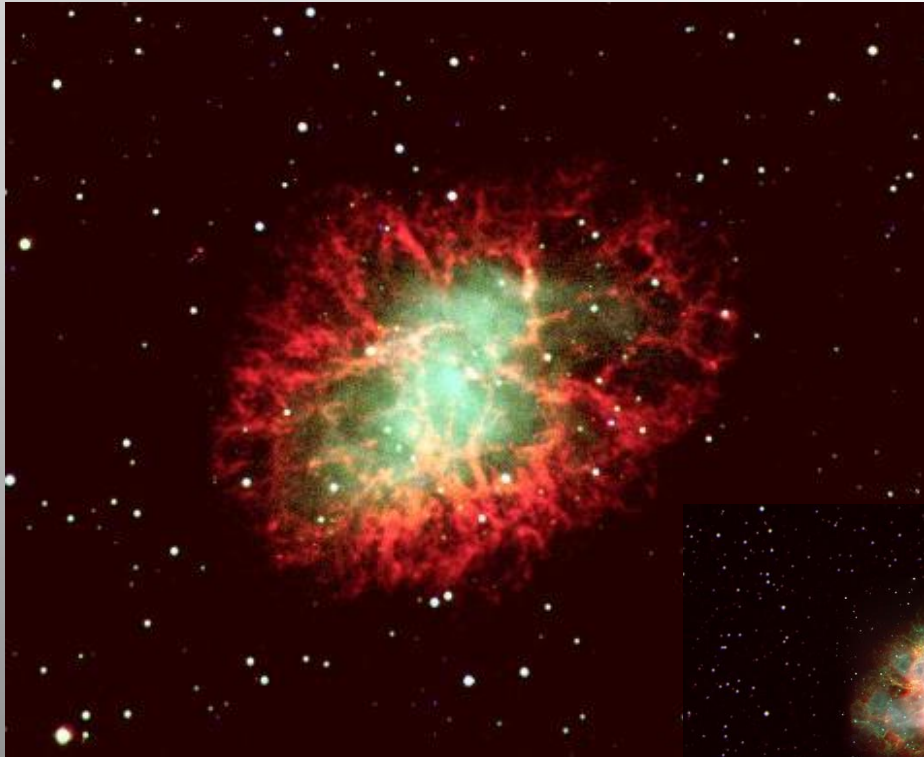
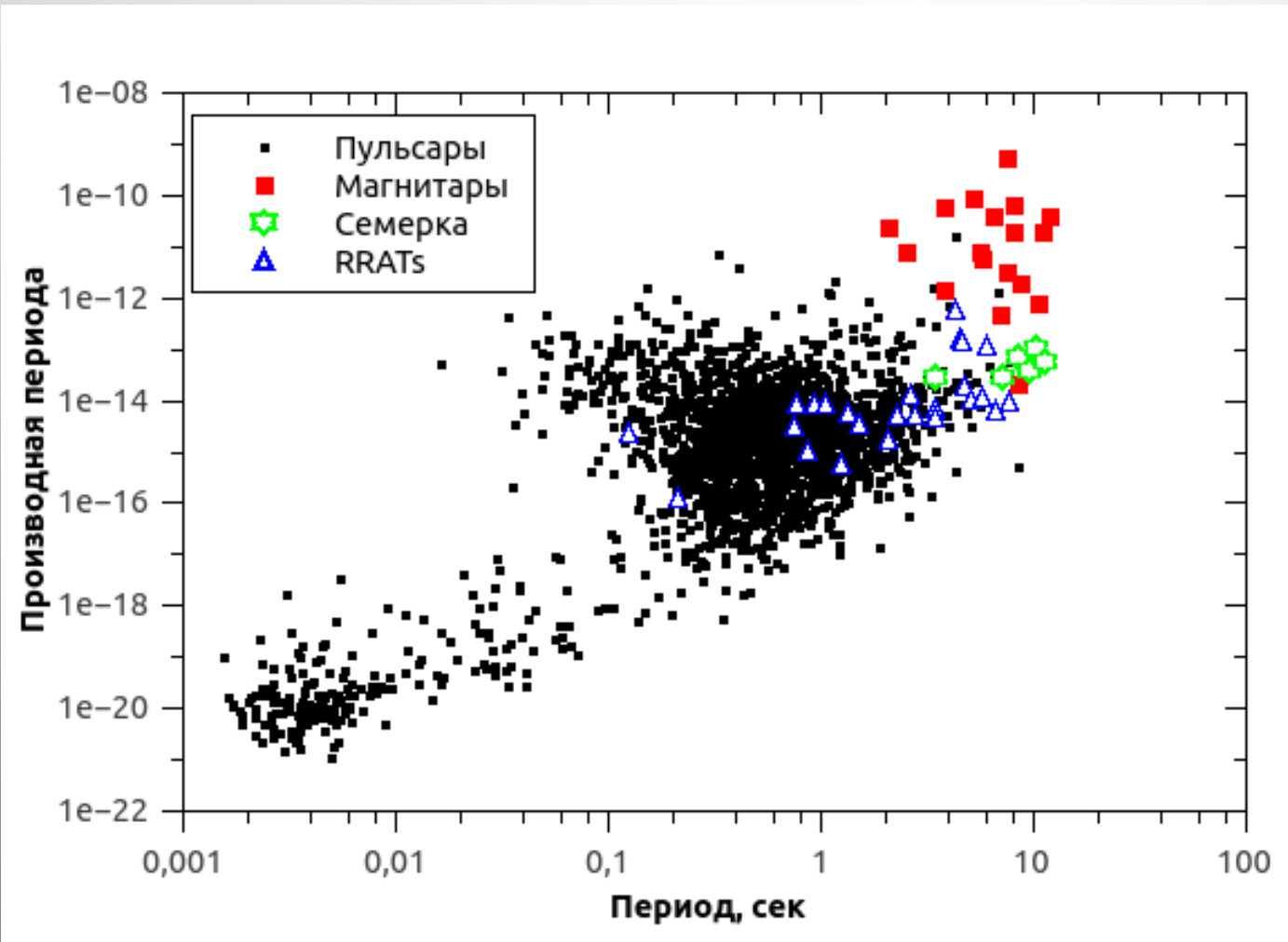
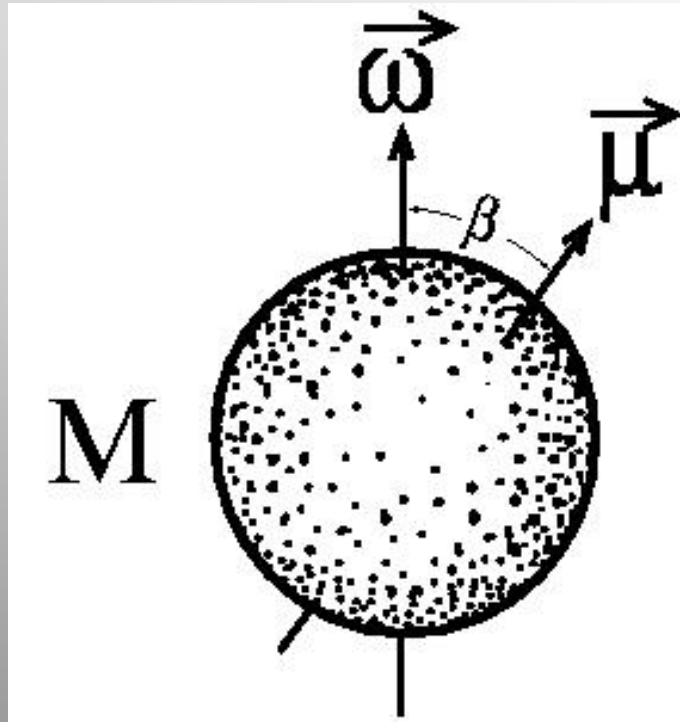


ДИАГРАММА ПЕРИОД - ПРОИЗВОДНАЯ ПЕРИОДА



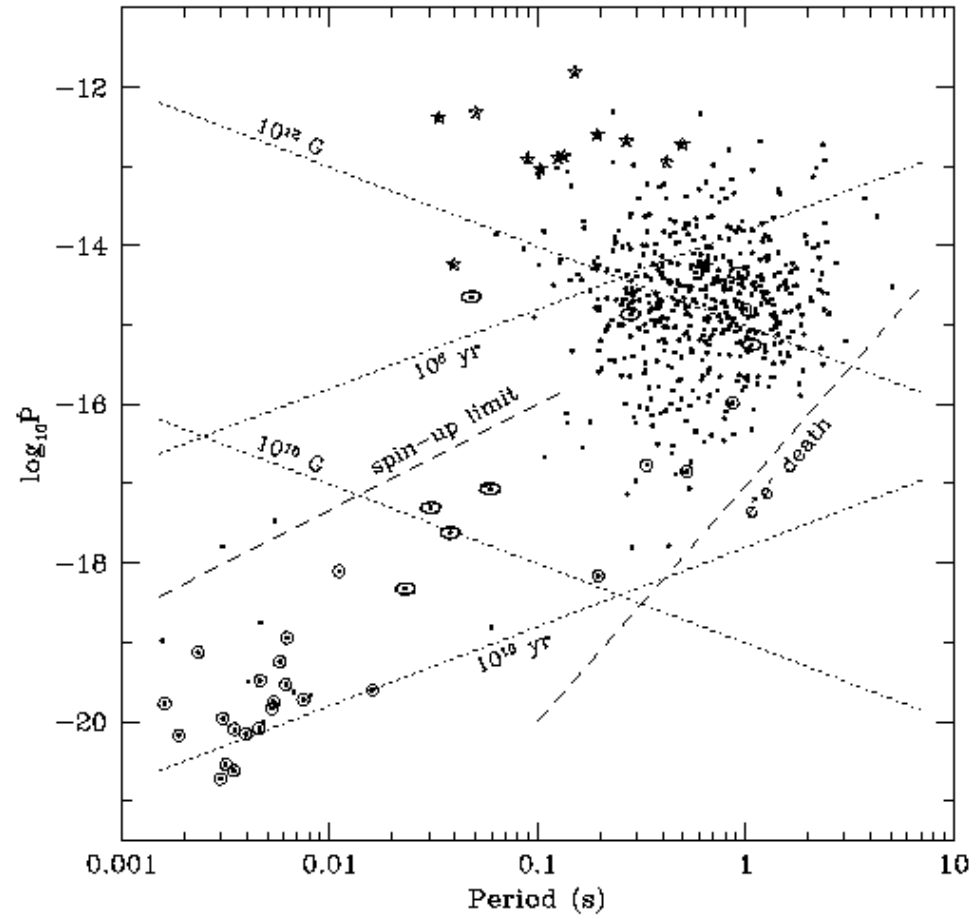
На диаграмме представлены только прямо наблюдаемые величины, которые легко и очень точно измеряются.

МАГНИТНЫЙ РОТАТОР

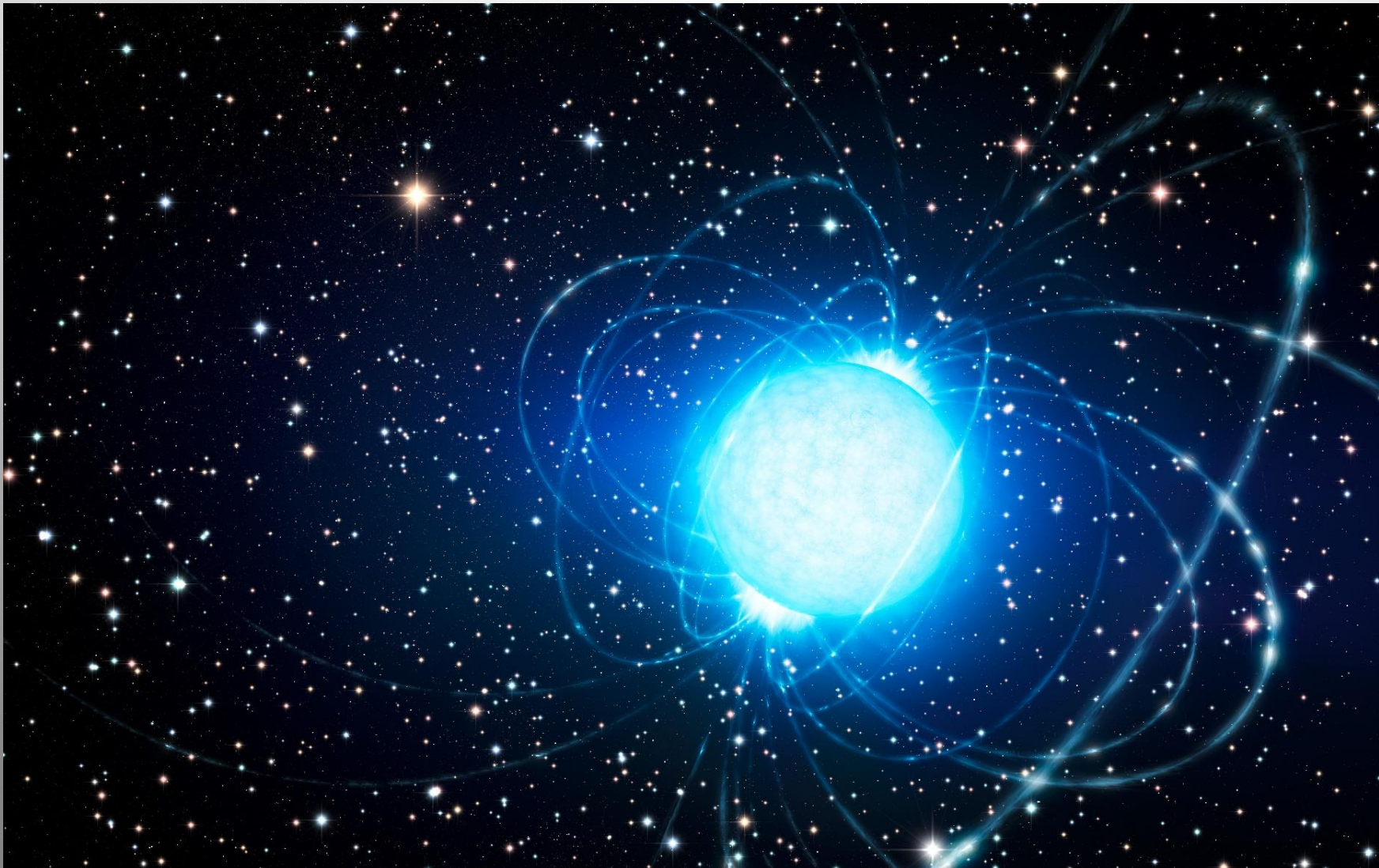


$$L_m = \frac{2}{3} \frac{\mu^2 \omega^4}{c^3} \sin^2 \beta = \kappa_t \frac{\mu^2}{R_t^3} \omega,$$

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



МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ВРАЩЕНИЕ

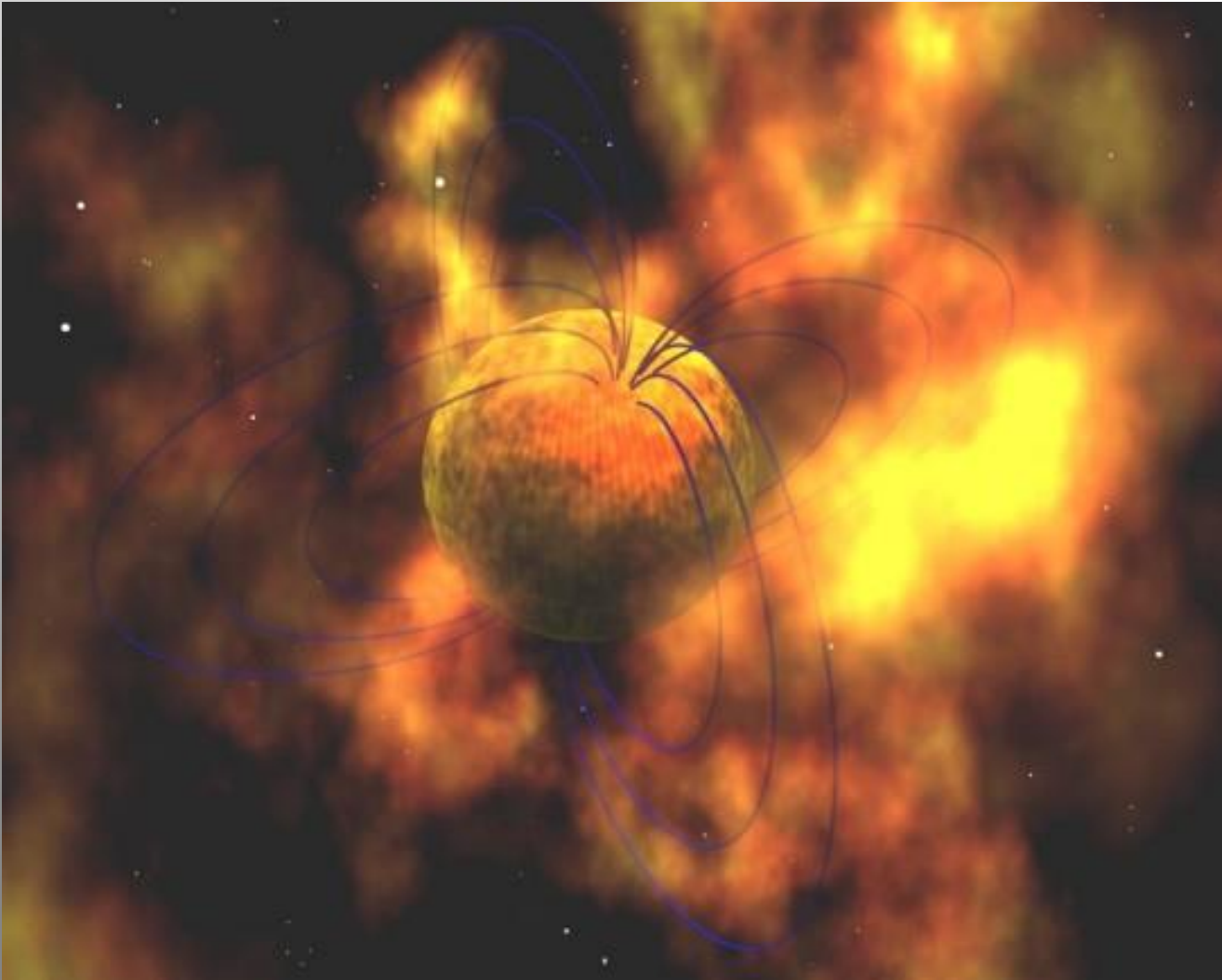


$$t_p = \frac{2\tau_c}{n-1} \left[1 - \left(\frac{P_0}{P} \right)^{n-1} \right]$$

Характеристический возраст.

Предполагая, что начальный период вращения пульсара мал, а индекс торможения n равен 3 (как в магнито-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.

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

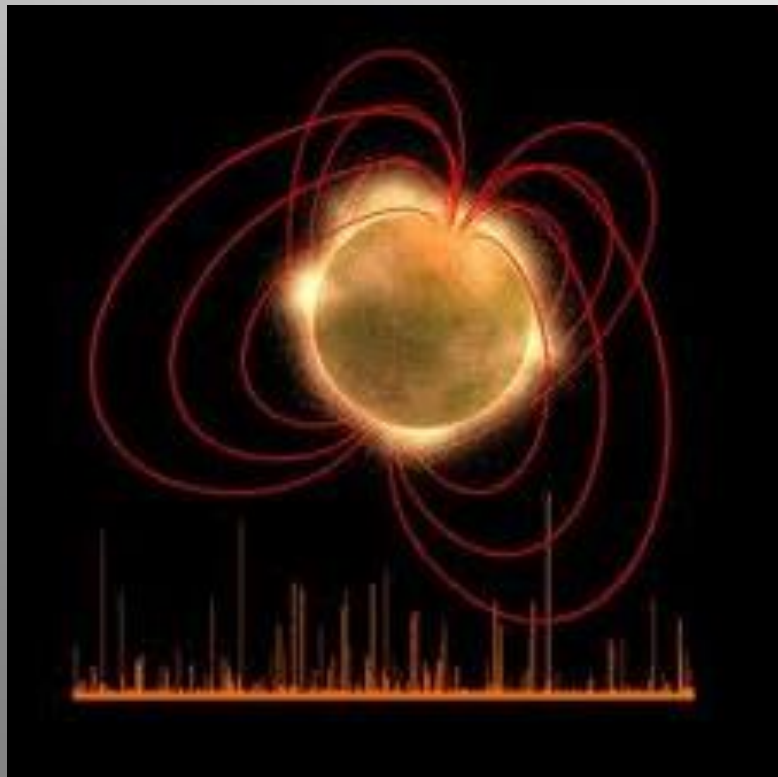
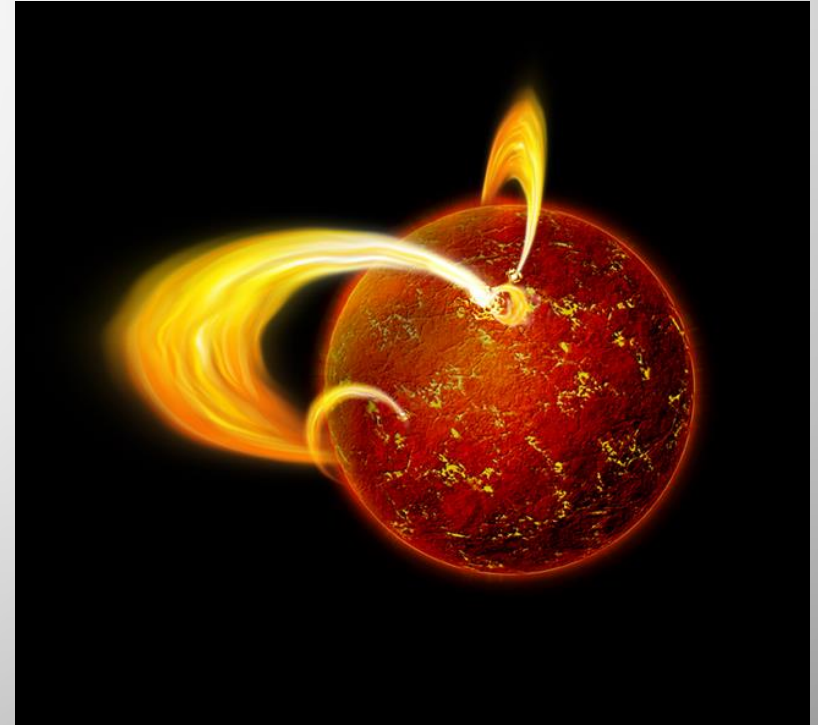
МАГНИТАРЫ

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

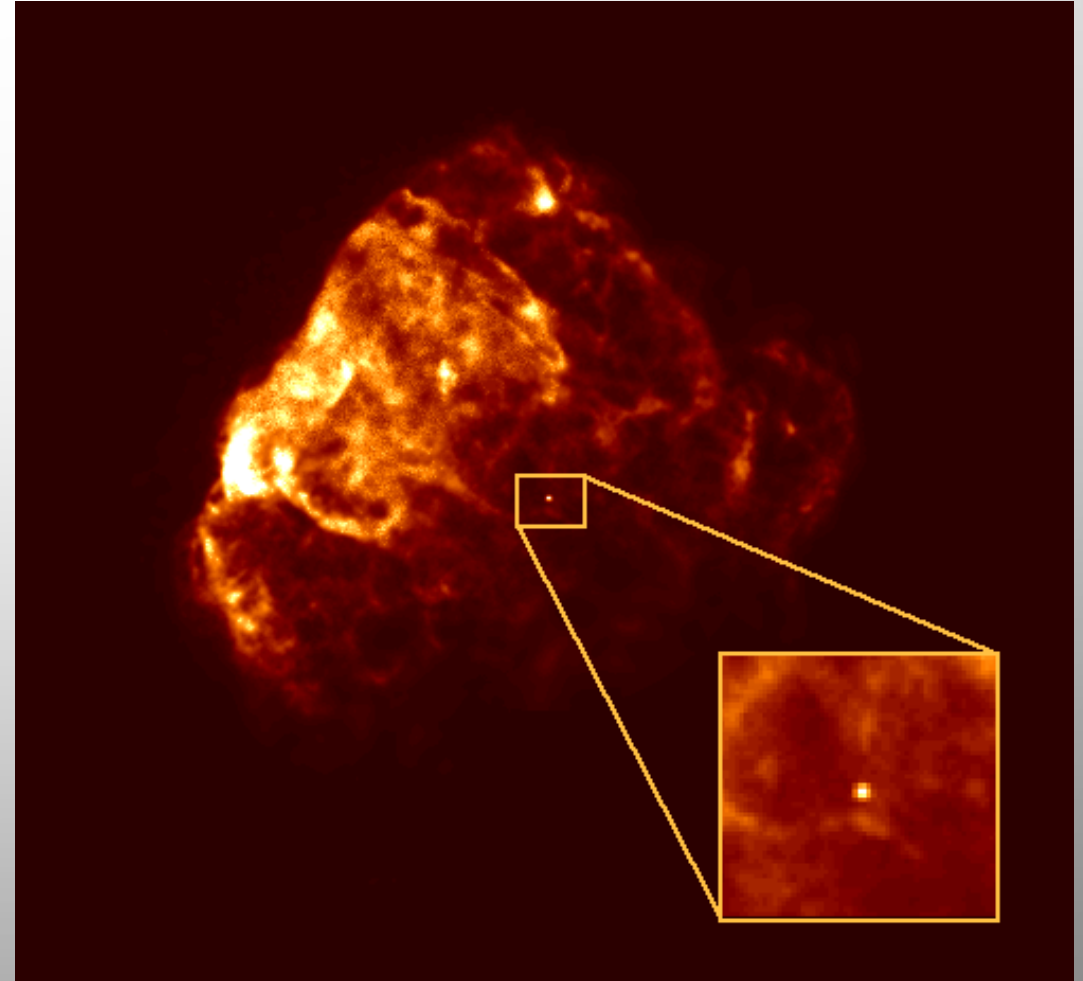
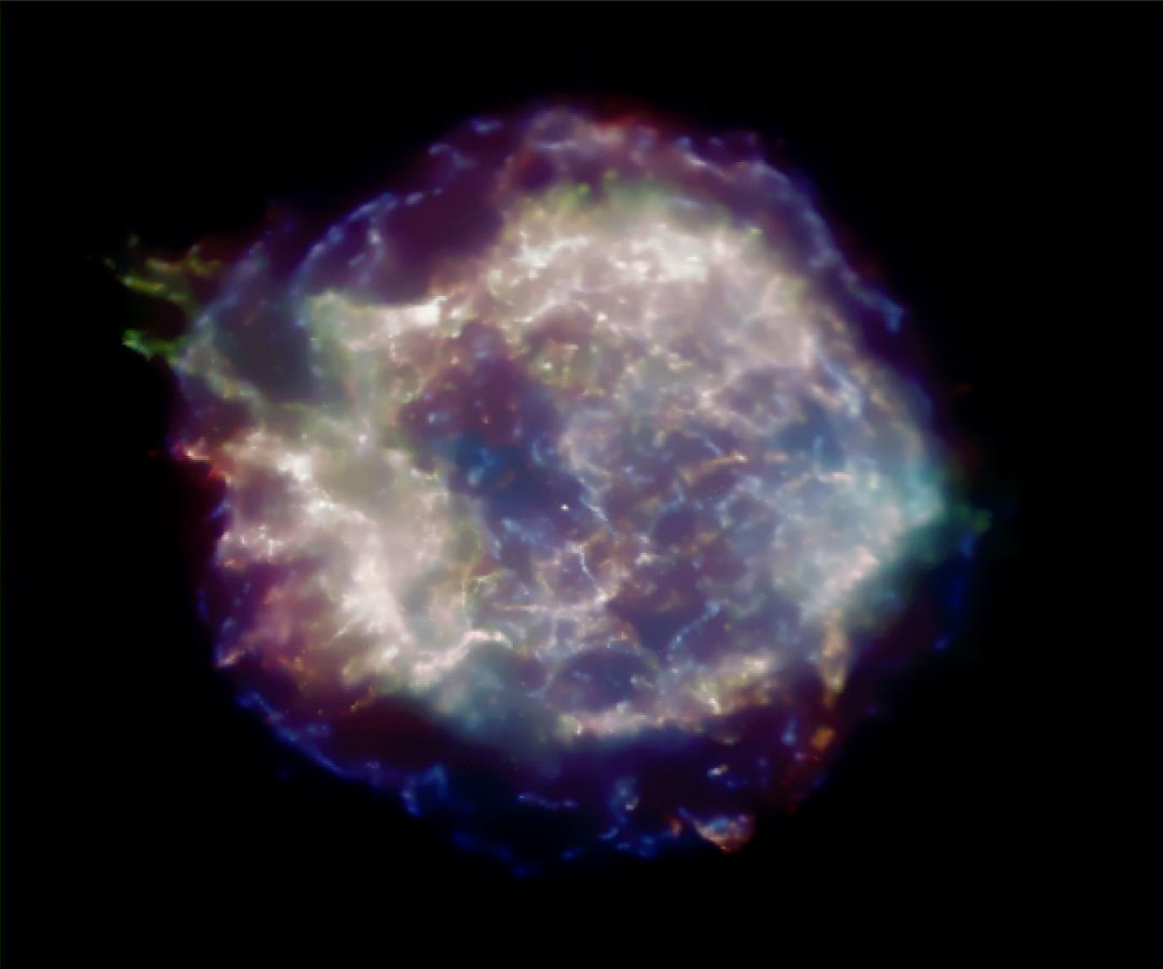
Основными кандидатами в магнитары являются аномальные рентгеновские пульсары и источники мягких повторяющихся гамма-всплесков.

Магнитные поля 10^{14} – 10^{15} Гс

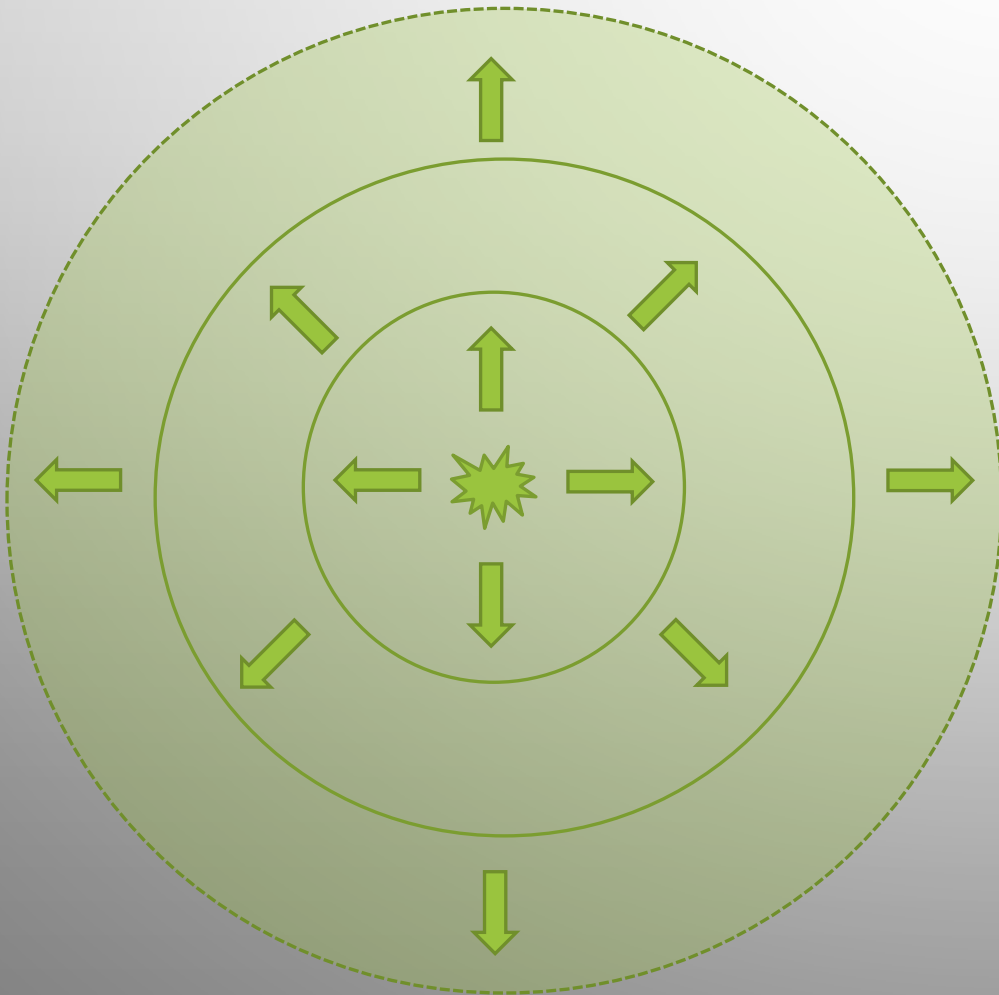
Расходуется энергия магнитного поля. Иногда – постепенно, иногда – в виде вспышек.



ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ В ОСТАТКАХ СВЕРХНОВЫХ



РАСШИРЕНИЕ ОСТАТКА

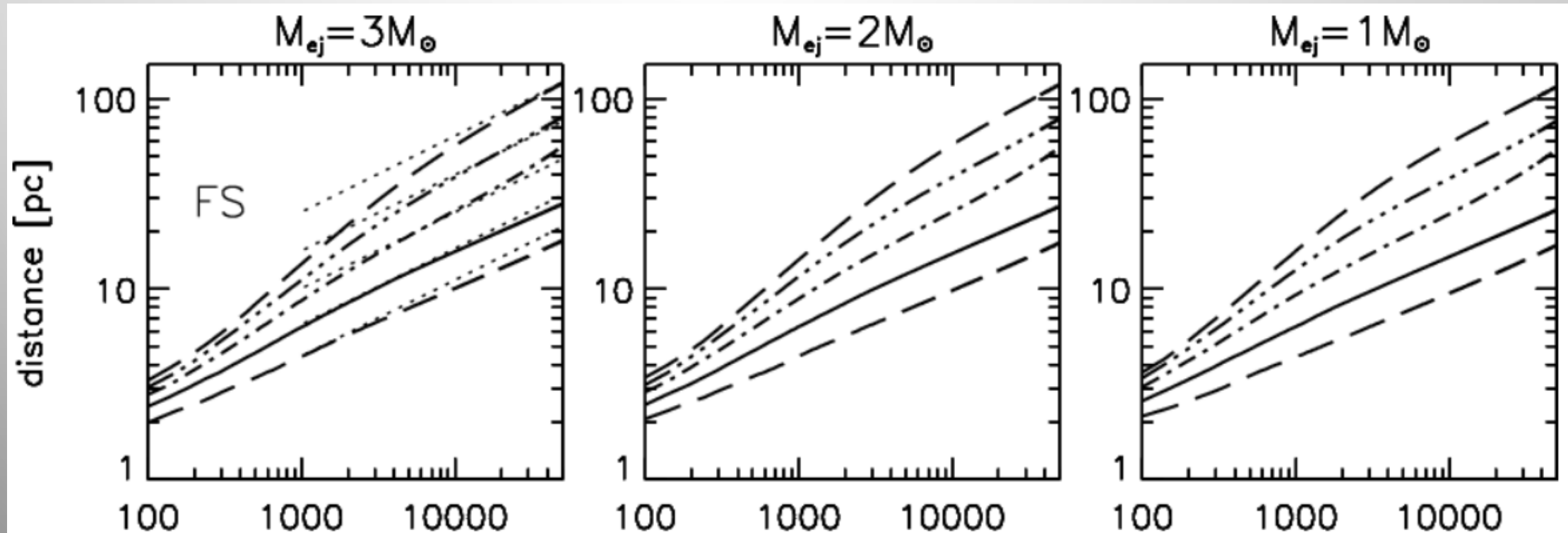


Построены модели для расширения остатков в разной среде.

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

ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ

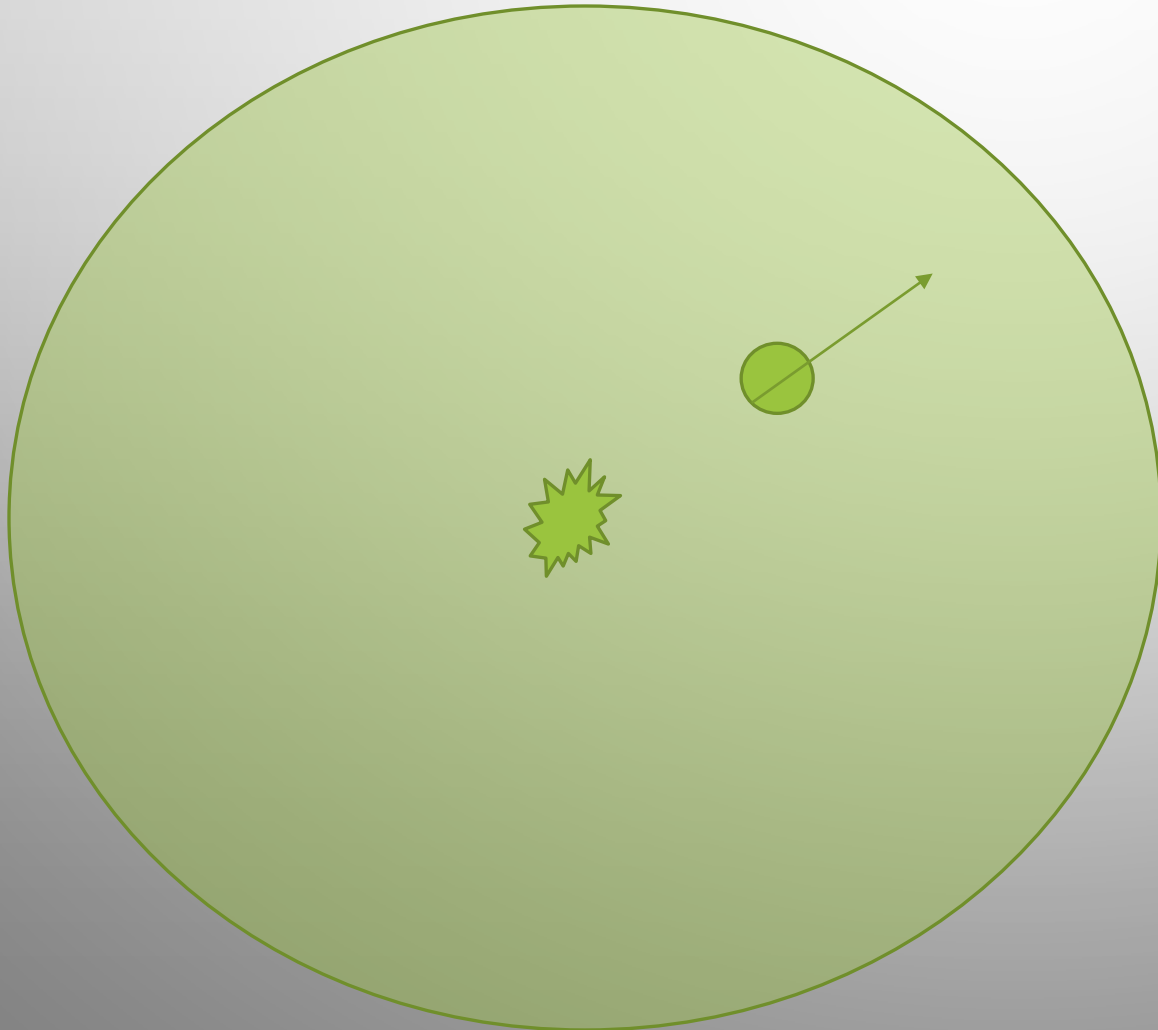
Ferreira, de Jager (2008)



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

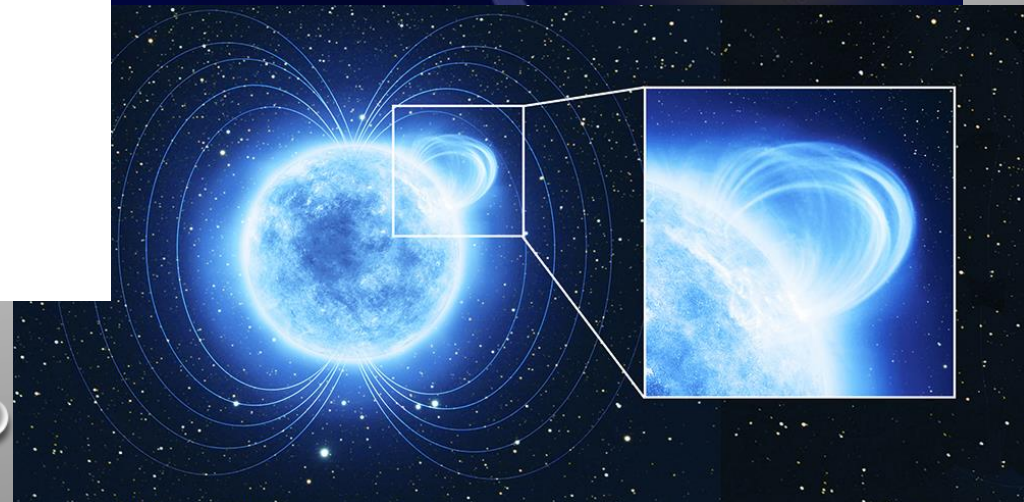
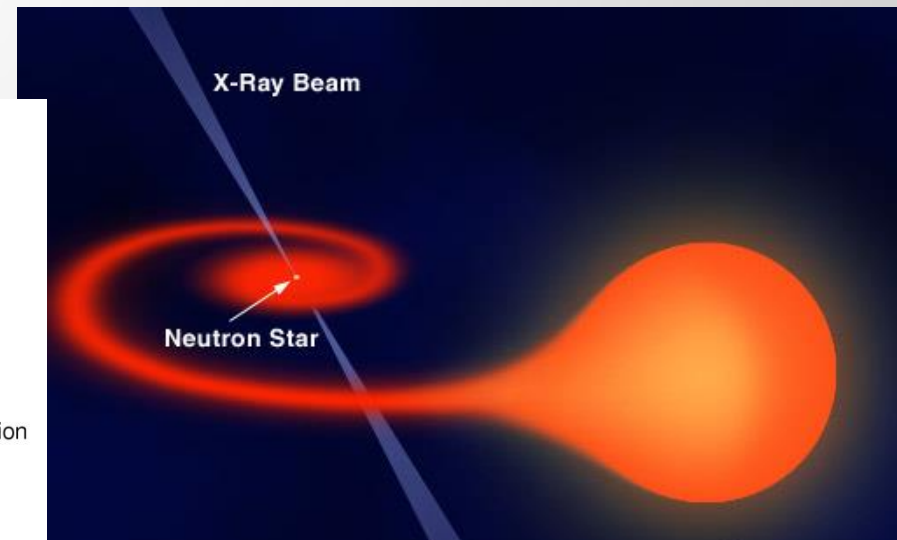
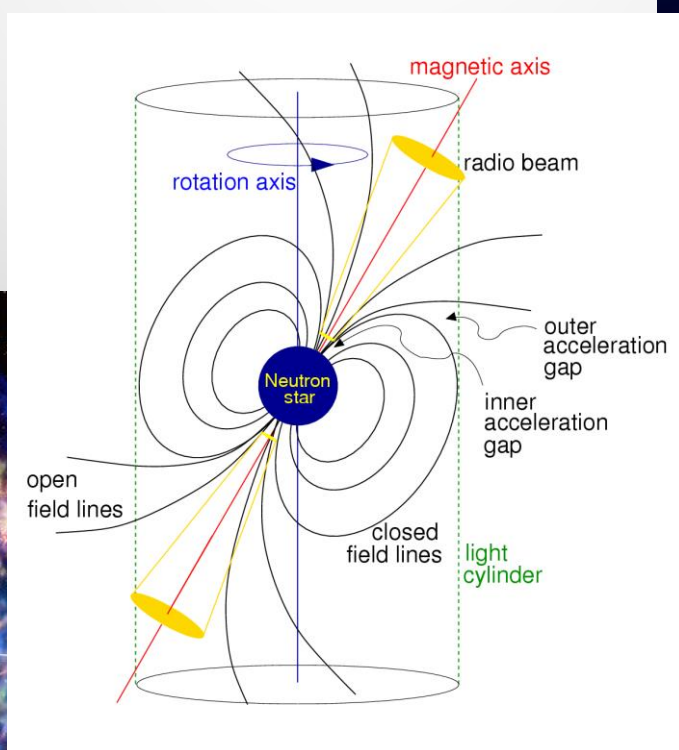
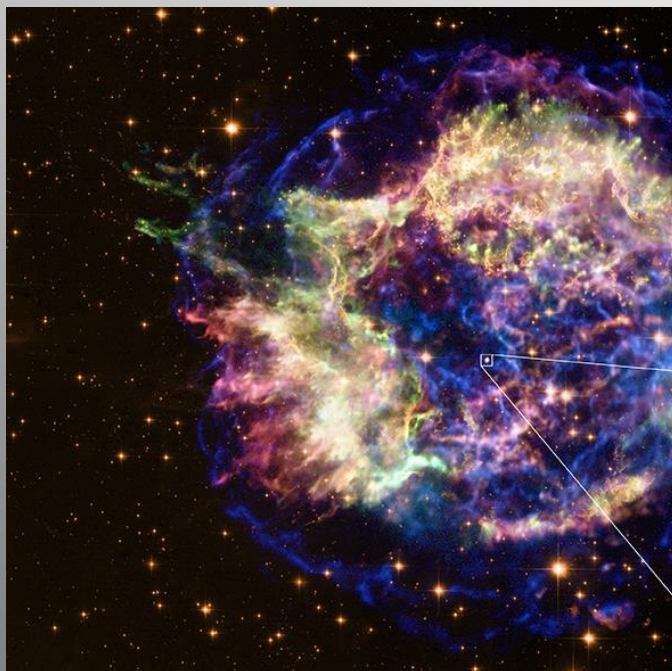


Если можно определить место взрыва,
то можно:

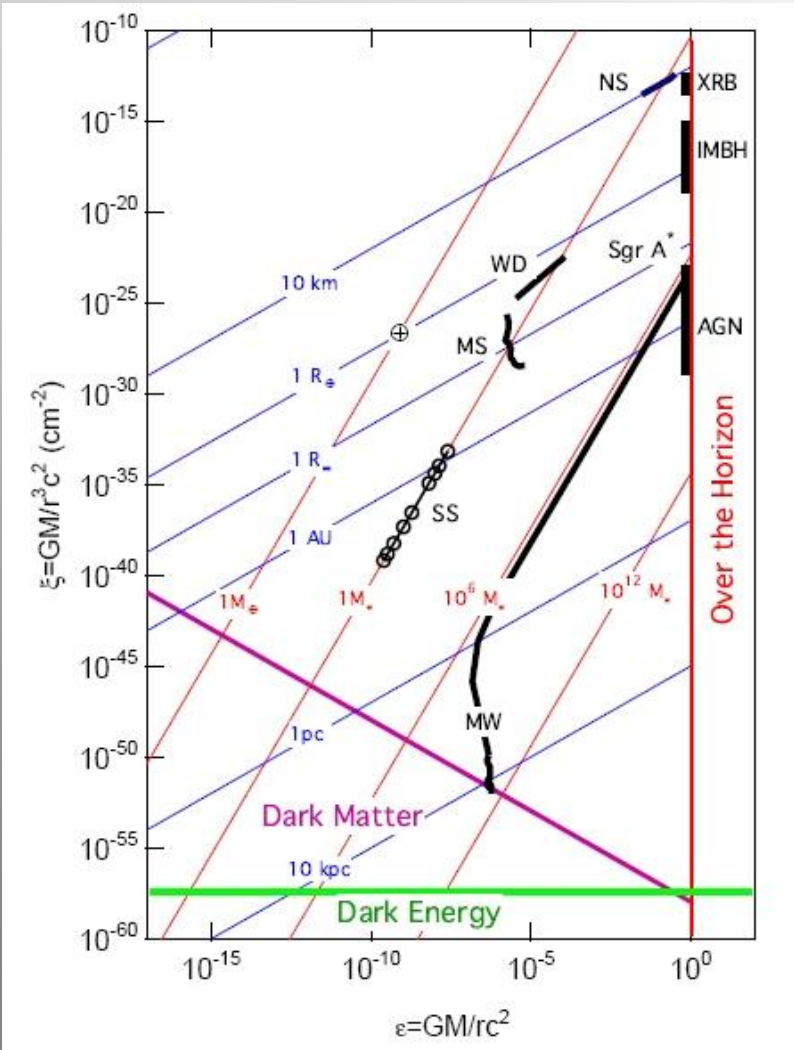
- или, зная возраст, определить скорость,
- или, зная скорость, определить возраст

ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

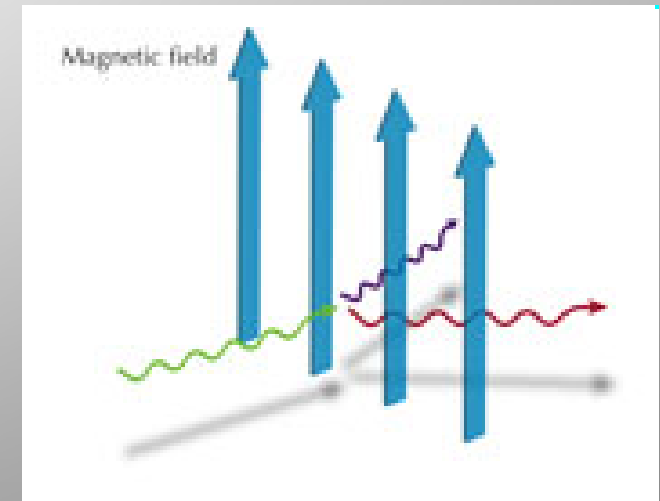
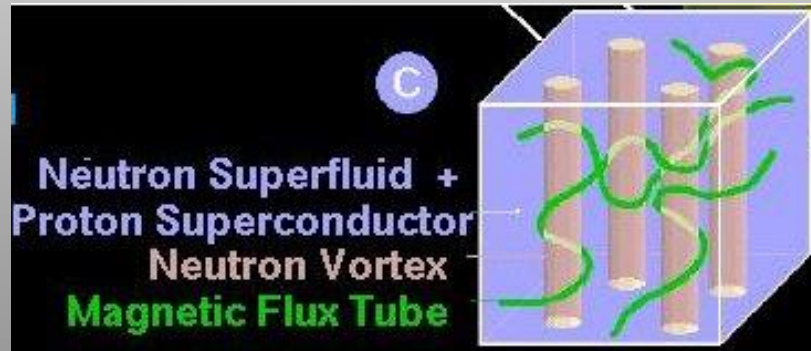
- Вращение
- Аккреция
- Затухание токов (магнитное поле)
- Тепловая энергия



ЧЕМ ВАЖНЫ

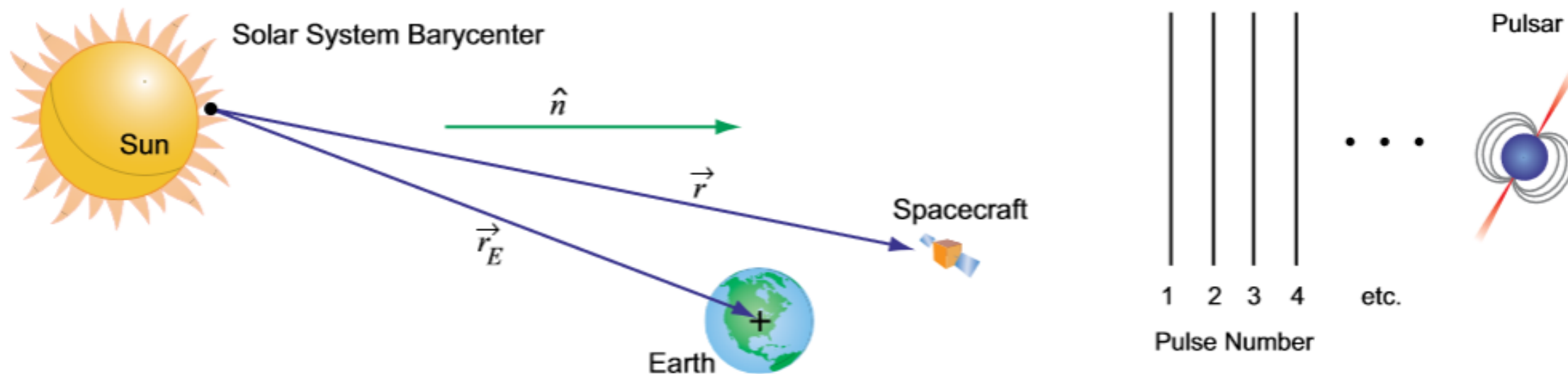


- Инструменты для физиков и астрофизиков
 - радиопульсары – тесты теорий гравитации
 - регистрация гравитационных волн
 - точное время
- Теория поведения вещества при высокой плотности – квантовая хромодинамика
- Процессы в сильном магнитном поле



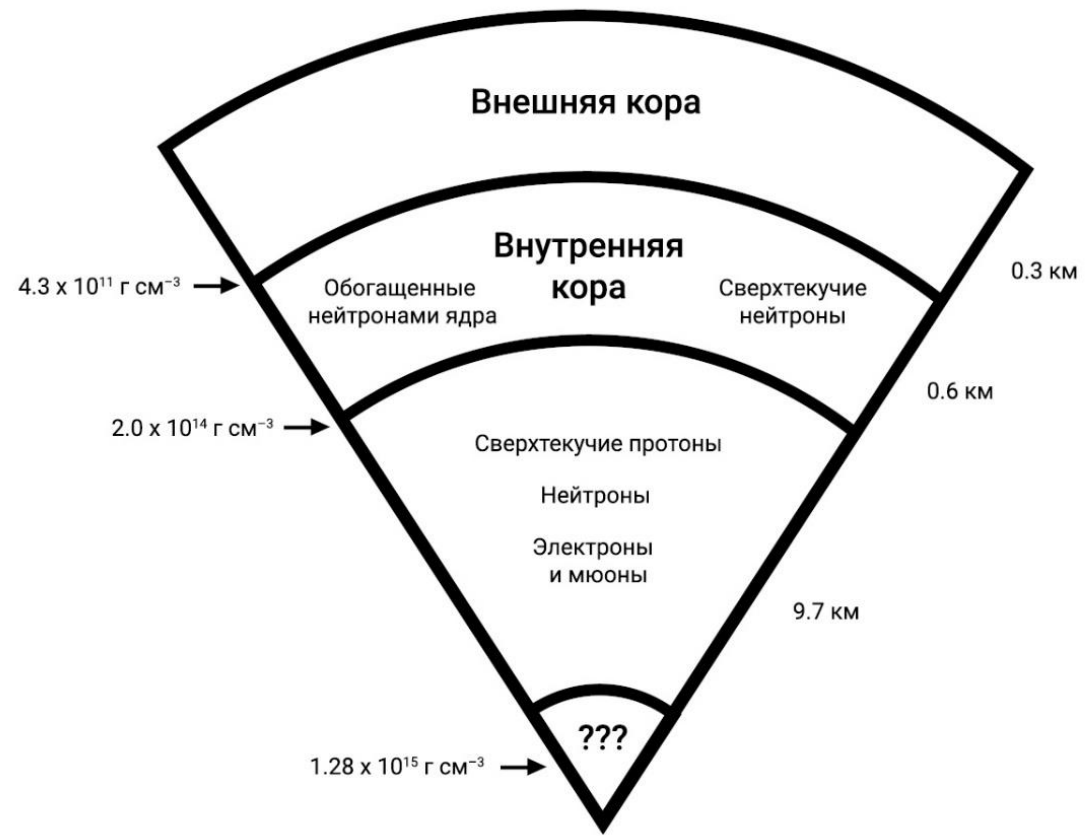
ОРИЕНТАЦИЯ СПУТНИКОВ ПО РЕНТГЕНОВСКИМ ПУЛЬСАРАМ

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

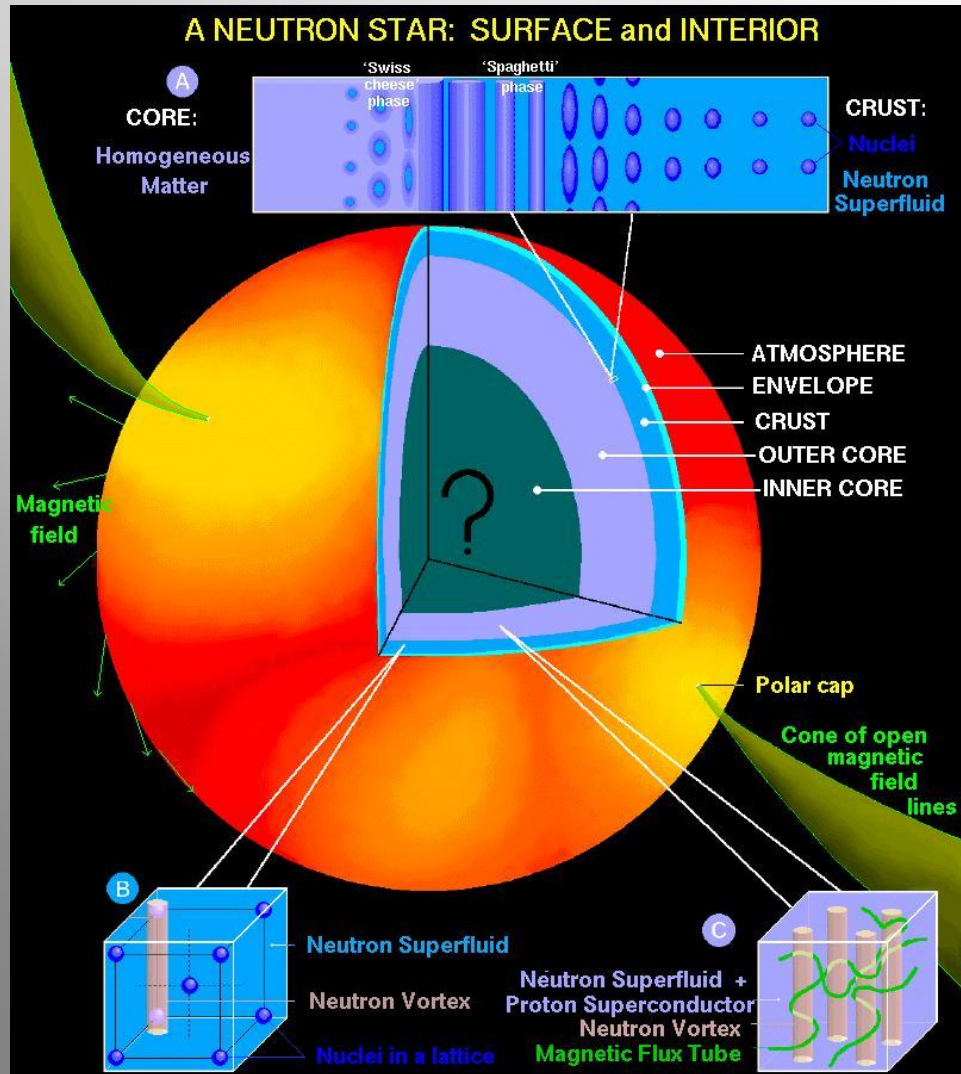


Все ведущие космические агентства в мире (включая российское) сейчас работают над созданием систем навигации, основанных на наблюдении рентгеновского излучения стабильных одиночных пульсаров.

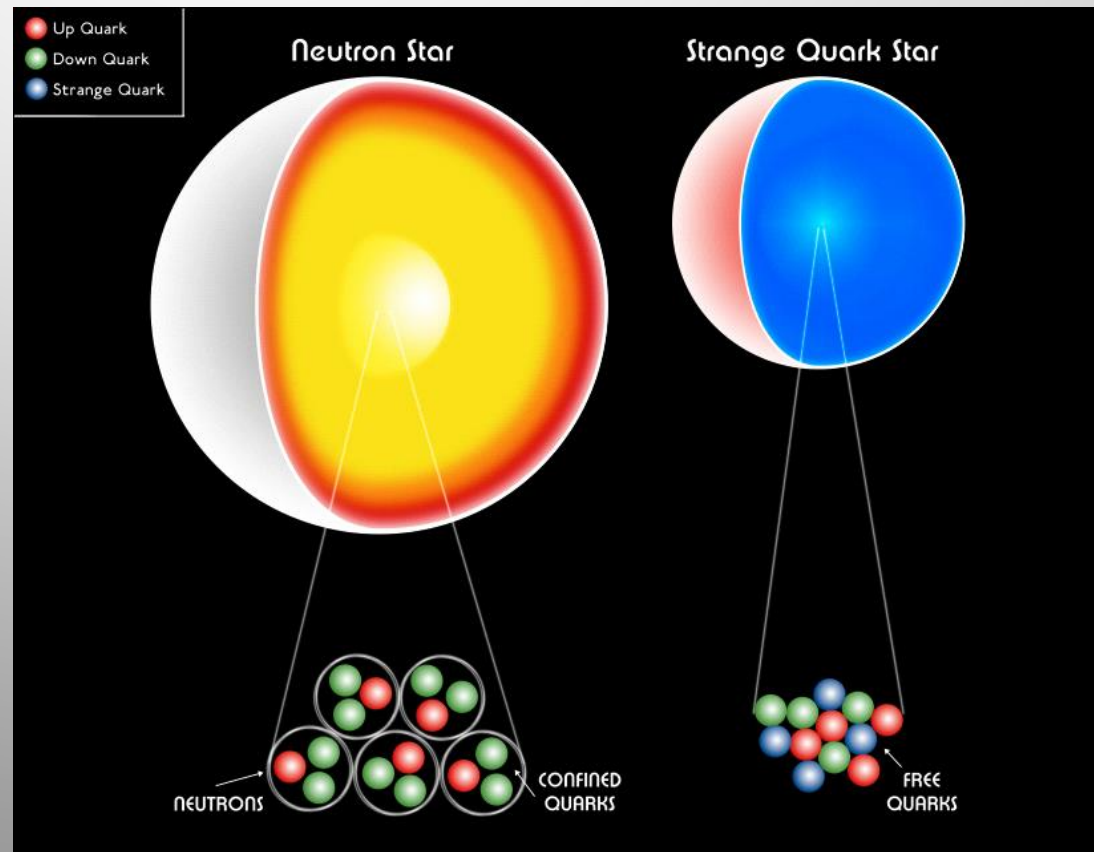
ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ



МНОЖЕСТВО ВАРИАНТОВ И СЛОЕВ



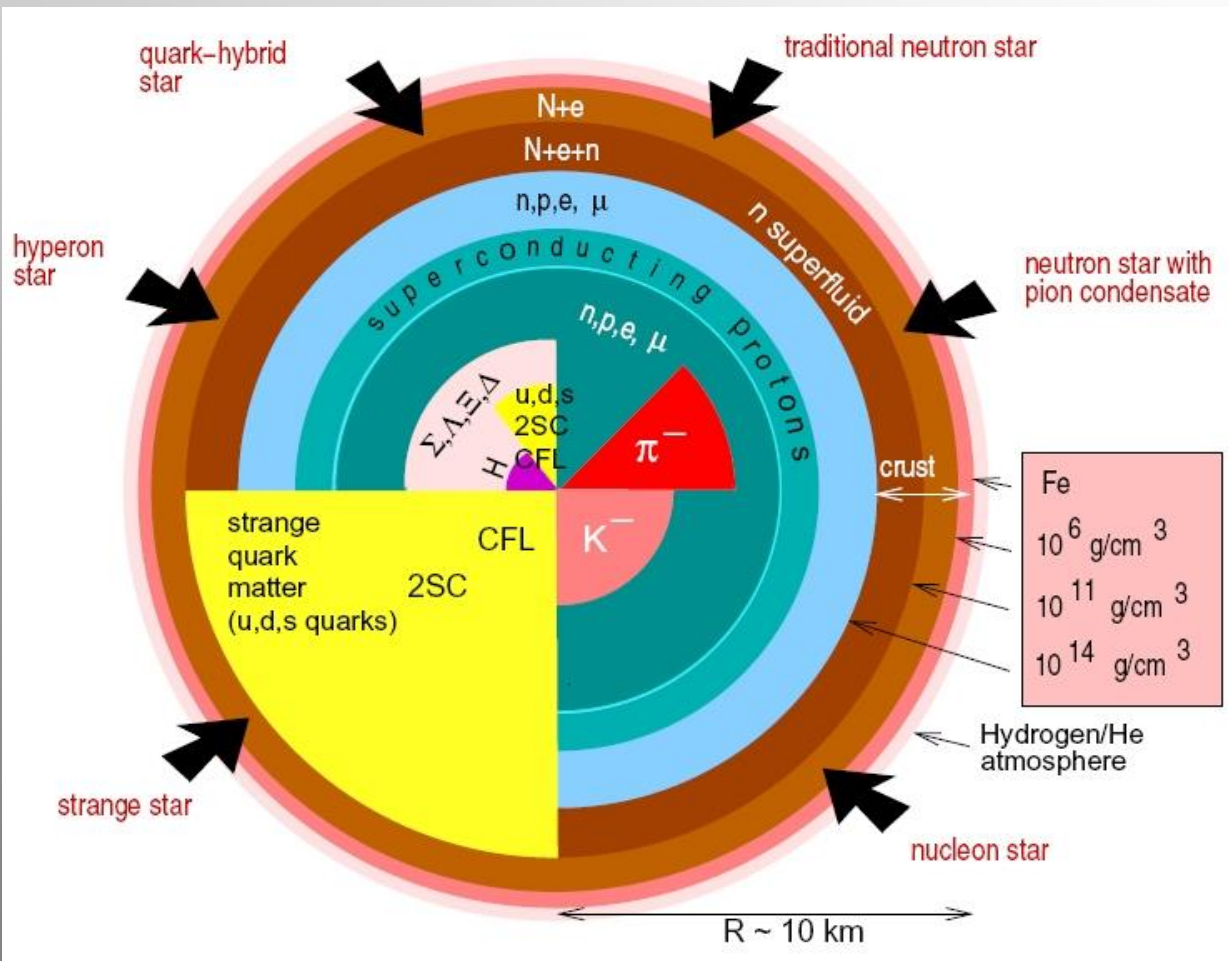
В зависимости от модели объекты, которые мы называем нейтронными звездами, могут иметь очень разное строение



ЗАГАДКА НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

В недрах – очень плотное вещество.

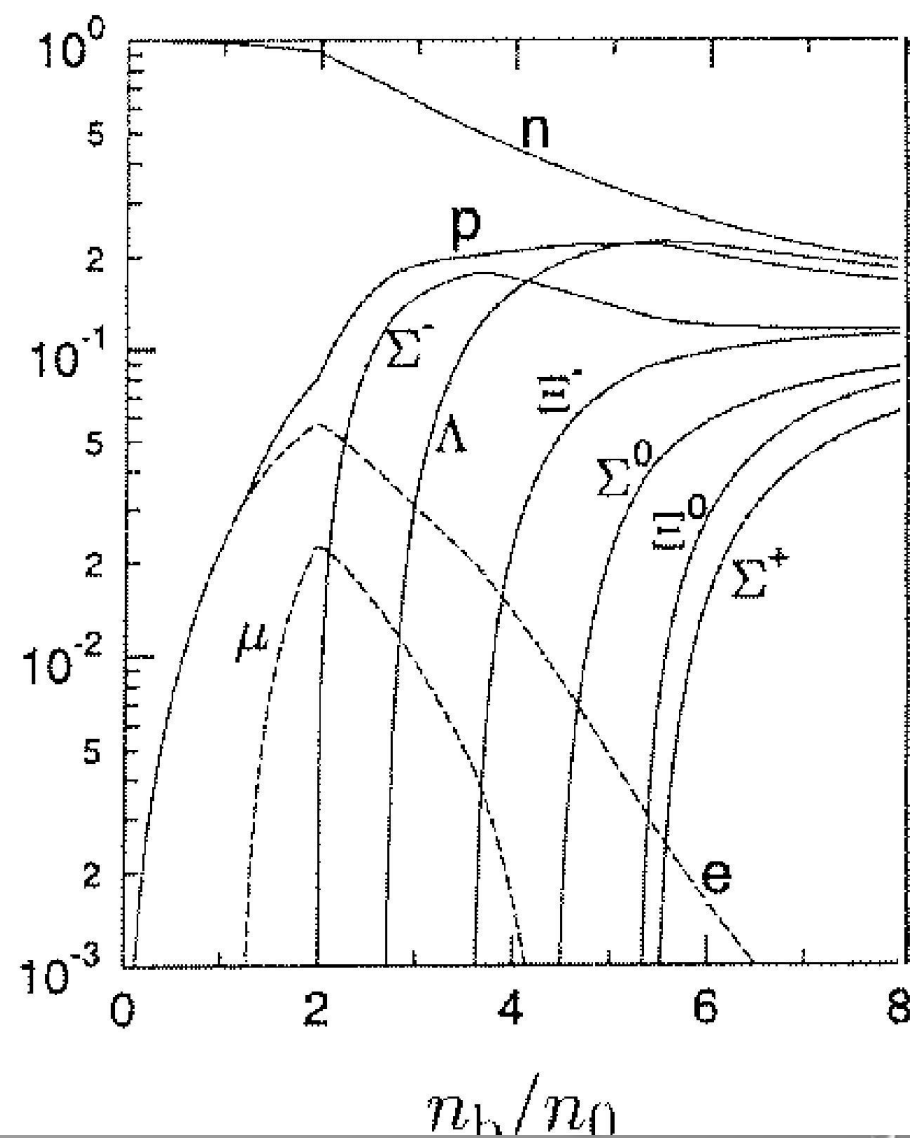
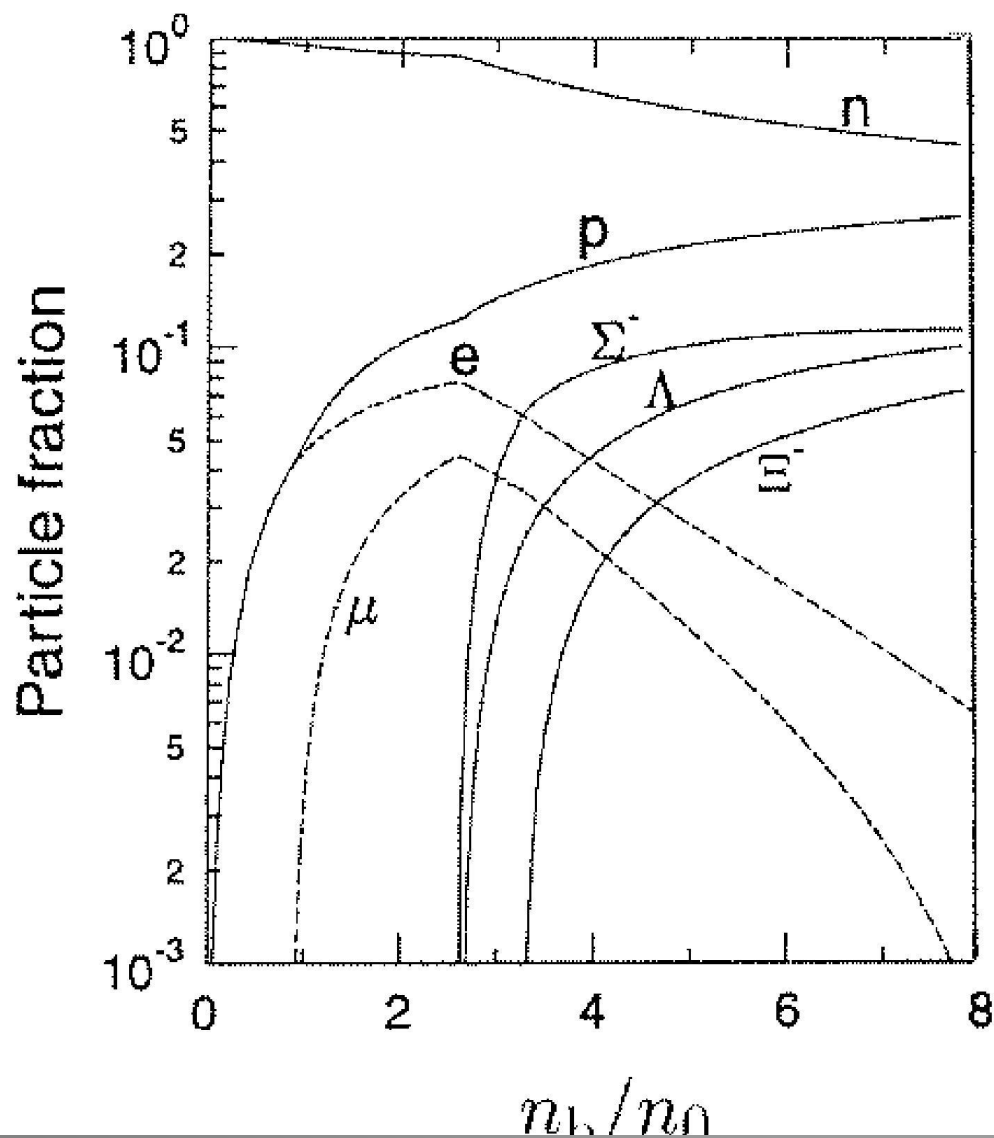
Мы плохо понимаем, как ведет себя вещество при такой плотности.



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

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

ЧАСТИЦЫ ВНУТРИ



Effective chiral model of
Hanuske et al. (2000)

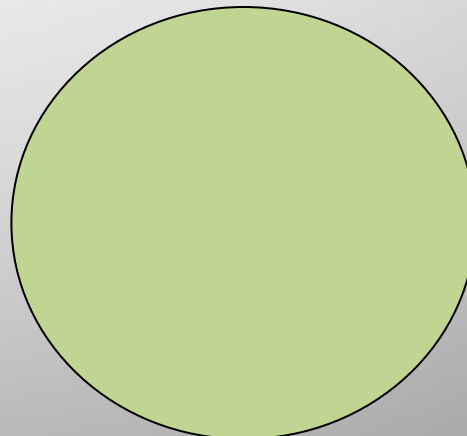
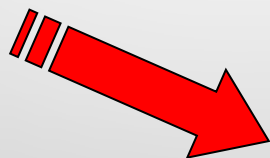
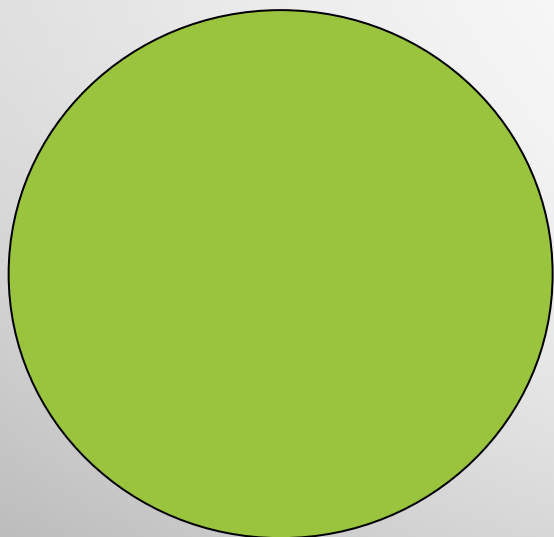
Relativistic mean-field model
TM1 of Sugahara & Toki (1971)

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

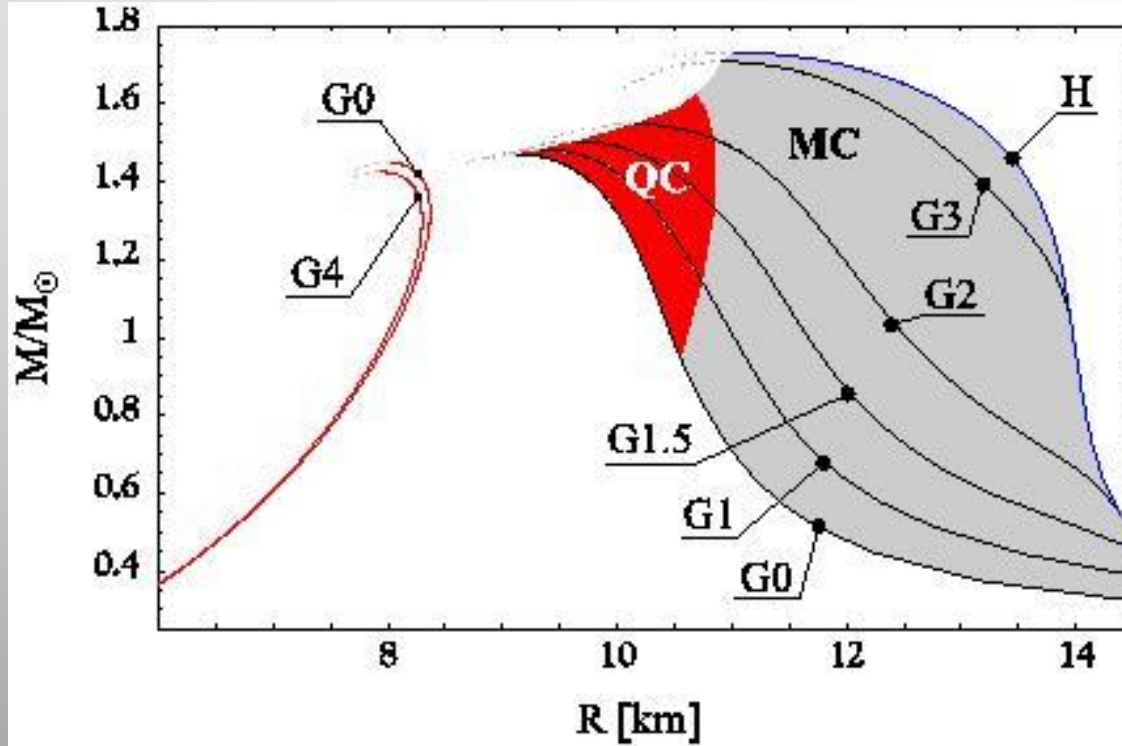
Барионная масса больше гравитационной.
При коллапсе ядра часть его массы
превращается в энергию: $E=mc^2$
И высвечивается.
Похоже на энергию связи атомного ядра.



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

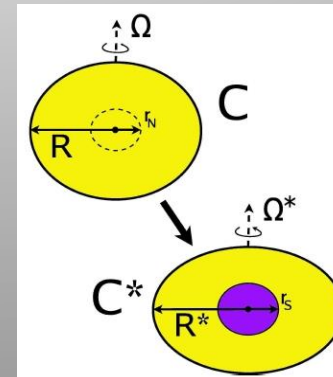
- Максимальная масса
- Разные семейства (кварковые и адронные)
- Жесткие и мягкие EoS
- Небольшая разница при реалистичных параметрах
- Смягчение уравнения состояния про росте массы

Здесь мы пренебрегли вращением

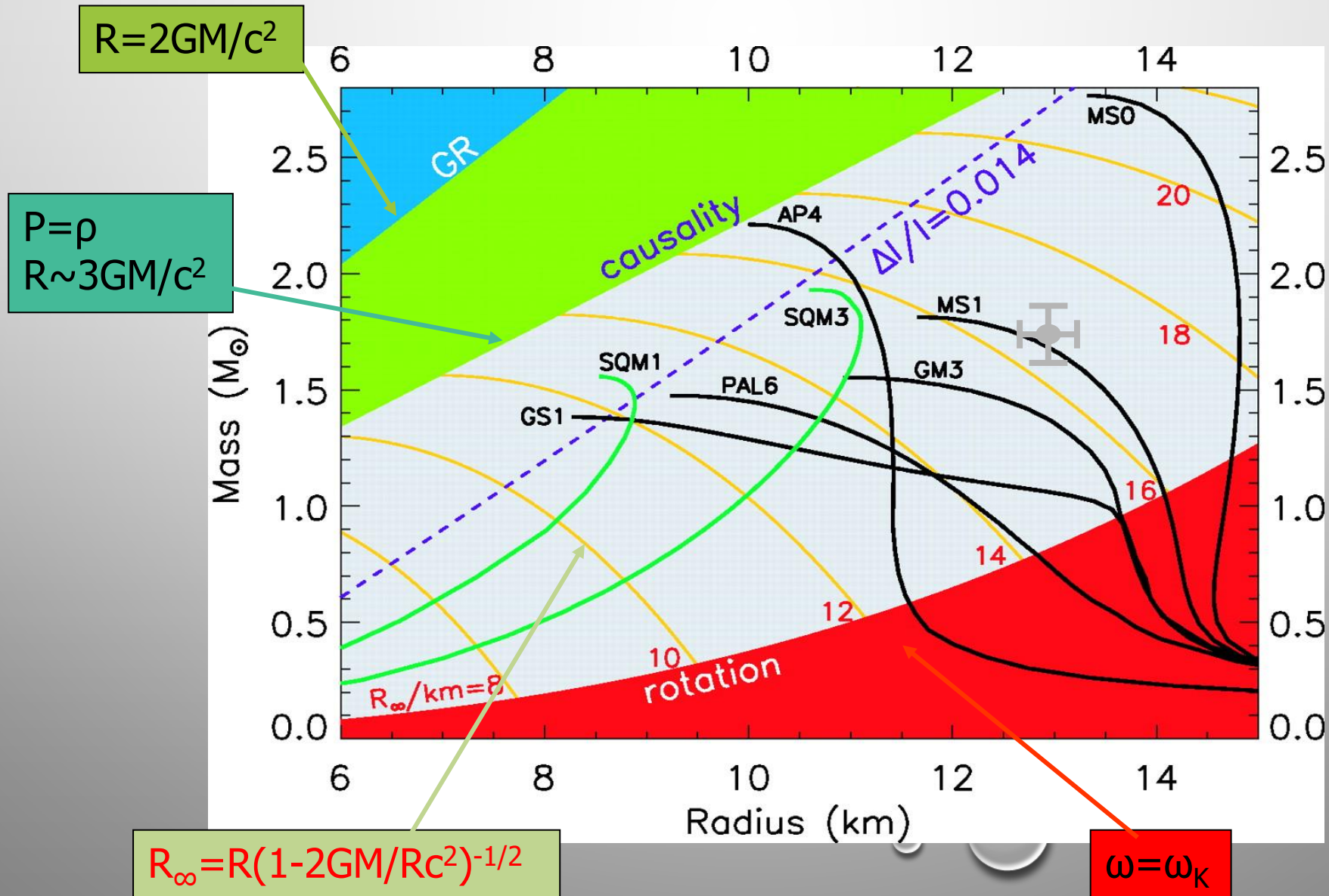
Вращение влияет на:

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

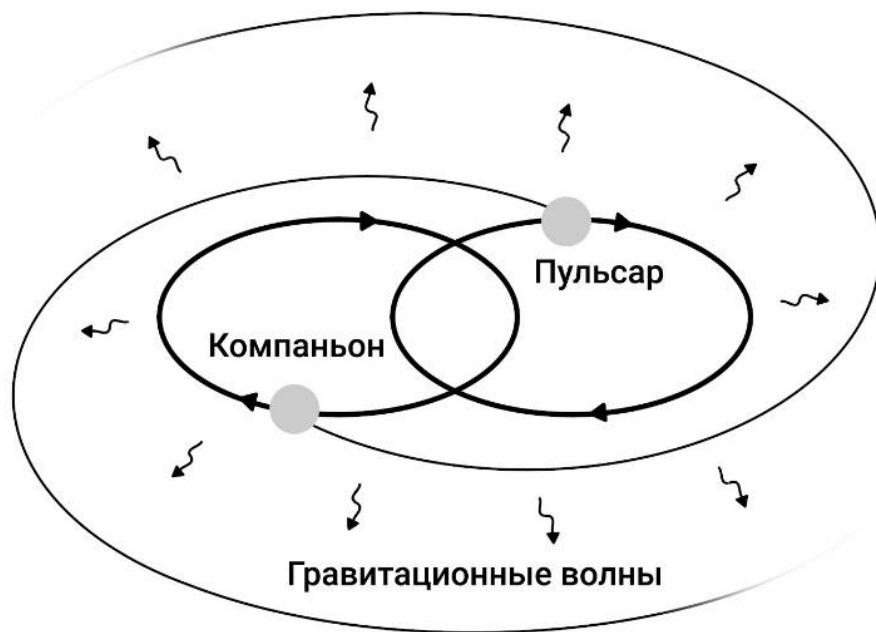
Замедление может вести к фазовому превращению.



МАССА-РАДИУС



ДВОЙНЫЕ ПУЛЬСАРЫ



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

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

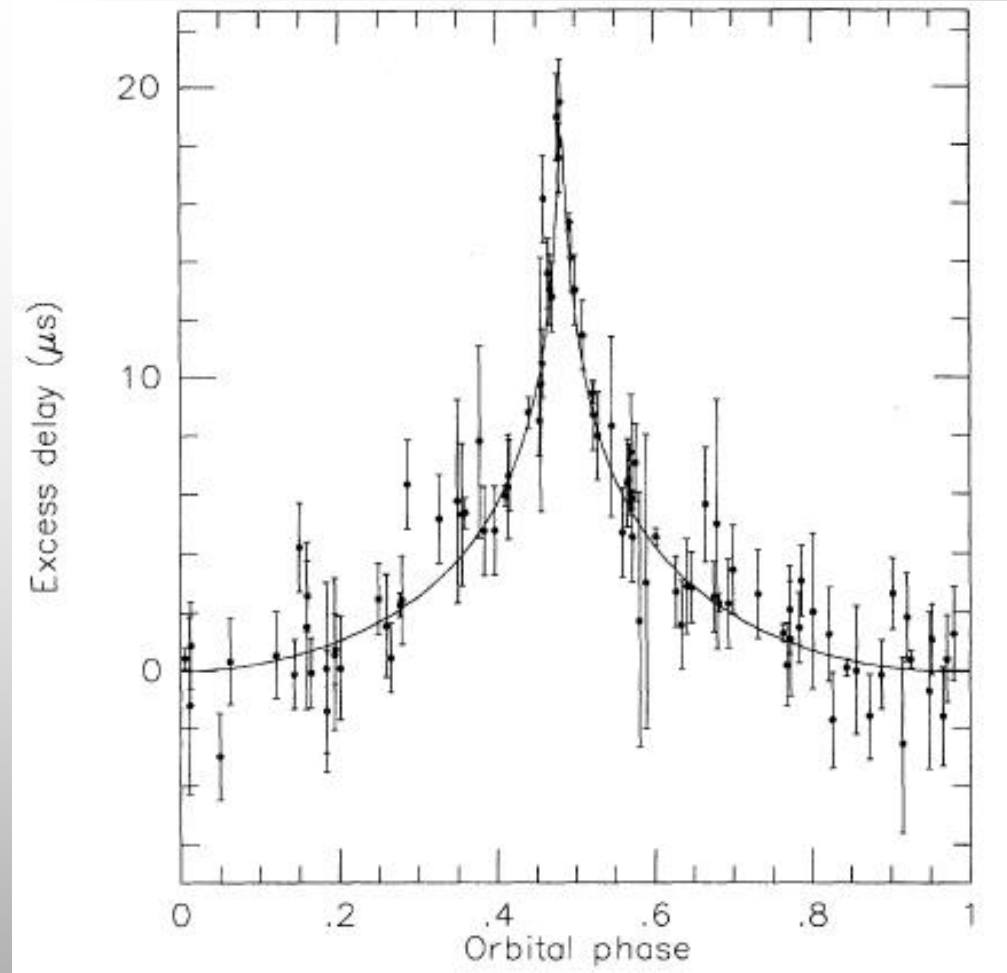
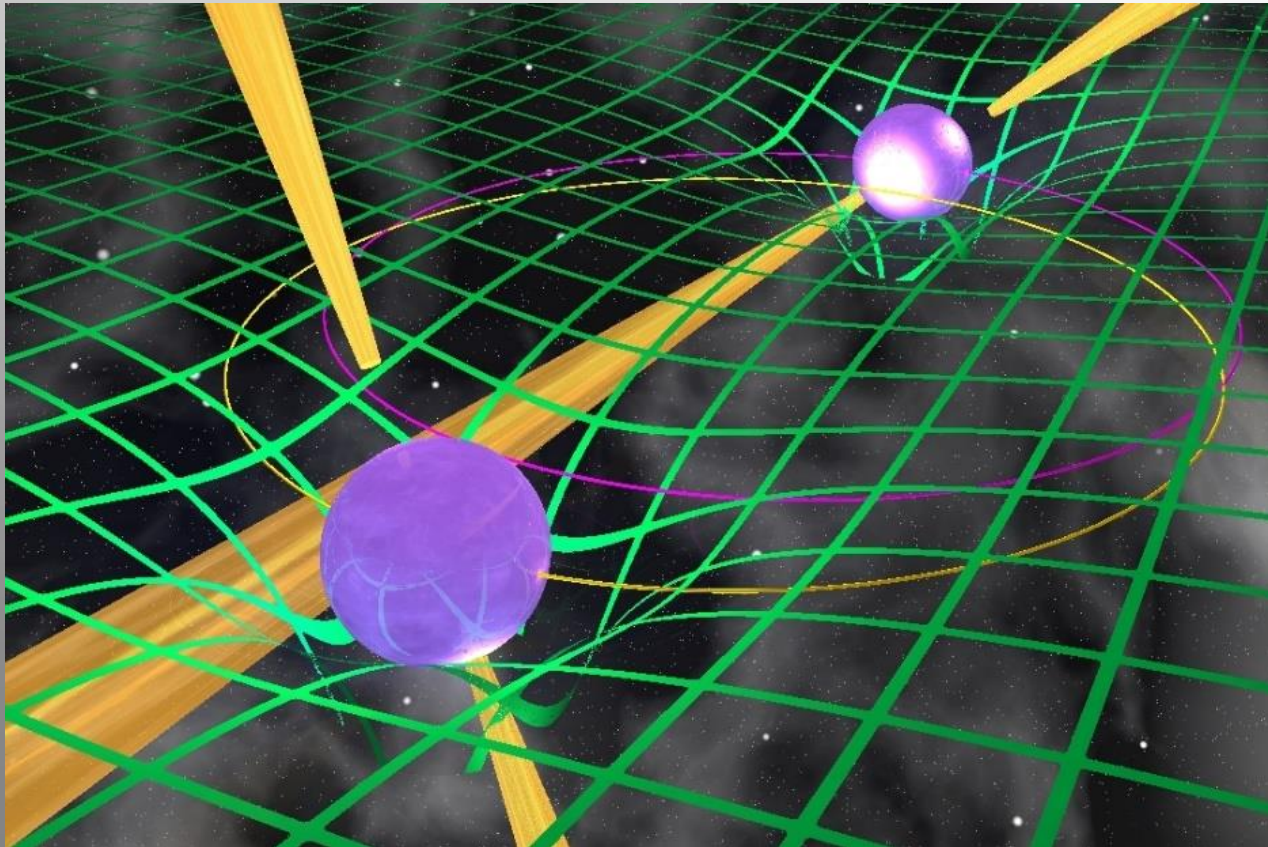
Наблюдения двойных радиопульсаров позволяют определять массы нейтронных звезд с очень высокой точностью благодаря наблюдению ряда эффектов Общем теории относительности.

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

ЗАДЕРЖКА ШАПИРО

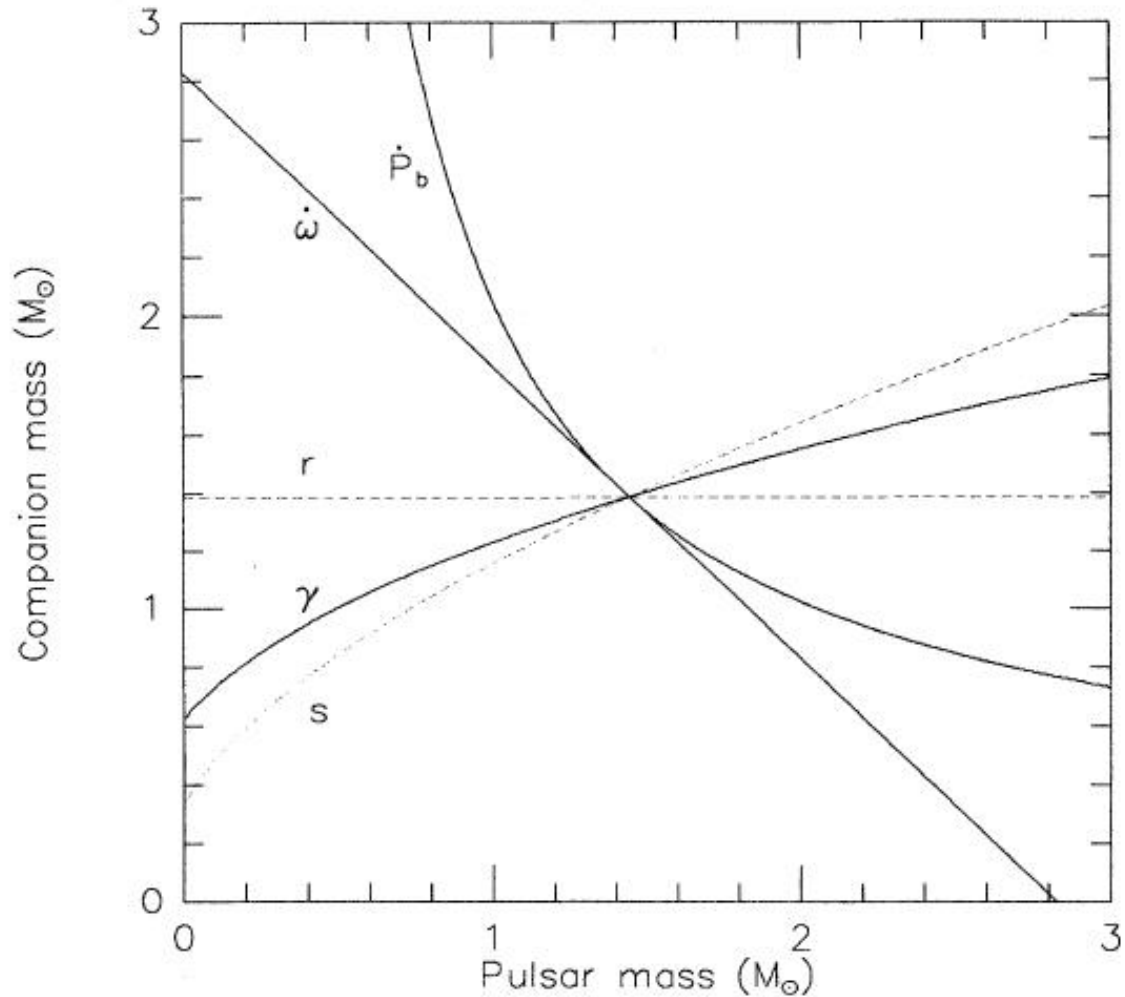
$$\Delta_S = -2r \log(1 - s \cos[2\pi(\phi - \phi_0)])$$

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



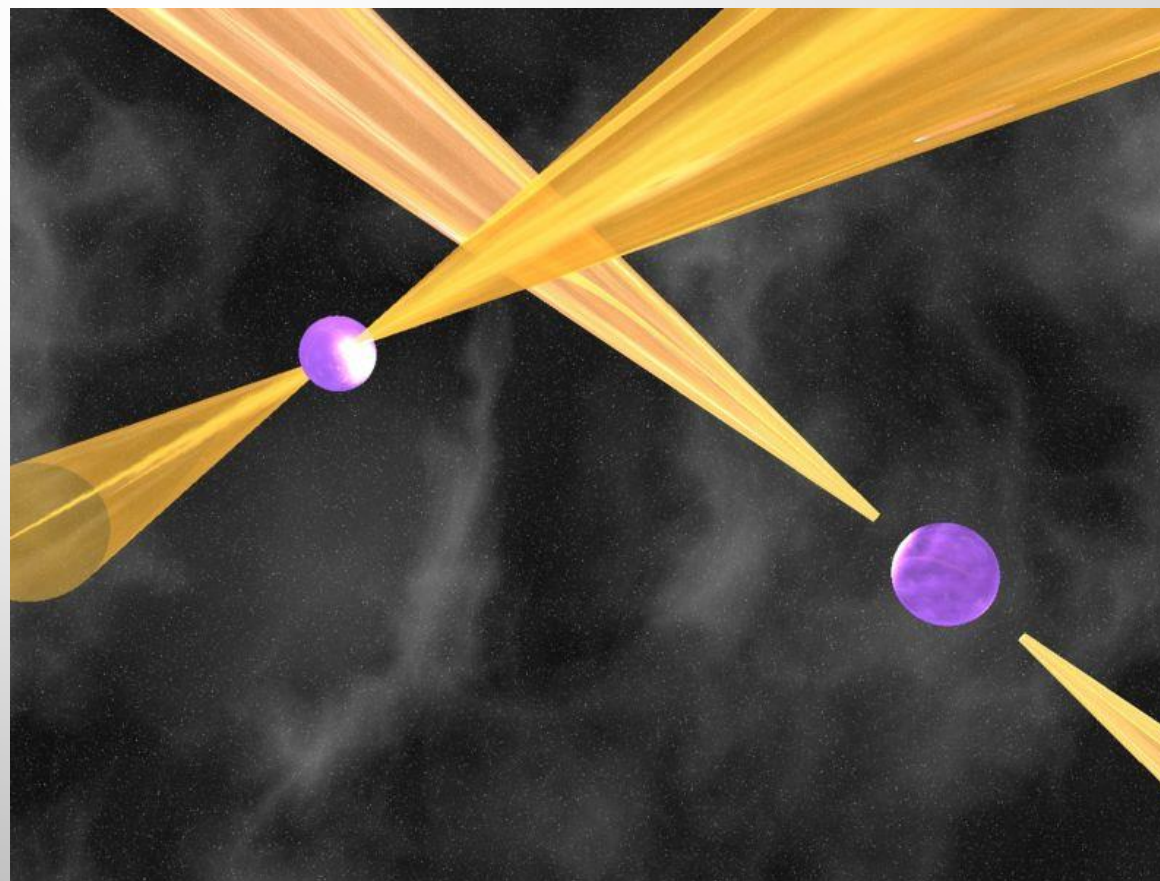
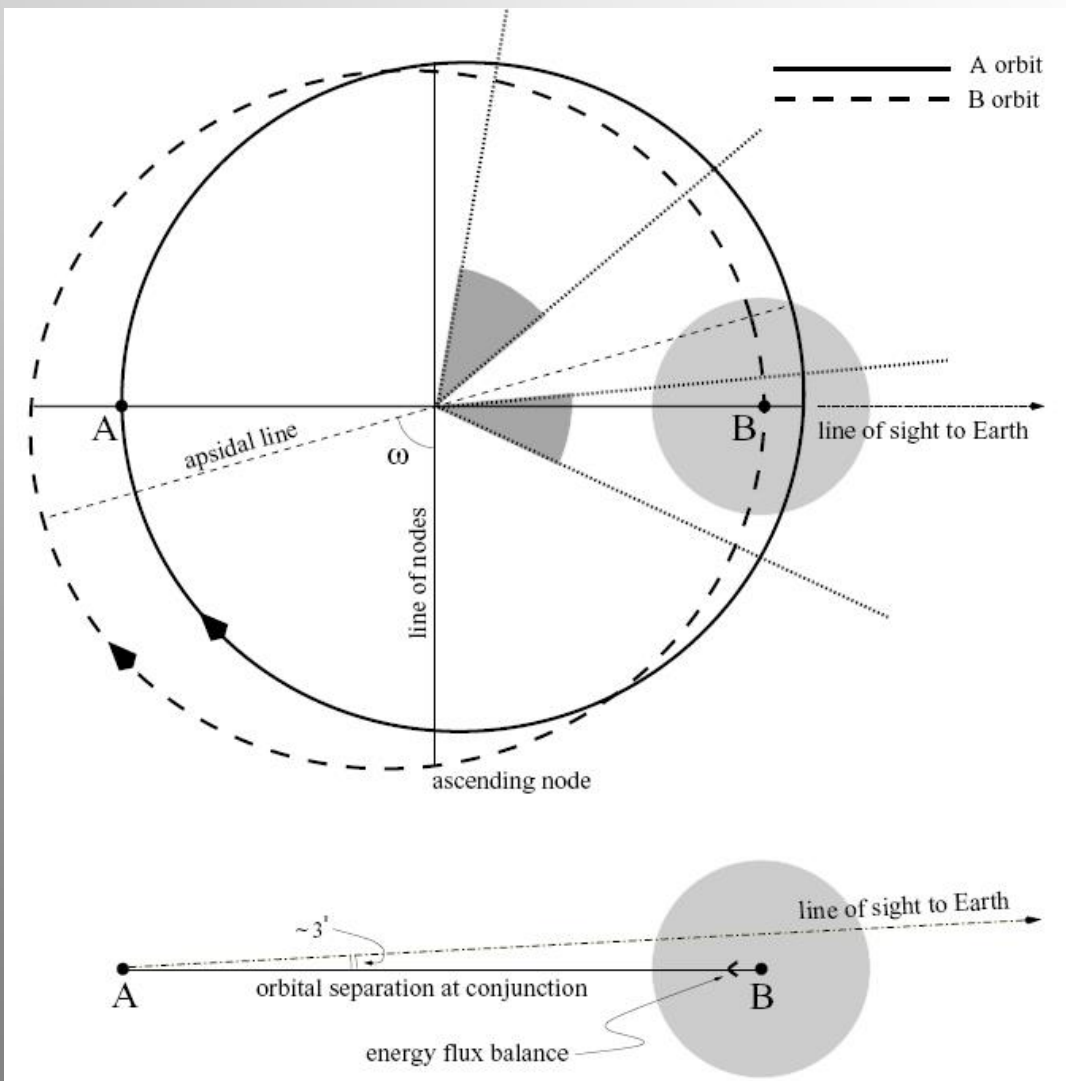
PSR 1855+09 (Taylor, Nobel lecture)

ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ



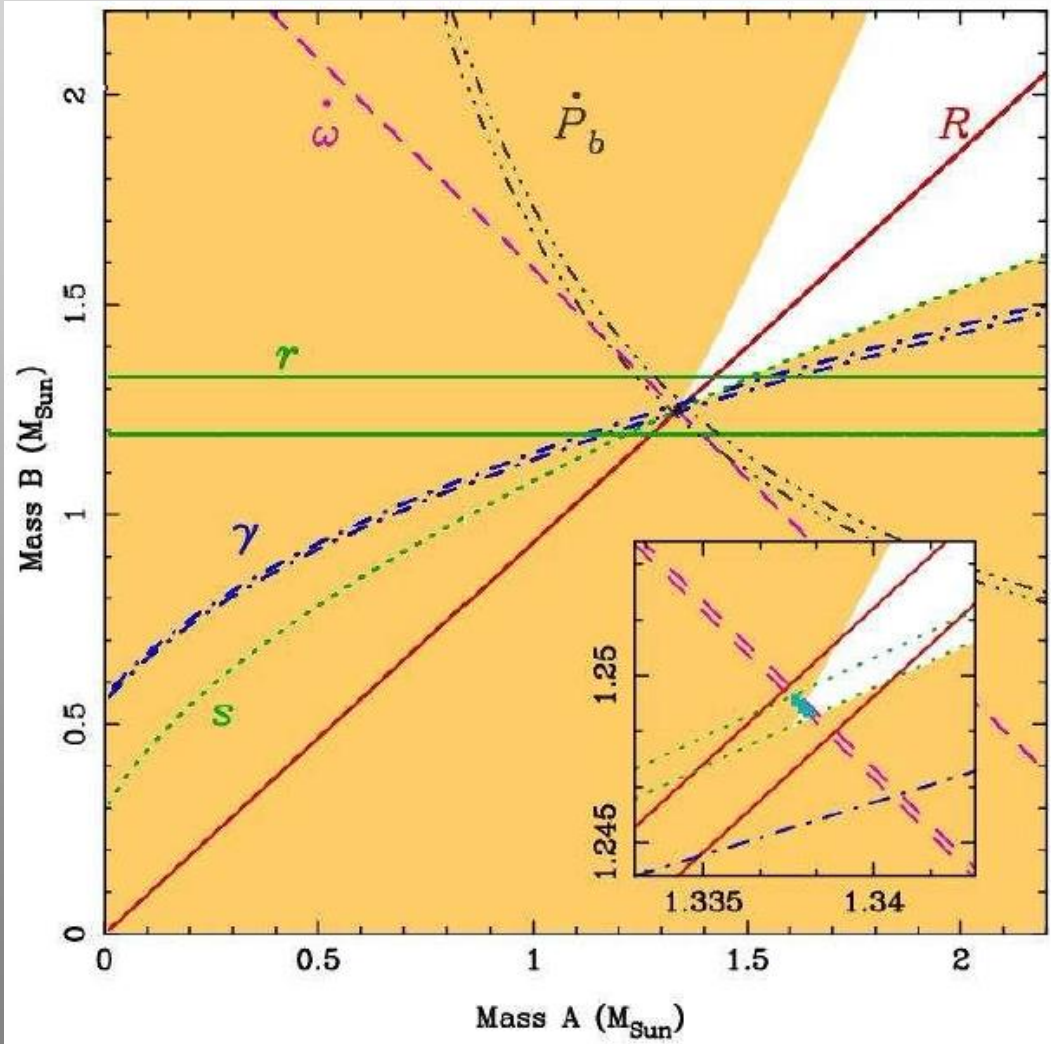
Наблюдение сразу нескольких эффектов позволяет измерить массы обеих звезд с очень высокой точностью. Иногда до 0.001 массы Солнца.

ДВОЙНОЙ PSR J0737-3039



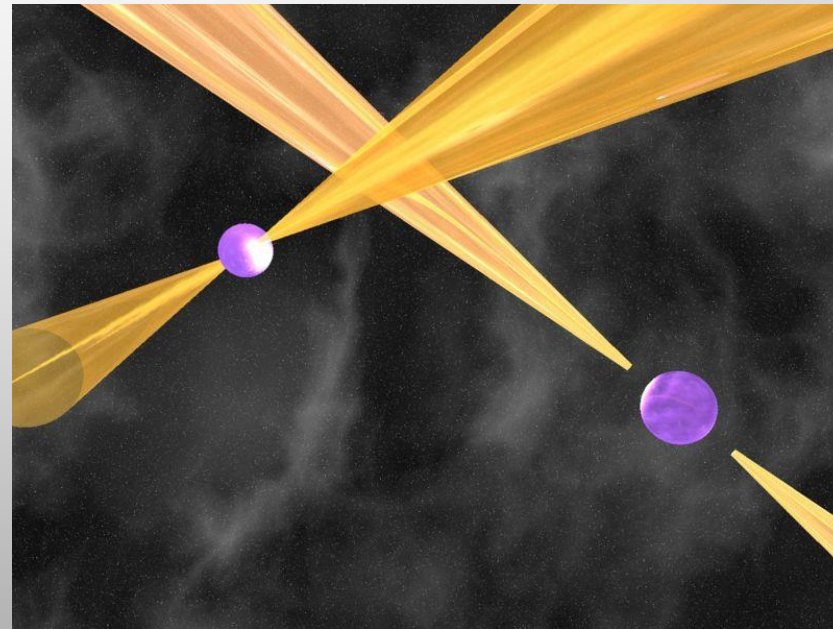
Уникальная система,
открытая в 2003 г.

MACCA PSR J0737-3039

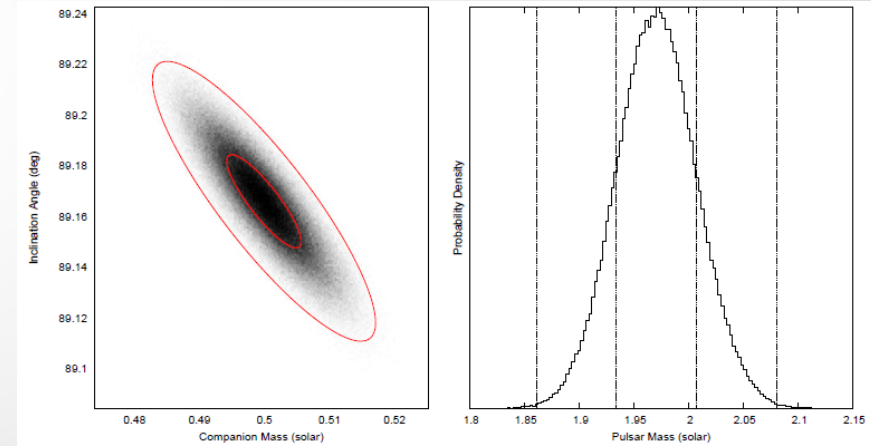
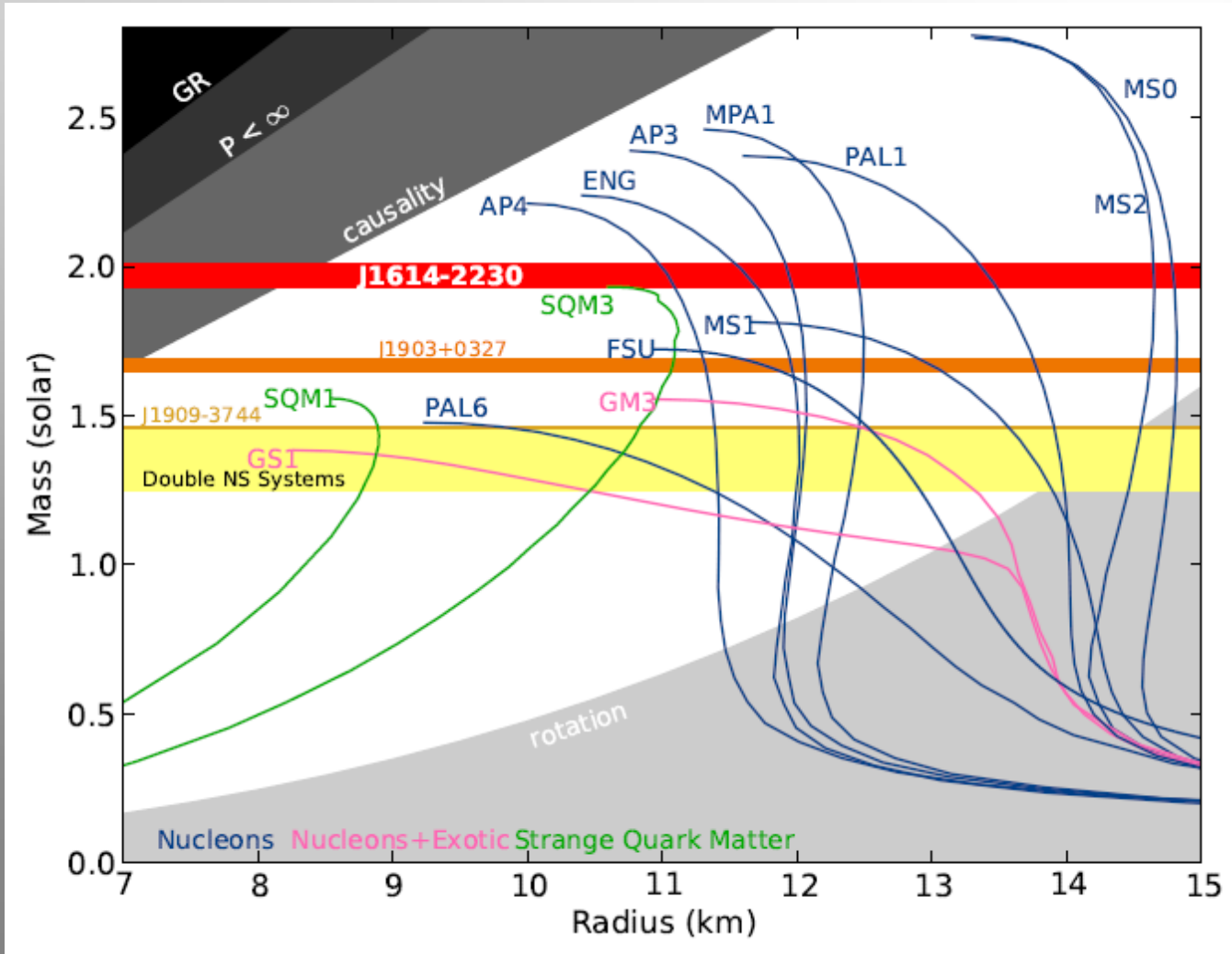


Наиболее точные значения.

Это очень тесная система,
где наблюдается два радиопульсара.



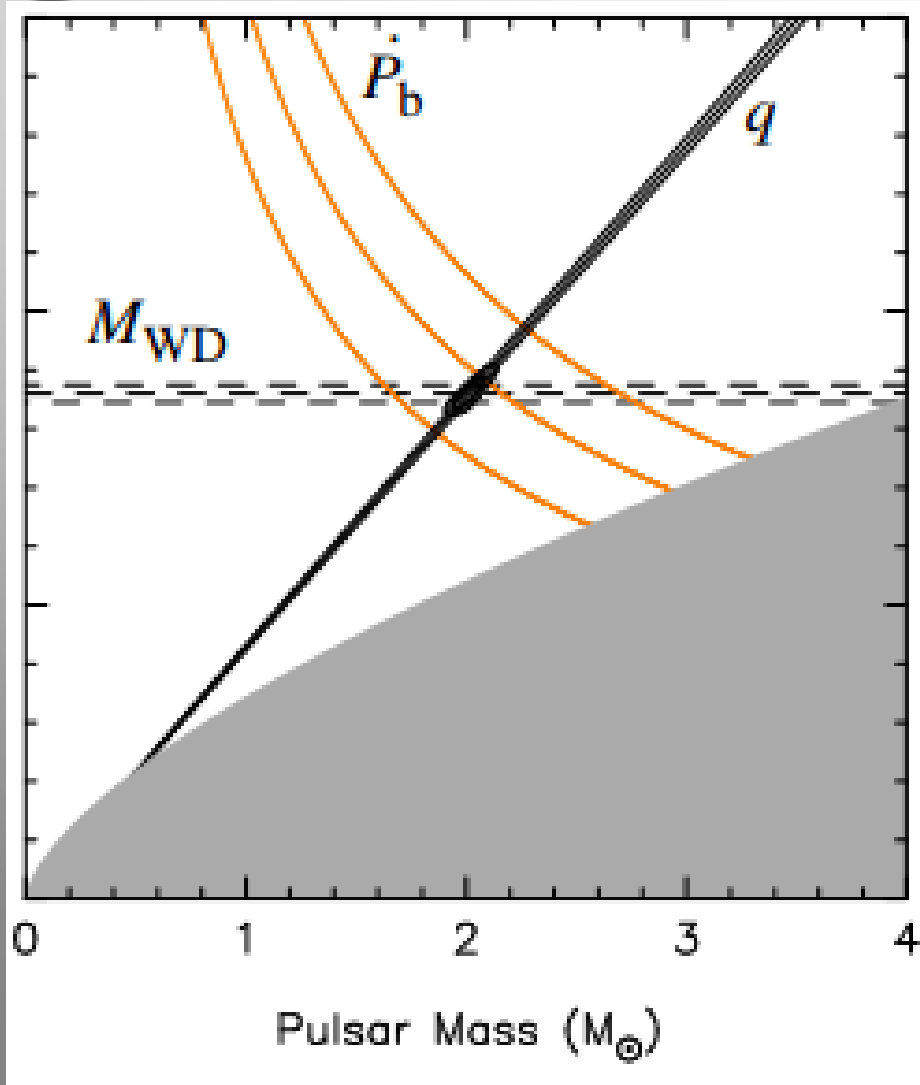
ПОЧЕМУ ВАЖНО ИСКАТЬ МАССИВНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ?



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

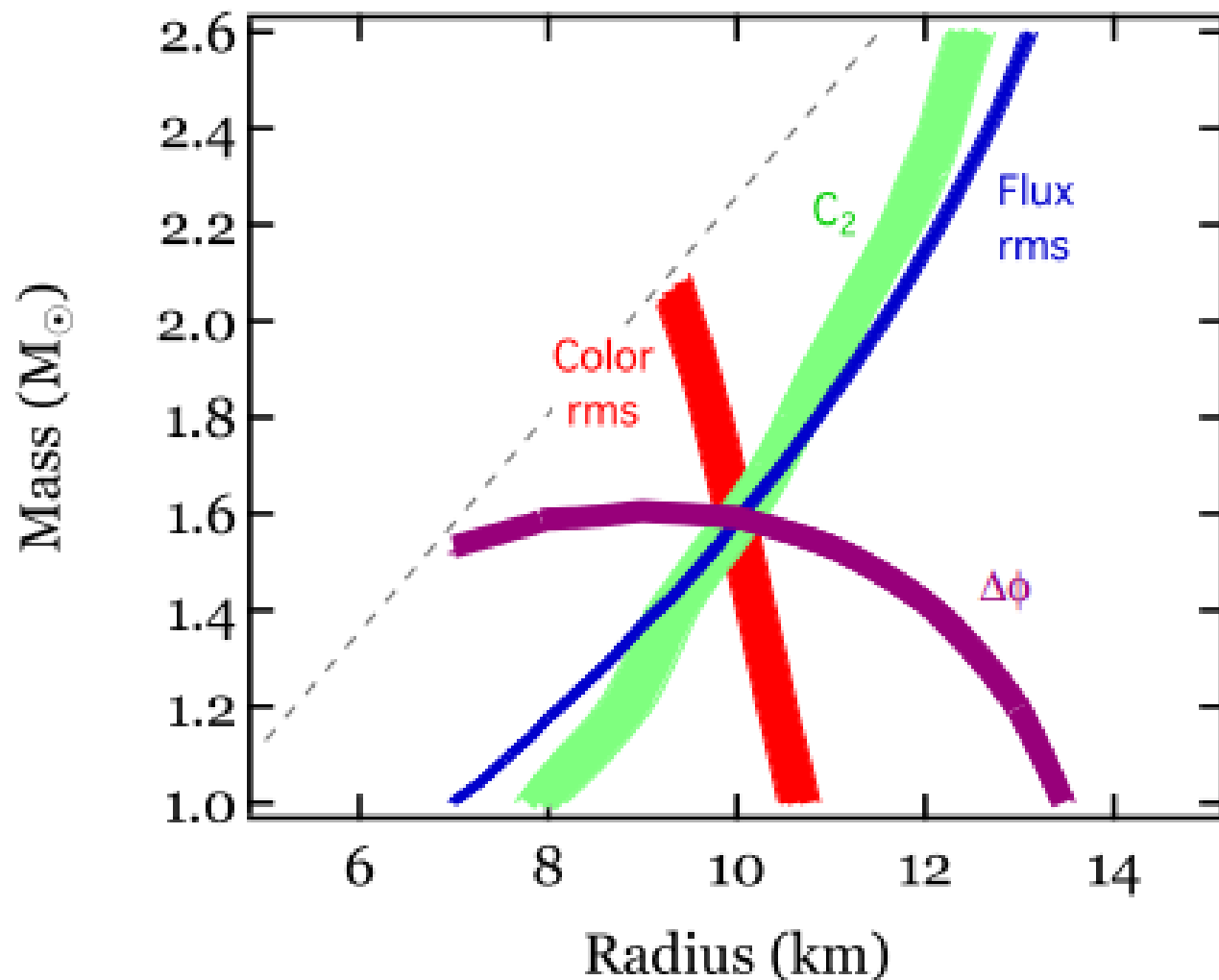
Оценка массы нейтронной звезды:

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



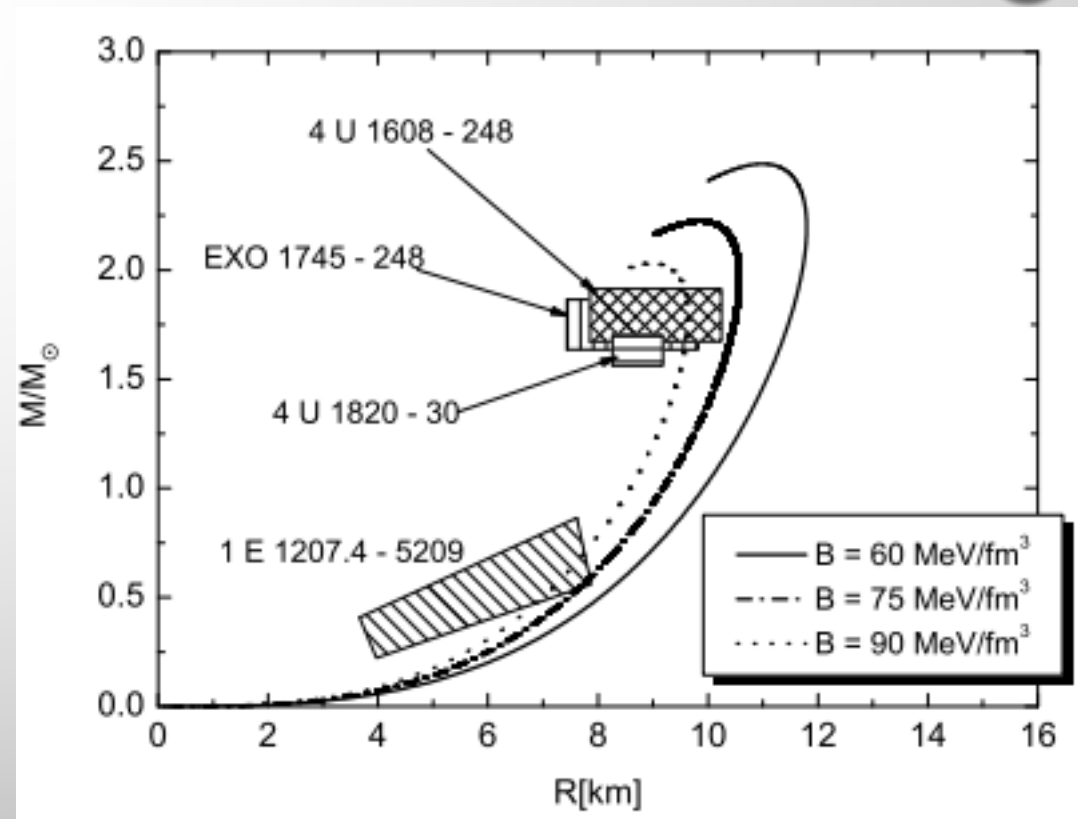
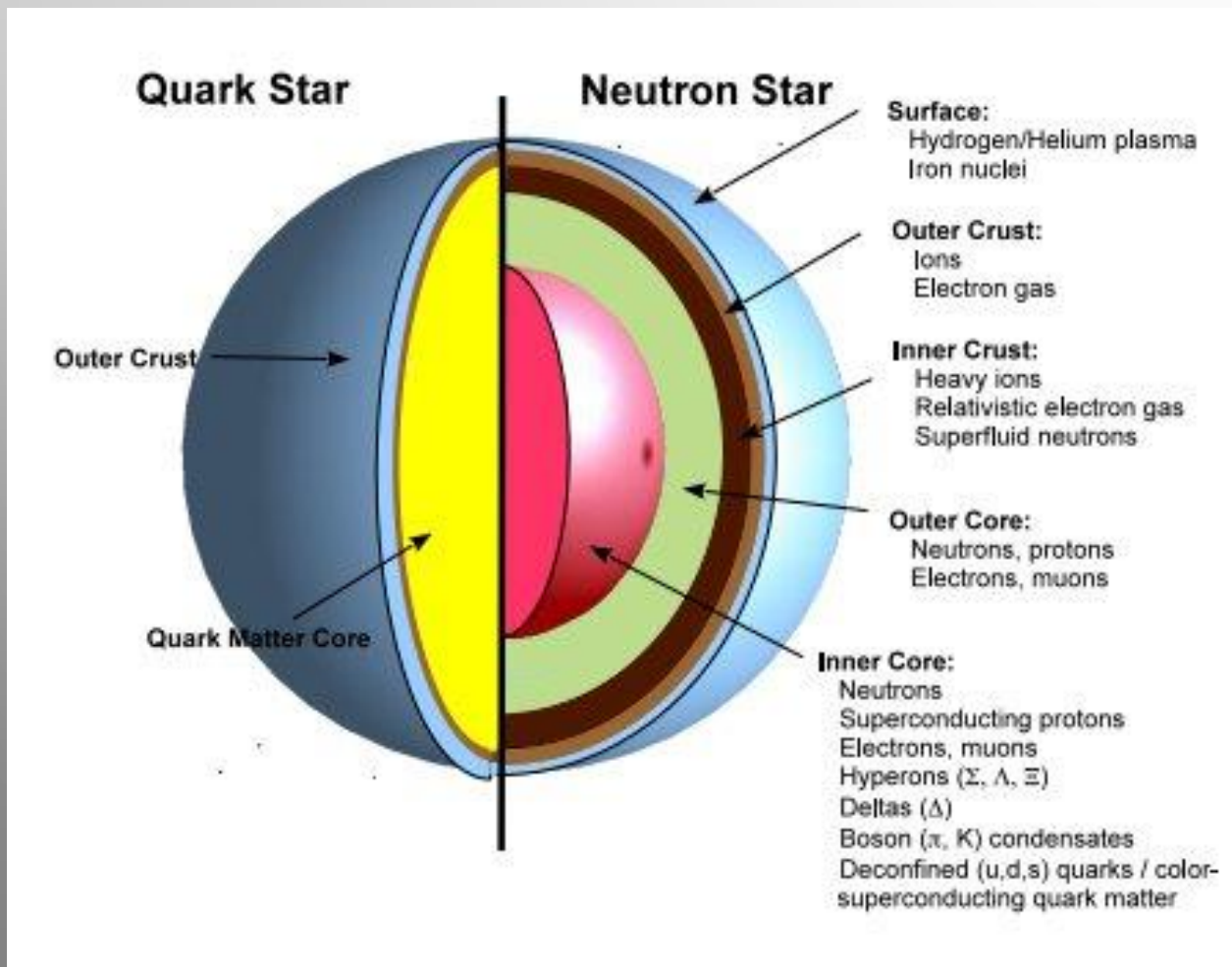
Возможно, что на будущих аппаратах NICER и LOFT можно будет очень точно измерять сразу и массу, и радиус хотя бы для небольшого числа звезд.

Данные основаны в первую очередь на анализе профиля импульса.

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

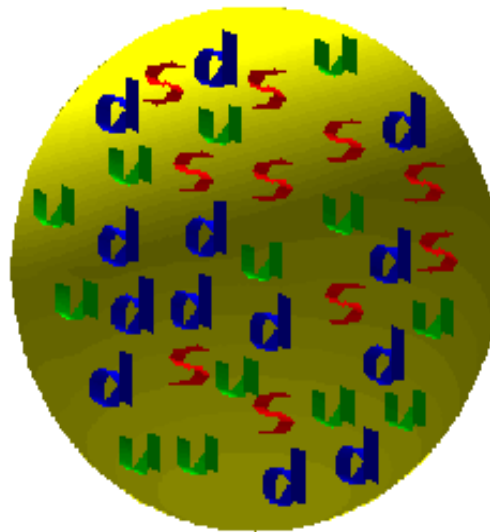
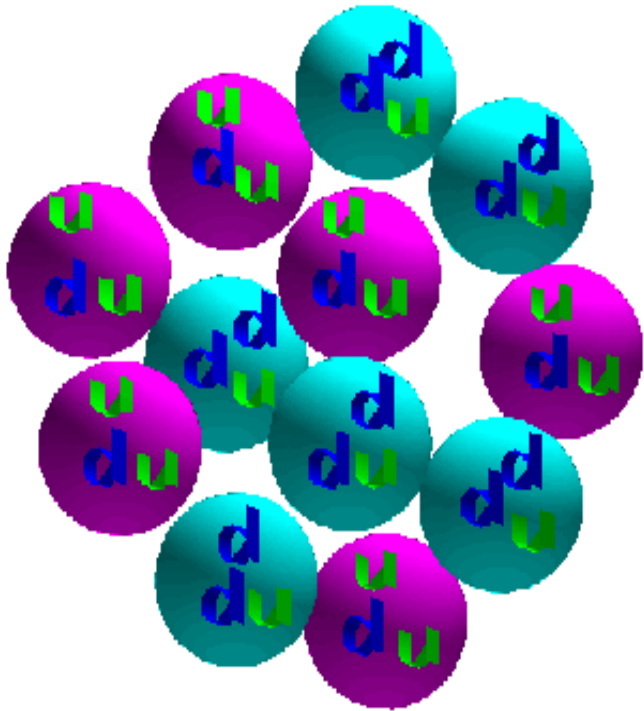
КВАРКОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

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



СТРАННОЕ ВЕЩЕСТВО И СТРАПЕЛЬКИ

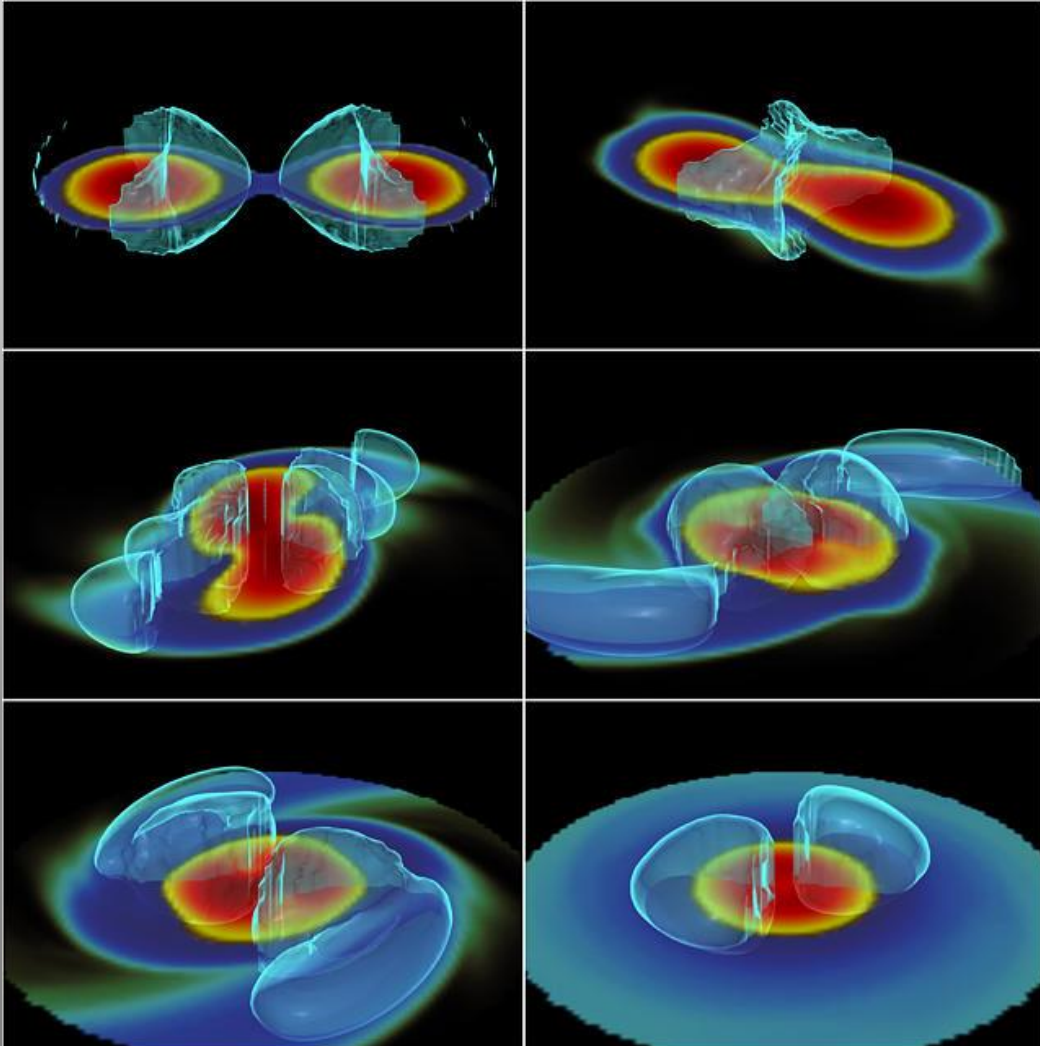
Кварковое вещество – «самодостаточно».
Для его устойчивости не нужна гравитация.
Т.е., могут существовать как странные звезды,
Так и маленькие комочки, капельки.



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

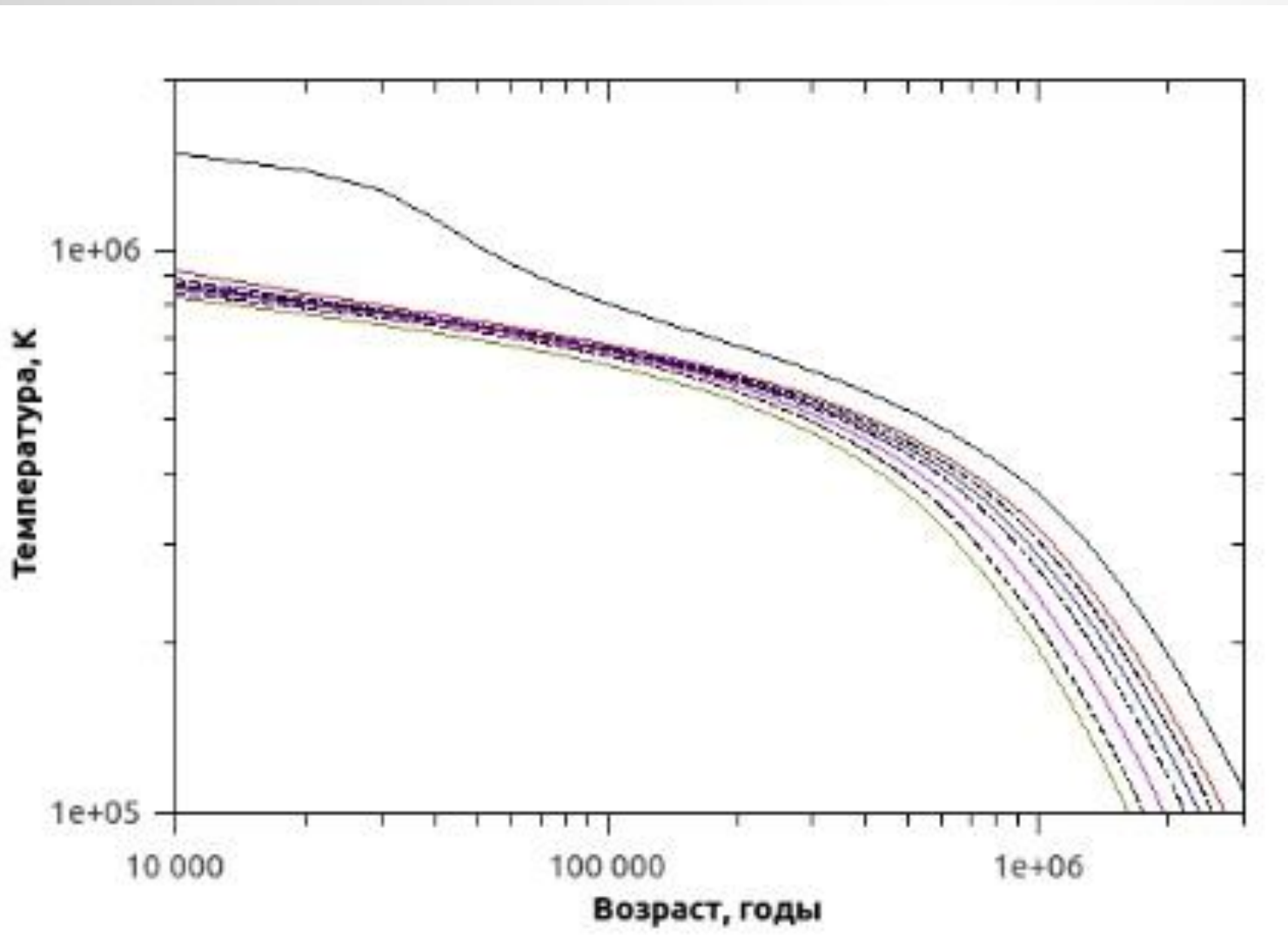
СТРАННАЯ КВАРКОВАЯ ЭПИДЕМИЯ

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



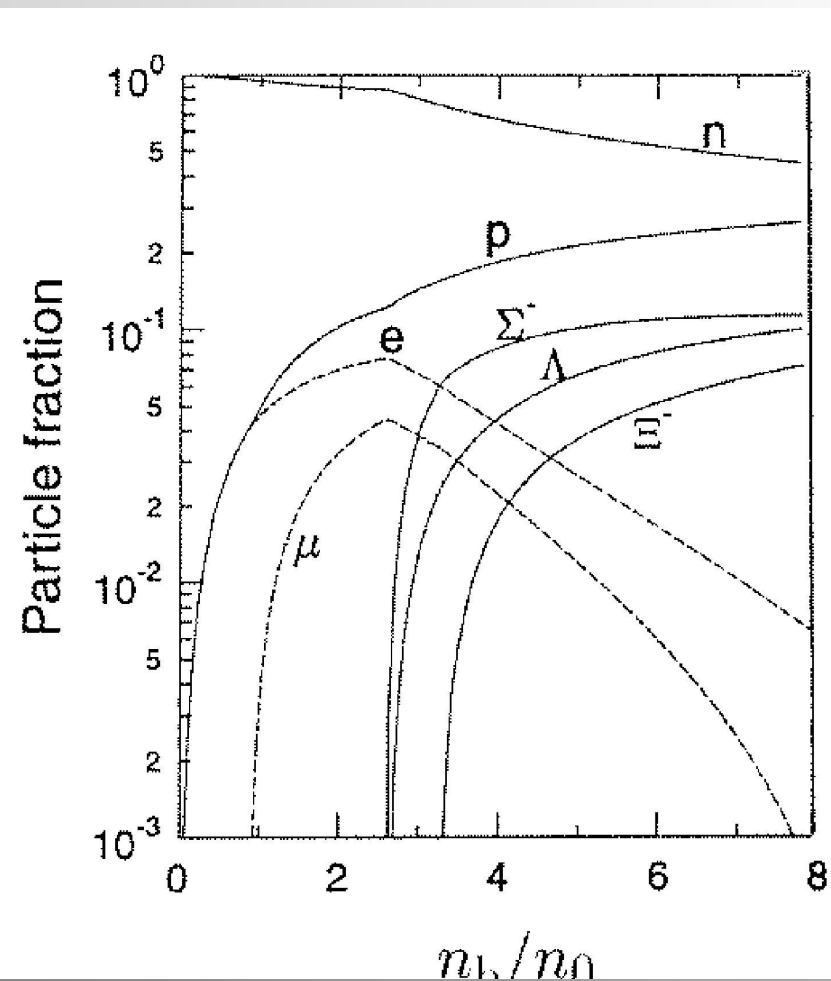
AMS на МКС

ОСТЫВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

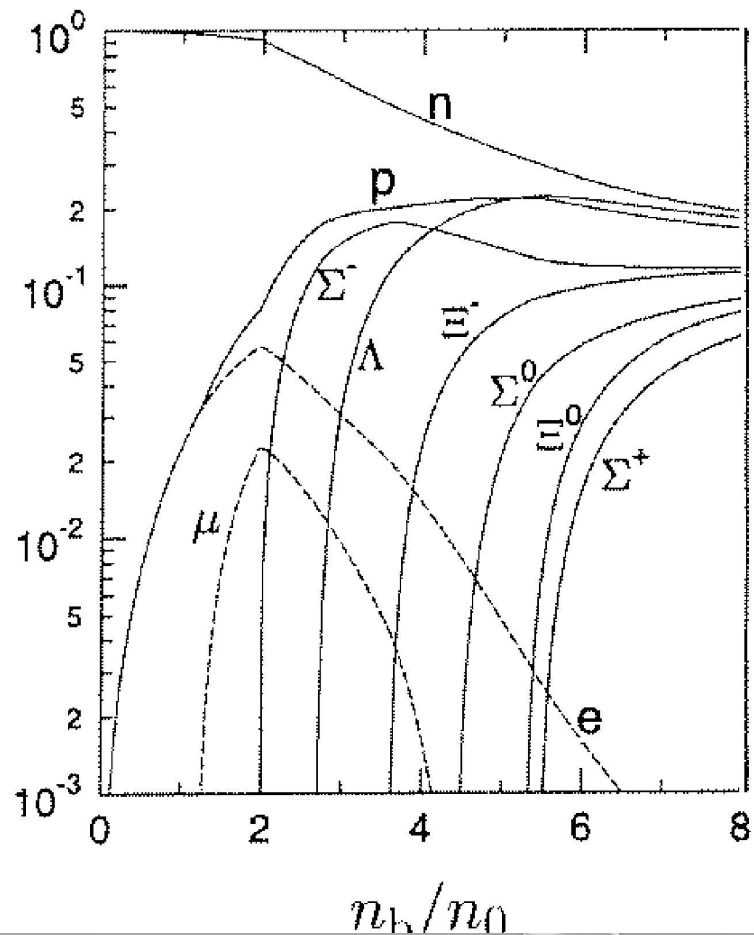


Рождаясь очень горячими, нейтронные звезды остывают со временем в начале за счет излучения нейтрино, а затем — за счет излучения фотонов с поверхности.

ЧАСТИЦЫ ВНУТРИ



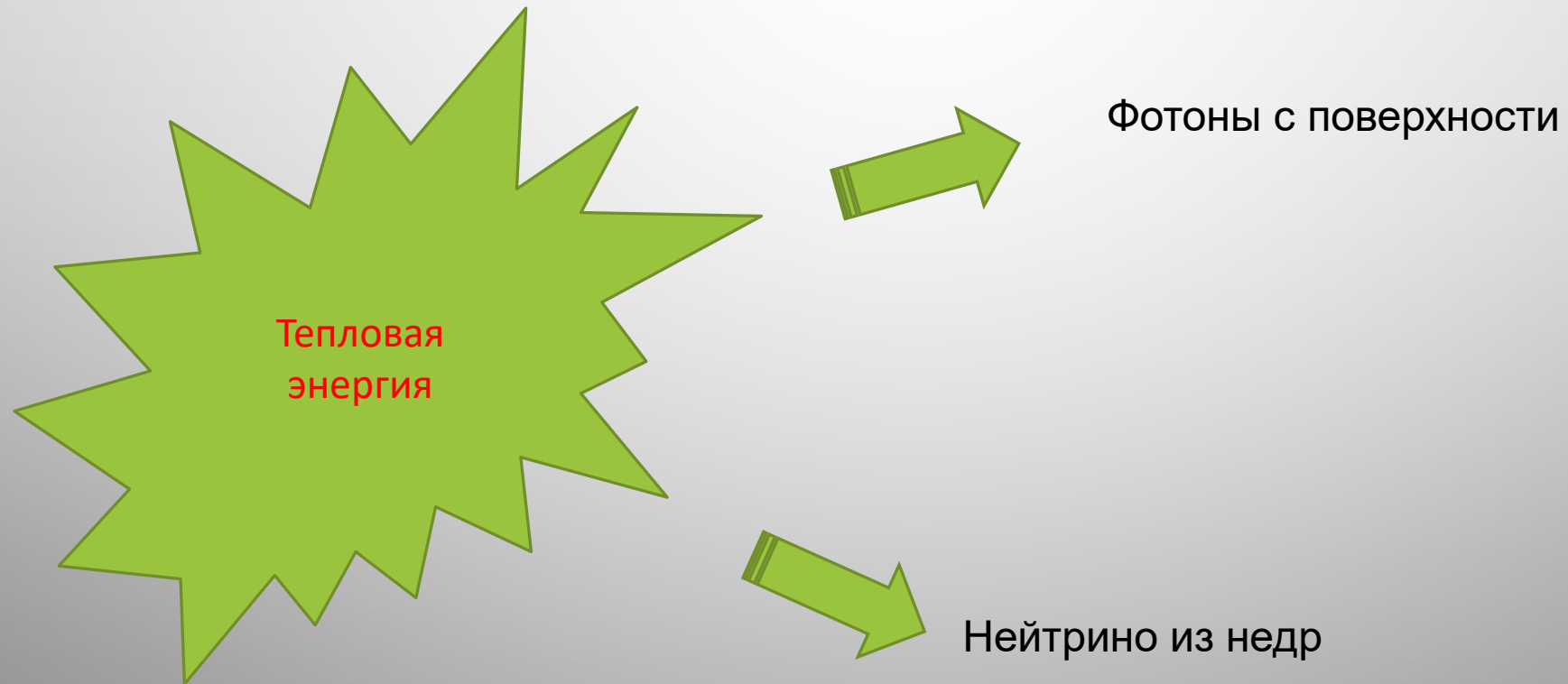
Effective chiral model of Hanauske et al. (2000)



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.

ТЕПЛОПТЕРИ



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

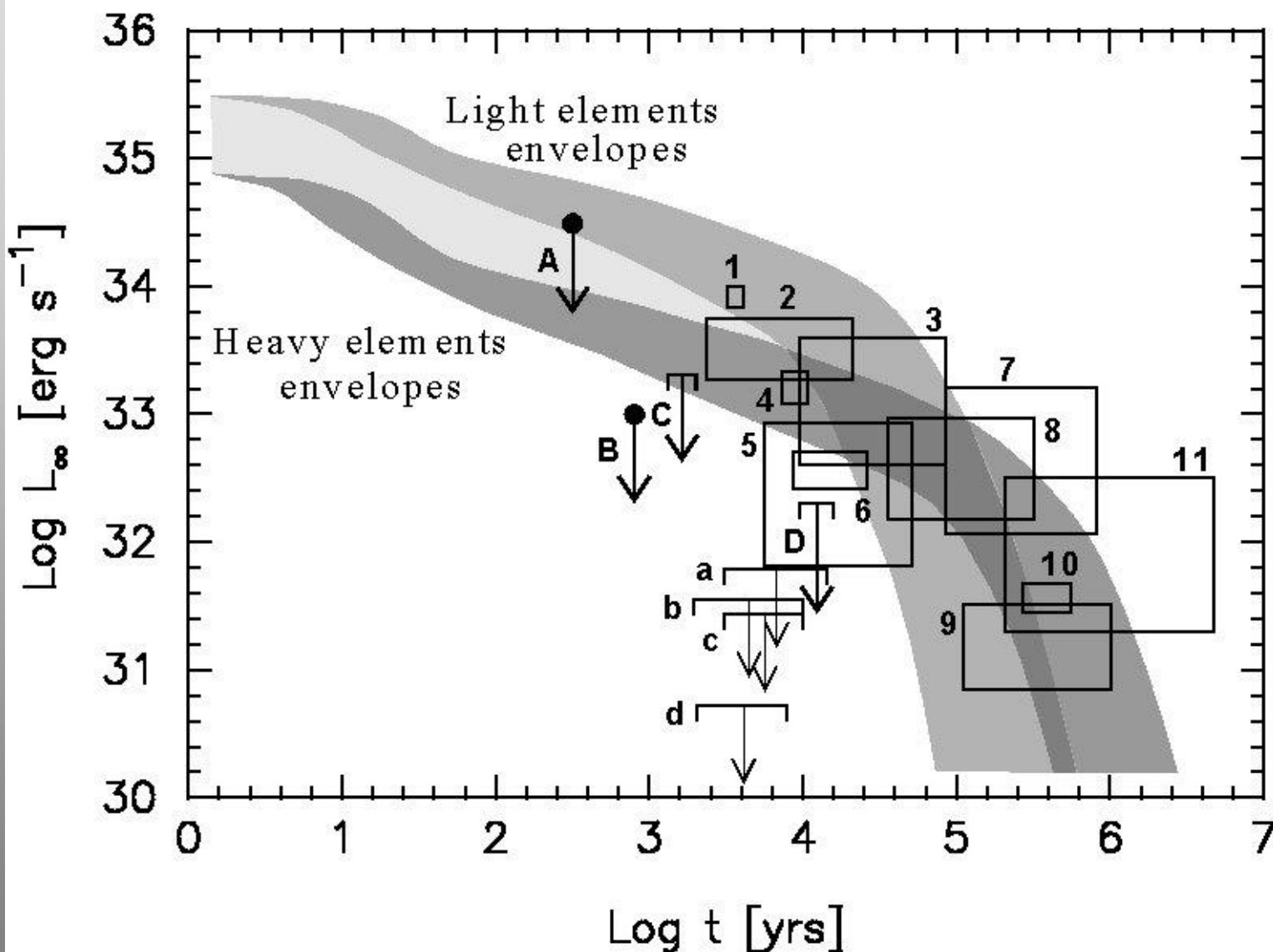
ОСНОВНЫЕ НЕЙТРИННЫЕ ПРОЦЕССЫ

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 $NN \rightarrow NN\nu\bar{\nu}$	$10^{19} - 10^{20}$

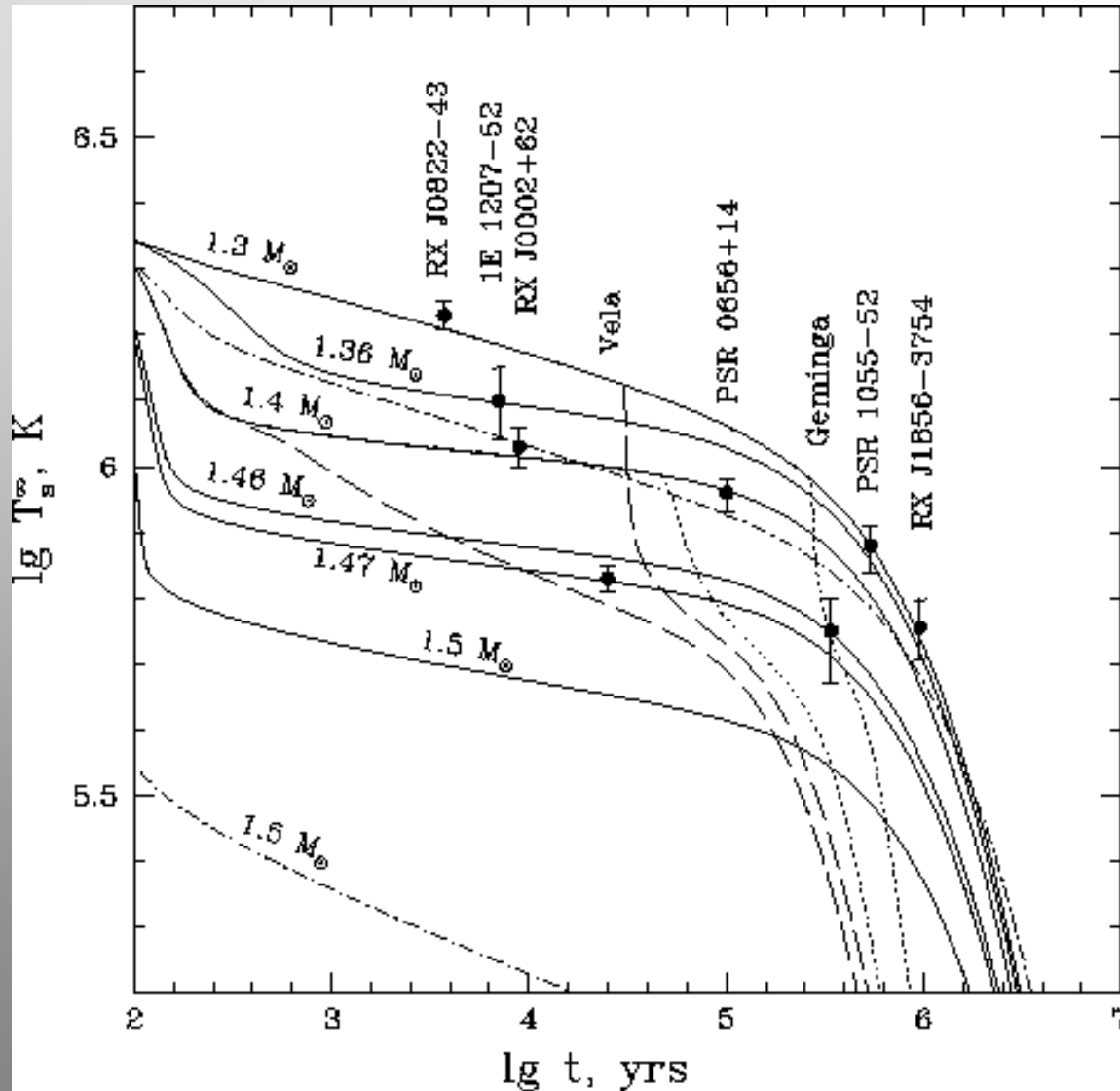
$$Q_{\text{slow}} = Q_s T_9^8, \quad Q_{\text{fast}} = Q_f T_9^6$$

КРИВЫЕ ОСТЫВАНИЯ



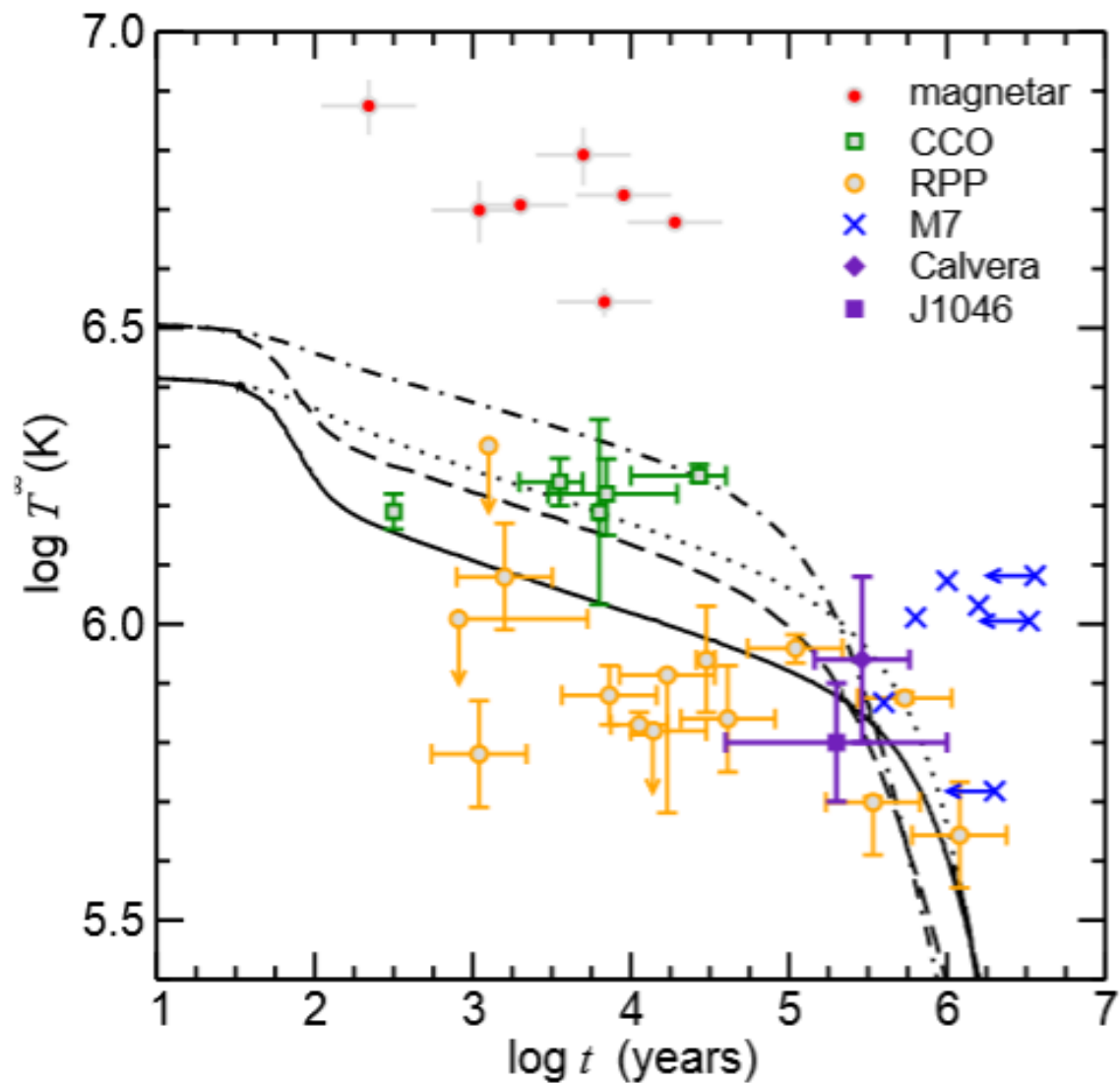
Теоретические кривые необходимо сопоставлять с данными наблюдений.

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.

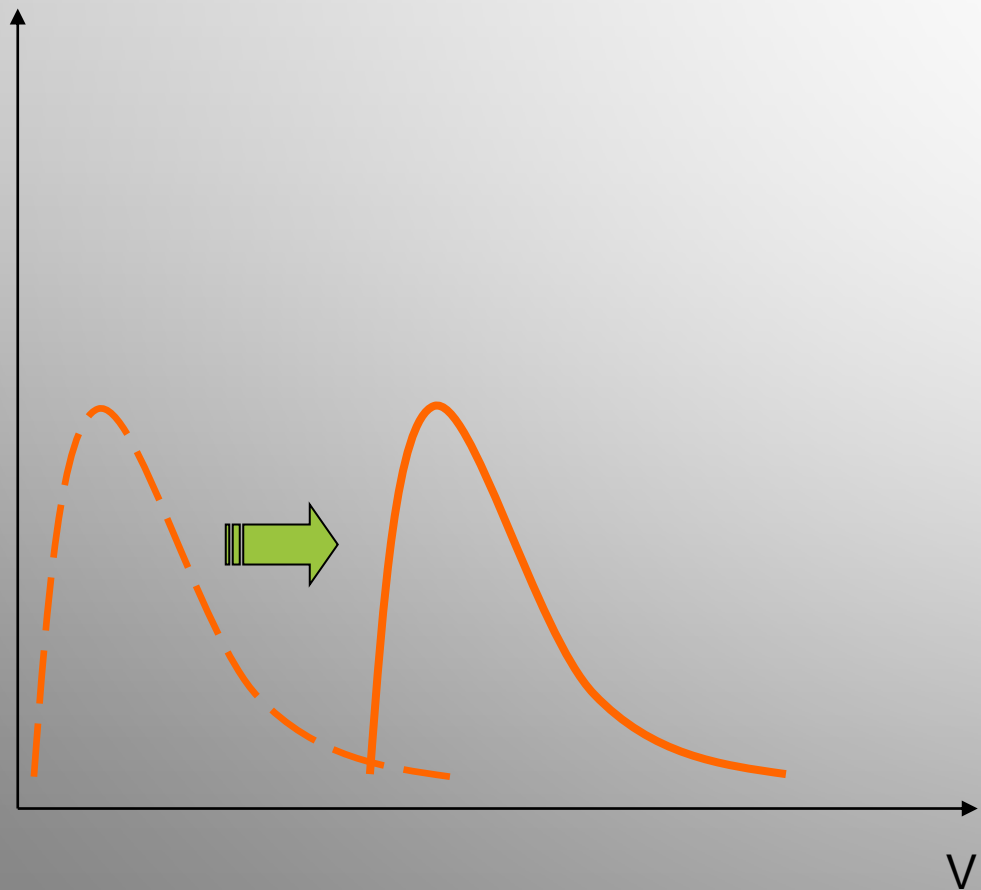
Такой есть у магнитаров. Он связан с затуханием электрических токов, текущих в коре этих нейтронных звезд.

КИНЕМАТИЧЕСКИЙ ВОЗРАСТ

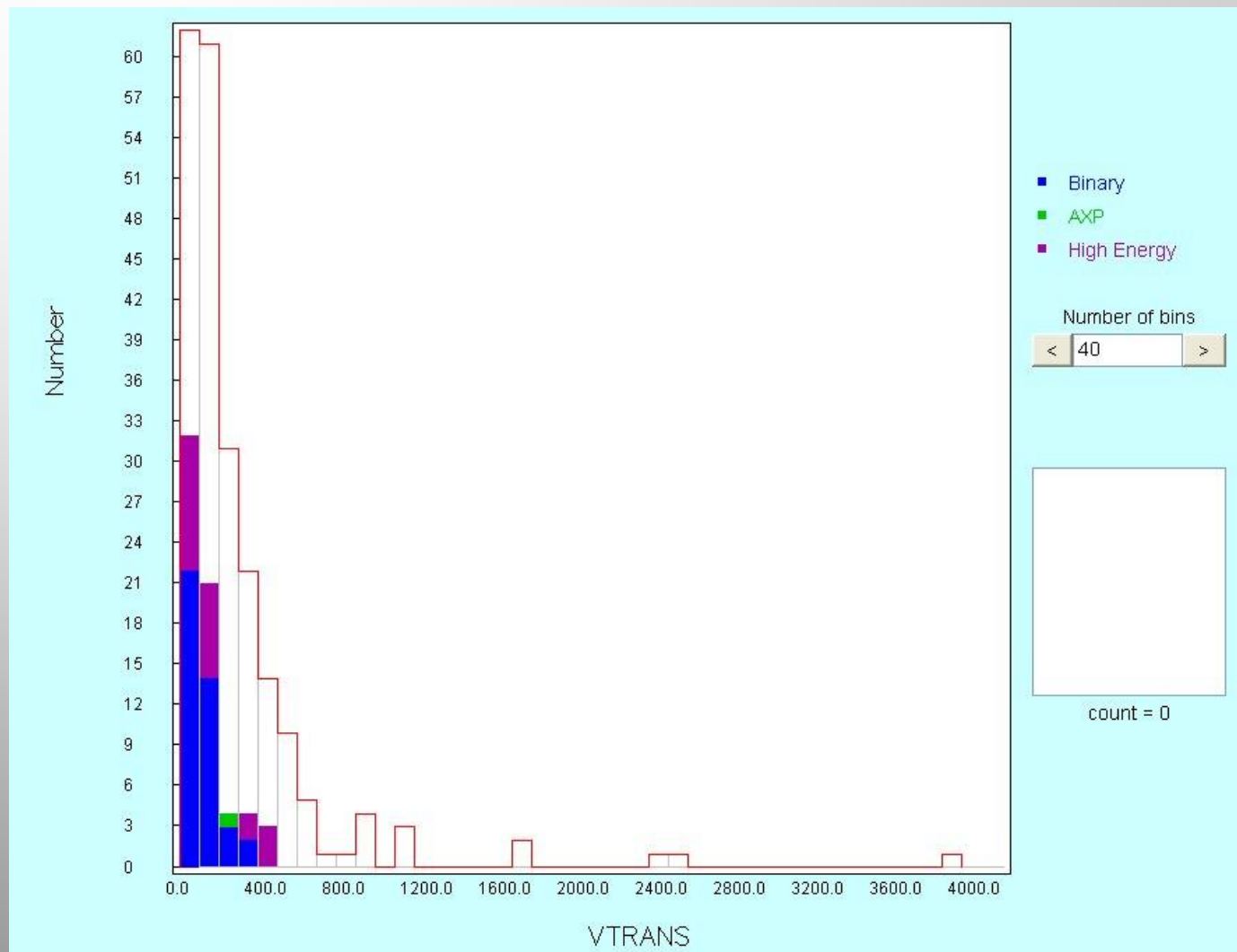


Если мы знаем, где объекты родились, то по их современному положению и скоростям можно определить возраст.

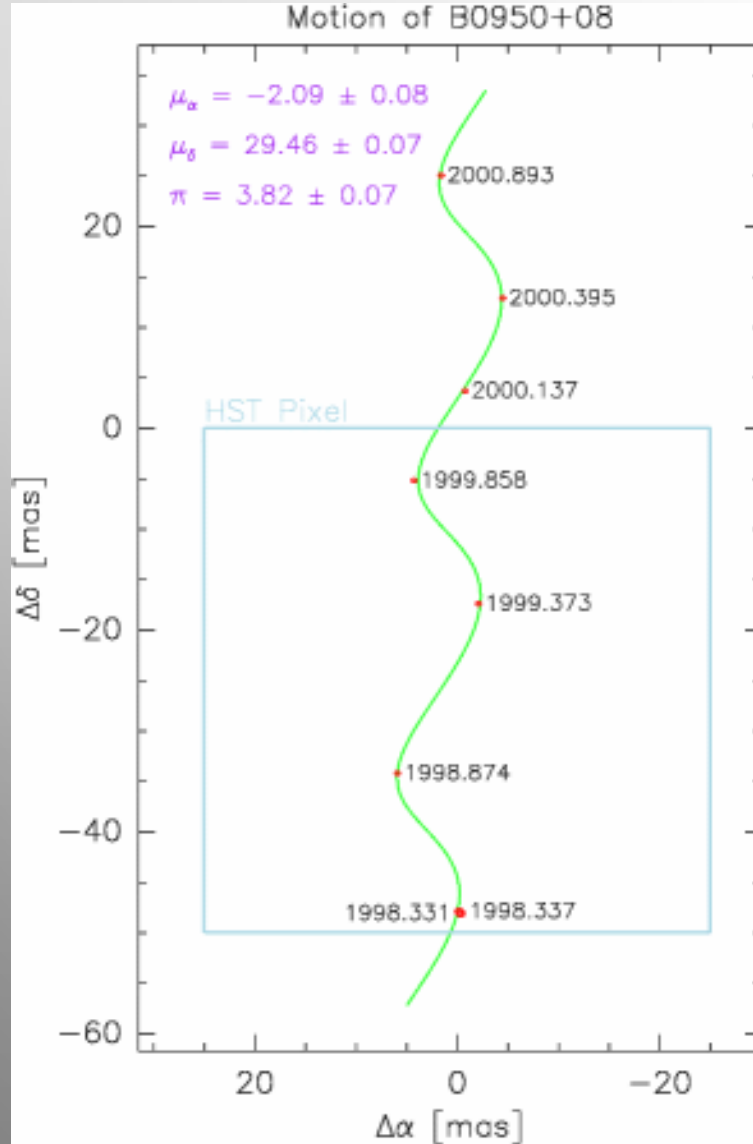
СКОРОСТИ



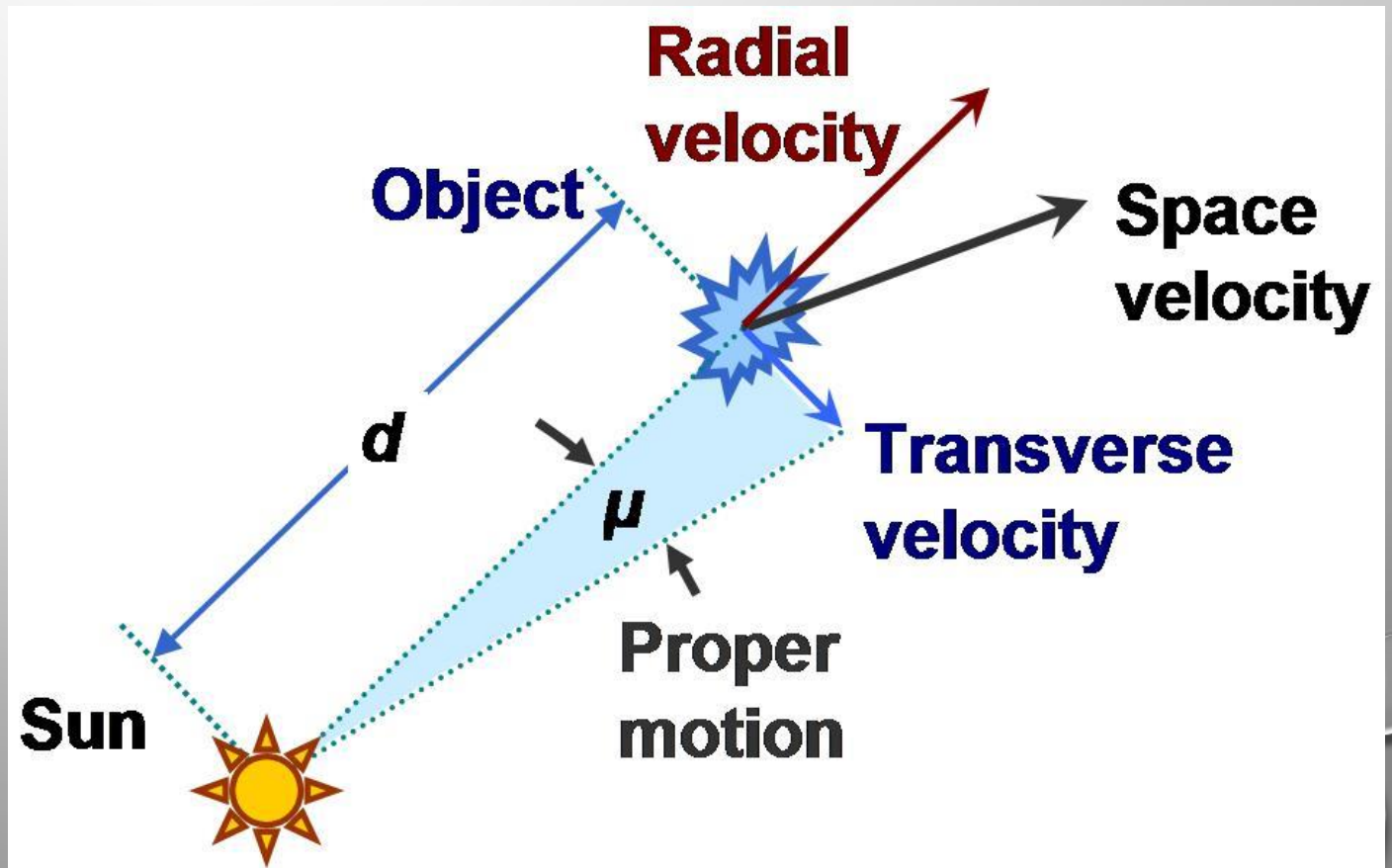
Прародители имеют скорости $\sim 10-30$ км/с
А пульсары имеют скорости $\sim 100-500$ км/с



ДВИЖЕНИЕ ПУЛЬСАРОВ

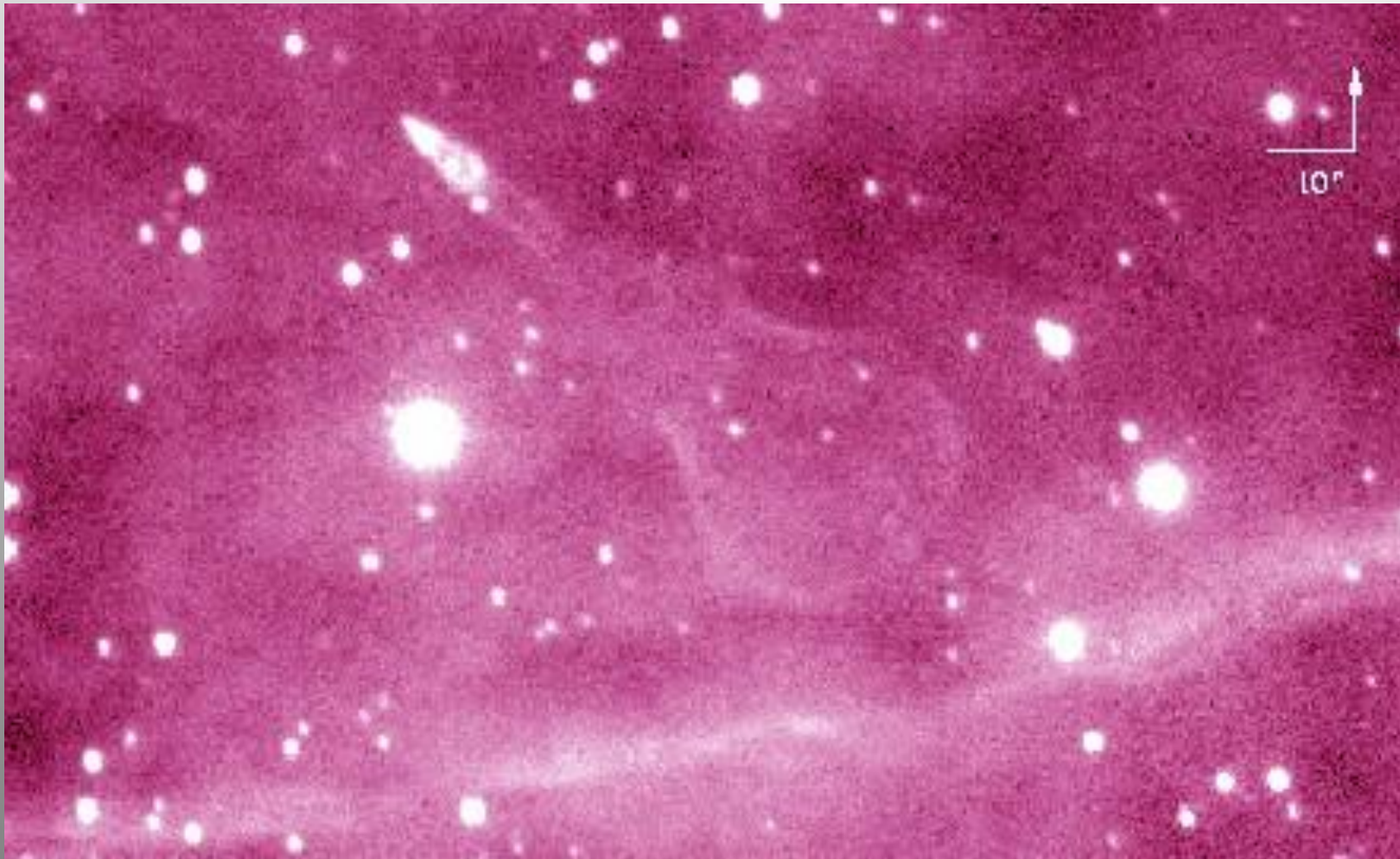


Пульсары имеют большие скорости.
Это измеряют по их собственному движению.



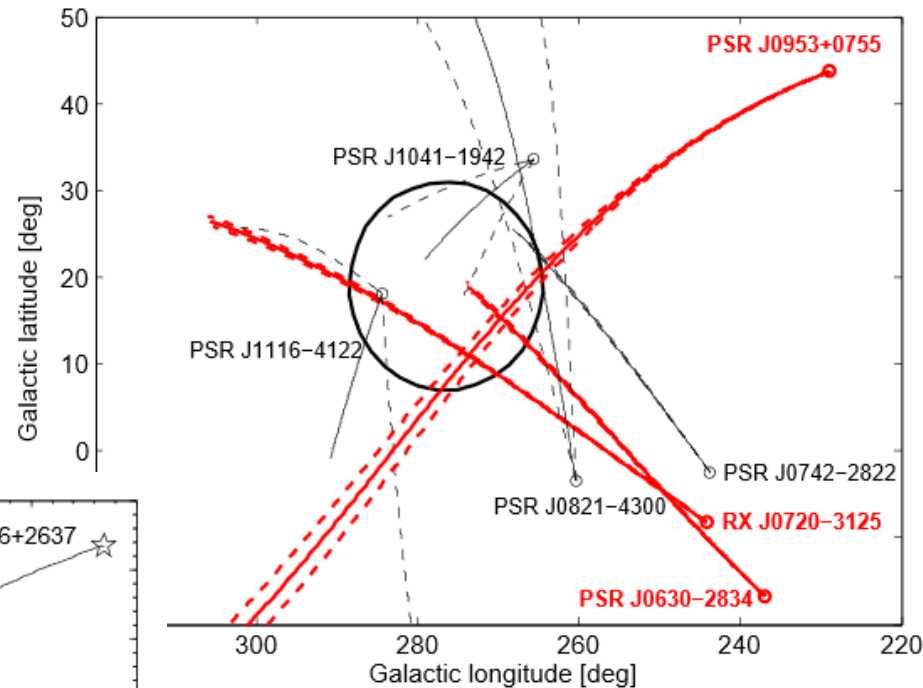
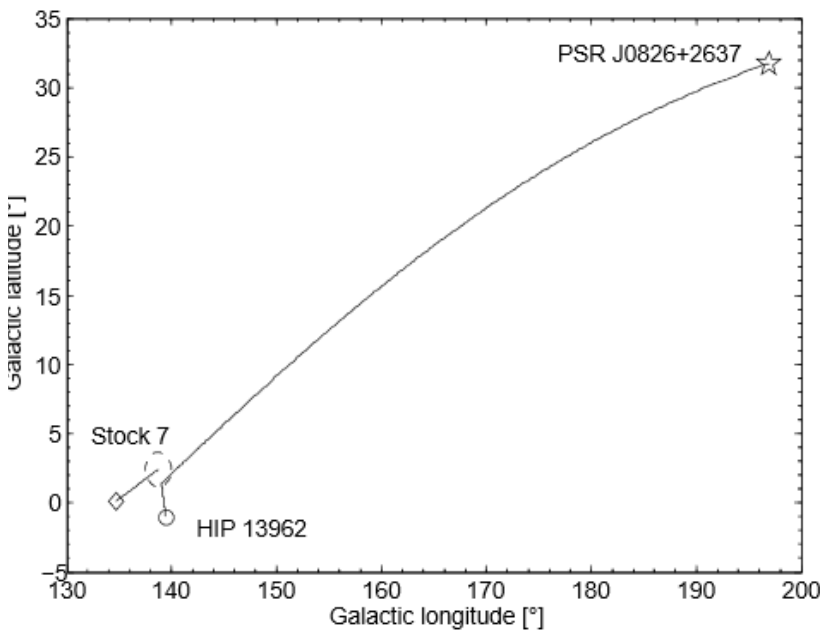
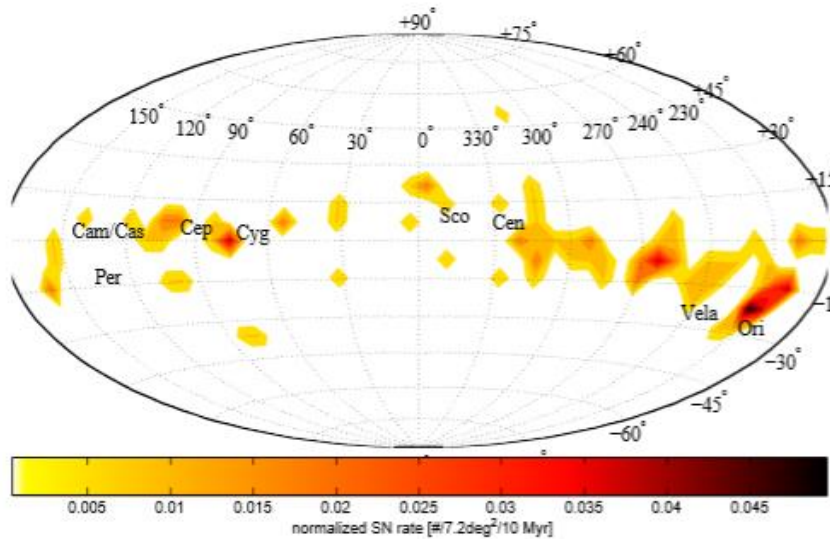
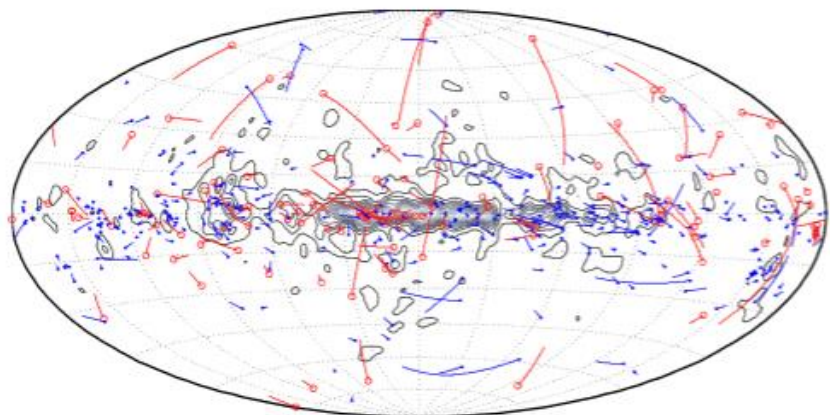
СКОРОСТИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД В ТУМАННОСТЯХ

<http://www.astro.cornell.edu/~shami/guitar/>



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

ТРАЕКТОРИИ И МЕСТА РОЖДЕНИЯ

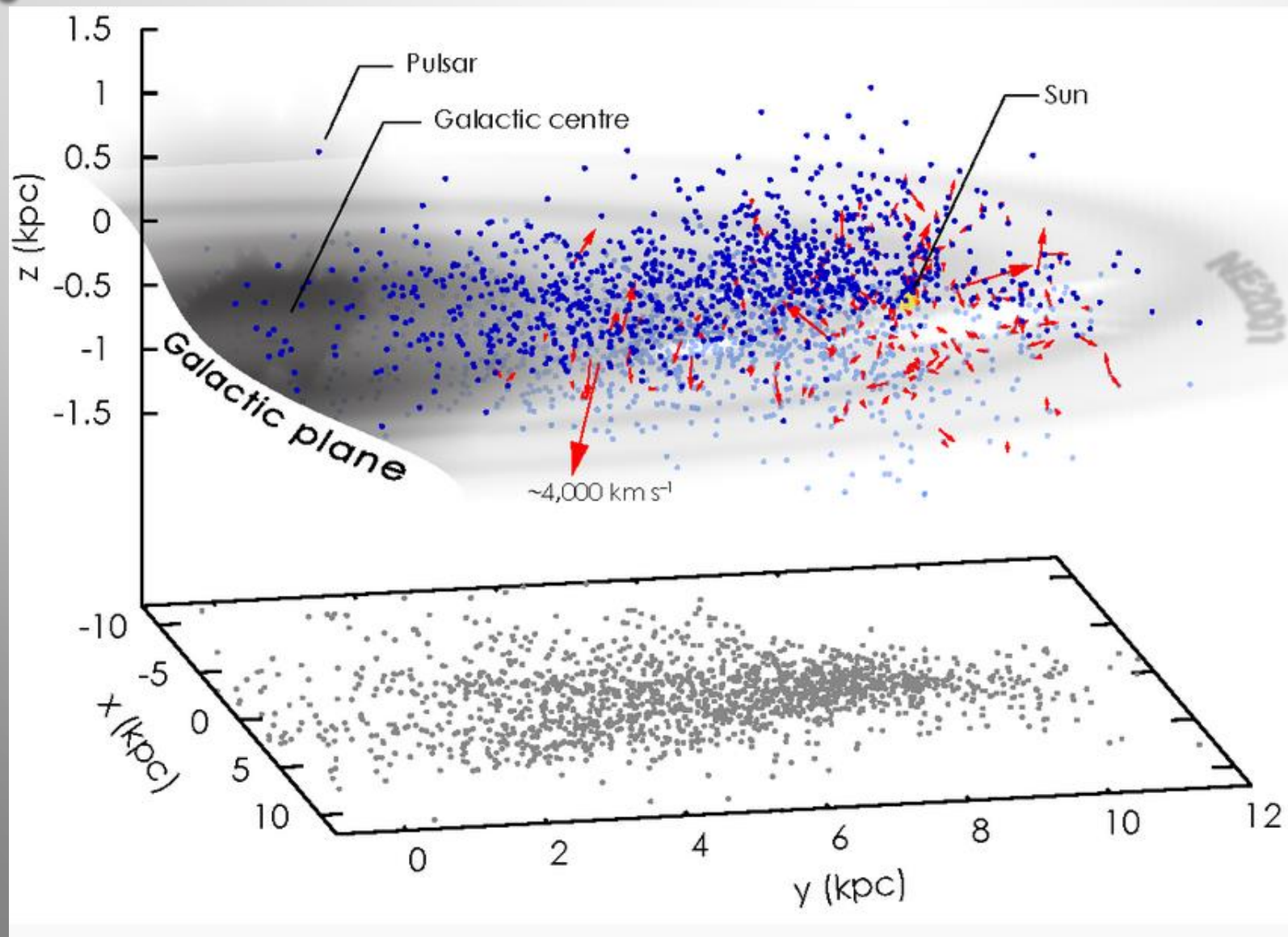


1202.1388

1401.4678

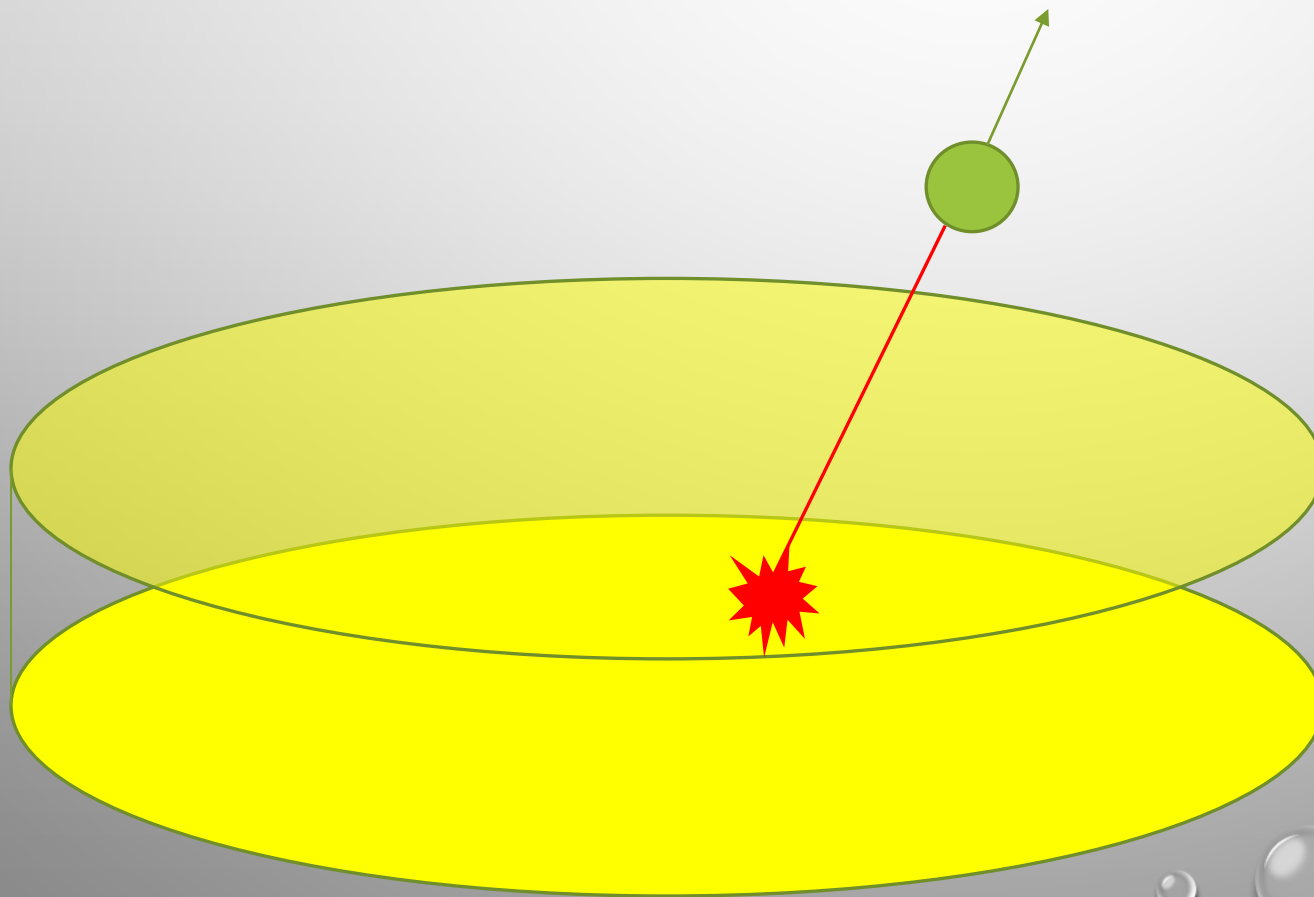
1307.5616

ПУЛЬСАРЫ В ГАЛАКТИКЕ



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

ПУЛЬСАРЫ ИЗ ДИСКА



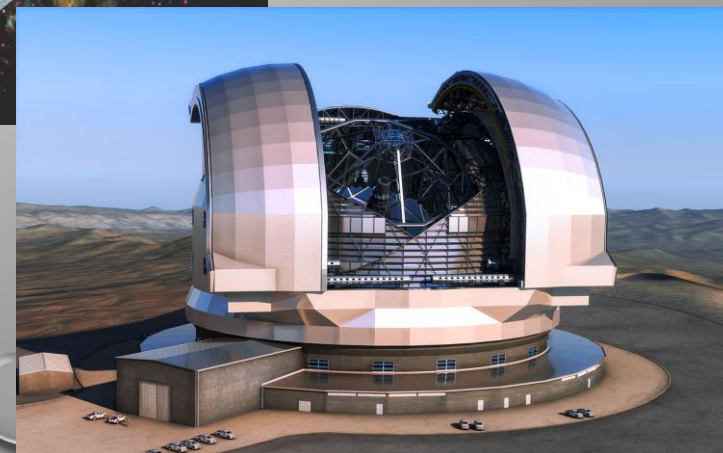
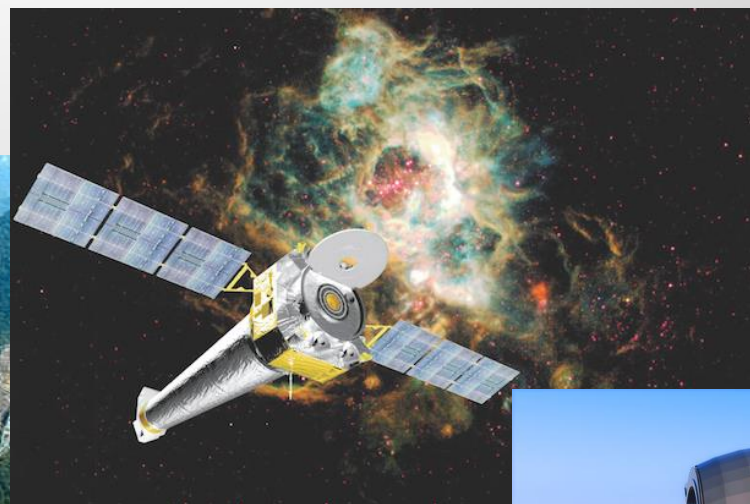
Для оценки кинематического возраста часто удобно считать, что пульсар родился в плоскости Галактики.

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

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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

Есть много актуальных задач, связанных с фундаментальной физикой, которые могут быть решены в ближайшие годы.



Обзоры по нейтронным звездам

1. Потехин «Физика нейтронных звезд» УФН 2010

<https://ufn.ru/ru/articles/2010/12/c/>

2. см. http://xray.sai.msu.ru/~polar/sci_rev/ns.html