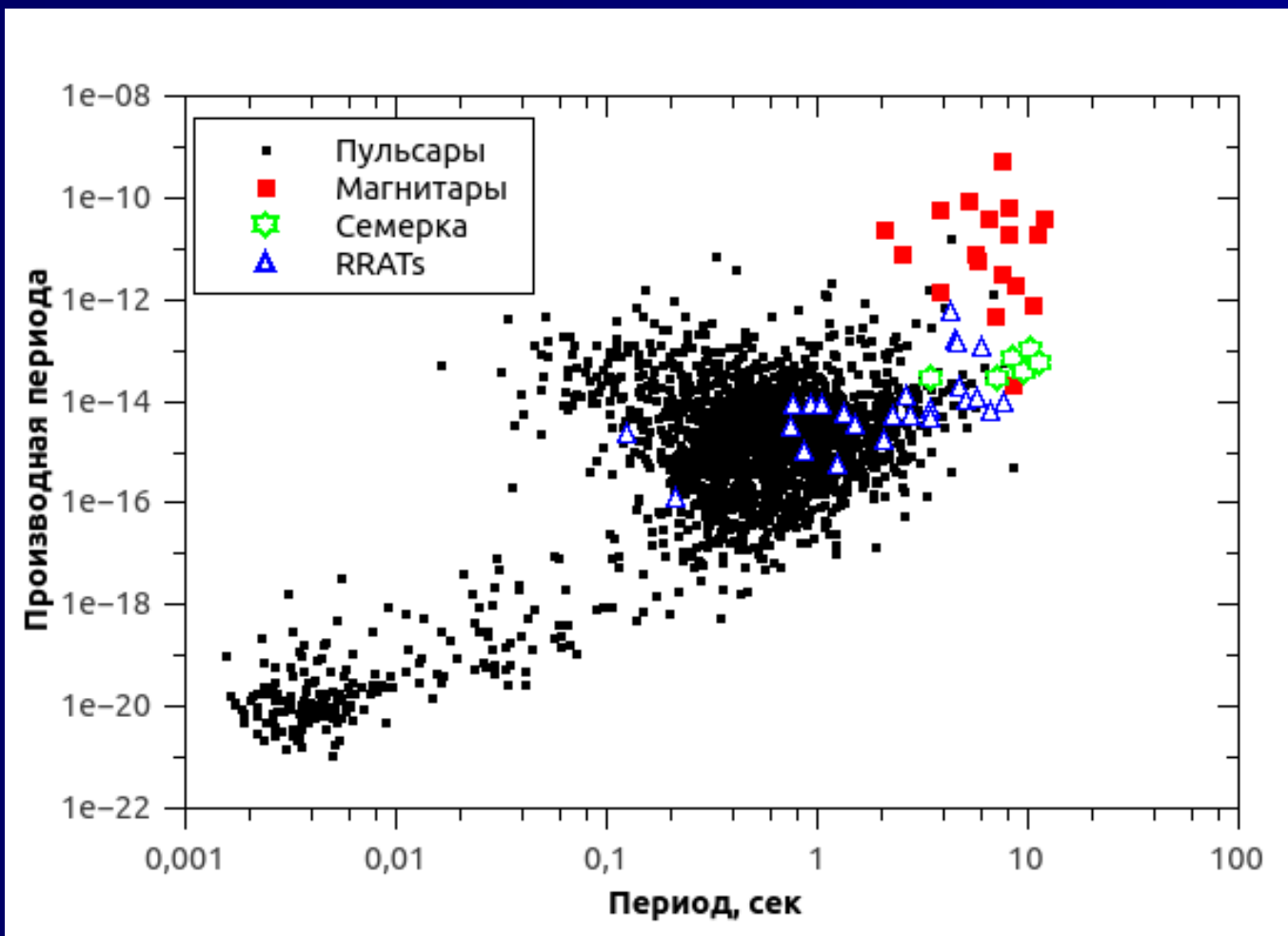


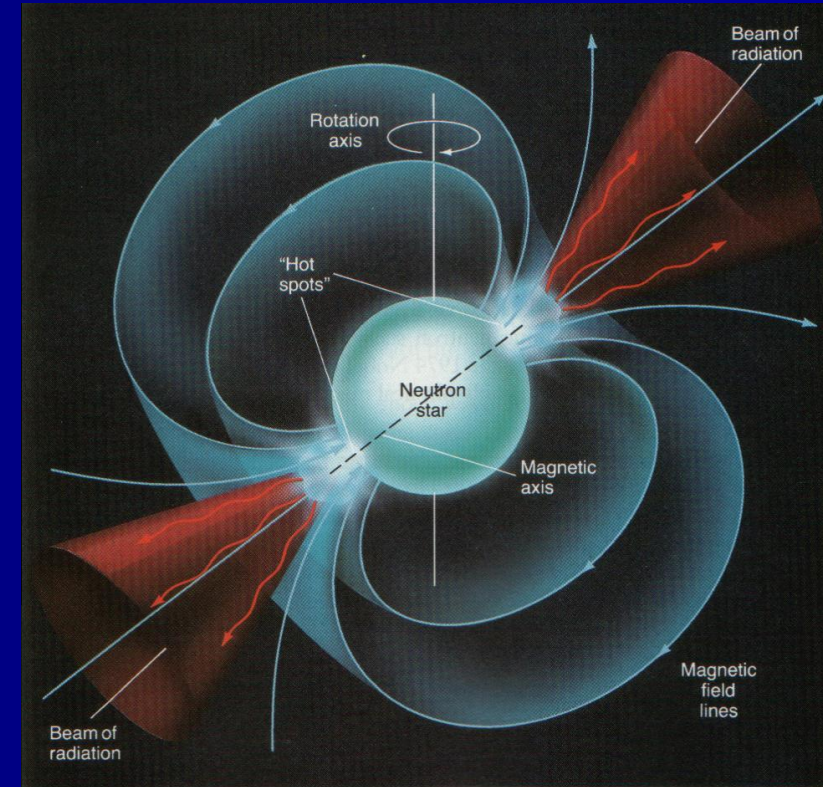
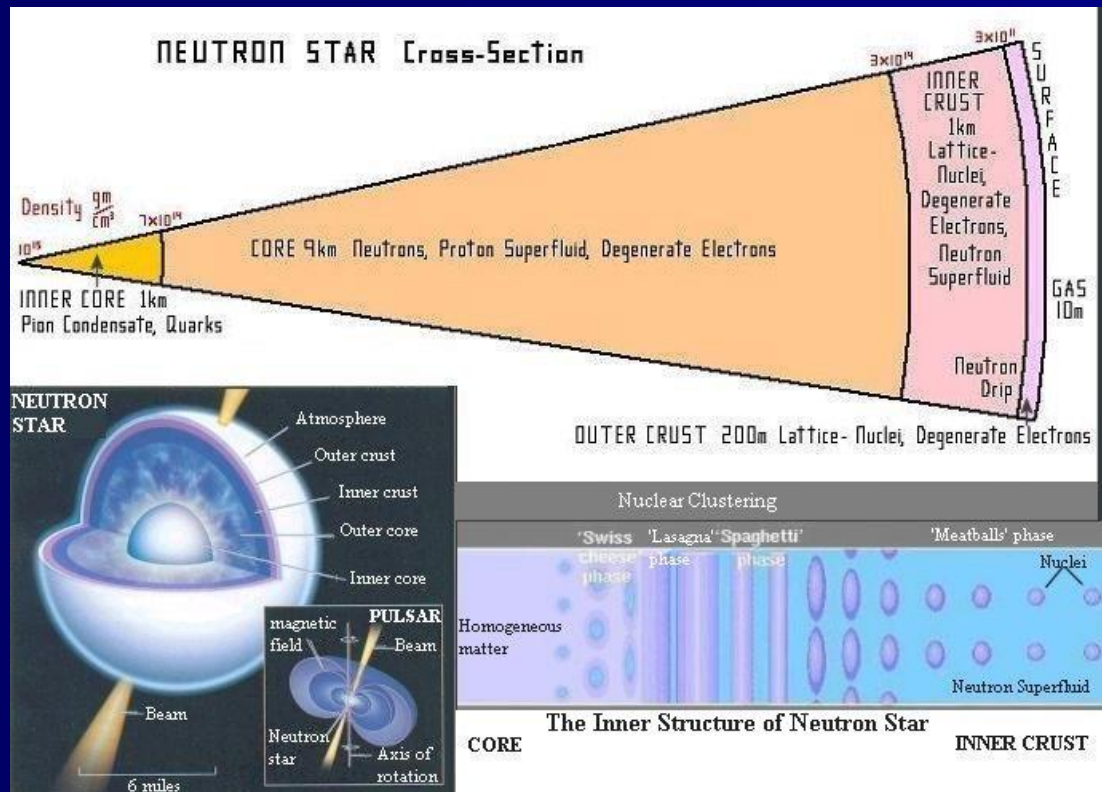
# Жизнь нейтронной звезды



Сергей Попов  
(ГАИШ МГУ)

# 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

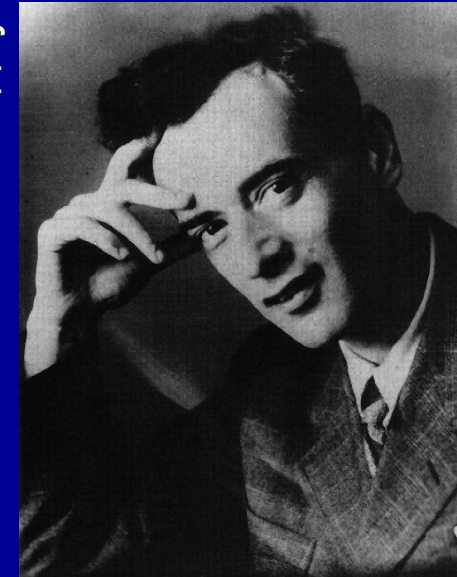
Бааде и Цвикки: нейтронные звезды и сверхновые

Бааде



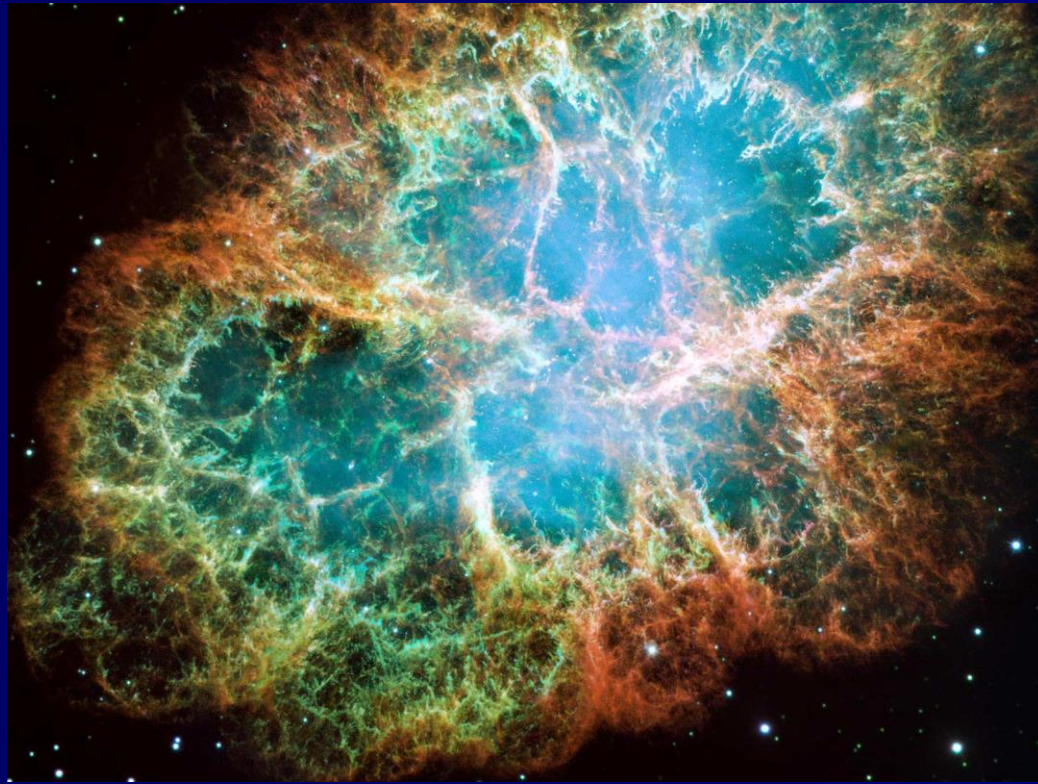
Цвикки

Ландау



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

# Рождение



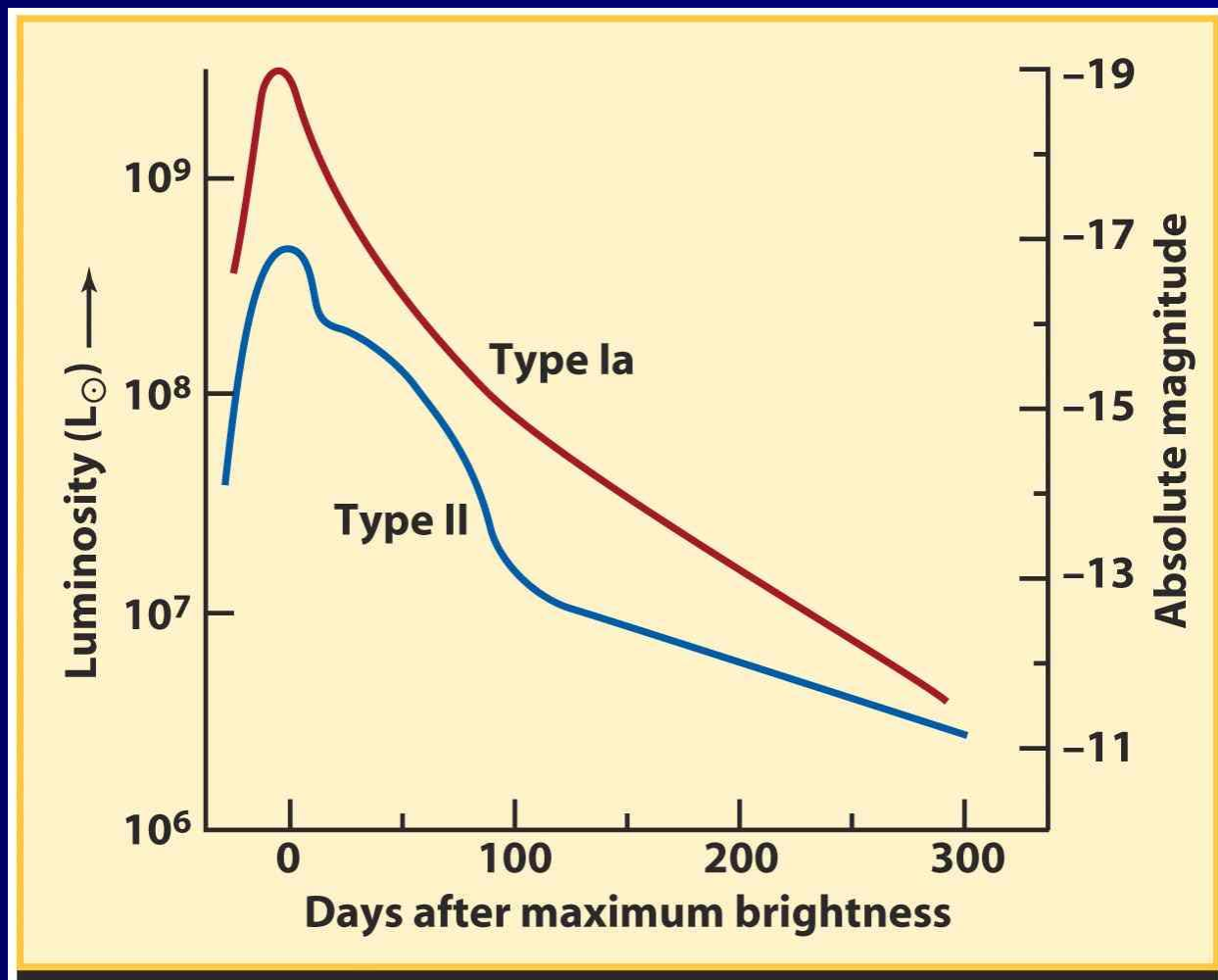
Крабовидная туманность – плерион.  
Внутри находится один из самых  
известных радиопульсаров.

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

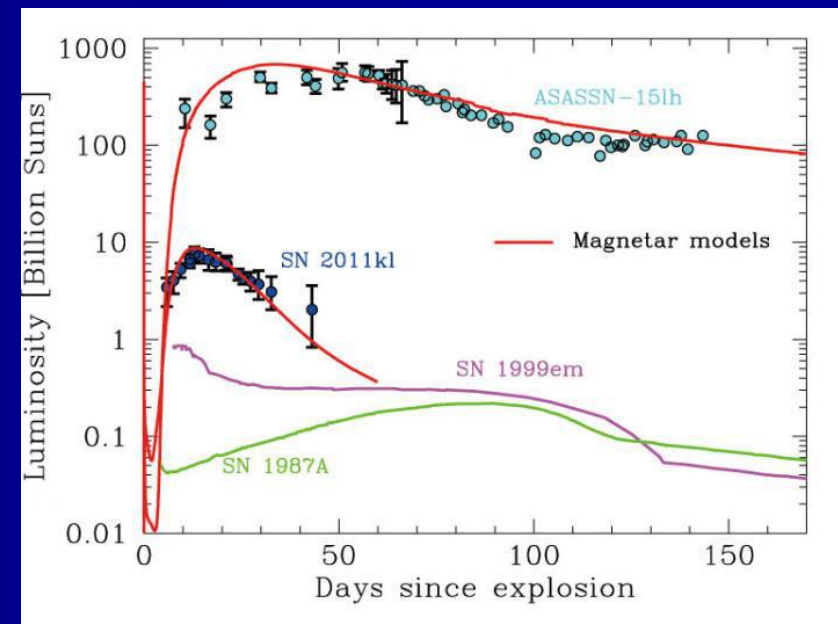
# Кривая блеска сверхновой

<http://pics-about-space.com>

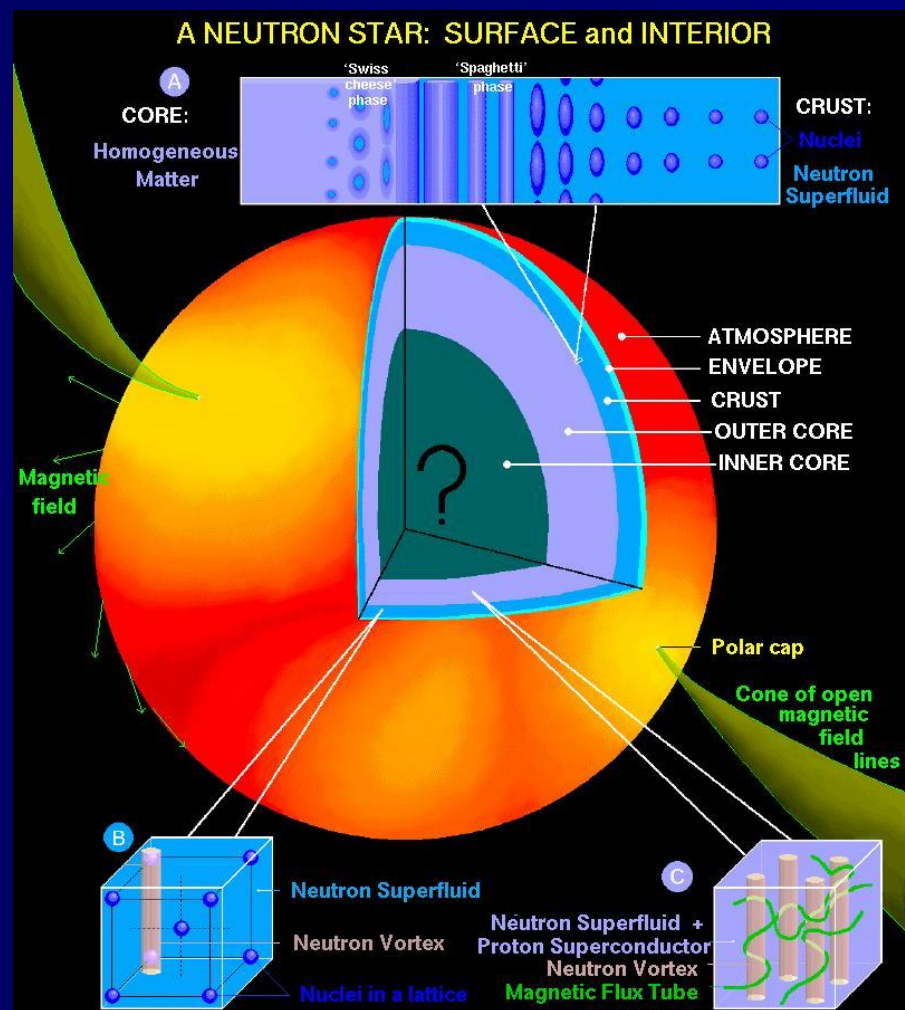


В течение сотен дней после коллапса сверхновая видна в основном за счет распада радиоактивных элементов.

На ранних стадиях также могут быть дополнительные источники энергии.



# Нейтронные звезды

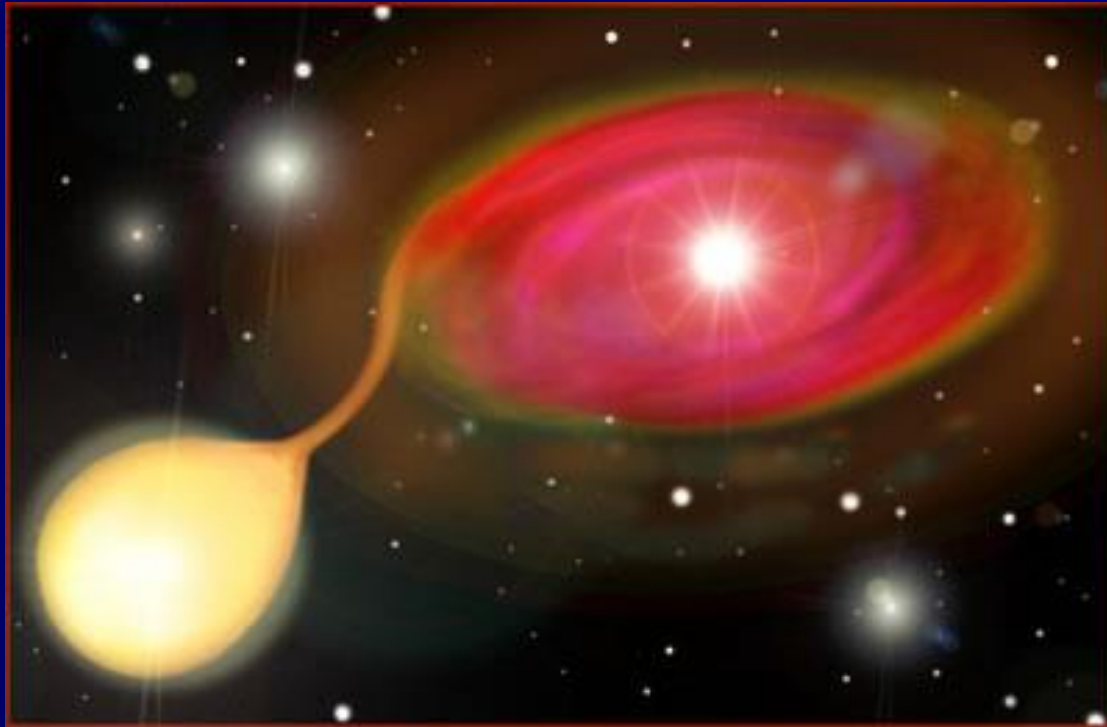


Радиус 10 км  
Масса 1-2 солнечной  
Плотность порядка ядерной  
Сильные магнитные поля

# Старый зоопарк нейтронных звезд

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

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

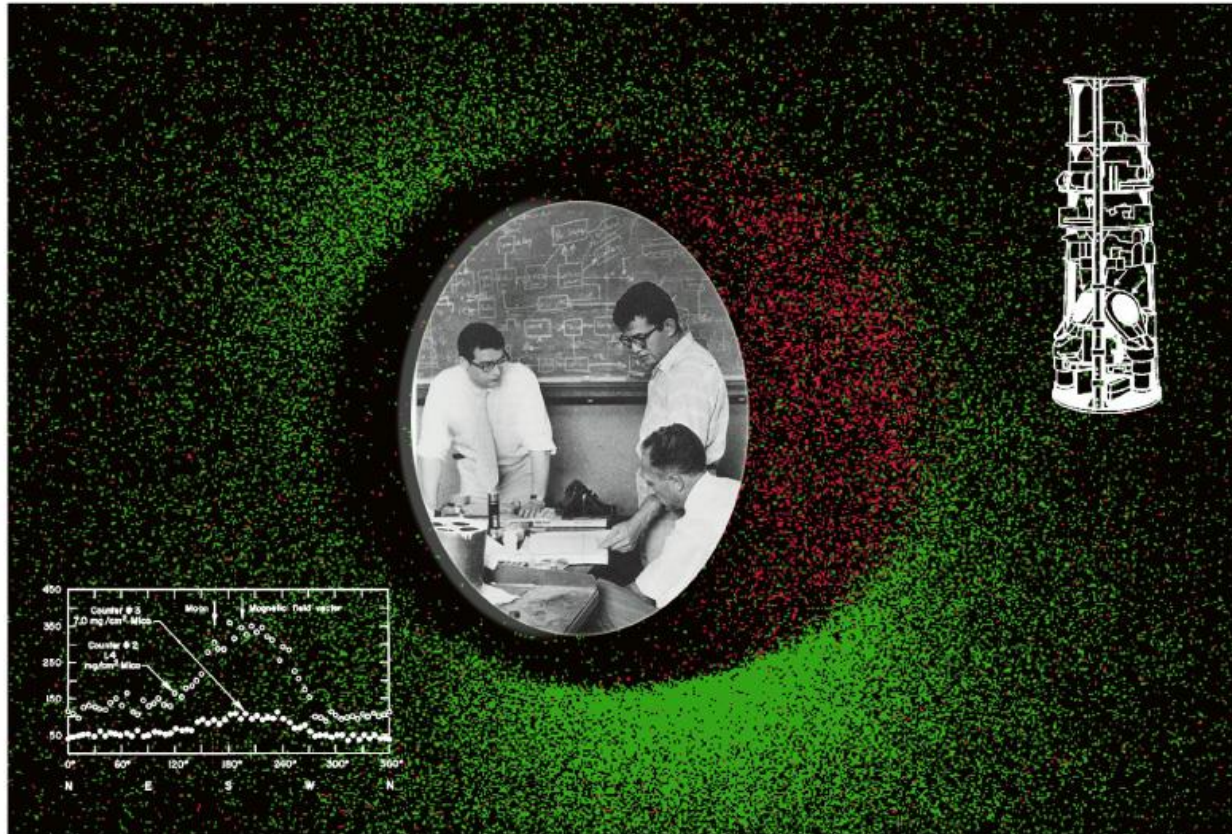


Сейчас известны сотни  
рентгеновских двойных  
с нейтронными звездами  
в нашей и других галактиках.

# Ракетные эксперименты Sco X-1

ROSAT Januar 2003

Max-Planck-Institut für  
extraterrestrische Physik

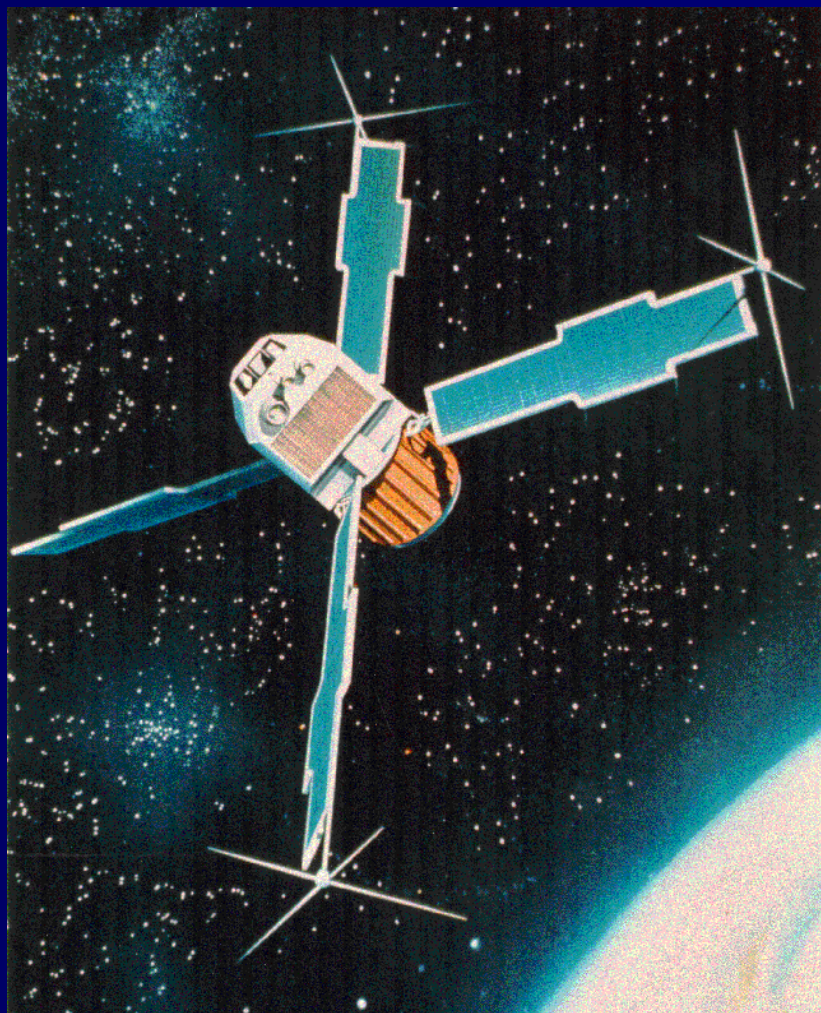


Giacconi, Gursky et al.  
1962 год

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



# UHURU

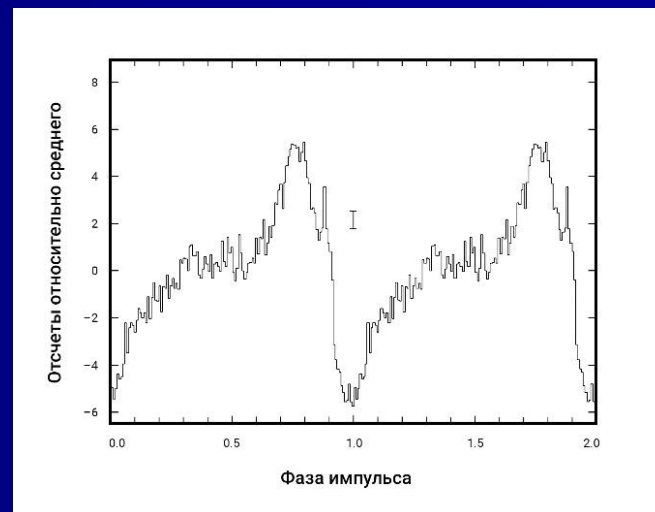


Спутник запущен 12 декабря 1970 г.  
Закончил работу в марте 1973 г.

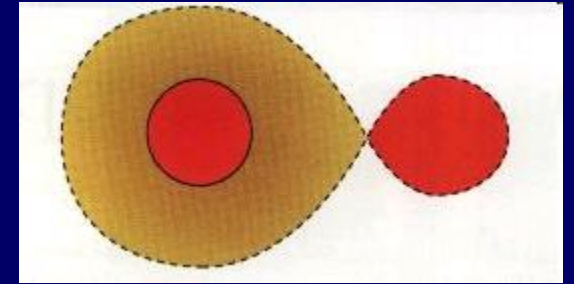
Другое название SAS-1

2-20 кэВ

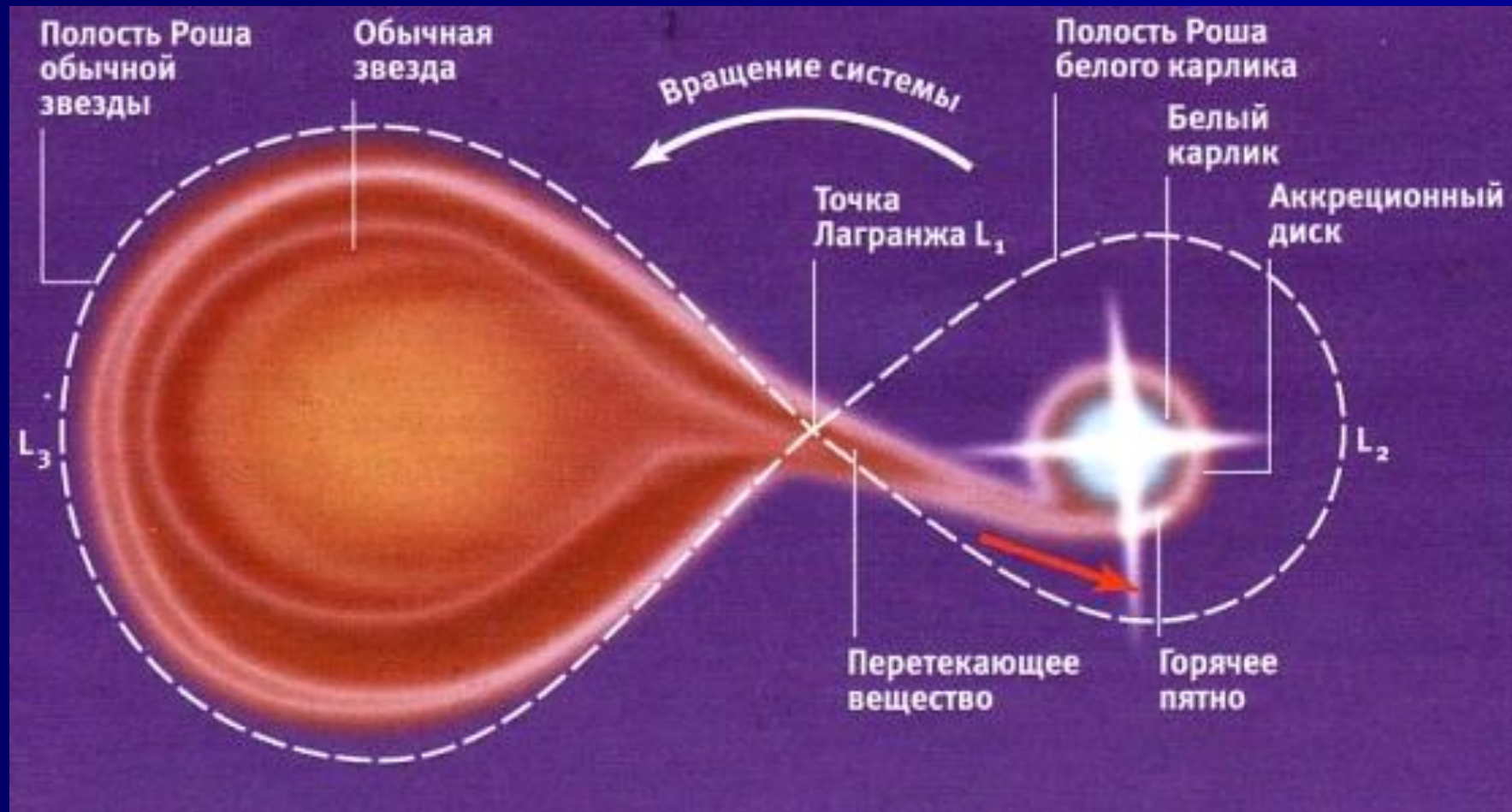
Первый полный обзор неба.  
339 источника.



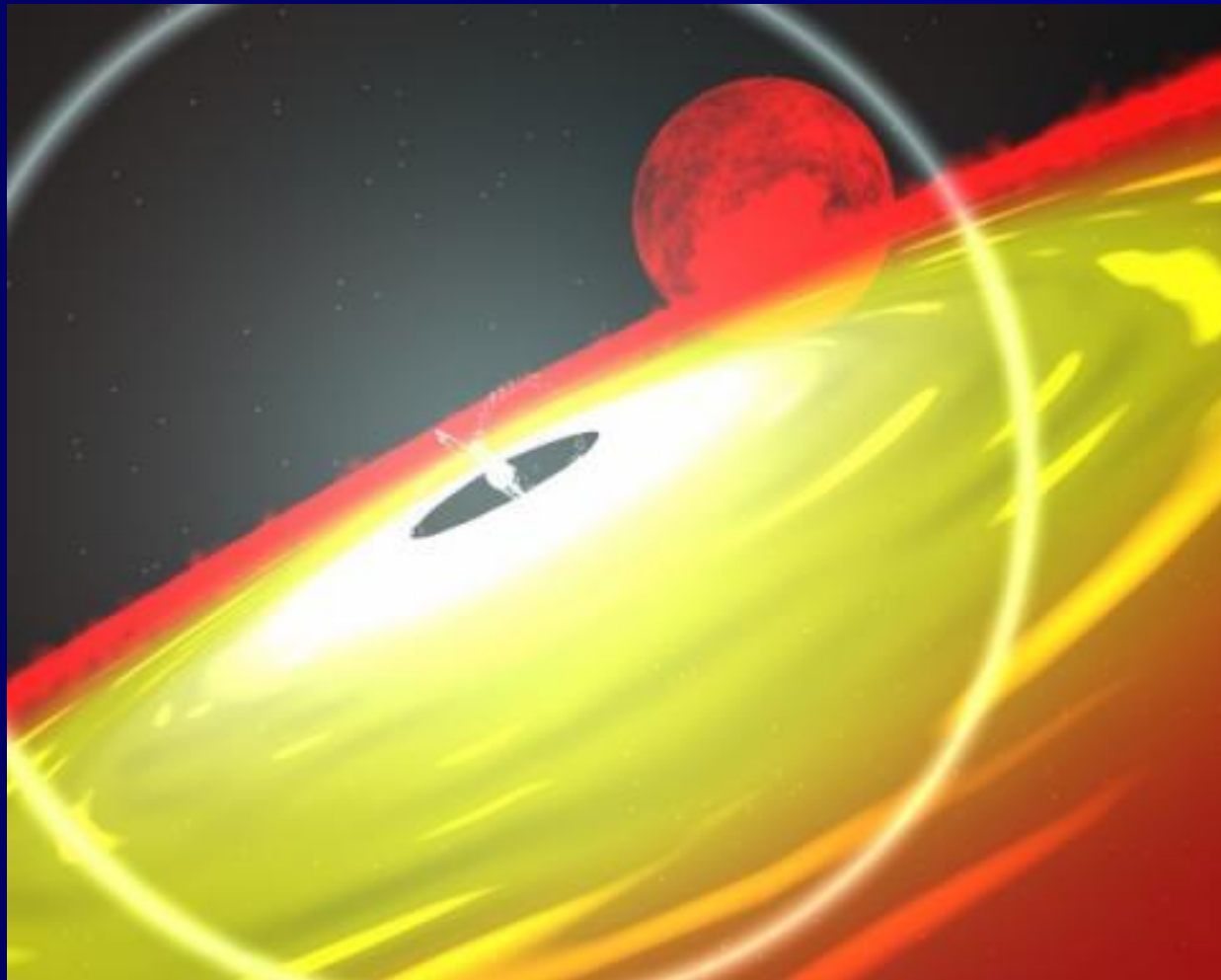
# Обмен масс в двойной



В двойной системе звезды могут обмениваться веществом.



# 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  $mc^2$

# Гамма-всплески

С конца 60-х гг. астрофизикам не давала покоя загадка космических гамма-всплесков. Теперь мы знаем, что это мощные взрывы, происходящие в далеких галактиках.

## Два типа всплесков

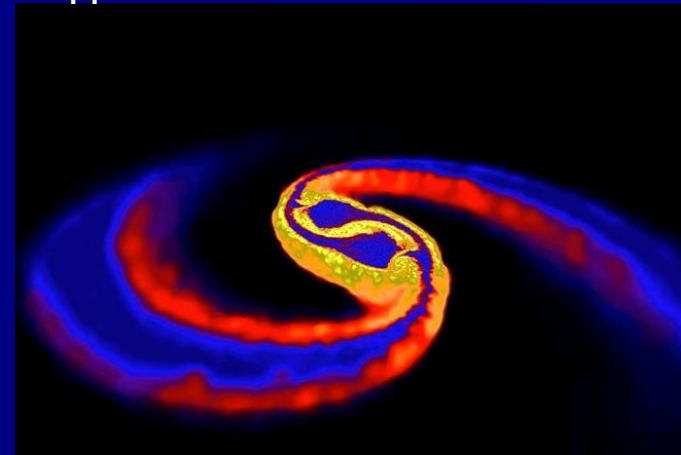
### Длинные

Образование черной дыры из быстровращающейся звезды

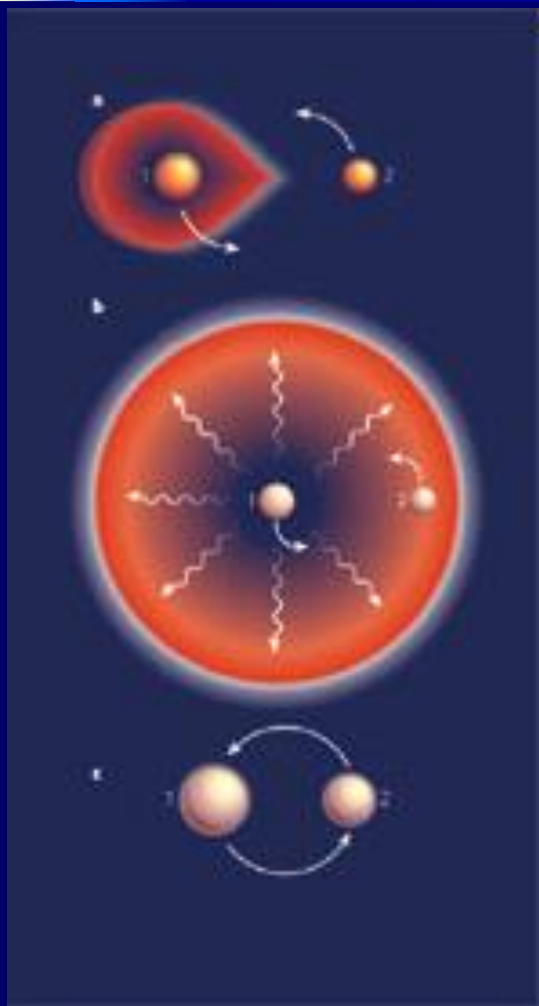


### Короткие

Слияния нейтронных звезд в двойных системах



# Гравитационные волны

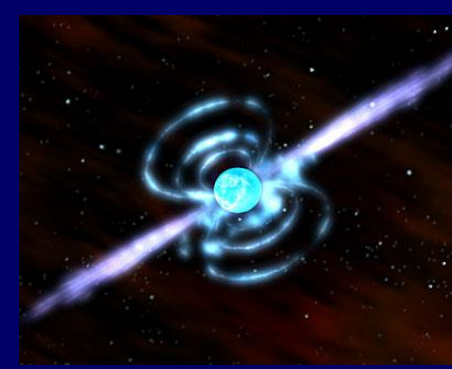


В двойной системе объекты испускают т.н. гравволны. Постепенно орбита уменьшается, и в конце концов звезды сольются. В случае нейтронных звезд или черных дыр это даст всплеск гравитационных волн.

Их удалось обнаружить в 2015г. LIGO (США) и VIRGO (Италия)

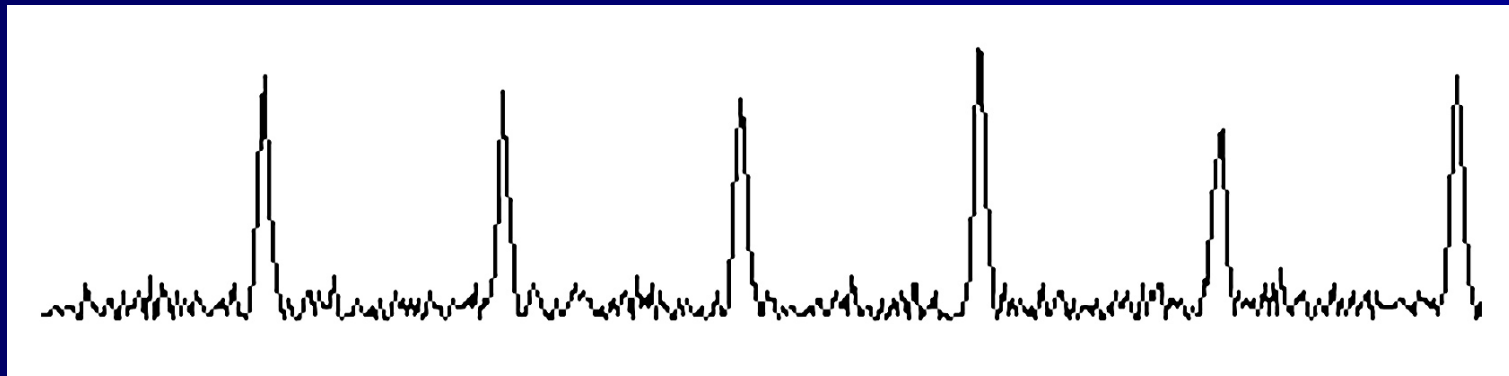


# Открытие !!!!



1967: Джоселин Белл. Радиопульсары.

Серендипическое открытие.



# Пульсар в Крабовидной туманности



# Как наблюдаем

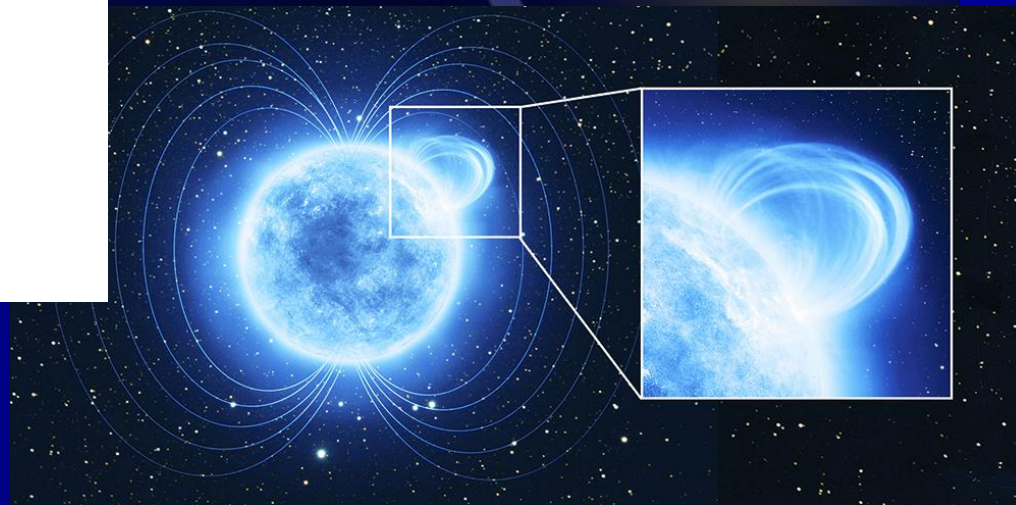
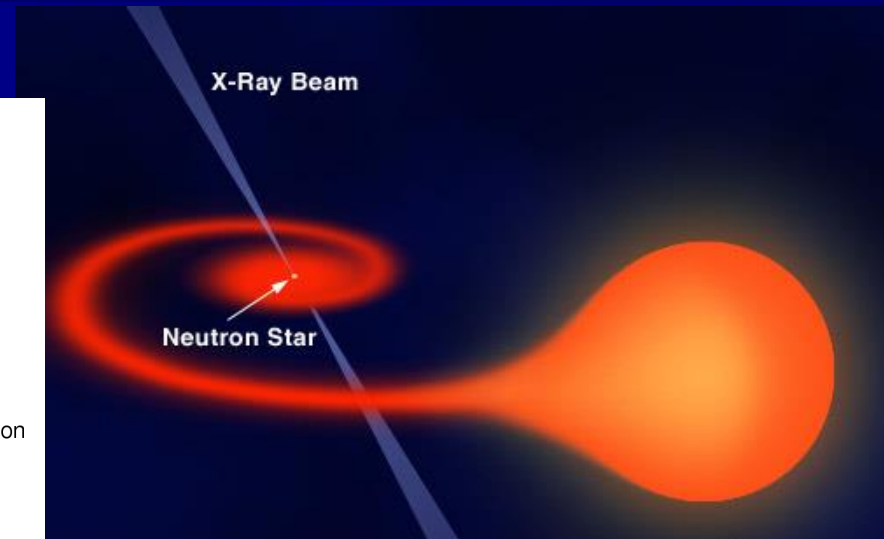
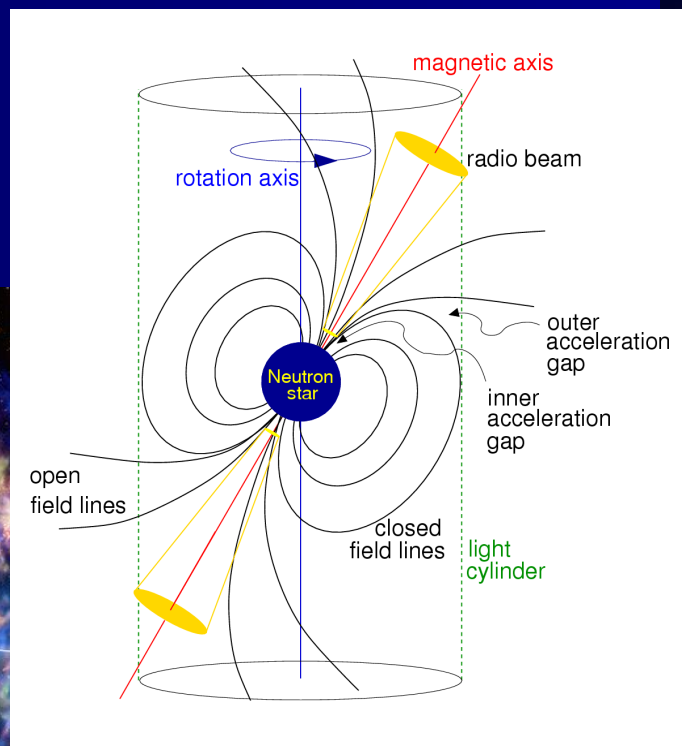
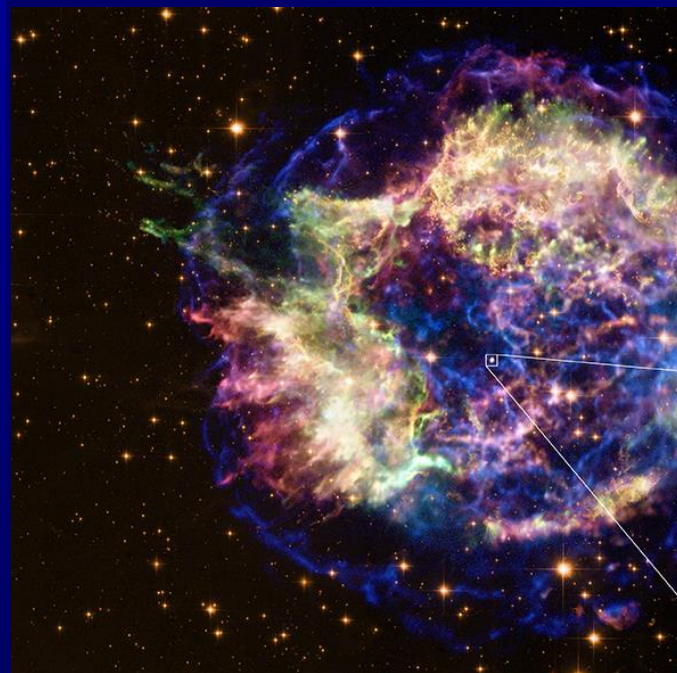
- радиопульсары
- рентгеновские источники в двойных системах
  - рентгеновские пульсары
  - барстеры
  - другие типы ...
- магнитары
  - аномальные рентгеновские пульсары
  - источники мягких повторяющихся гамма-всплесков
- одиночные остывающие нейтронные звезды
  - компактные источники в остатках сверхновых
  - Великолепная семерка
  - Геминга и похожие источники
- вспыхивающие радиоисточники (RRATs)
- гамма-источники





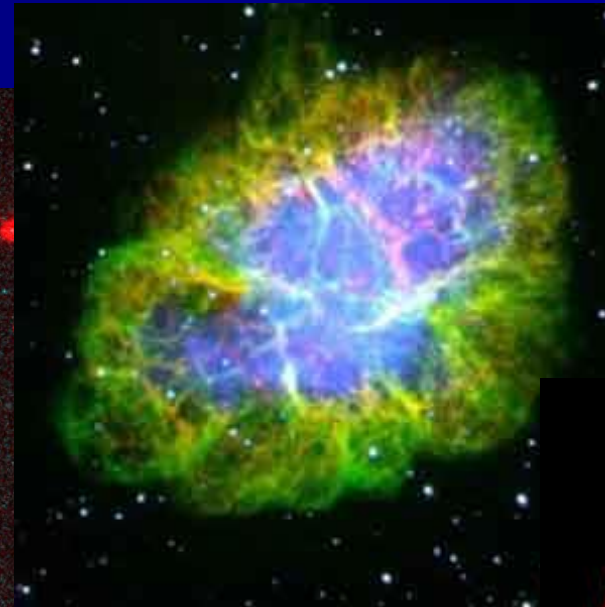
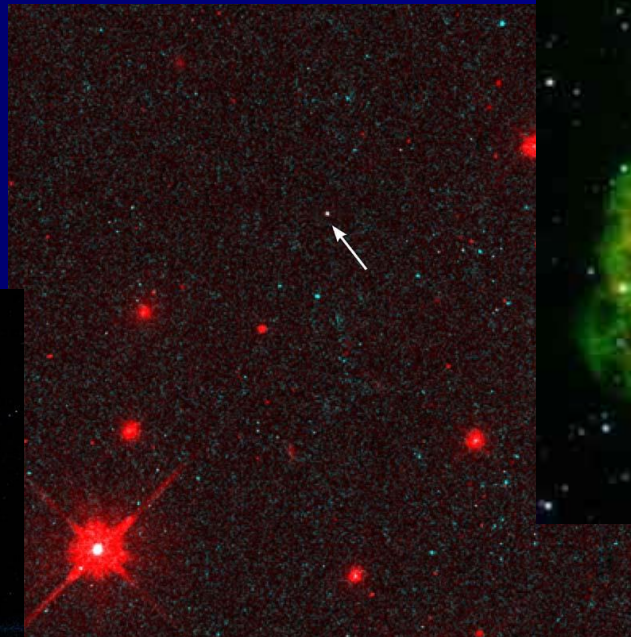
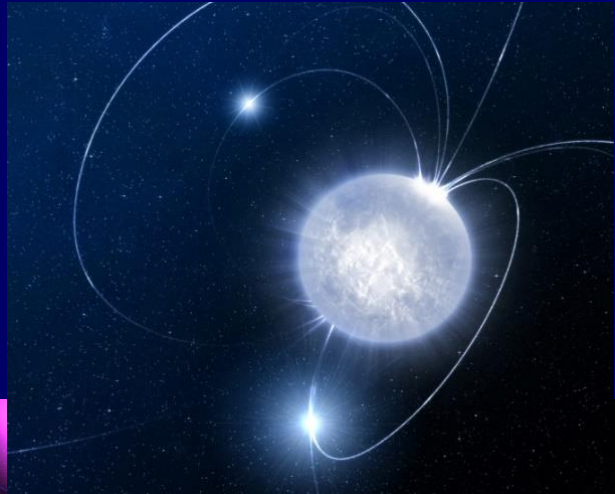
# Источник энергии нейтронных звезд

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

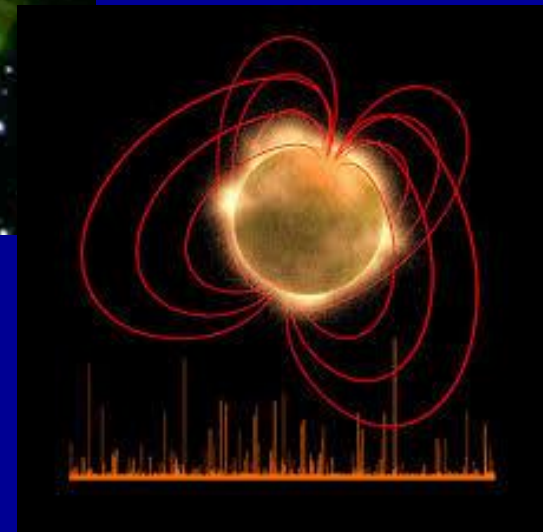
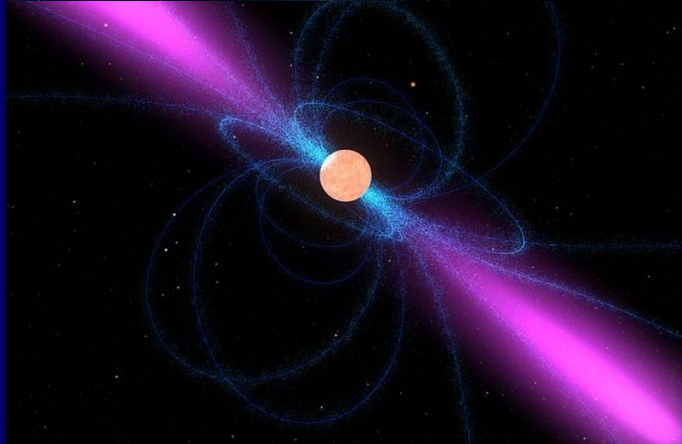


# Великое объединение нейтронных звезд

Молодые нейтронные звезды бывают очень разными!

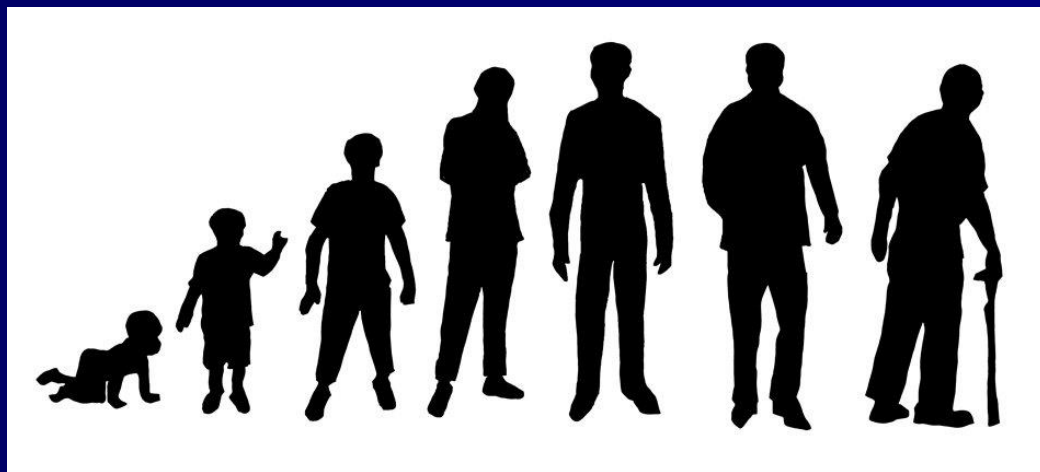


Можно ли их все  
объединить  
в рамках единой  
эволюционной  
модели?

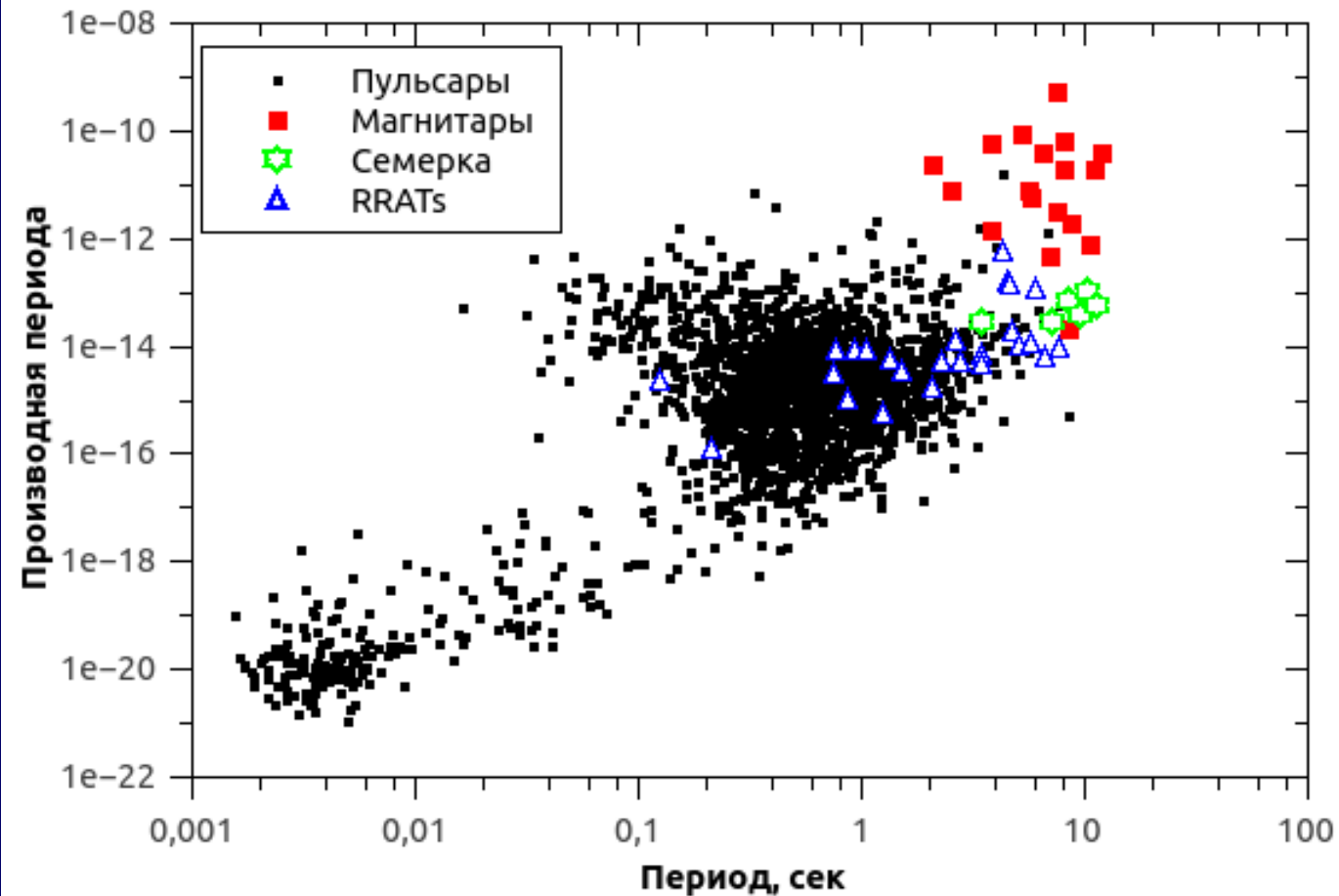


# Оценки возрастов

- По замедлению
- По остатку сверхновой
- По остыванию
- Кинематический возраст

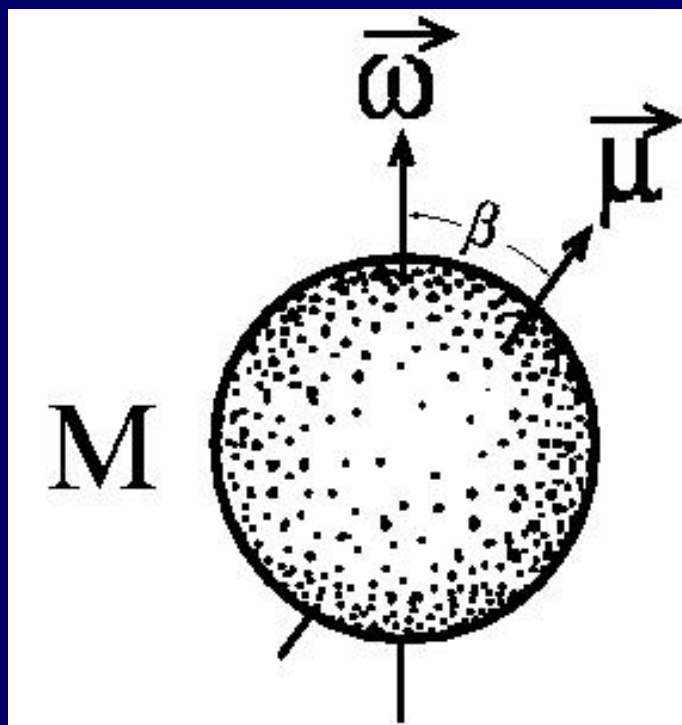


# Диаграмма период - производная периода



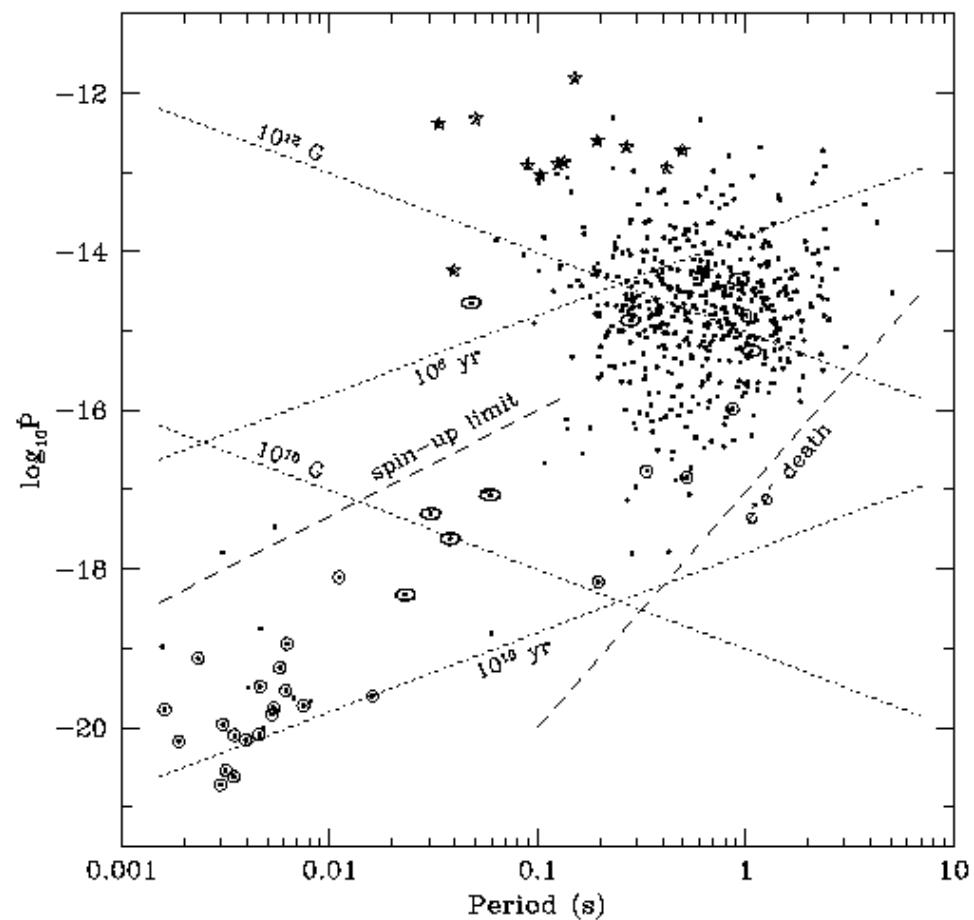
На диаграмме представлены только прямо наблюдаемые величины, которые легко и очень точно измеряются.

# Магнитный ротатор

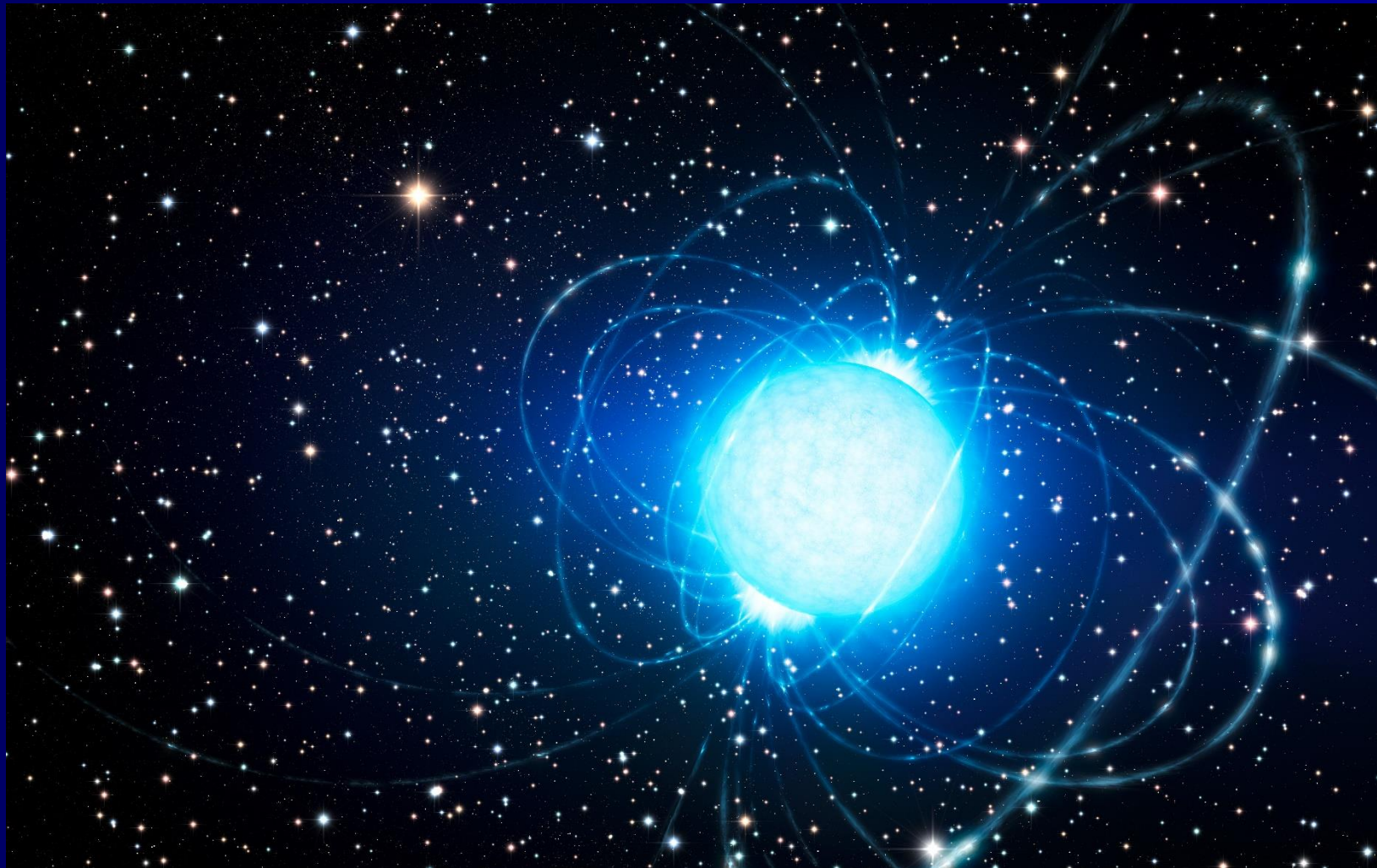


$$L_m = \frac{2}{3} \frac{\mu^2 \omega^4}{c^3} \sin^2 \beta = \kappa_t \frac{\mu^2}{R_t^3} \omega,$$

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



# Магнитное поле и вращение

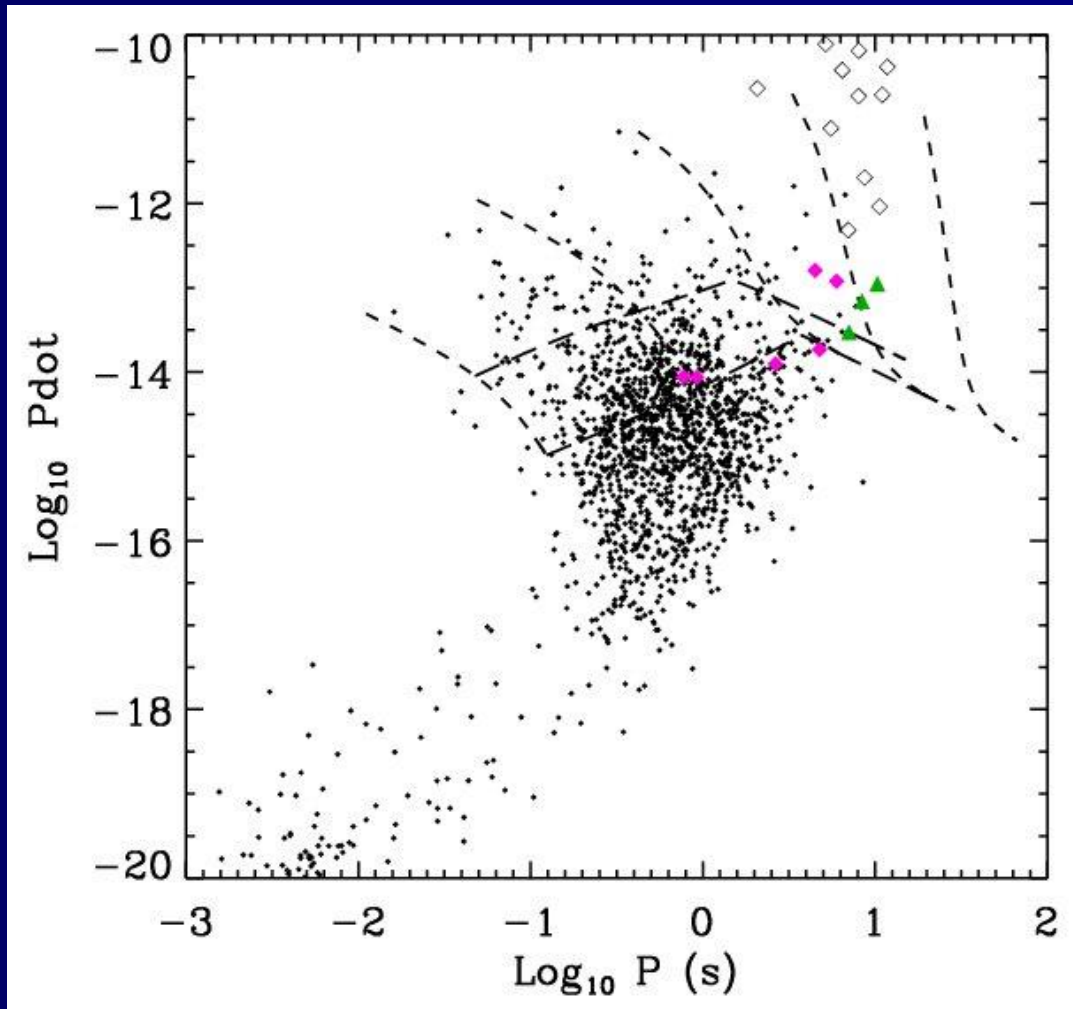


$$t_p = \frac{2\tau_c}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P} \right)^{n-1} \right]$$

Характеристический возраст.

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

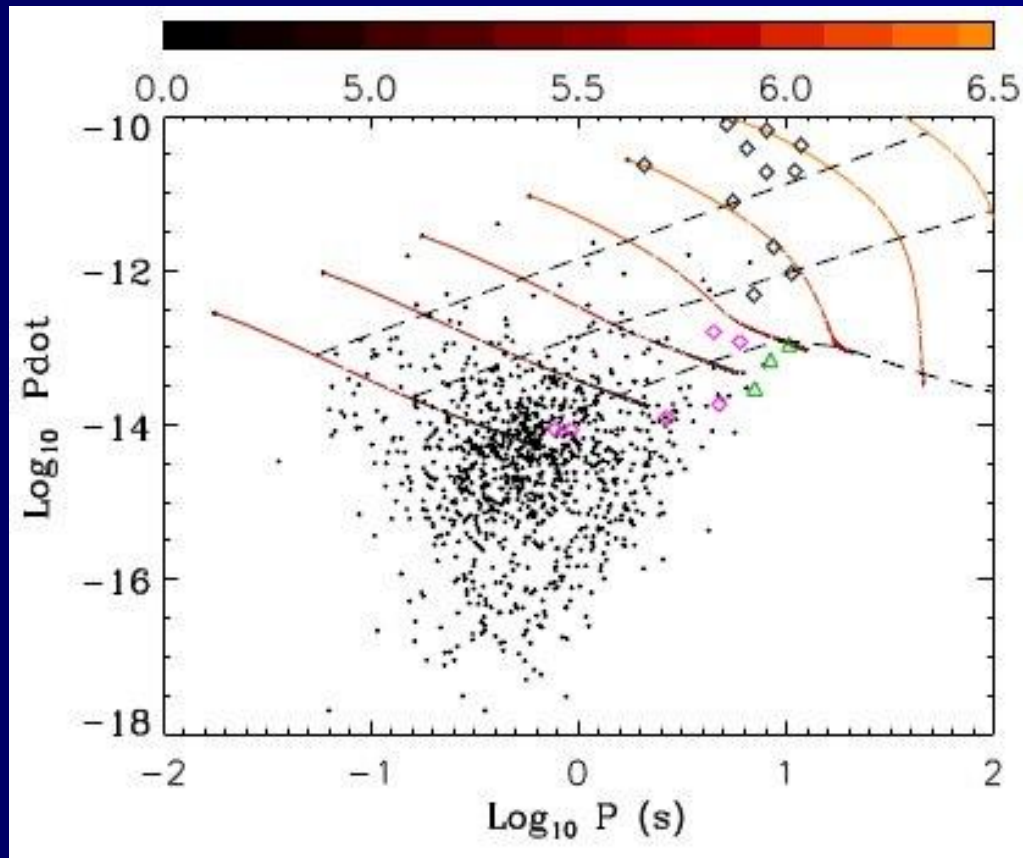
# Затухание магнитного поля



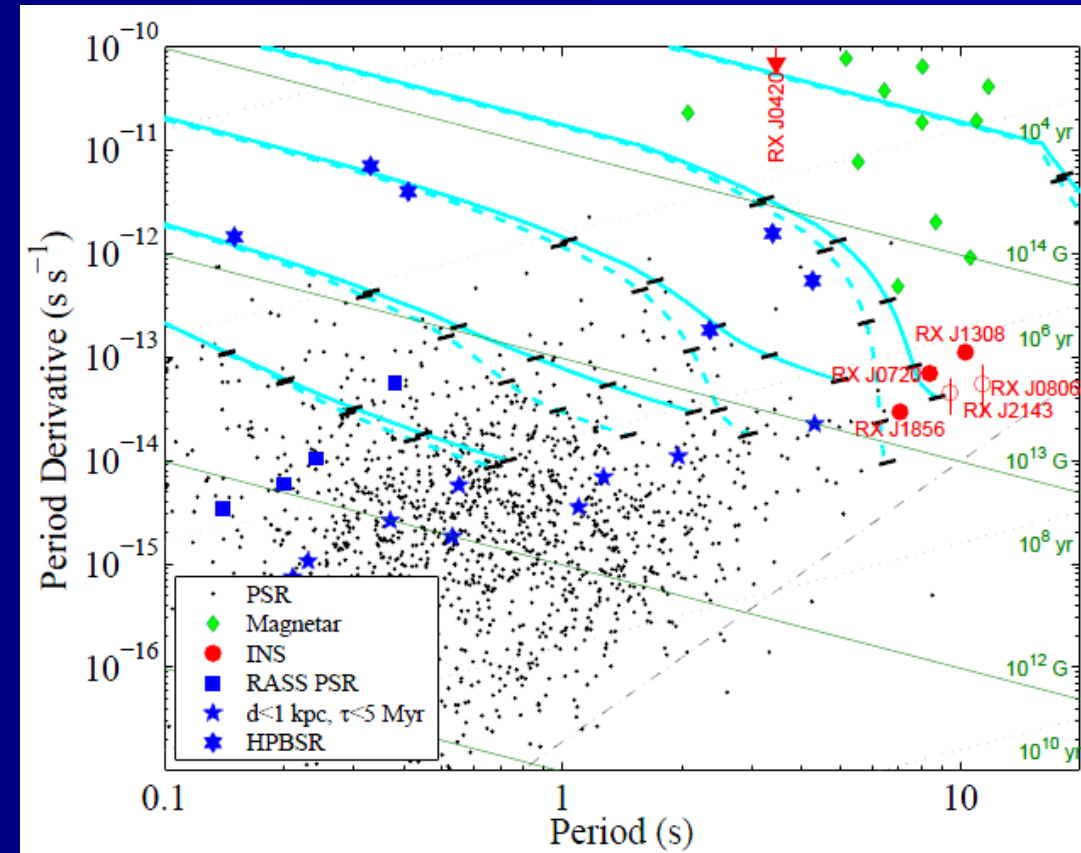
$$B = B_0 \frac{\exp(-t/\tau_{\text{Ohm}})}{1 + \frac{\tau_{\text{Ohm}}}{\tau_{\text{Hall}}}(1 - \exp(-t/\tau_{\text{Ohm}}))}$$

Можно использовать массивные рентгеновские двойные для проверки моделей эволюции магнитного поля на временах  $>1$  млн лет.

# Эволюционные треки на диаграмме период-производная периода



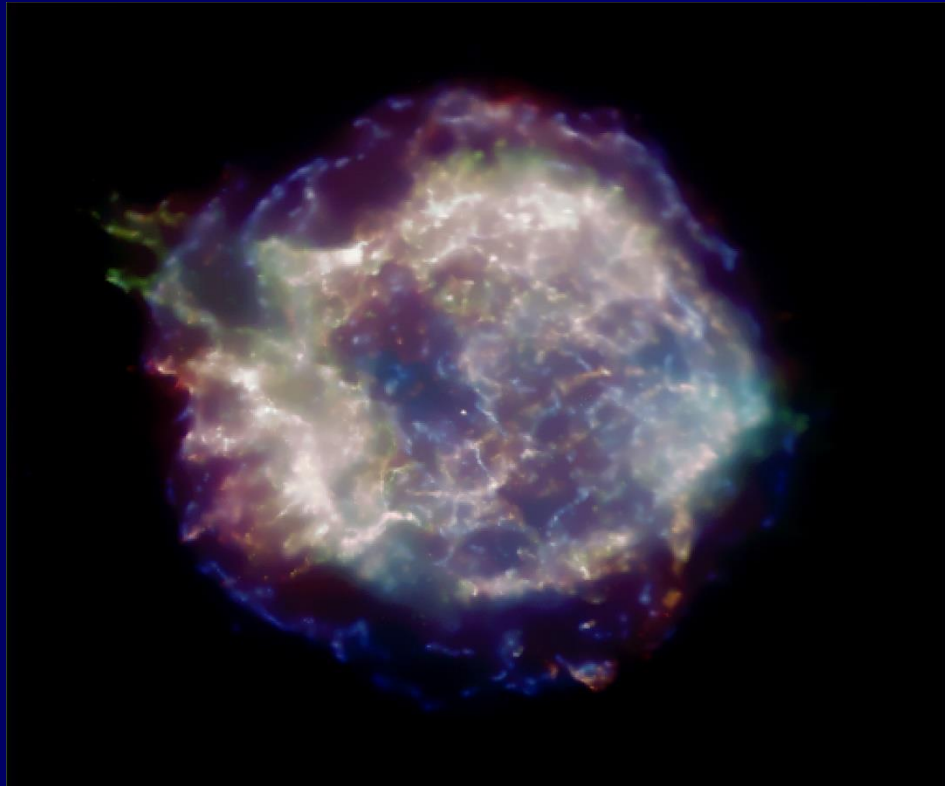
Цвет кодирует температуру поверхности  
Начало трека  $10^3$  лет, конец трека  $\sim 3 \cdot 10^6$  лет.



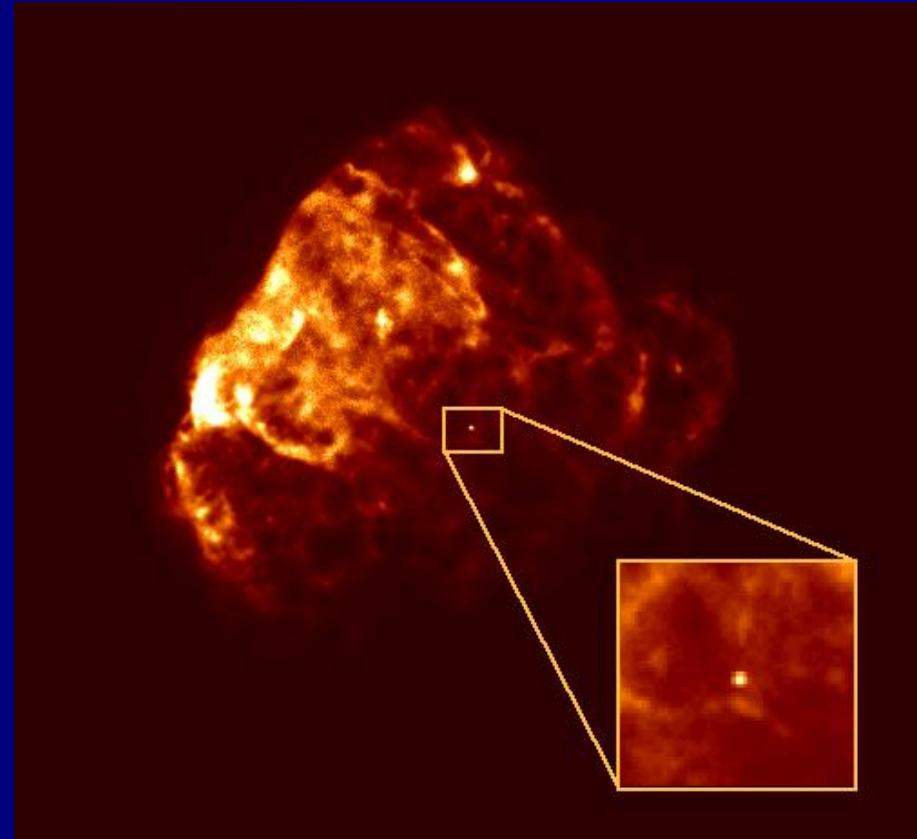
Возраст обычного пульсара можно оценить как  
«период делить на две производные».



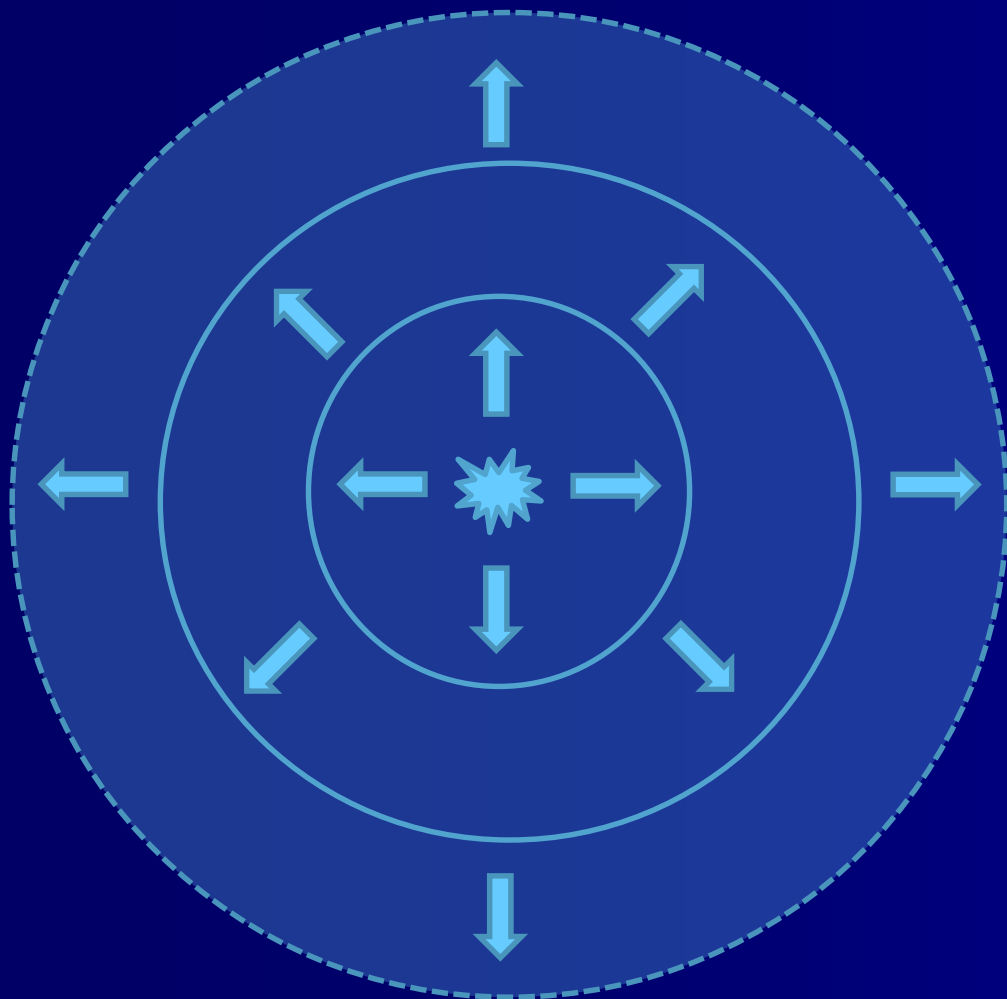
# Нейтронные звезды в остатках сверхновых



Нейтронная звезда и остаток  
родились одновременно



# Расширение остатка

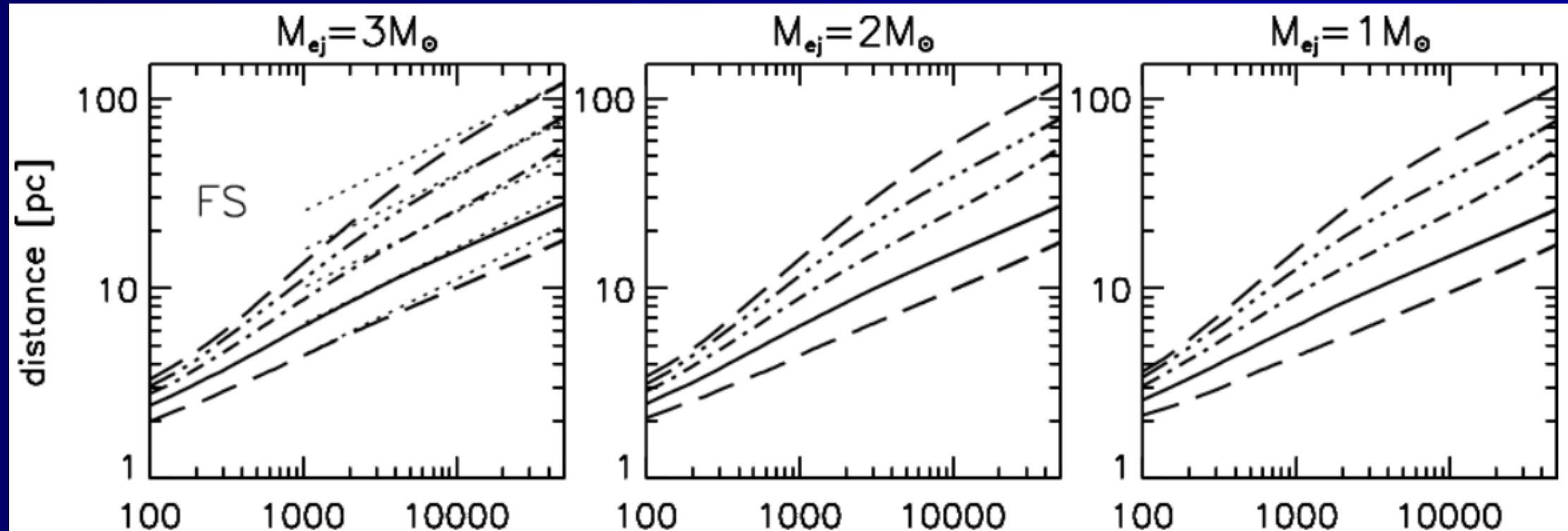


Построены модели для расширения остатков в разной среде.

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

# Численные модели

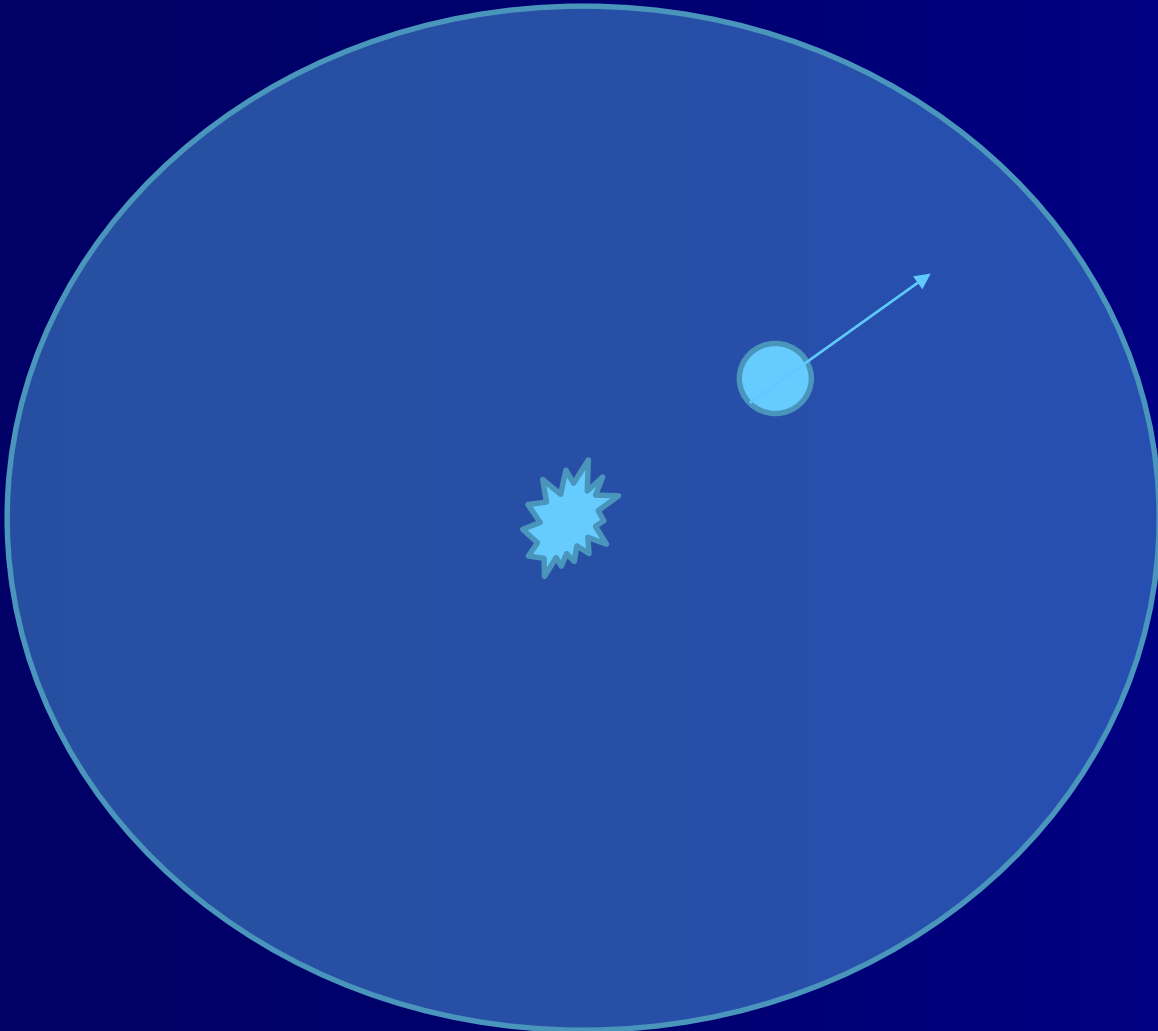
Ferreira, de Jager (2008)



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/см<sup>3</sup>).

Наблюдаемые параметры остатка позволяют оценить его возраст.

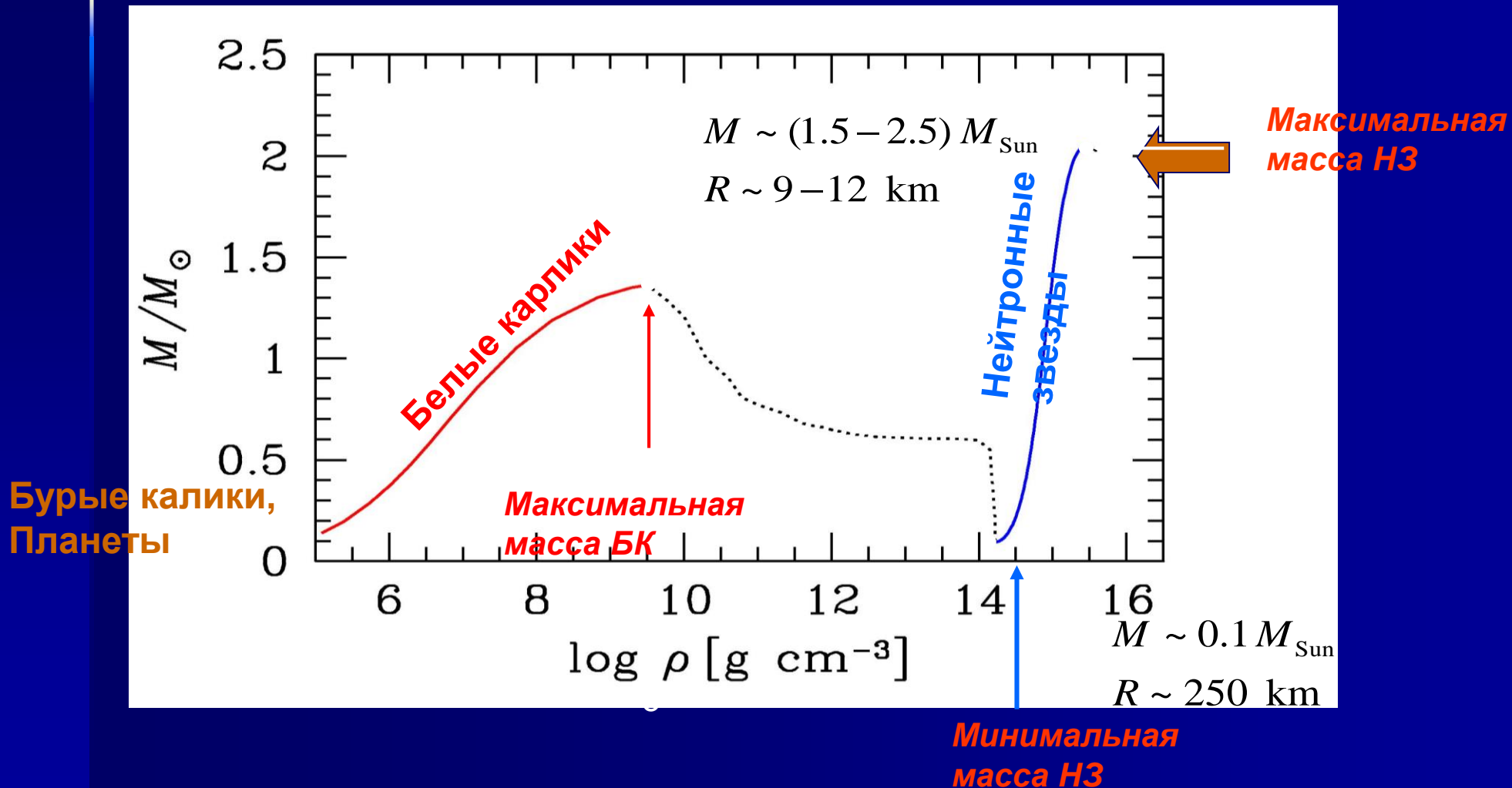
# Смещение нейтронной звезды



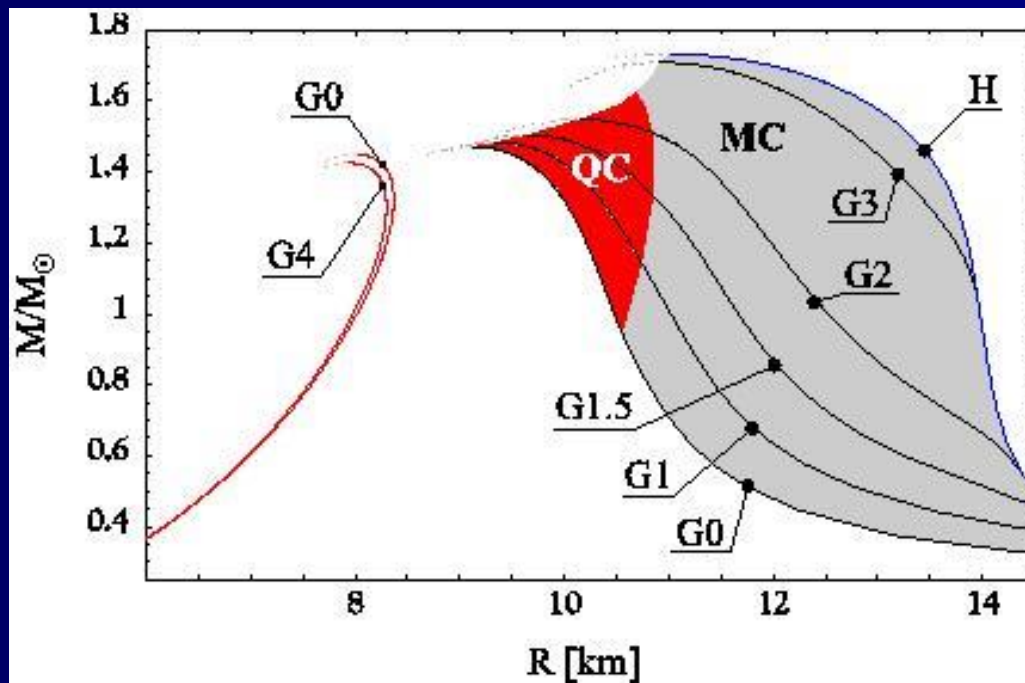
Если можно определить место взрыва,  
то можно:

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

# Массы нейтронных звезд и белых карликов



# Зависимость масса-радиус



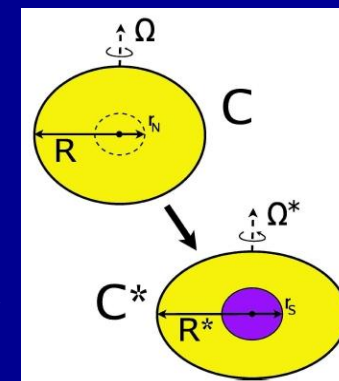
## Основные черты

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

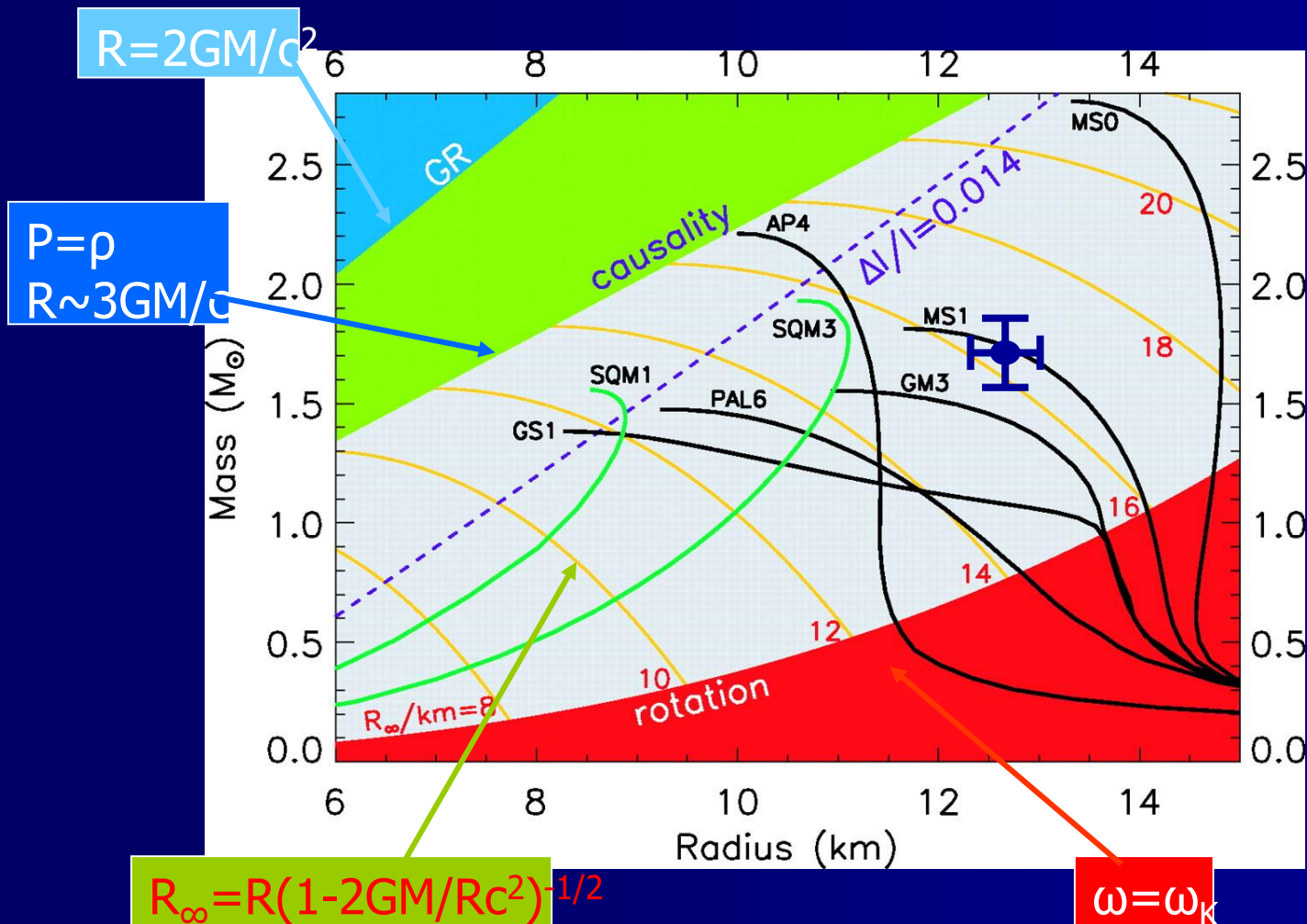
Здесь мы пренебрегли вращением  
Вращение влияет на:

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

Замедление может вести к фазовому превращению.

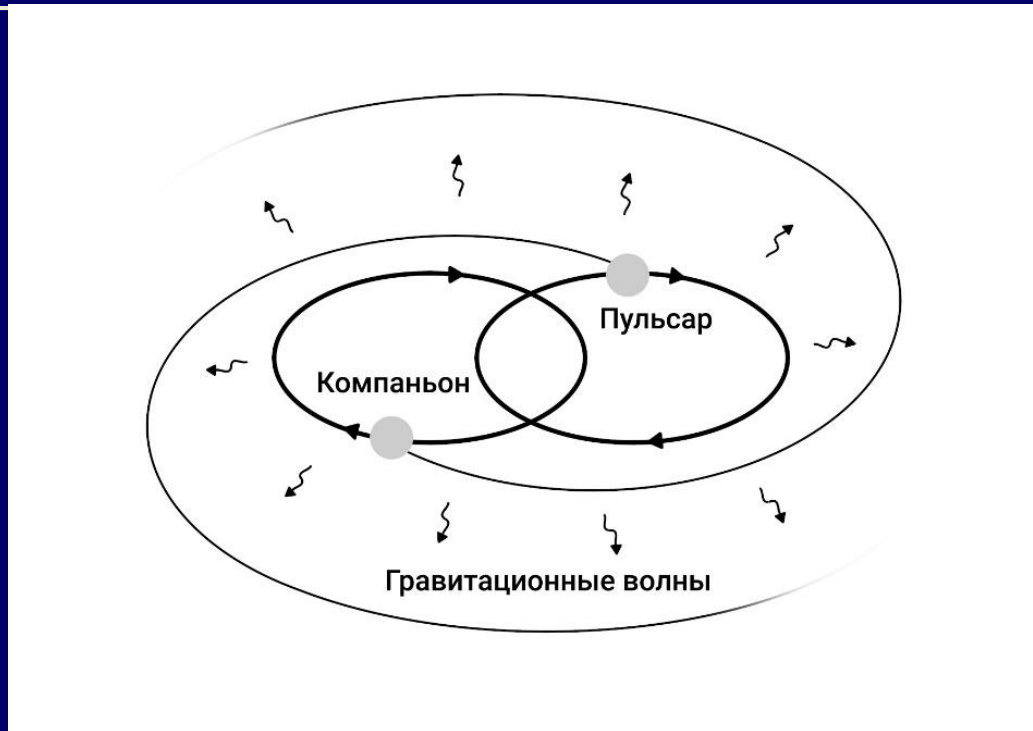


# Масса-радиус



Точные одновременные измерения массы и радиуса должны позволить выбрать одну модель внутреннего строения нейтронных звезд, ответив на вопрос о поведении вещества при сверхвысокой плотности.

# 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.

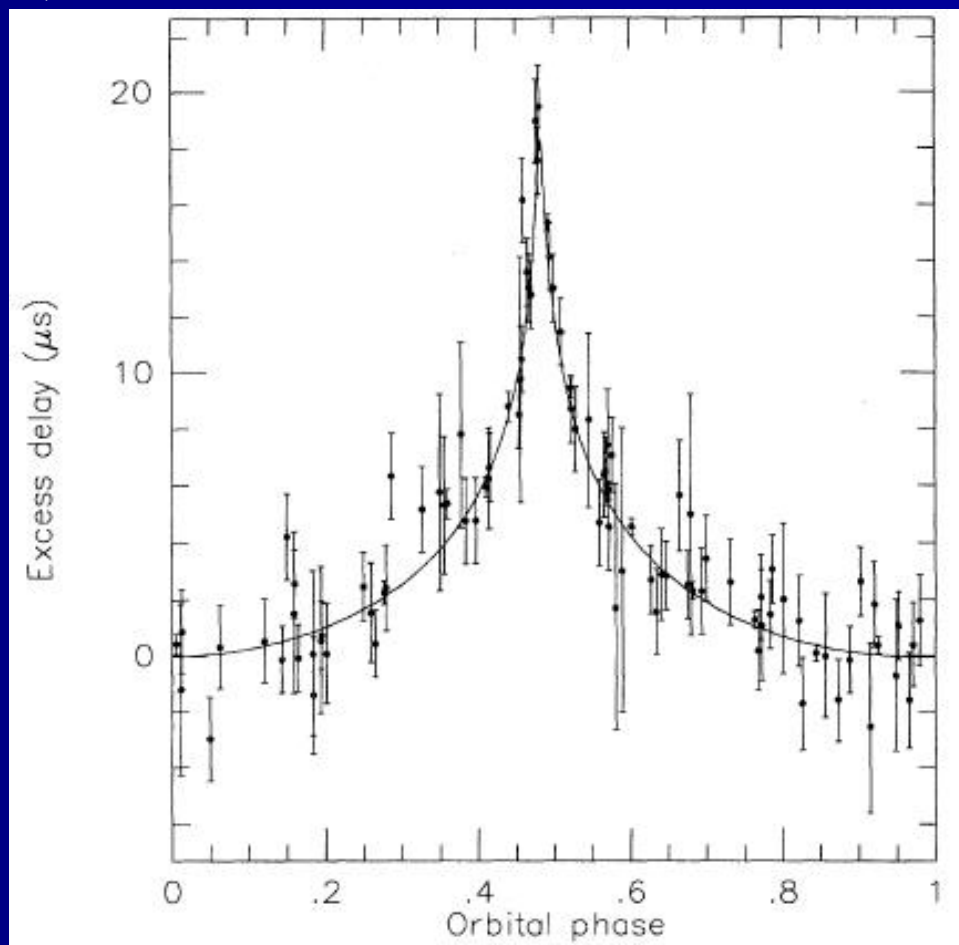
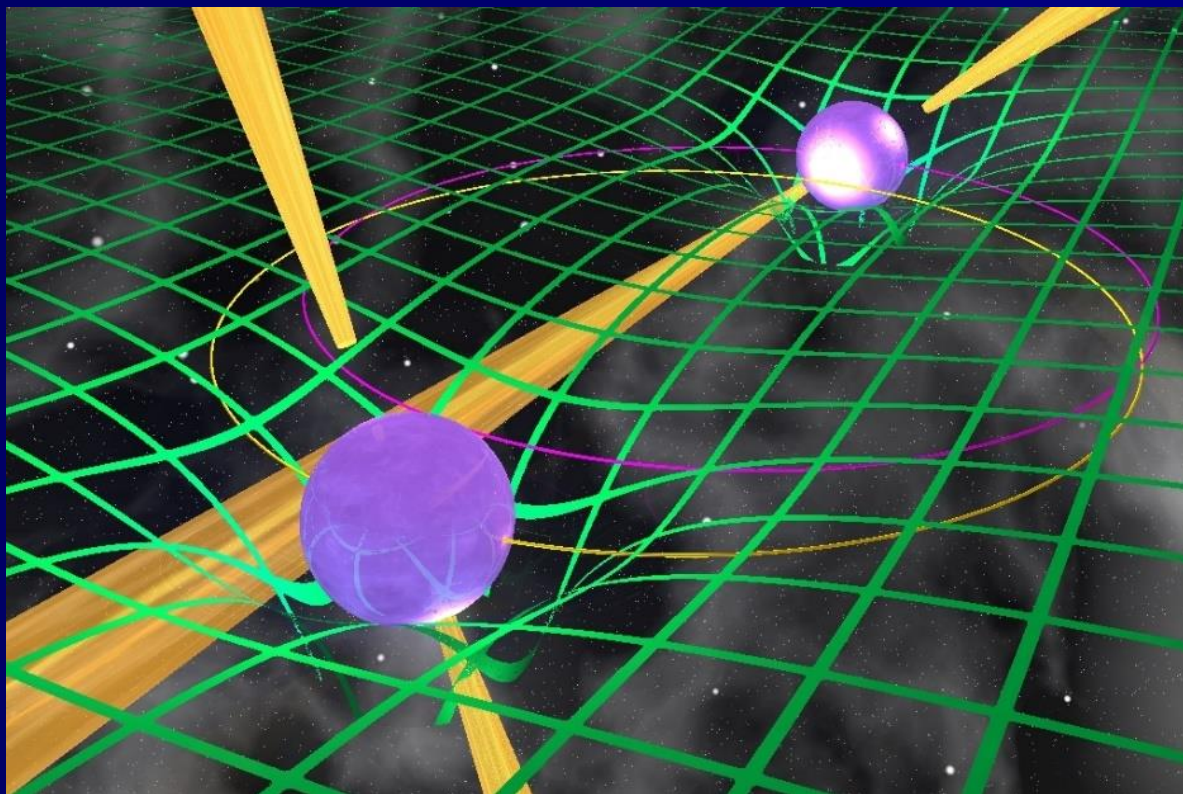
$$T = t_{\text{obs}} - t_0 + \Delta_C - D/f^2 + \Delta_{R\odot}(\alpha, \delta, \mu_{\alpha}, \mu_{\delta}, \pi) \\ + \Delta_{E\odot} - \Delta_{S\odot}(\alpha, \delta) \\ - \Delta_R(x, e, P_b, T_0, \omega, \dot{\omega}, \dot{P}_b) - \Delta_E(\gamma) - \Delta_S(r, s)$$



# Задержка Шапиро

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

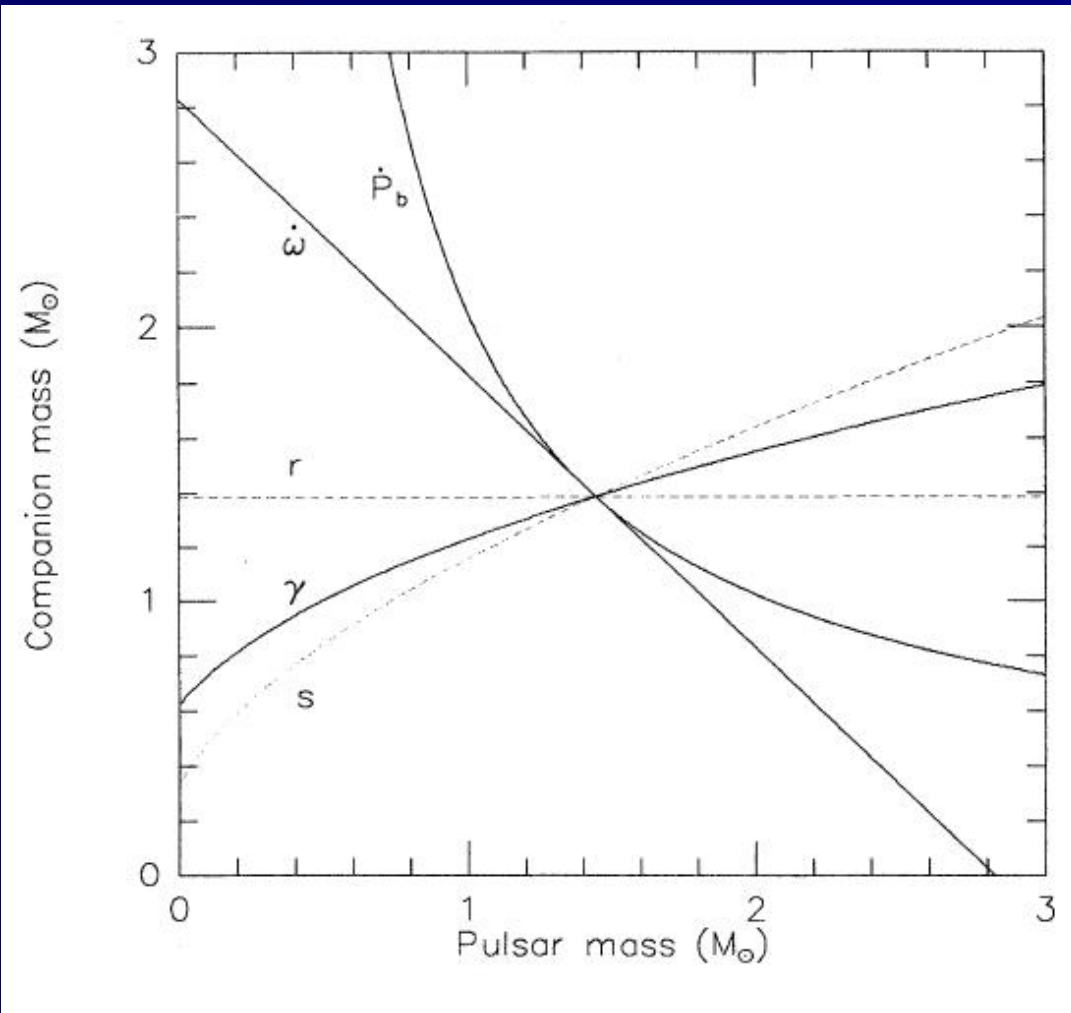
Электромагнитным волнам требуется больше времени, чтобы достичь наблюдателя, если пространство искривлено.



# Измерения массы

PSR 1913+16

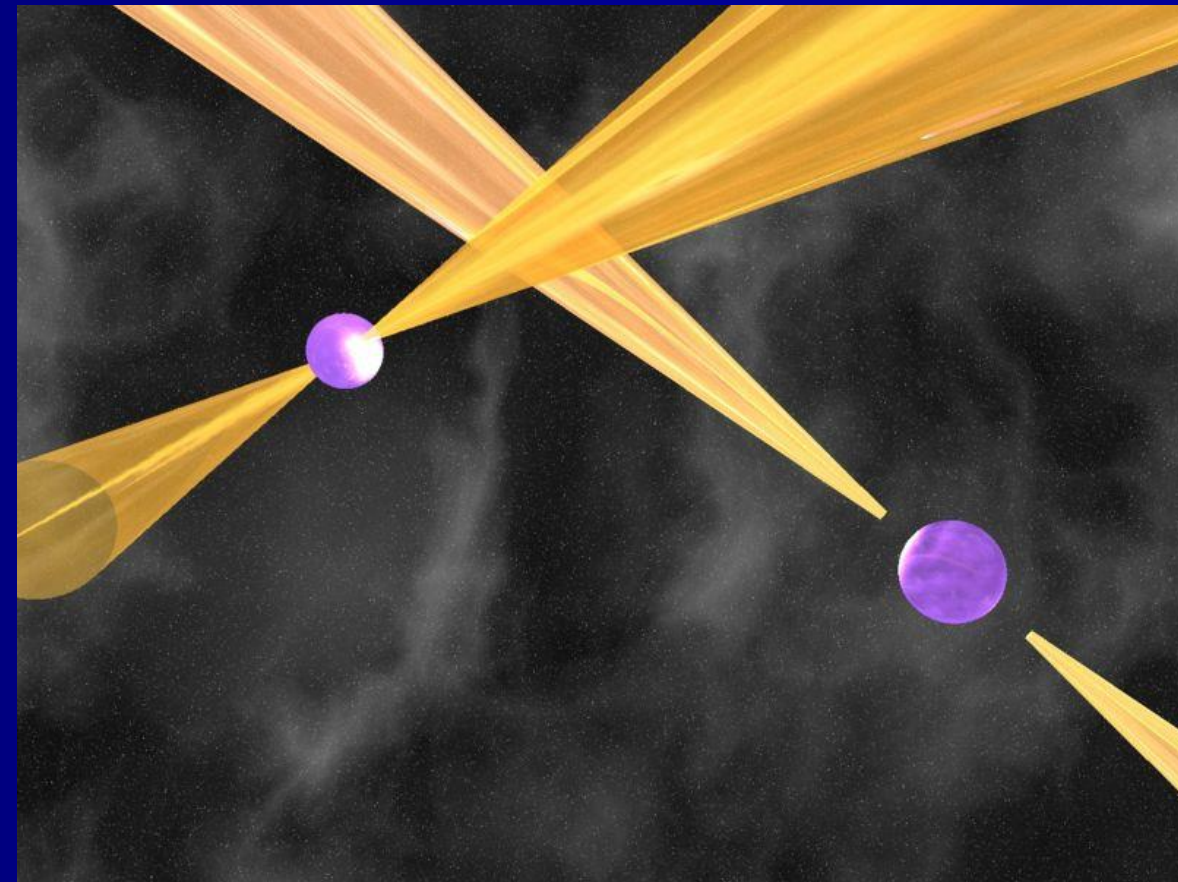
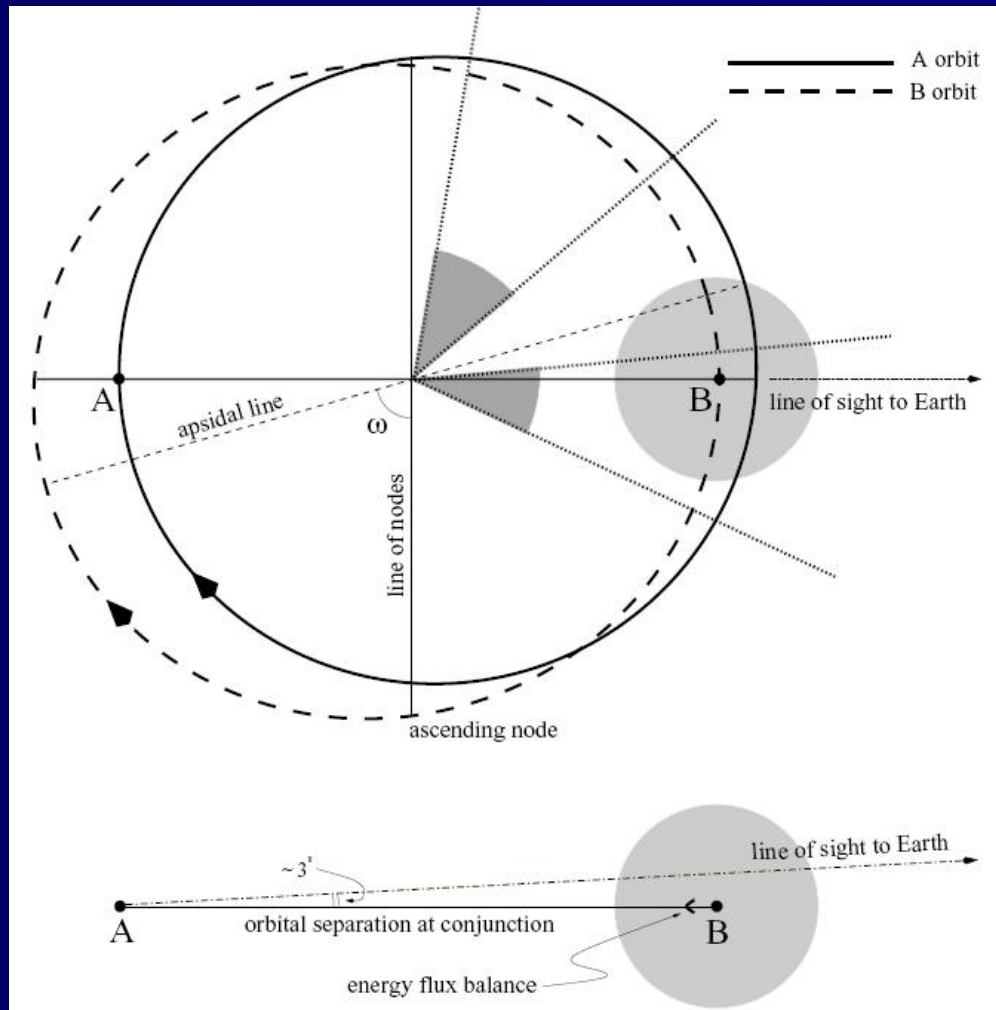
(Taylor)



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

# Двойной PSR J0737-3039

(Lyne et al. astro-ph/0401086)

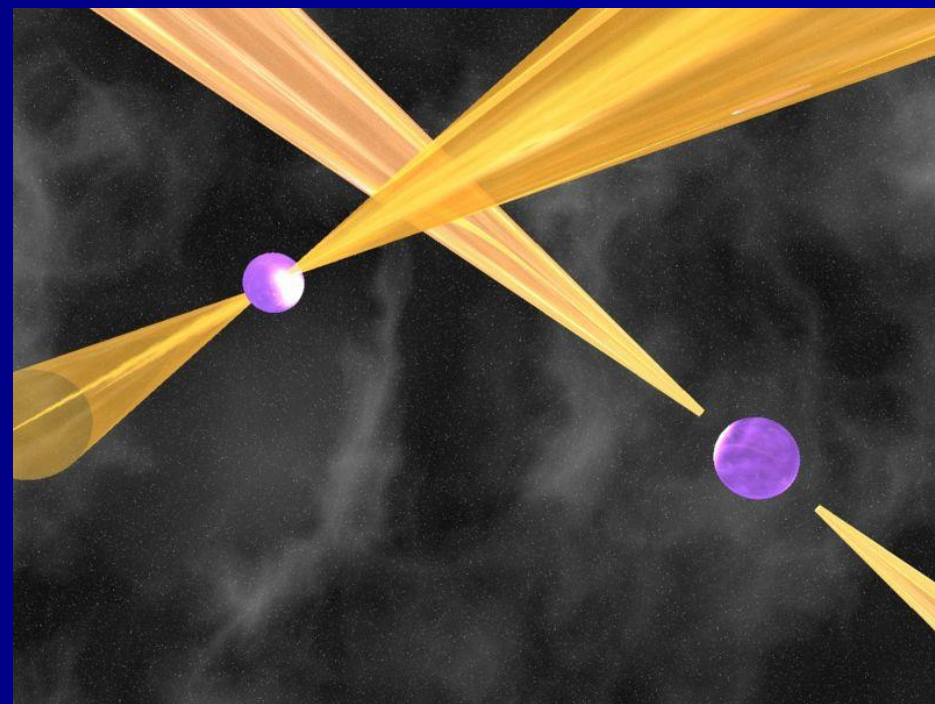
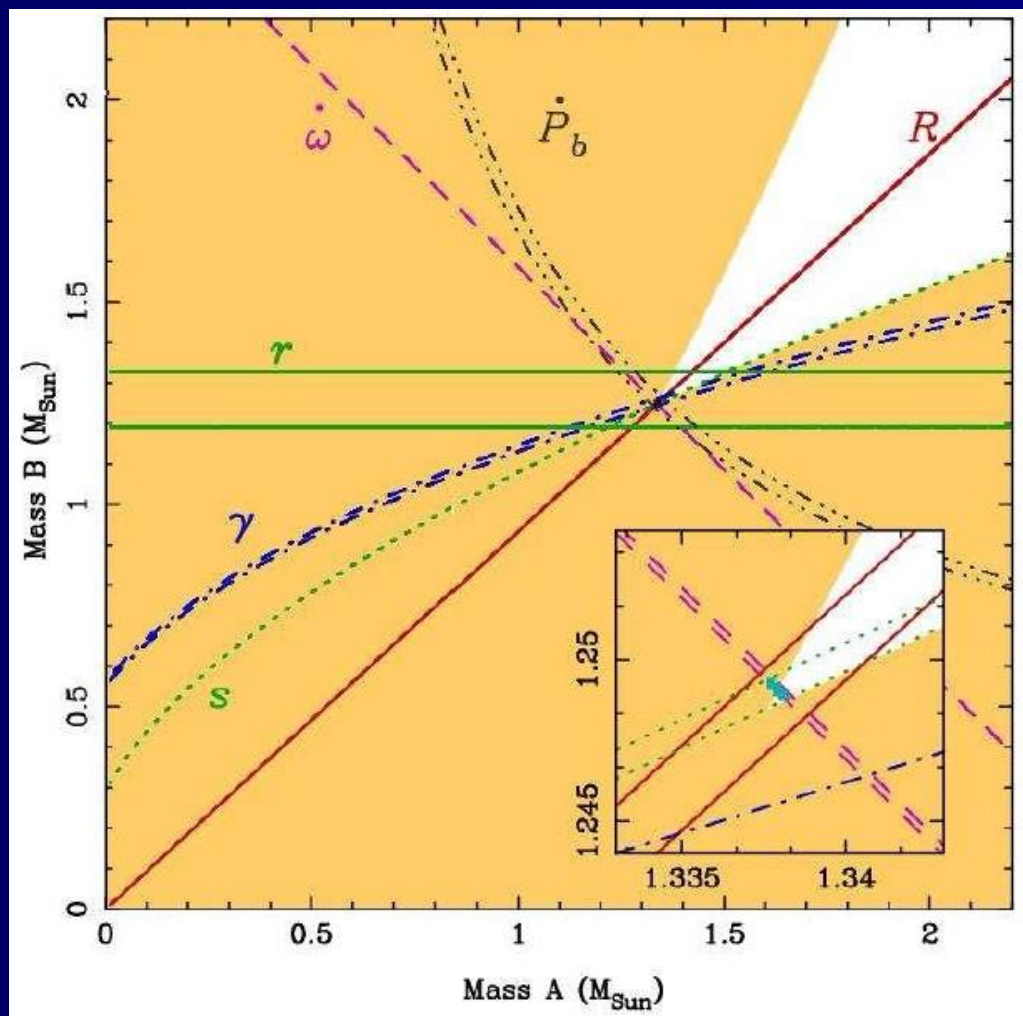


Уникальная система,  
открытая в 2003 г.

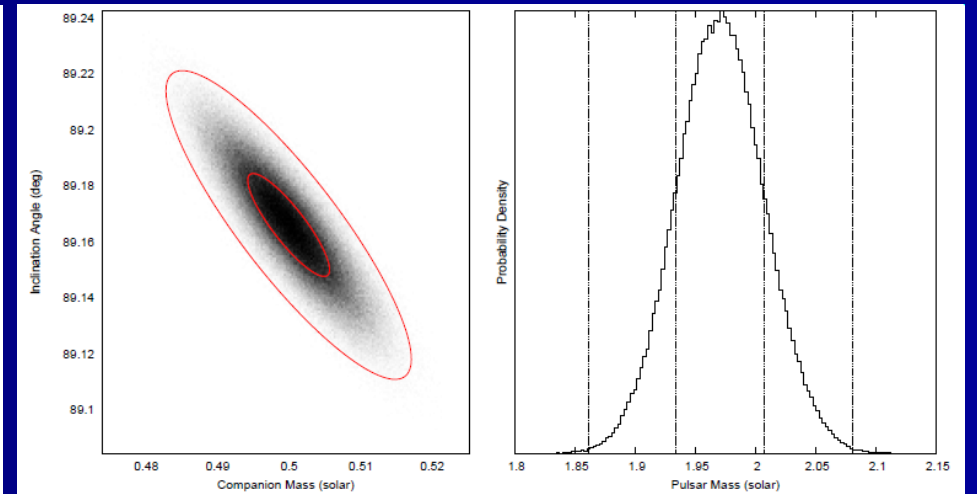
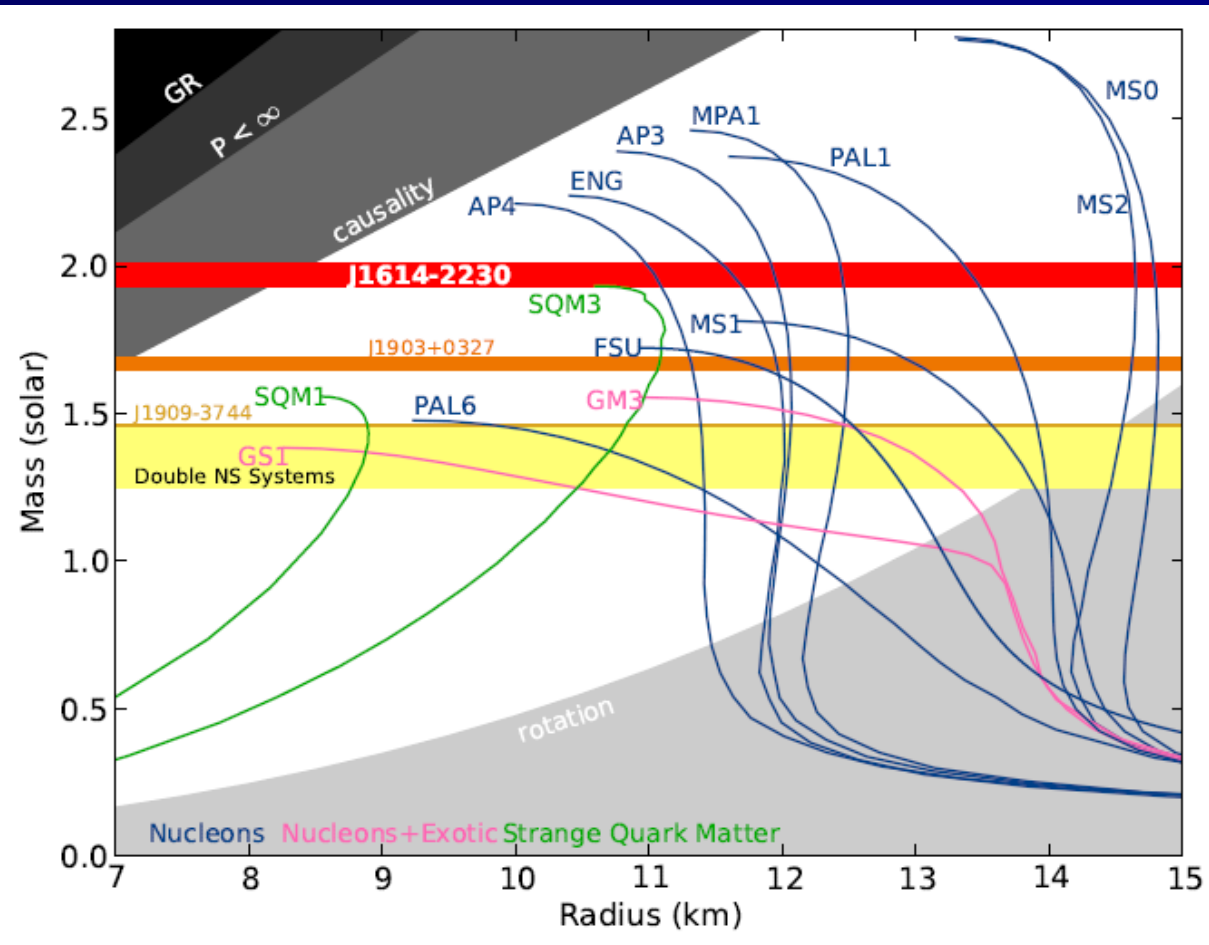
# Масса PSR J0737-3039

Наиболее точные значения.

Это очень тесная система, где наблюдается два радиопульсара.



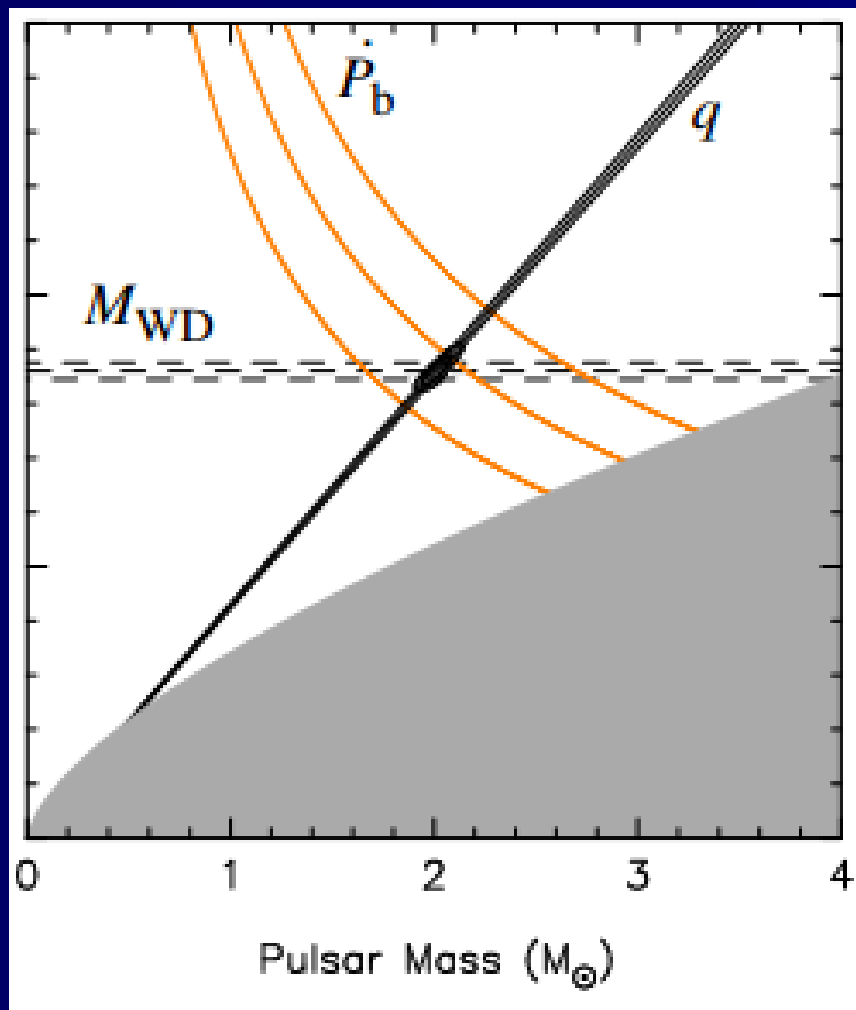
# Почему важно искать массивные нейтронные звезды?



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



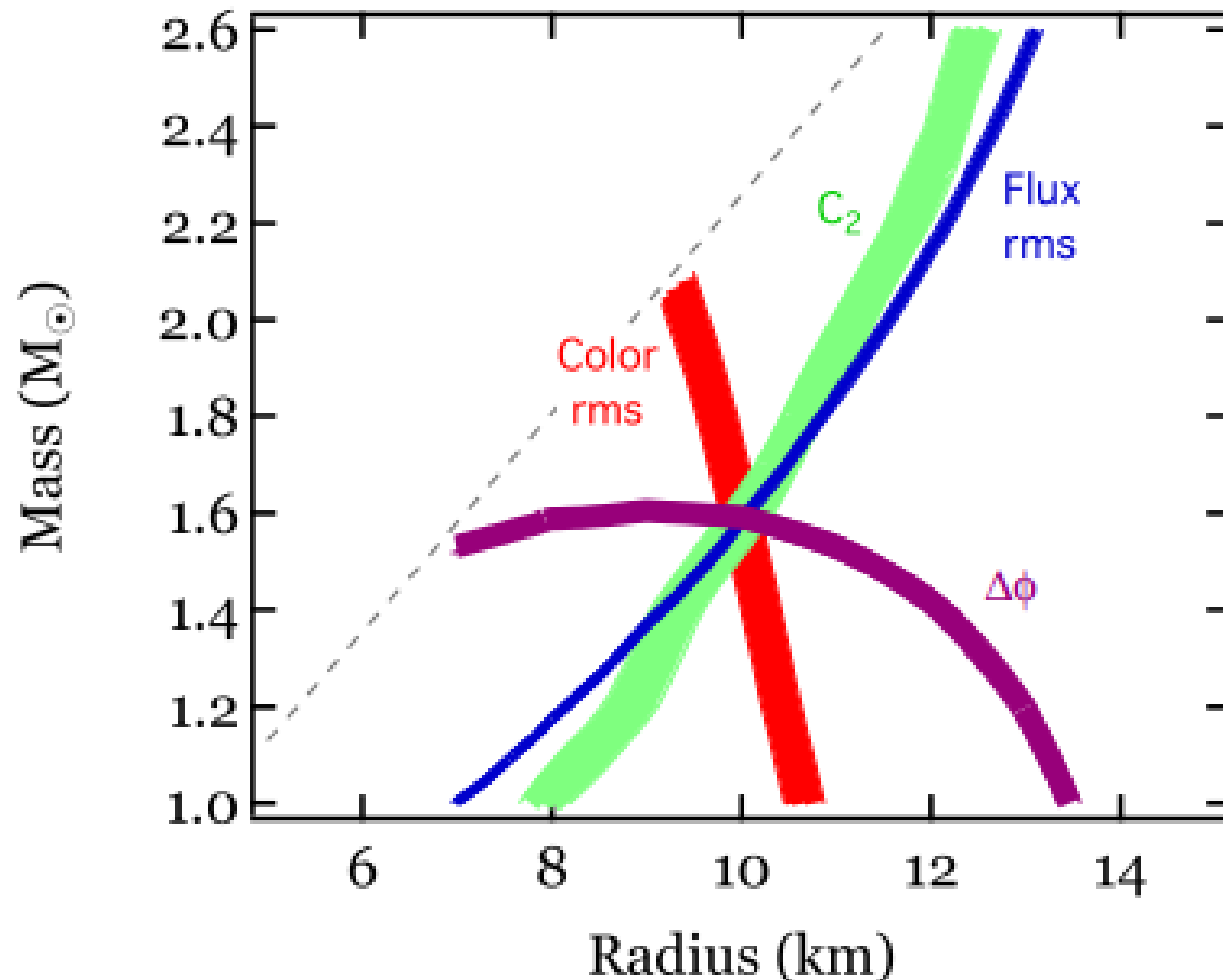
PSR J0348+0432

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

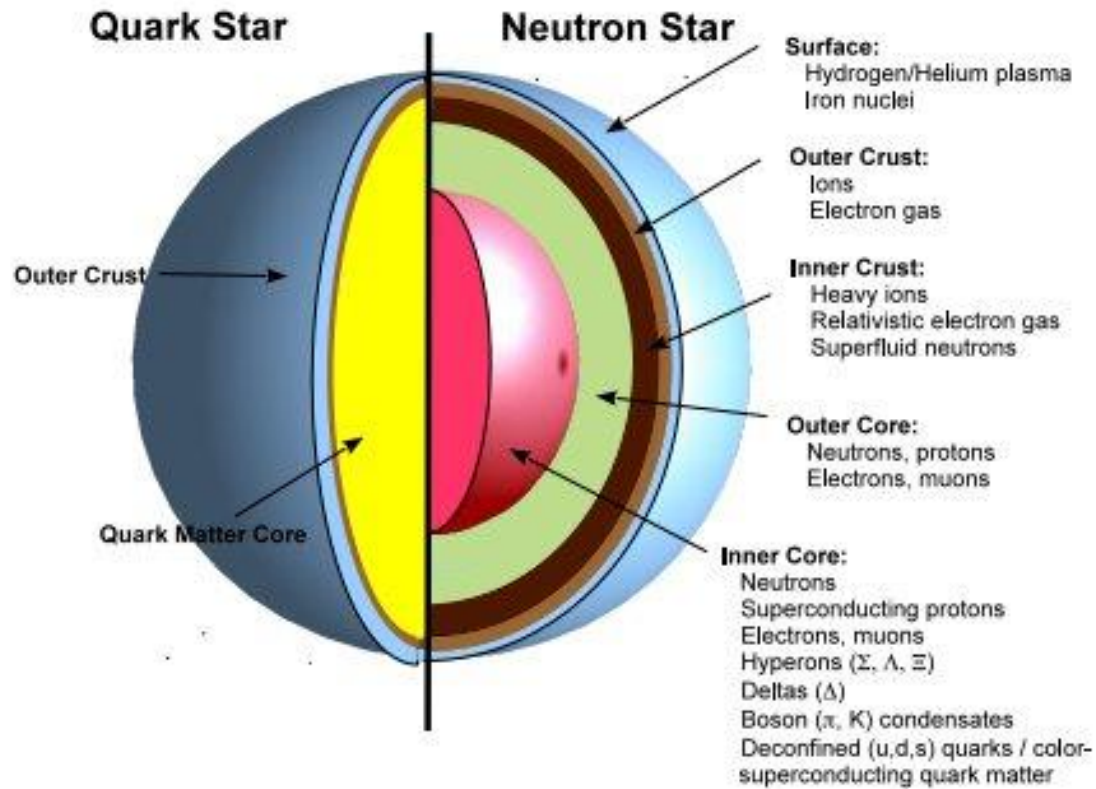


Возможно, что на будущих аппаратах NICER и LOFT можно будет очень точно измерять сразу и массу, и радиус хотя бы для небольшого числа звезд.

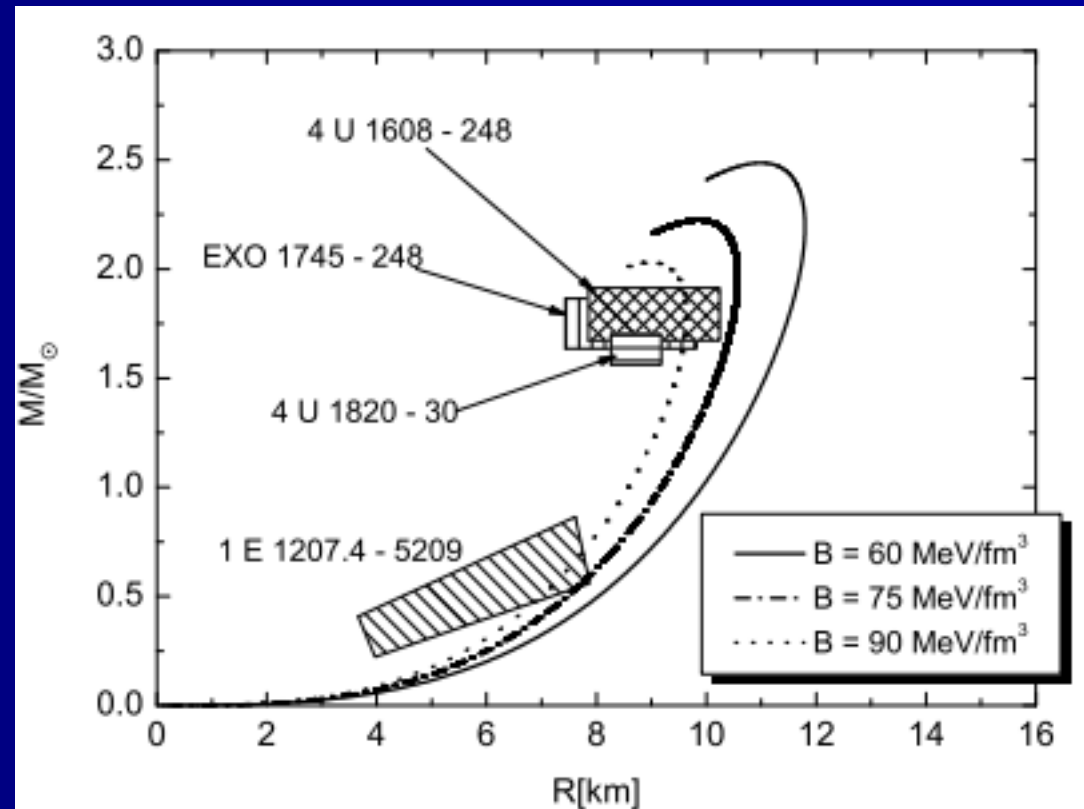
Данные основаны в первую очередь на анализе профиля импульса.

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

# Кварковые звезды

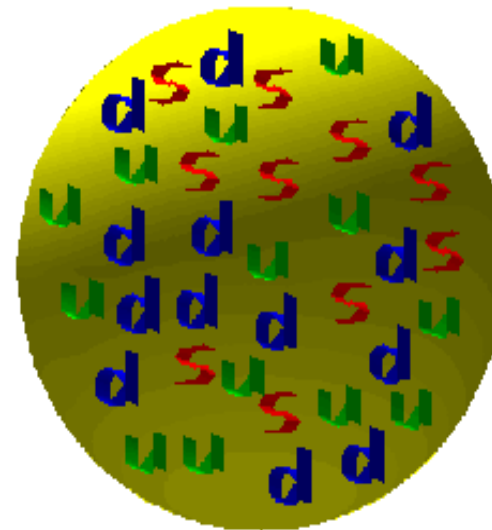
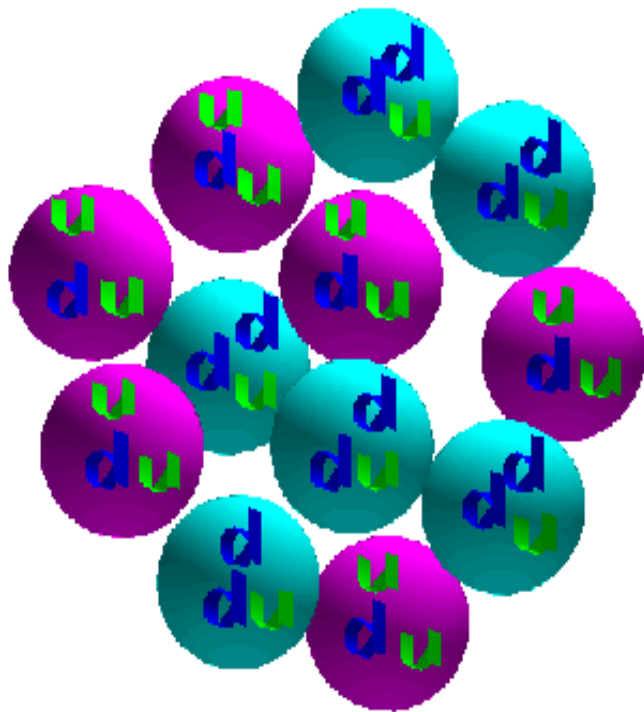


В отличие от нейтронных звезд кварковые удерживаются не гравитацией, а ядерными силами. Нет минимальной массы.





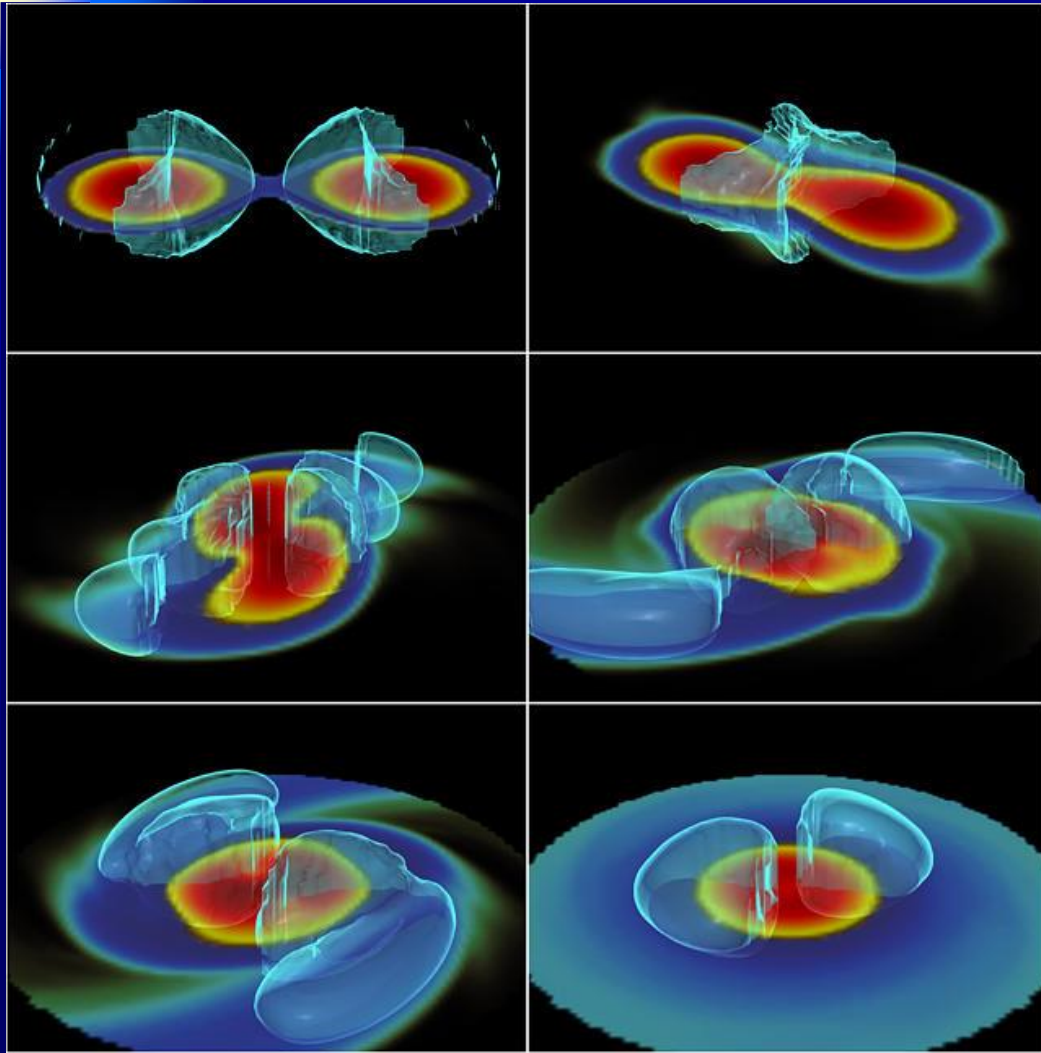
# Странное вещество и страпельки



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.

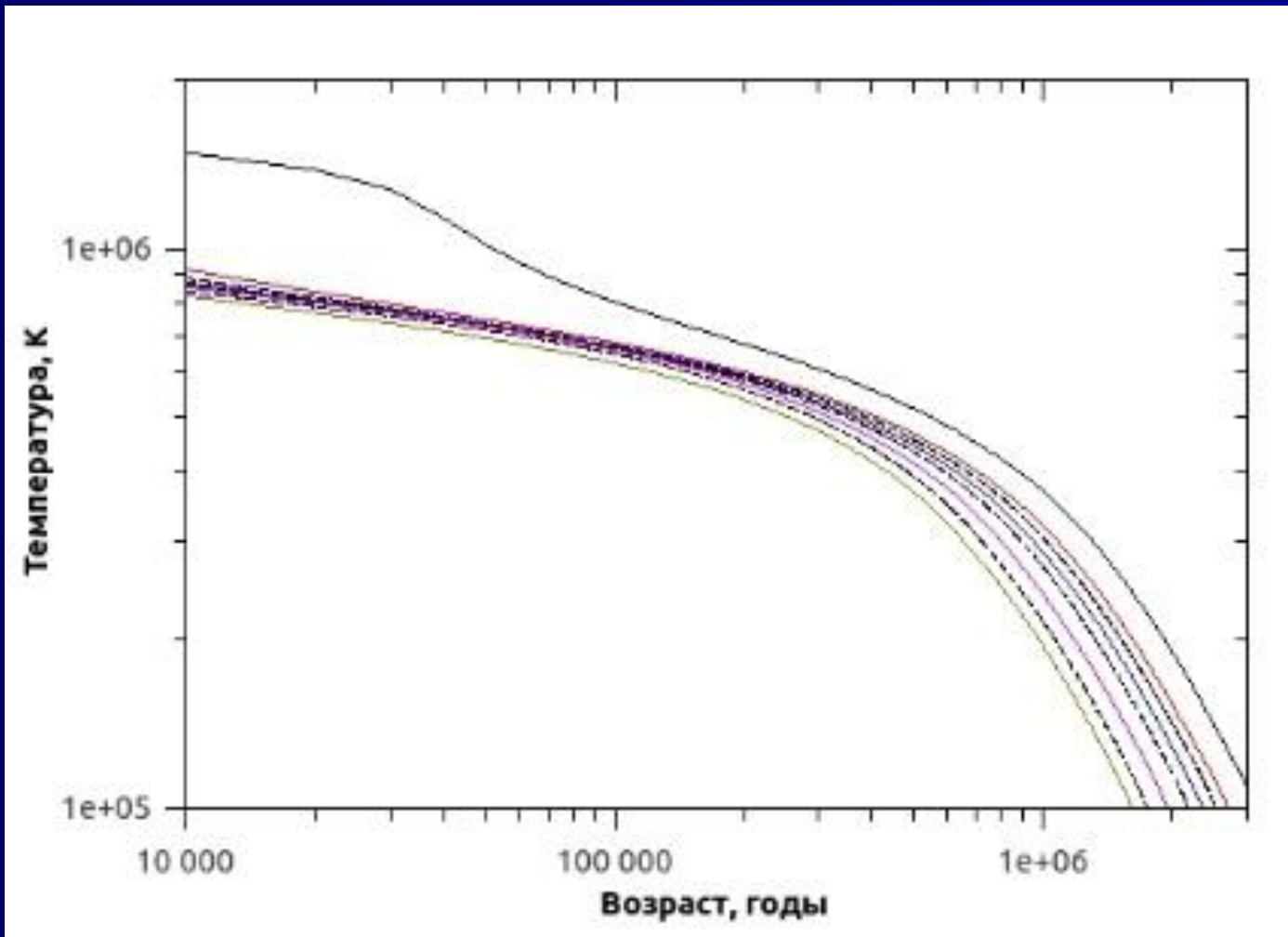
# Странная кварковая эпидемия



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

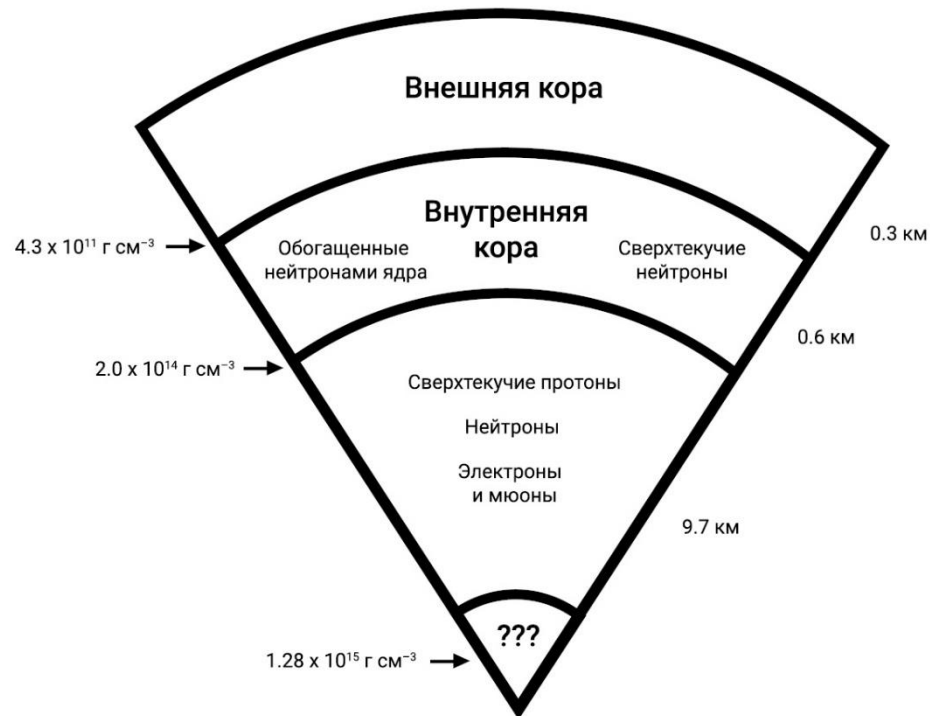


# Остывание нейтронных звезд



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

# Внутреннее строение



Выделяют два основных слоя:  
кору и ядро.

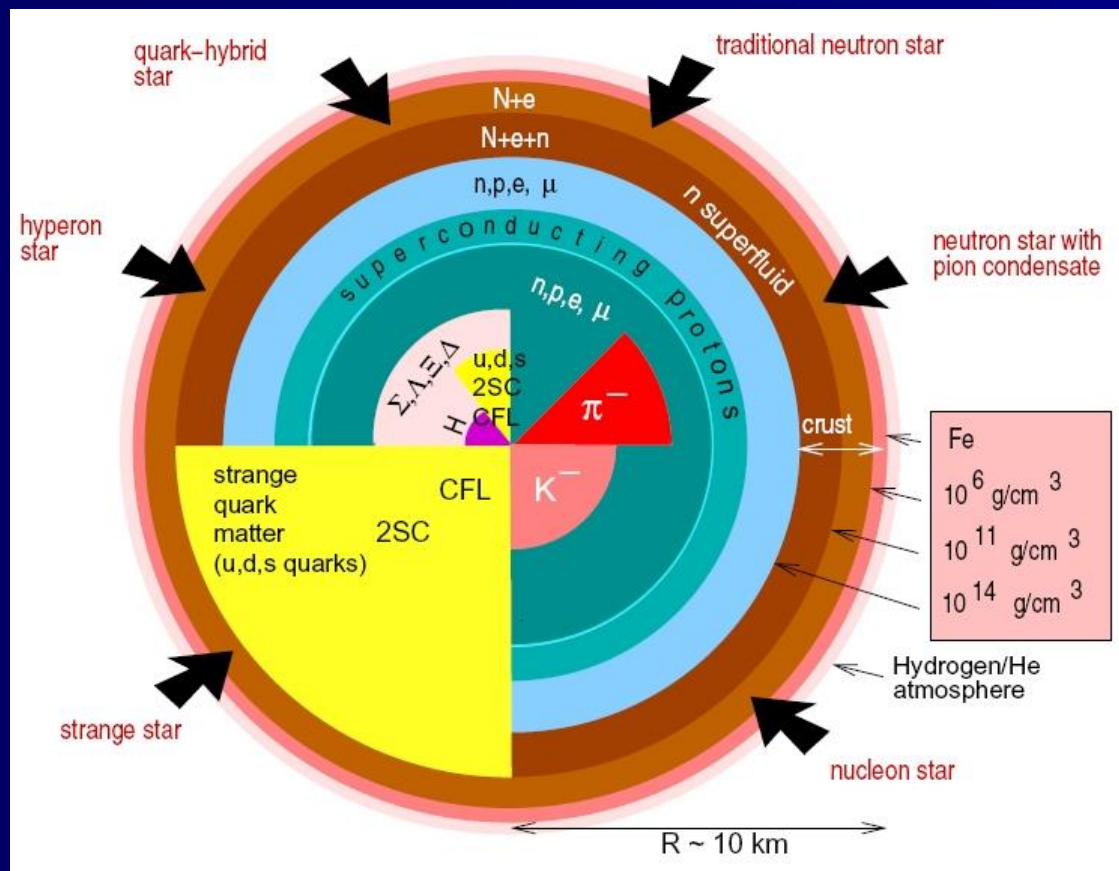
Каждый из них подразделяют  
еще на две части.

Кора гораздо тоньше ядра.

# Загадка нейтронных звезд

В недрах – очень плотное вещество.

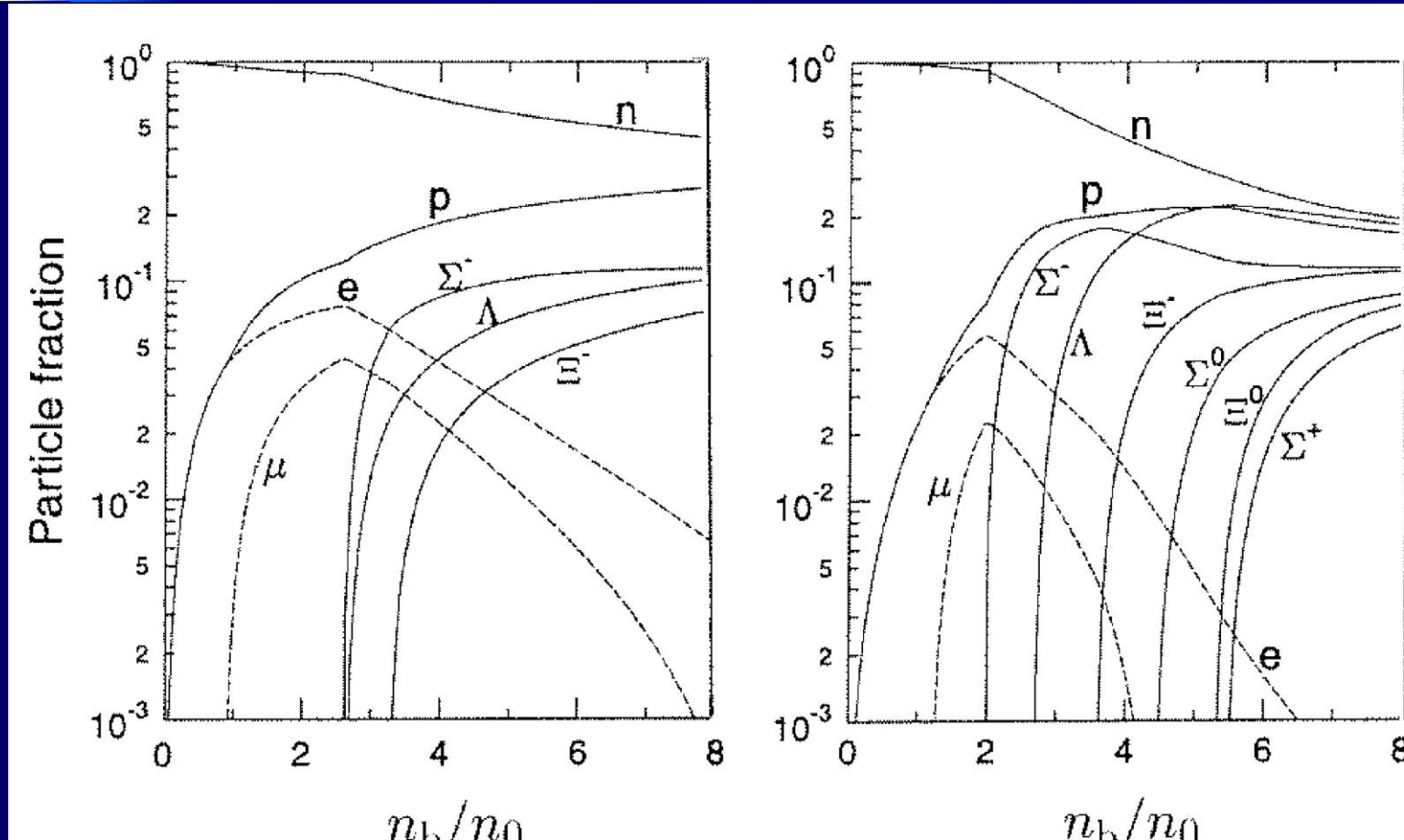
Мы плохо понимаем, как ведет себя вещество при такой плотности.



- 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

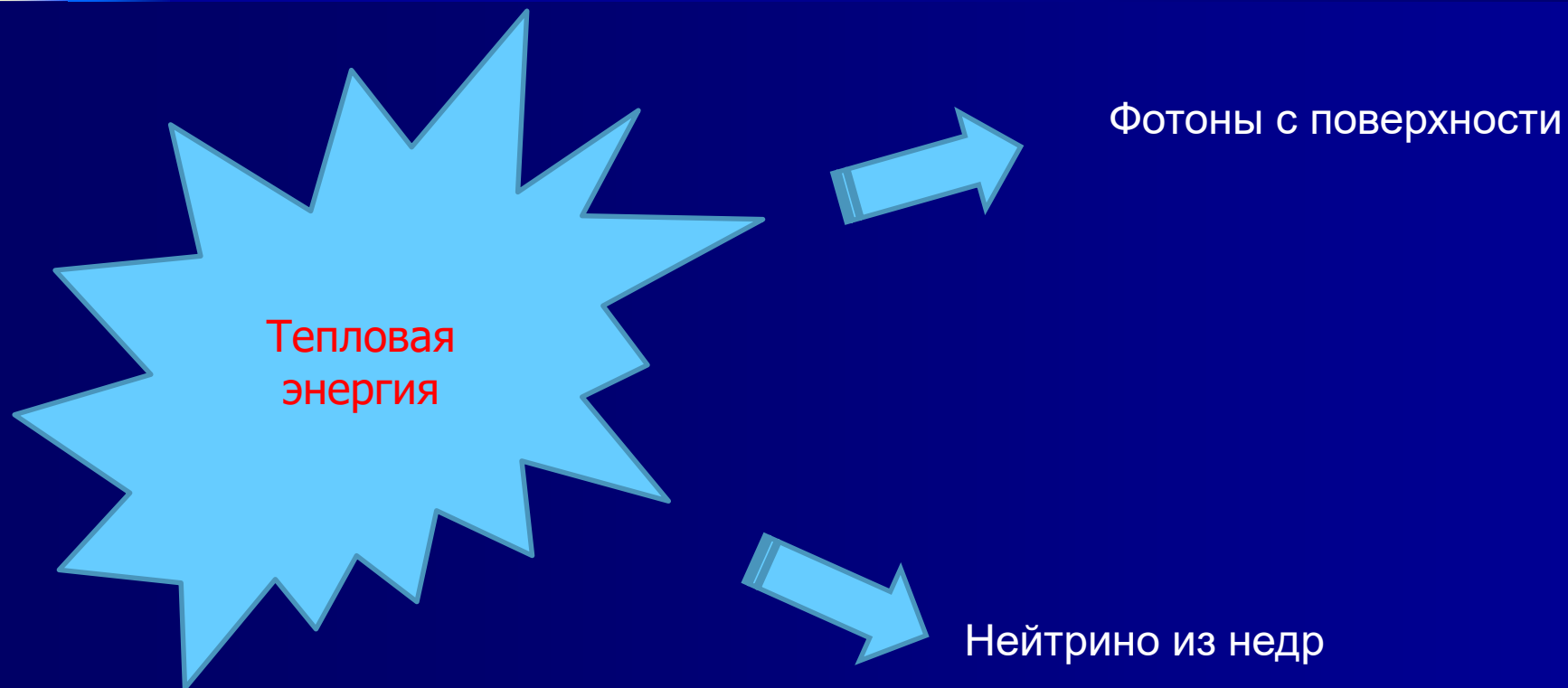


Effective chiral model of  
Hanauske et al. (2000)

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

(Yakovlev & Pethick astro-ph/0402143)

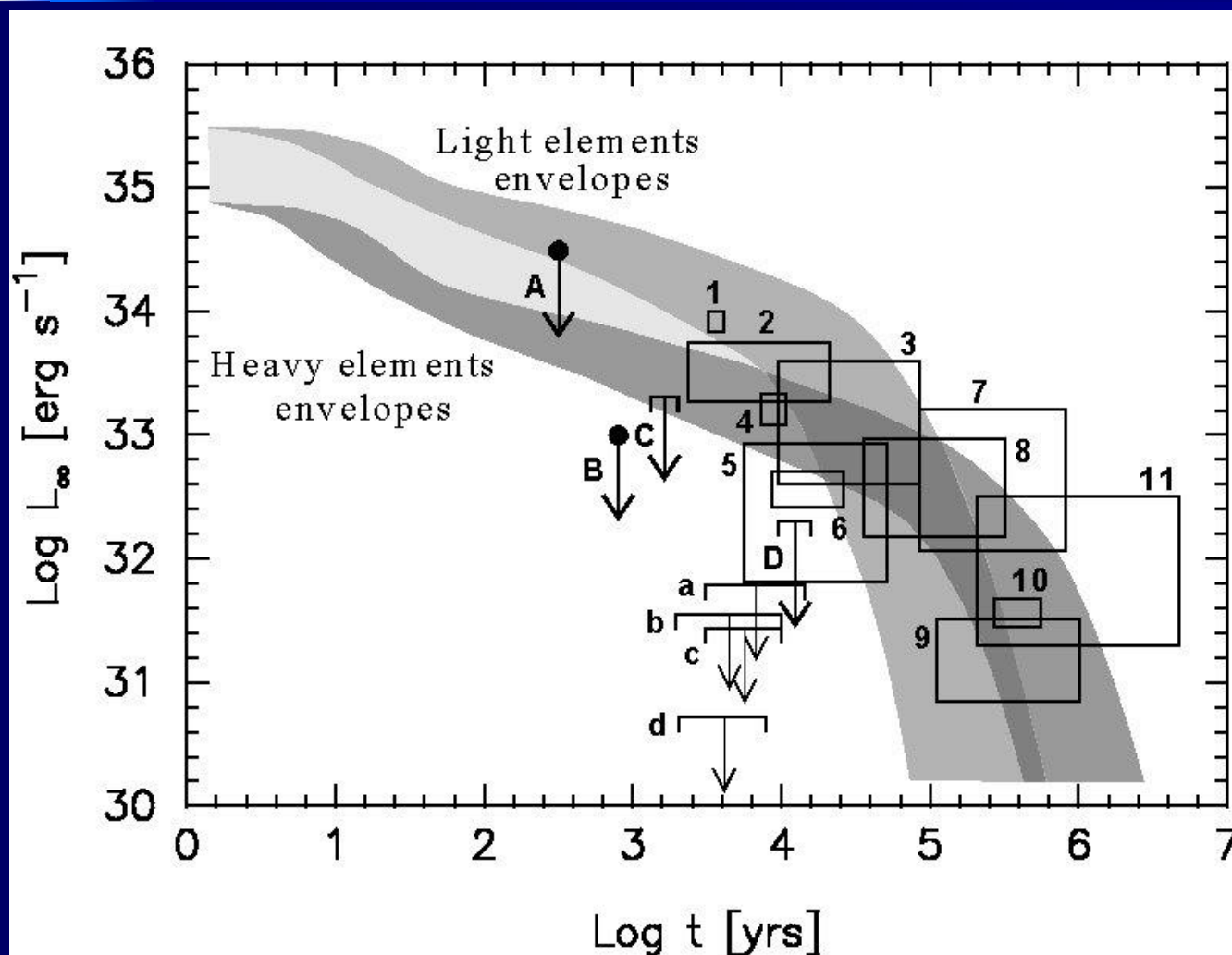
Model	Process	$Q_f, \text{ erg cm}^{-3} \text{ s}^{-1}$
Nucleon matter	$n \rightarrow pe\bar{\nu} \quad pe \rightarrow n\nu$	$10^{26} - 3 \times 10^{27}$
Pion condensate	$\tilde{N} \rightarrow \tilde{N}e\bar{\nu} \quad \tilde{N}e \rightarrow \tilde{N}\nu$	$10^{23} - 10^{26}$
Kaon condensate	$\tilde{B} \rightarrow \tilde{B}e\bar{\nu} \quad \tilde{B}e \rightarrow \tilde{B}\nu$	$10^{23} - 10^{24}$
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 $NN \rightarrow NN\nu\bar{\nu}$	$10^{19} - 10^{20}$

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



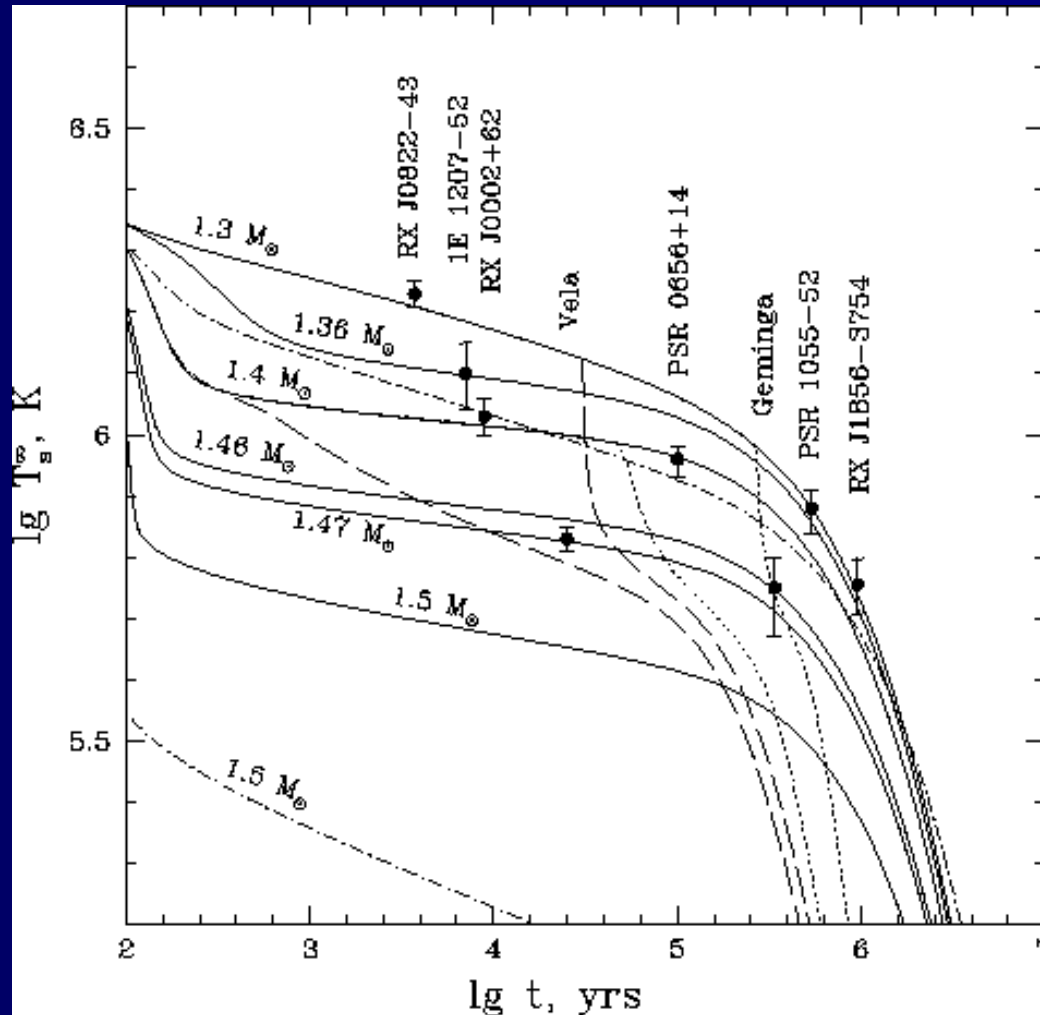
# Кривые остывания



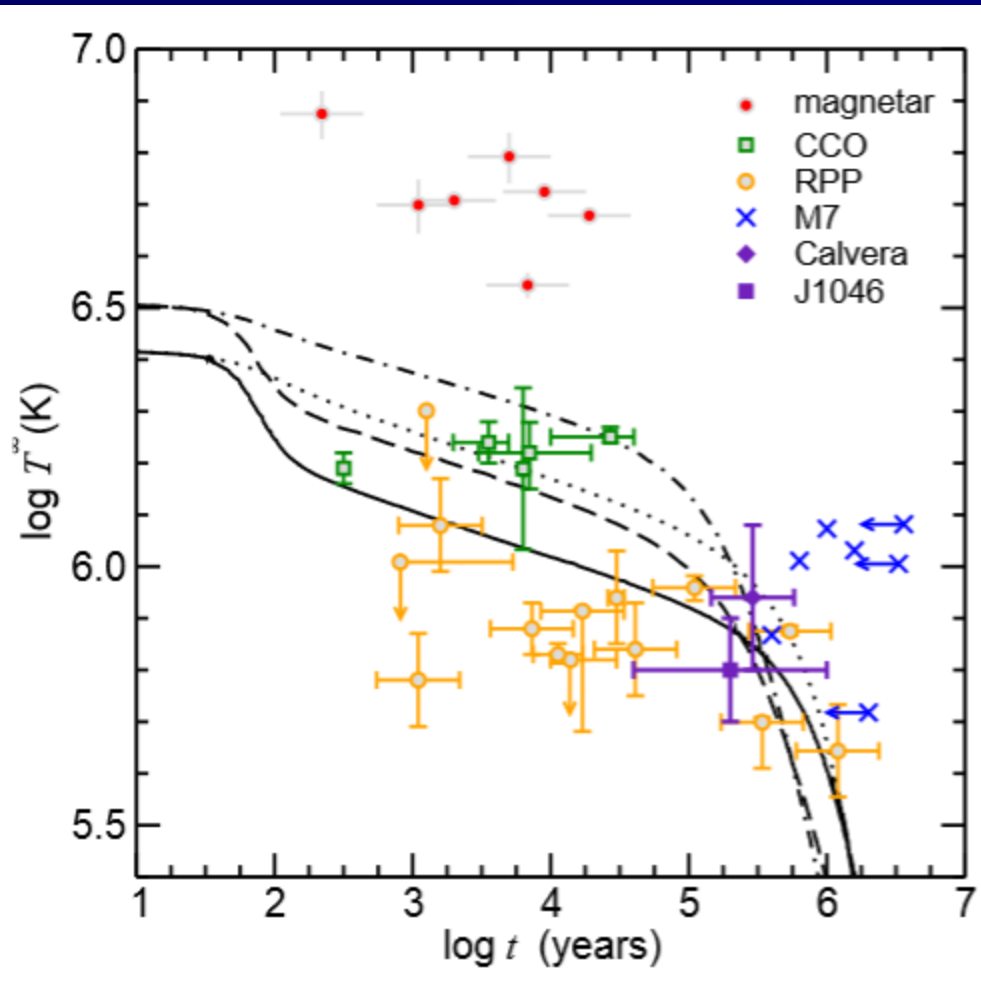
Теоретические кривые необходимо сопоставлять с данными наблюдений.

# 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.

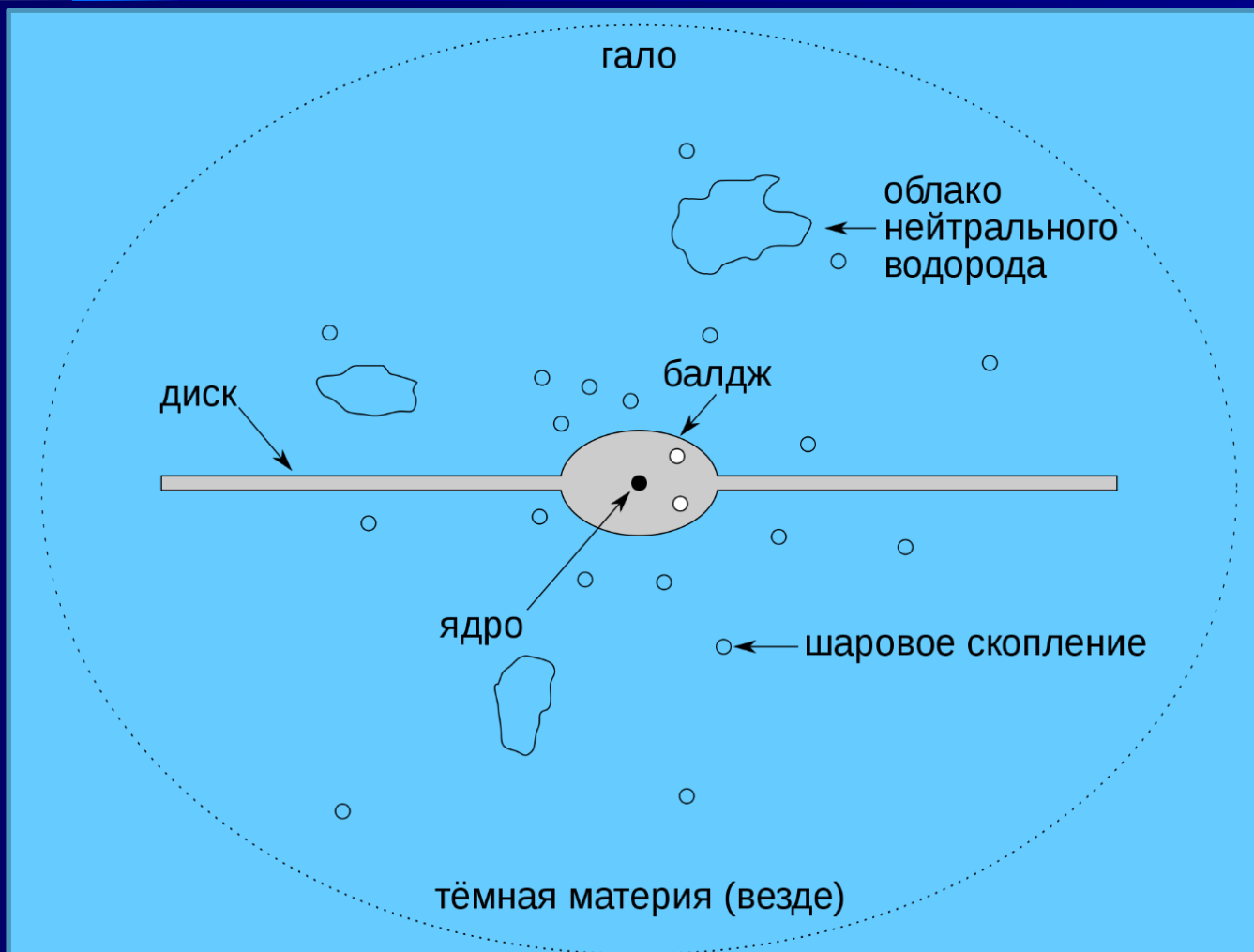
# Великолепная семерка

Имя	Период, с
RX 1856	7.05
RX 0720	8.39
RBS 1223	10.31
RBS 1556	3.39
RX 0806	11.37
RX 0420	3.45
RBS 1774	9.44



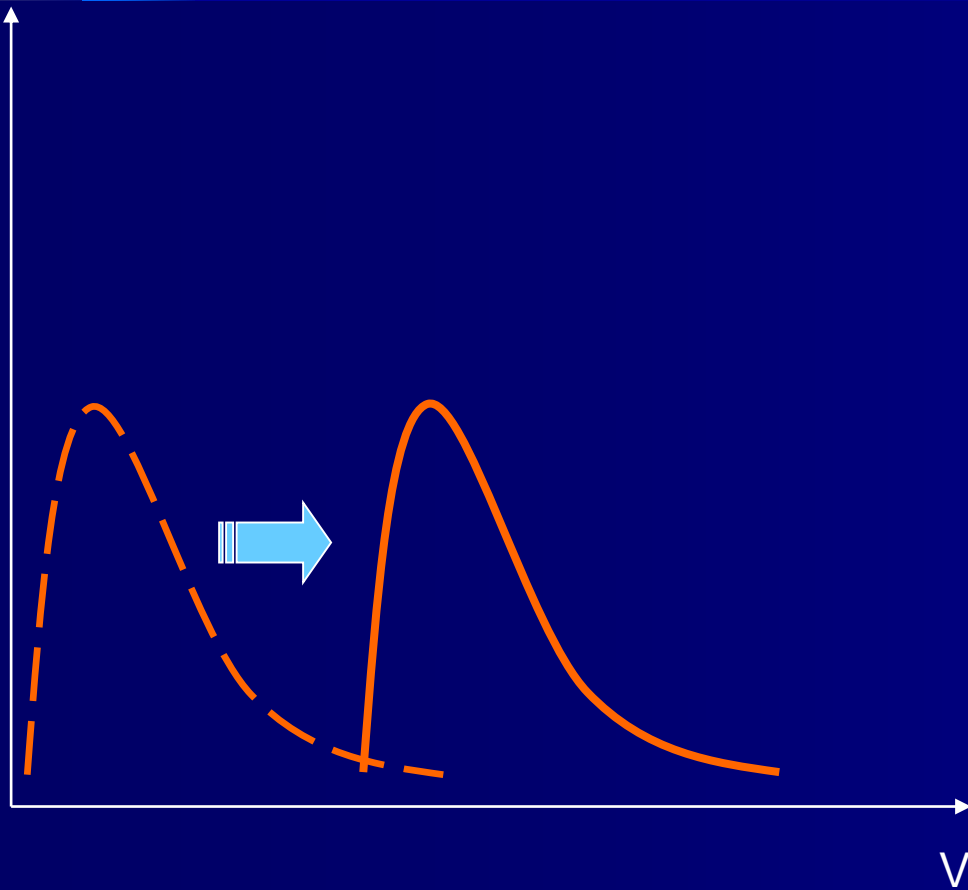
**Радиотихие**  
**Близкие**  
**Тепловые**  
**Длинные периоды**  
**Детали в спектре**

# Кинематический возраст

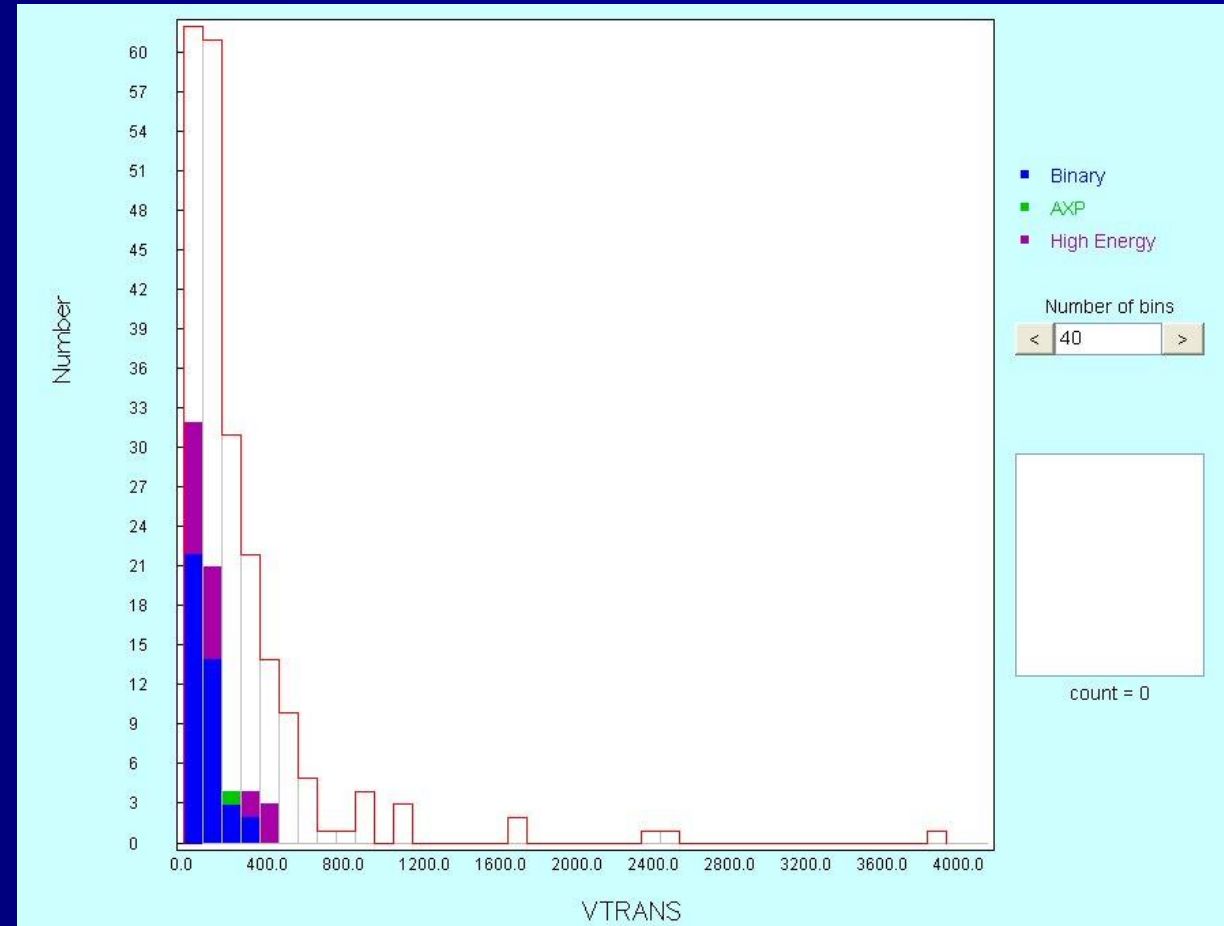


Если мы знаем, где объекты родились, то по их современному положению и скоростям можно определить возраст.

# Скорости

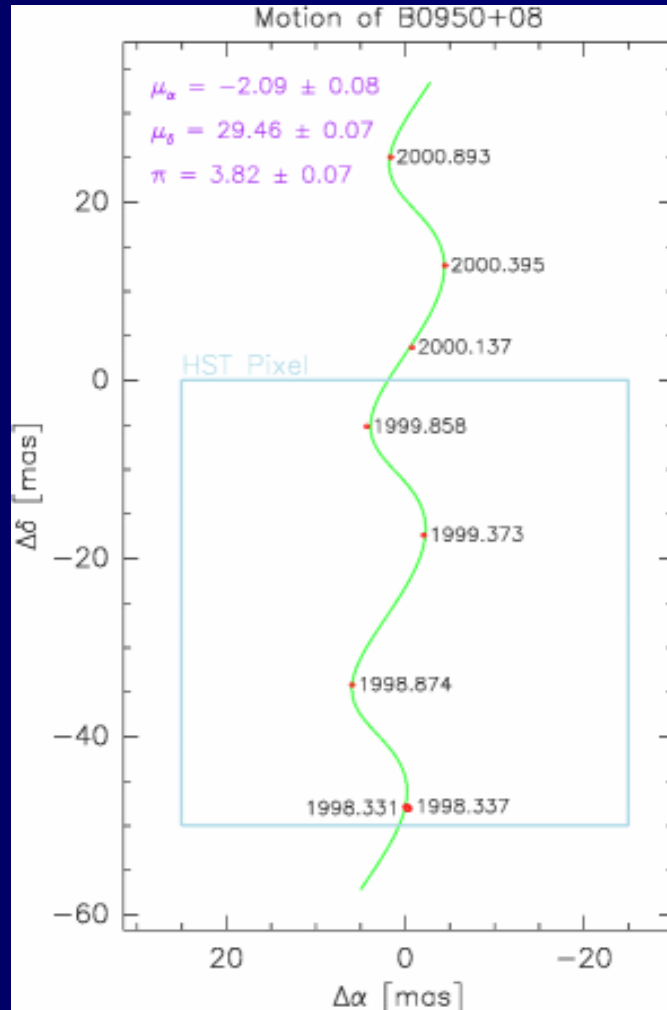


Прародители имеют скорости  $\sim 10-30$  км/с  
А пульсары имеют скорости  $\sim 100-500$  км/с

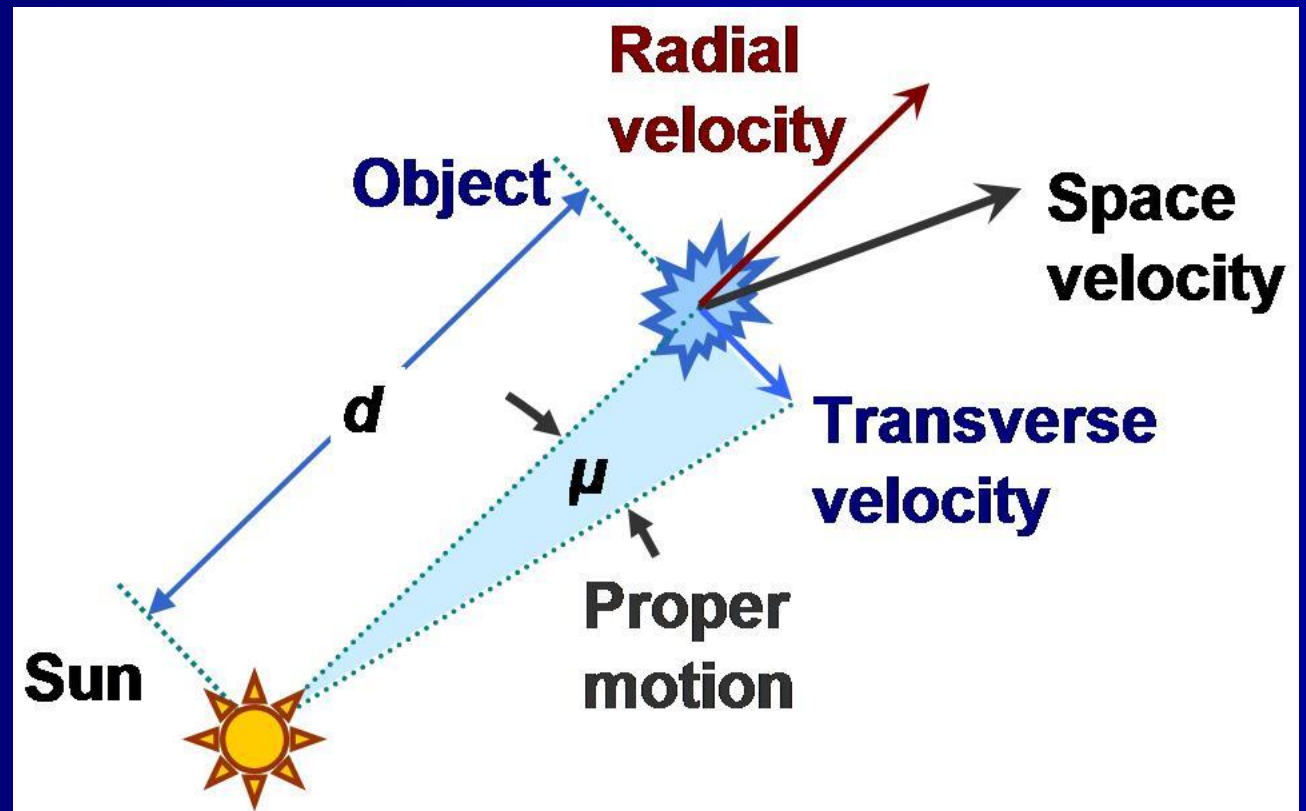


# Движение пульсаров

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



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



# Скорости нейтронных звезд в туманностях

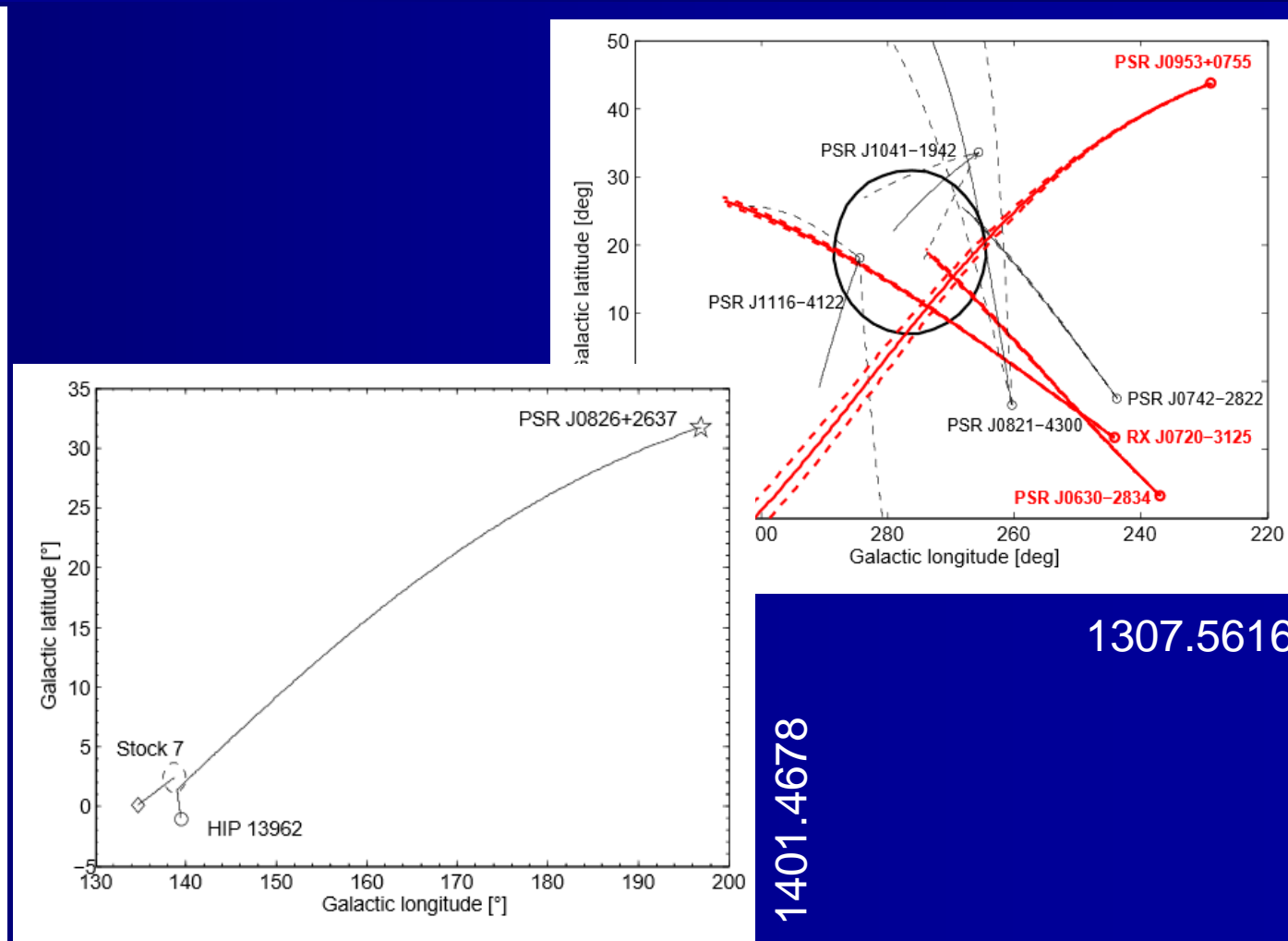
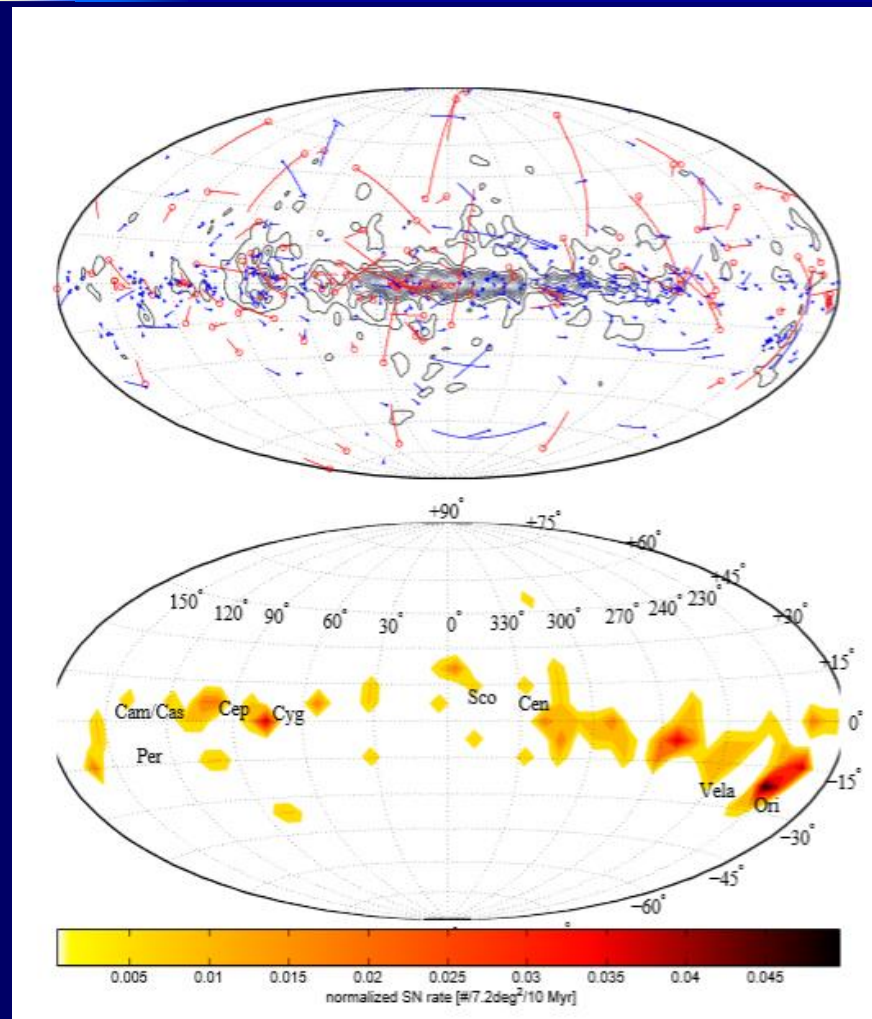
<http://www.astro.cornell.edu/~shami/guitar/>



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



# Траектории и места рождения

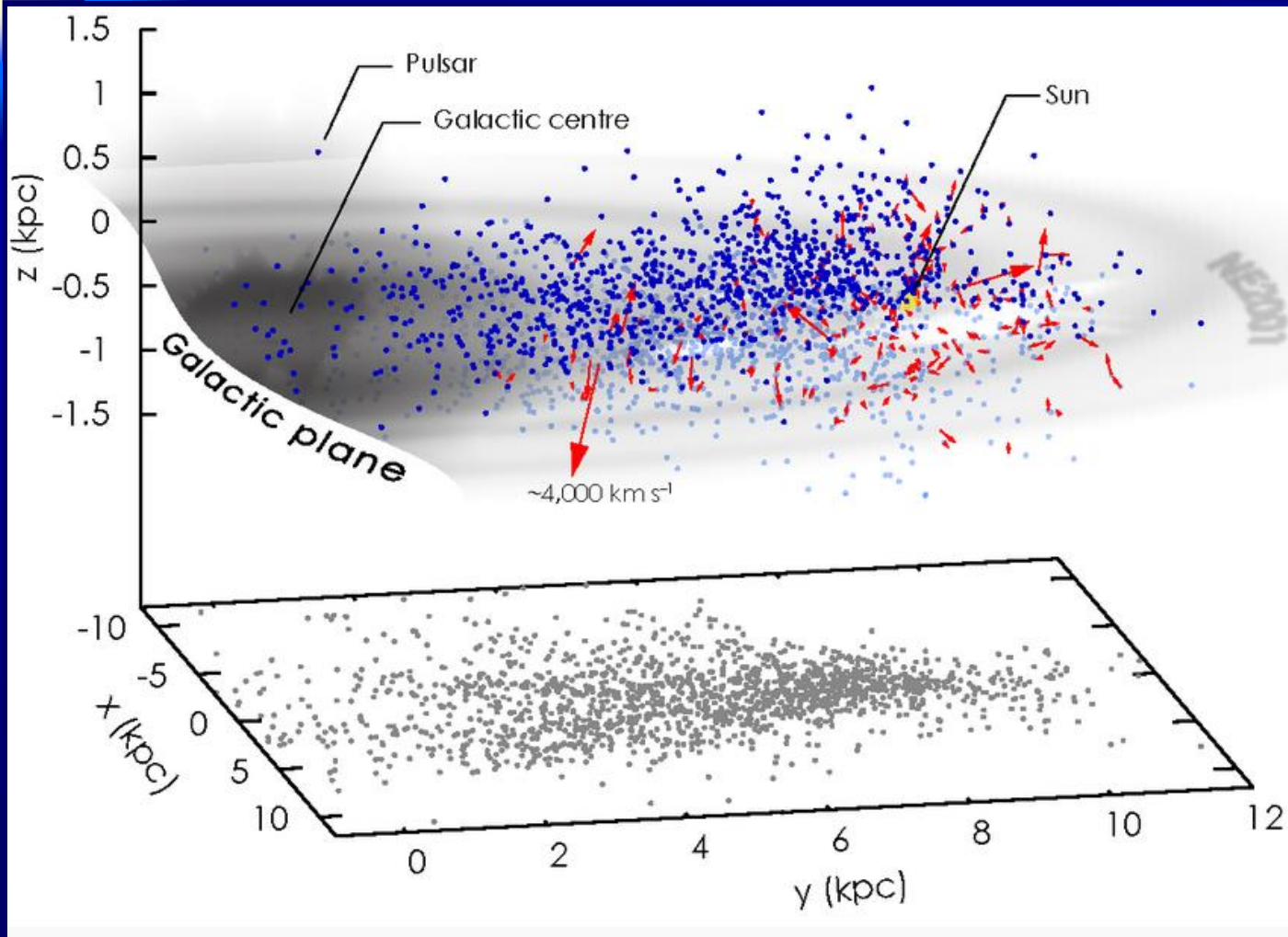


1202.1388

1307.5616

1401.4678

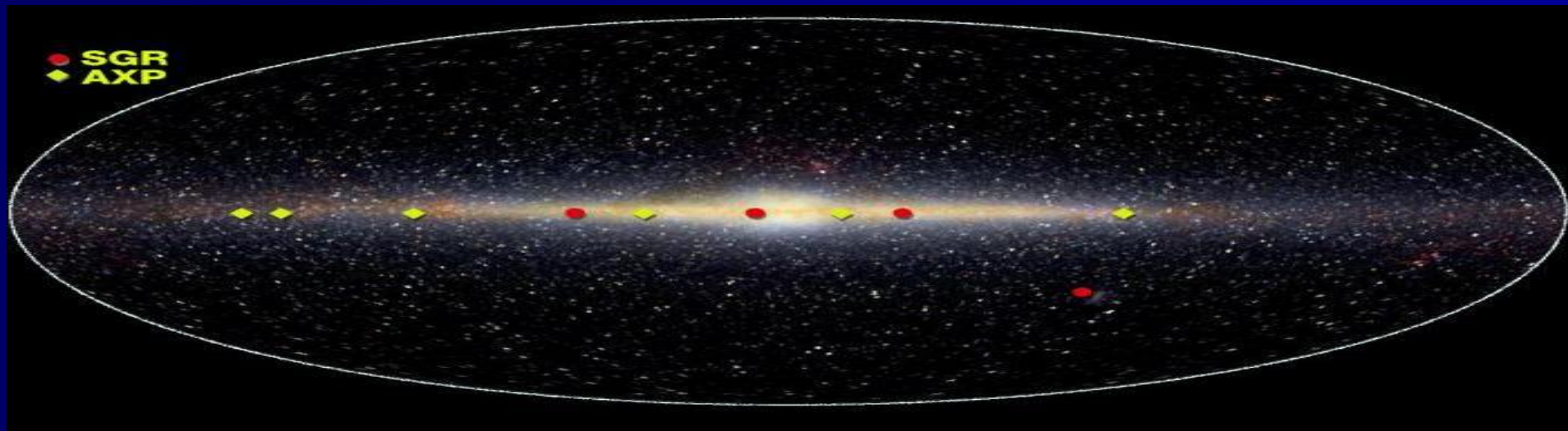
# Пульсары в Галактике



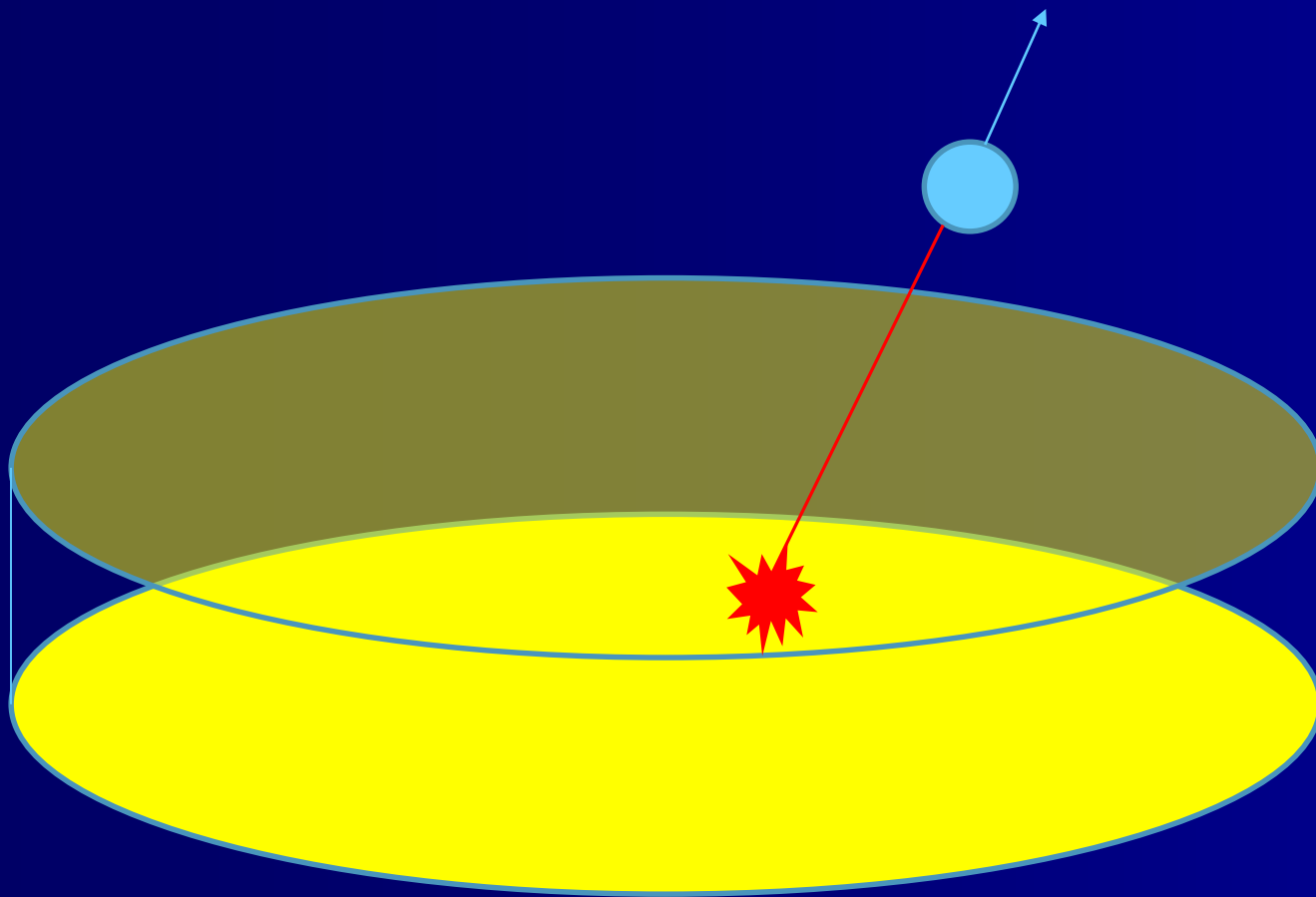
Пульсары рождаются в диске.  
А в диске они концентрируются  
к спиральным ветвям.

# Магнитары в галактике

- 14 МПГ, 14 АРП, плюс кандидаты (5), плюс радиопульсары с большими магнитными полями ...
- Молодые объекты (около  $10^4$  лет).
- Возможно около 10% всех НЗ.



# 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.

# Выводы

Существует четыре основных способа оценки возраста нейтронной звезды:

1. По замедлению
2. По остыванию
3. По остатку сверхновой
4. Кинематический

