



БЕЛЫЕ КАРЛИКИ,  
СВЕРХНОВЫЕ,  
НЕЙТРОННЫЕ  
ЗВЕЗДЫ

СЕРГЕЙ ПОПОВ  
(ГАИШ МГУ)

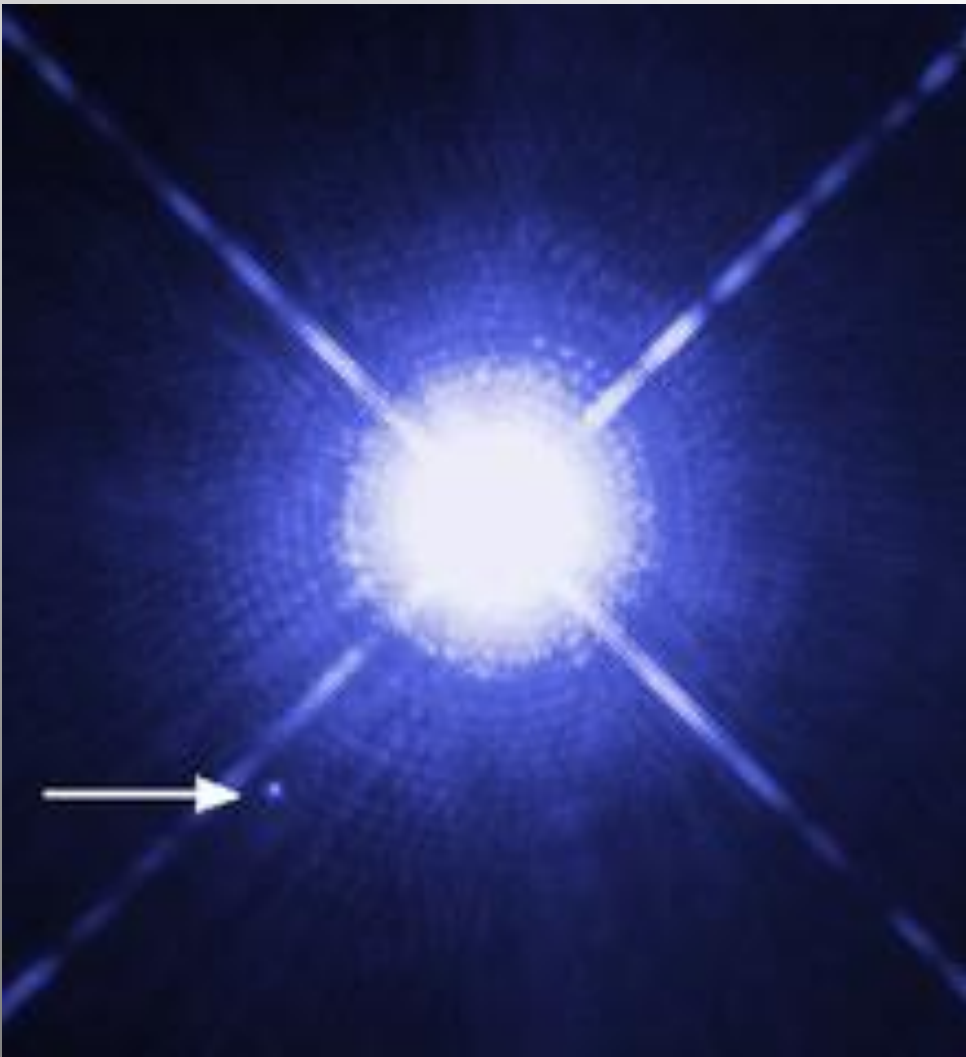
# НЕОБЫЧНЫЕ КОМПАКТНЫЕ ЗВЕЗДЫ

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 размеры порядка земной.

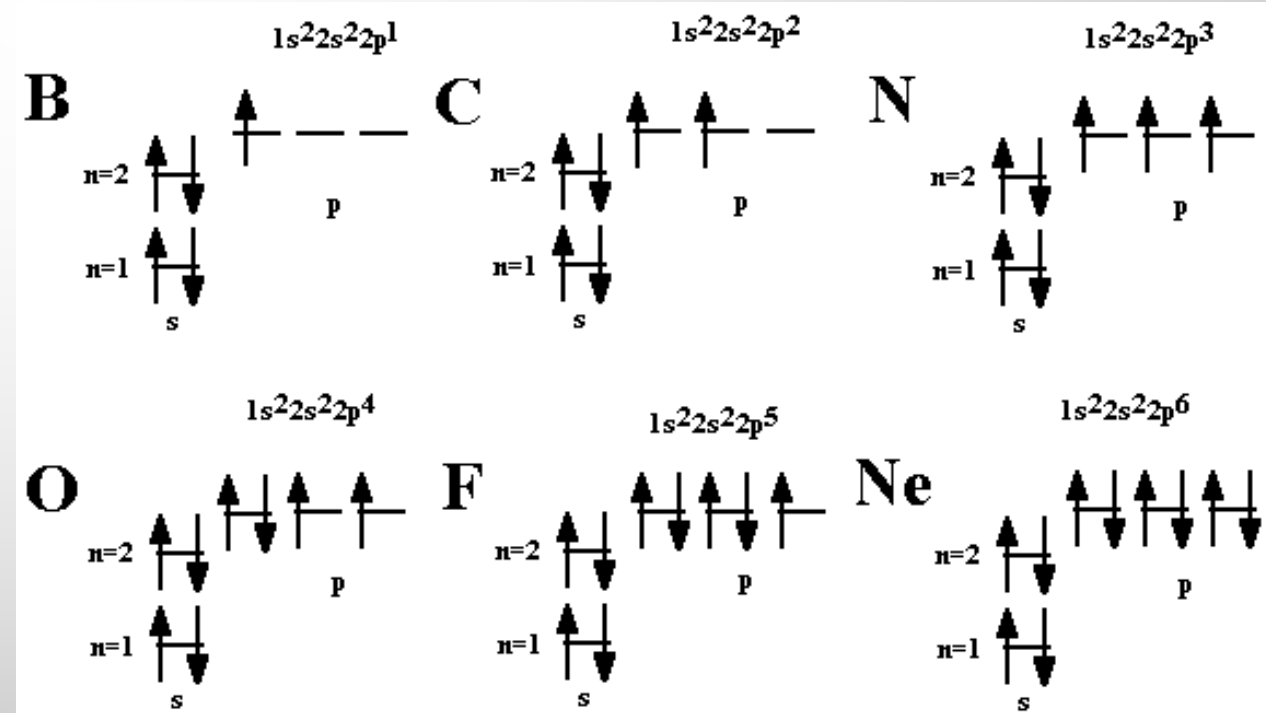
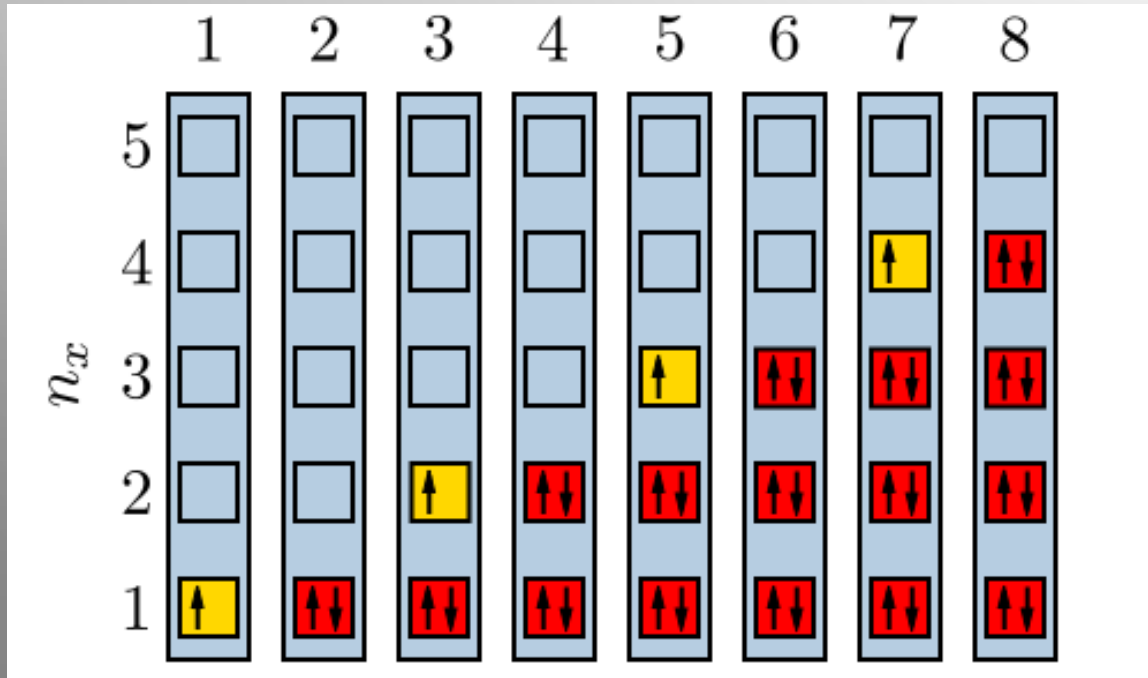
Для объяснения природы этих объектов понадобилась квантовая механика.

См. статью Д.Г. Яковлева в УФН (1994)  
<https://ufn.ru/ru/articles/1994/6/g/>

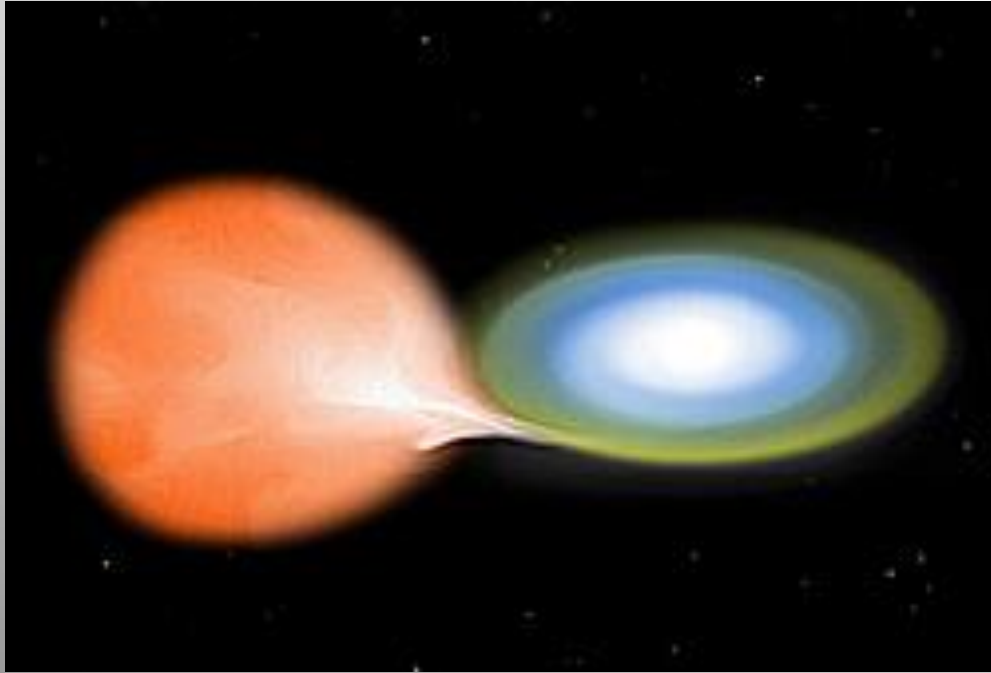


# ЗАПРЕТ ПАУЛИ

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

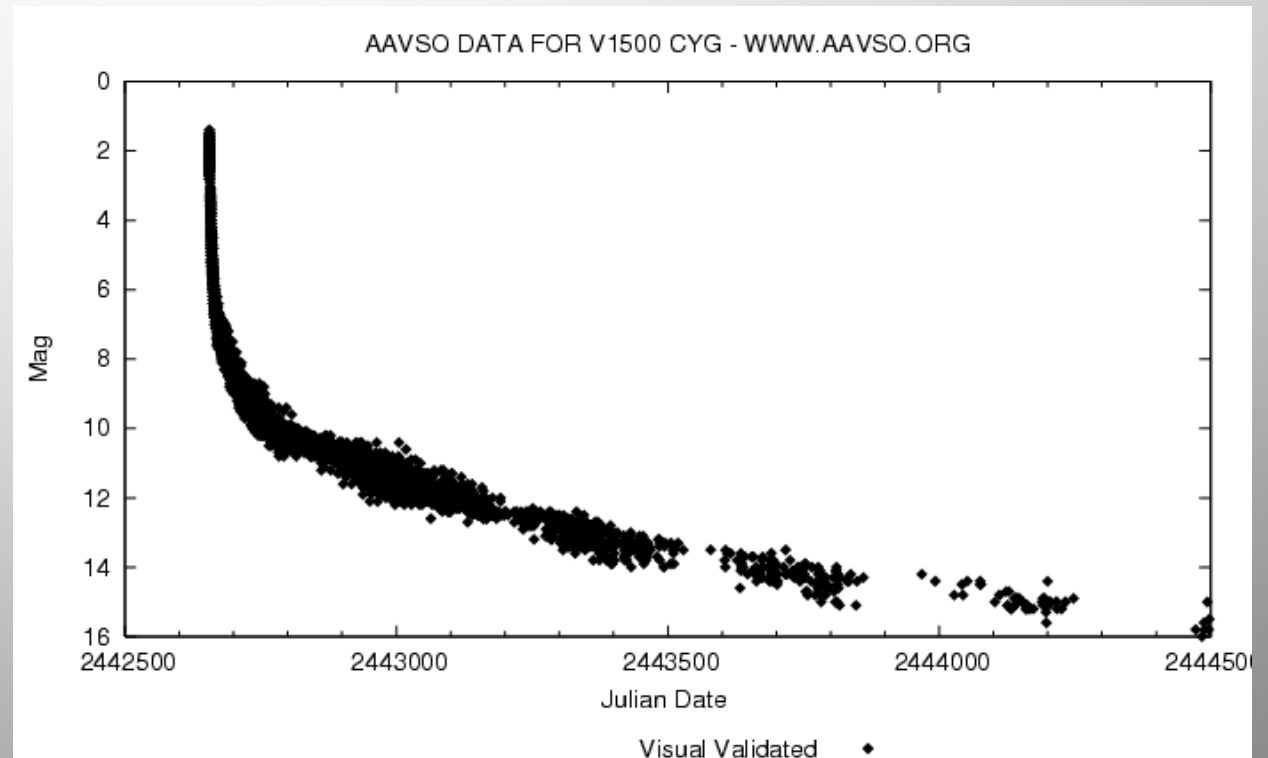


# НОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

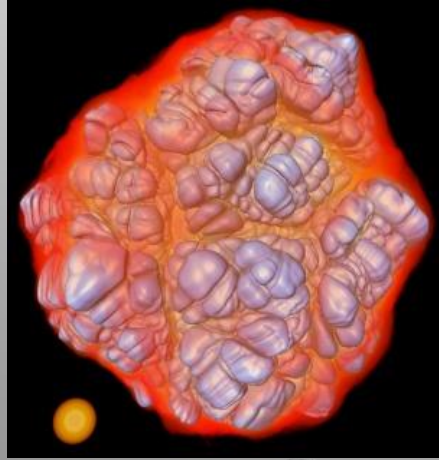
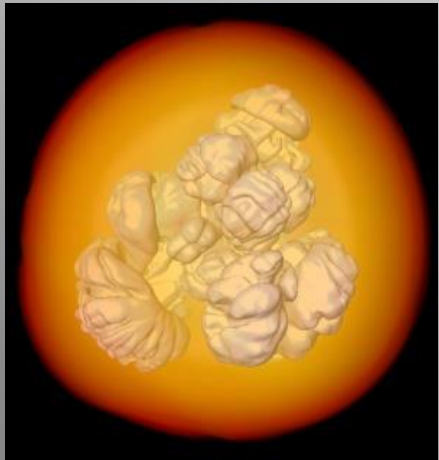
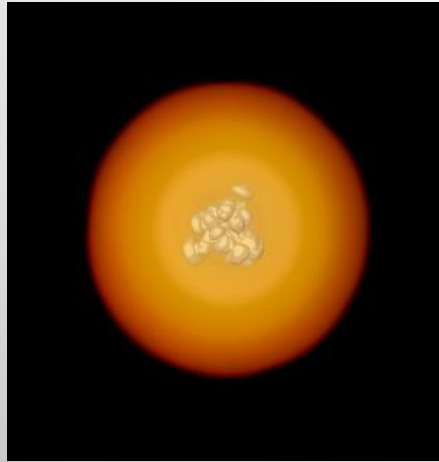
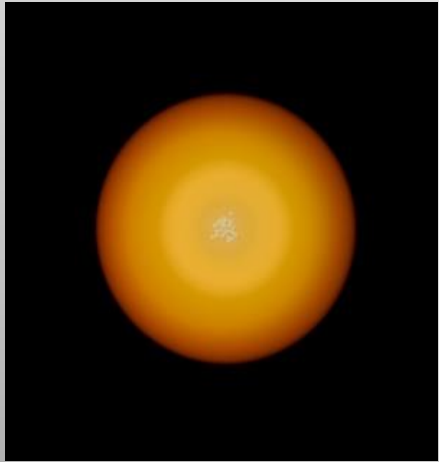


Перетекающее вещество накапливается на поверхности белого карлика, пока не происходит взрыв.

Термоядерное взрывное горение водорода



# ВЗРЫВ SN IA



Достигнув критической массы, белые карлики взрываются (термоядерное горение углерода и кислорода).

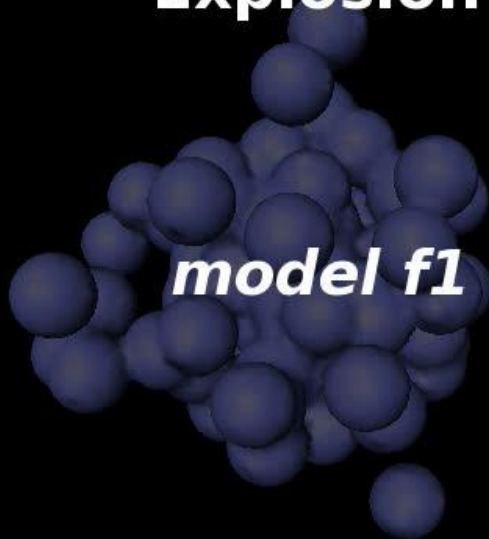
Это термоядерный взрыв, полностью разрушающий объект.

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



*model f1*



(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.

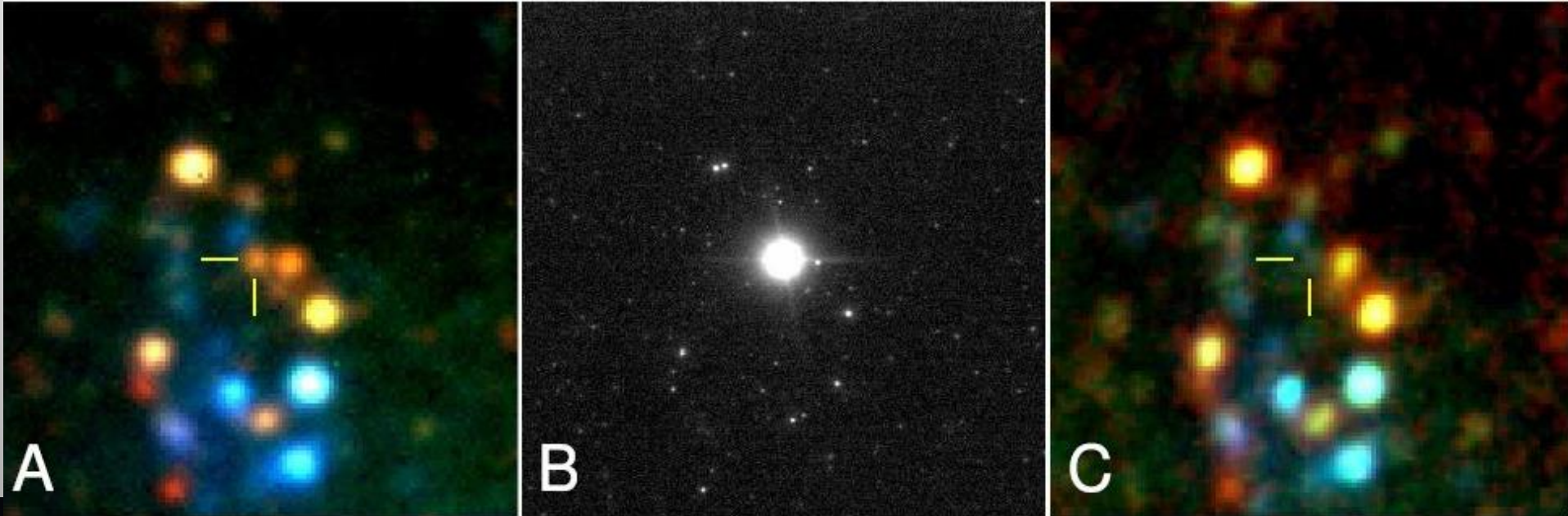
# СВЕРХНОВАЯ Ia В БЛИЗКОЙ ГАЛАКТИКЕ



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.

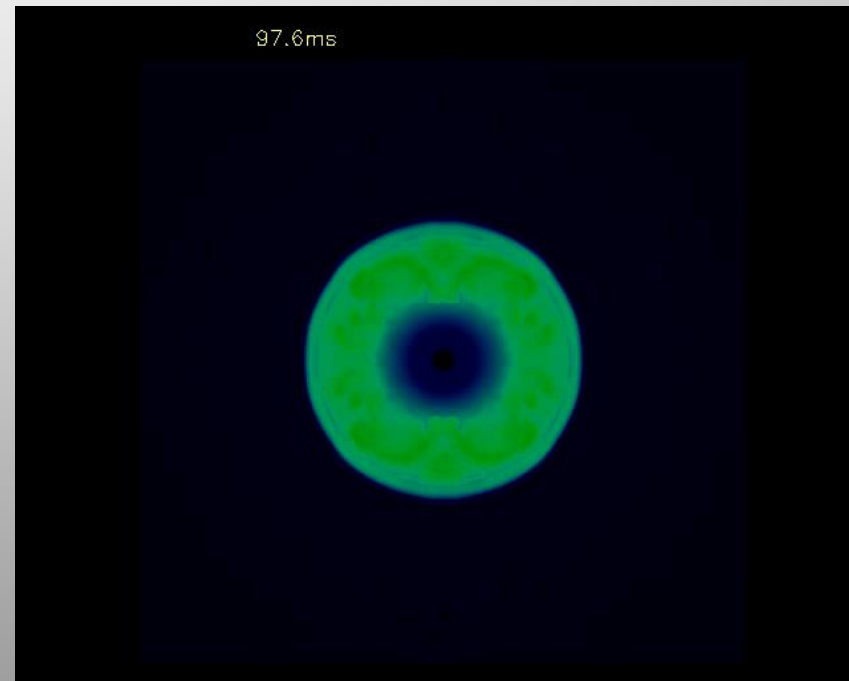
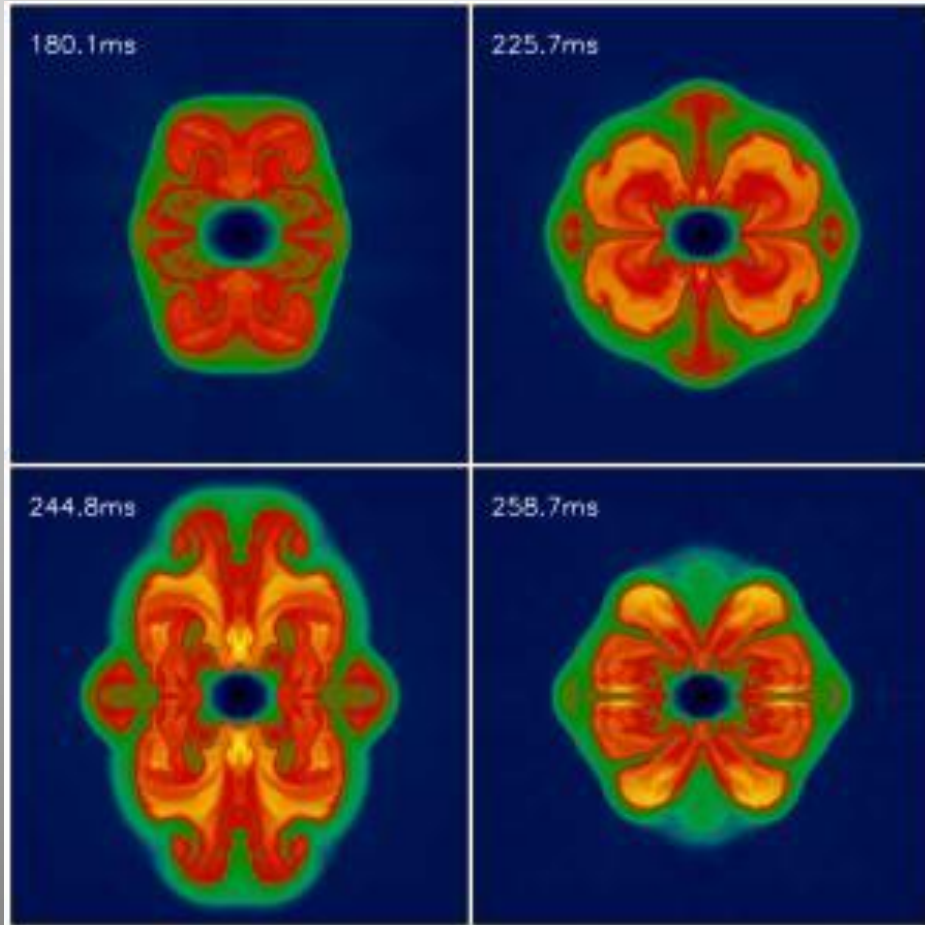
На короткое время звезда становится ярче целой галактики!



# ВЗРЫВ СВЕРХНОВОЙ

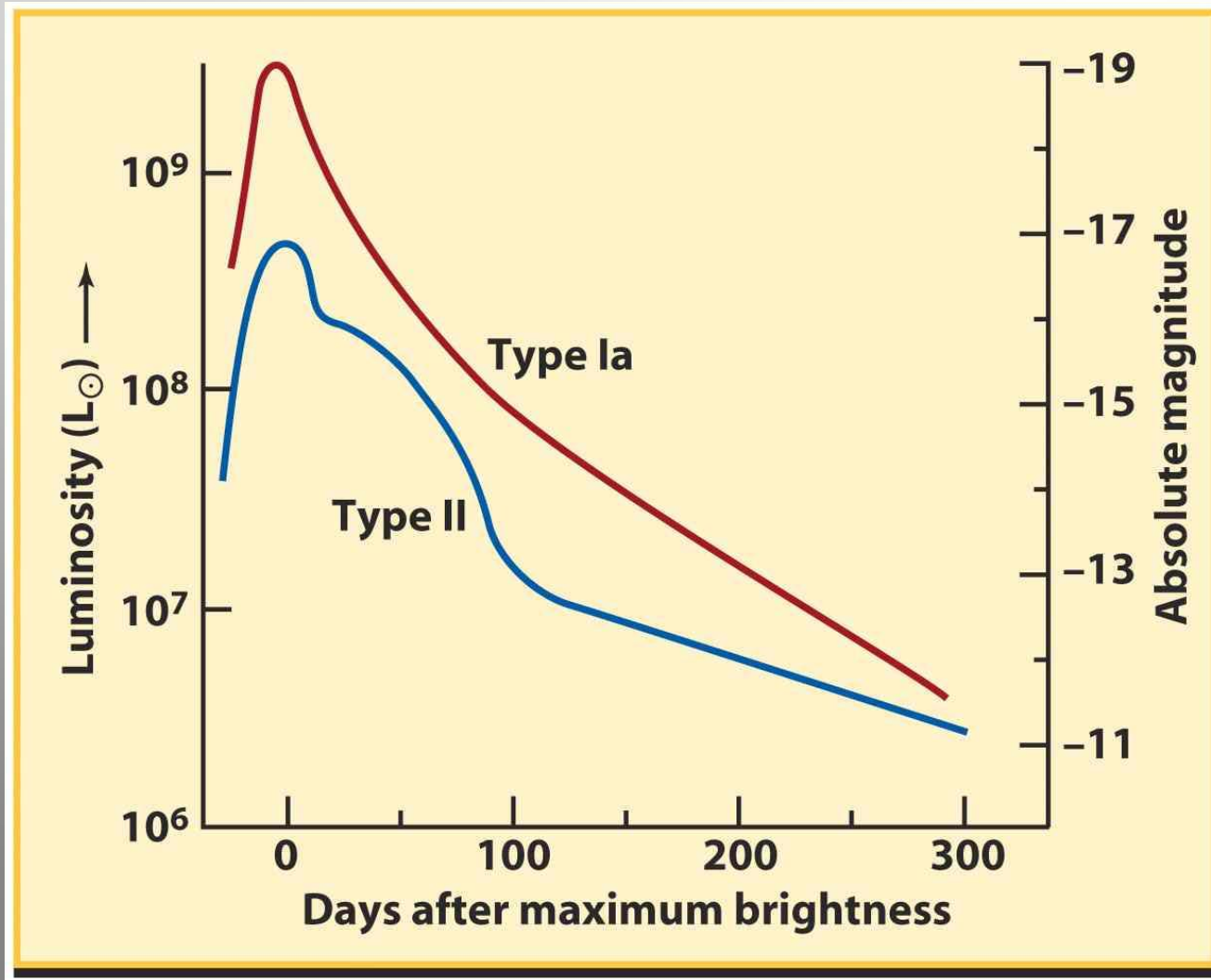
Расчеты взрывов сверхновых можно смело отнести к числу самых сложных задач

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



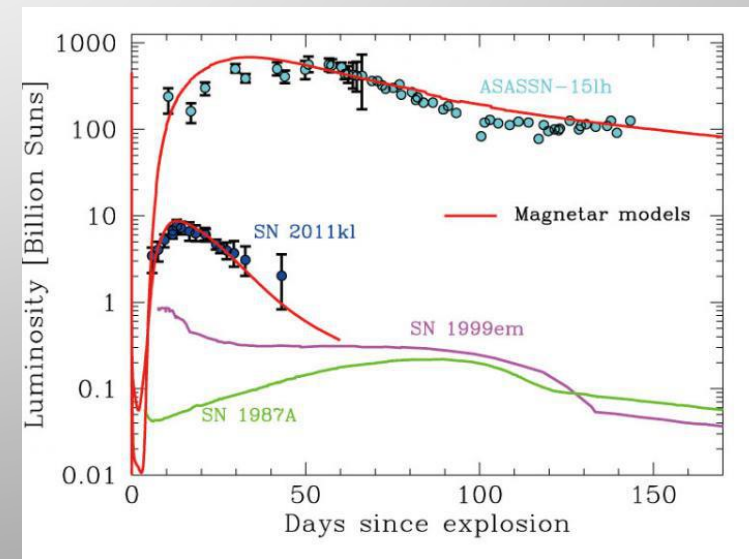
(Buras, Janka et al.)

# КРИВАЯ БЛЕСКА СВЕРХНОВОЙ



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

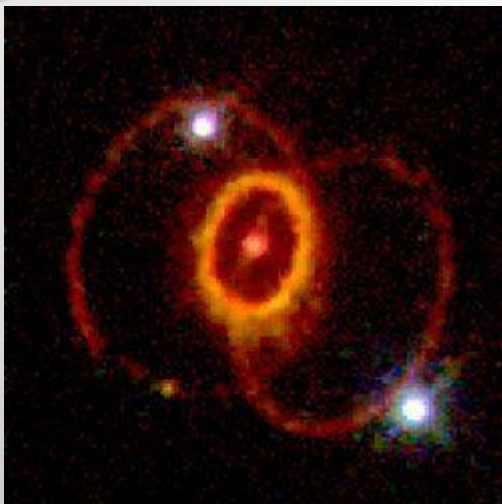
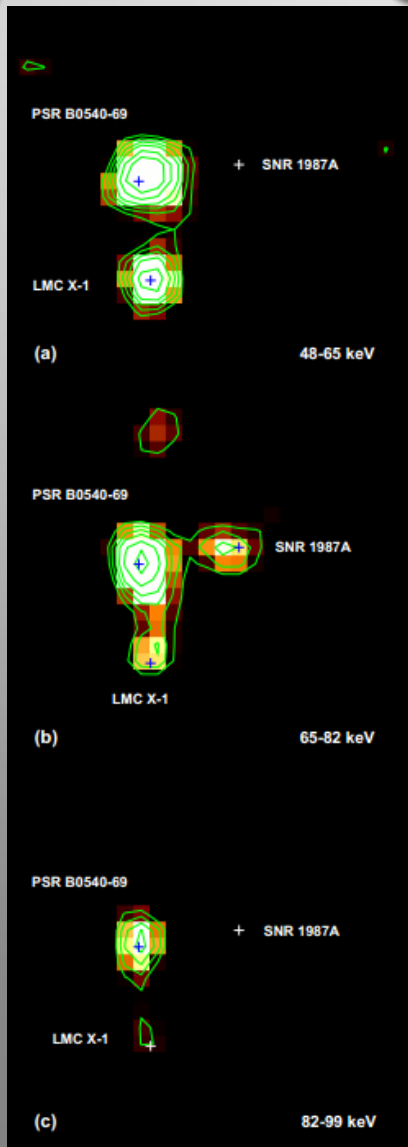
На ранних стадиях также могут быть дополнительные источники энергии.



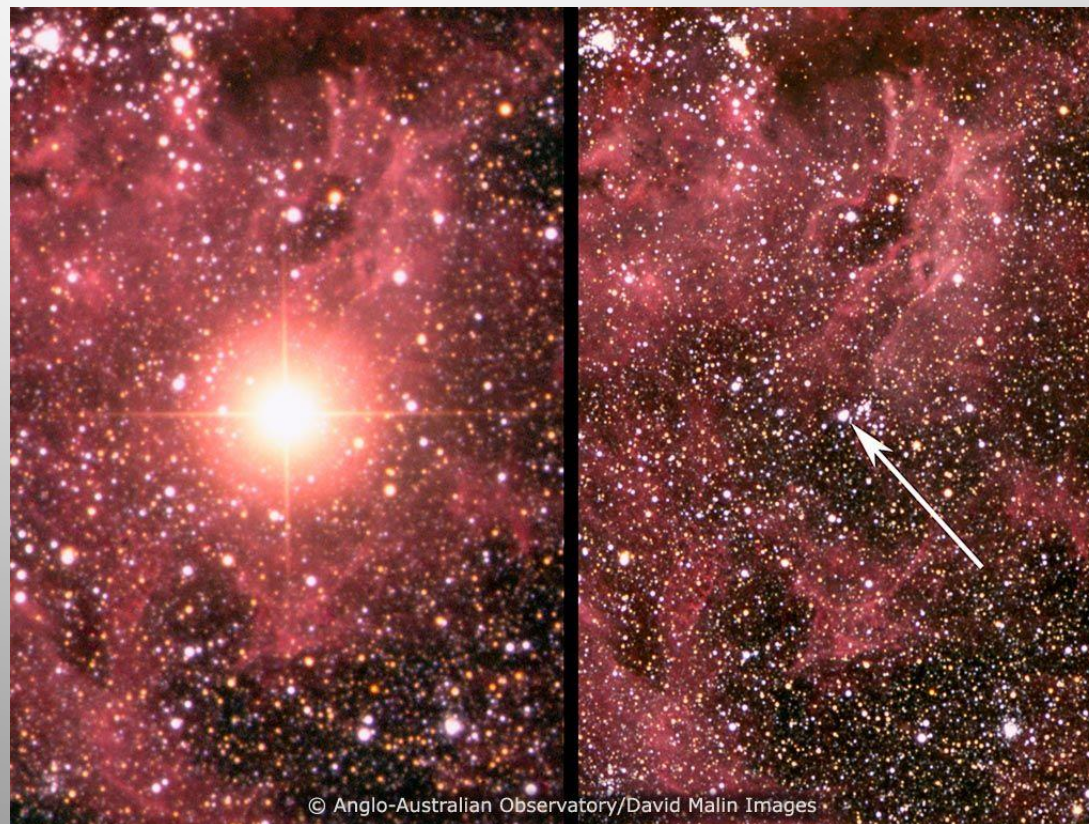
Bersten et al.

# ТИТАН В СВЕРХНОВОЙ 1987А

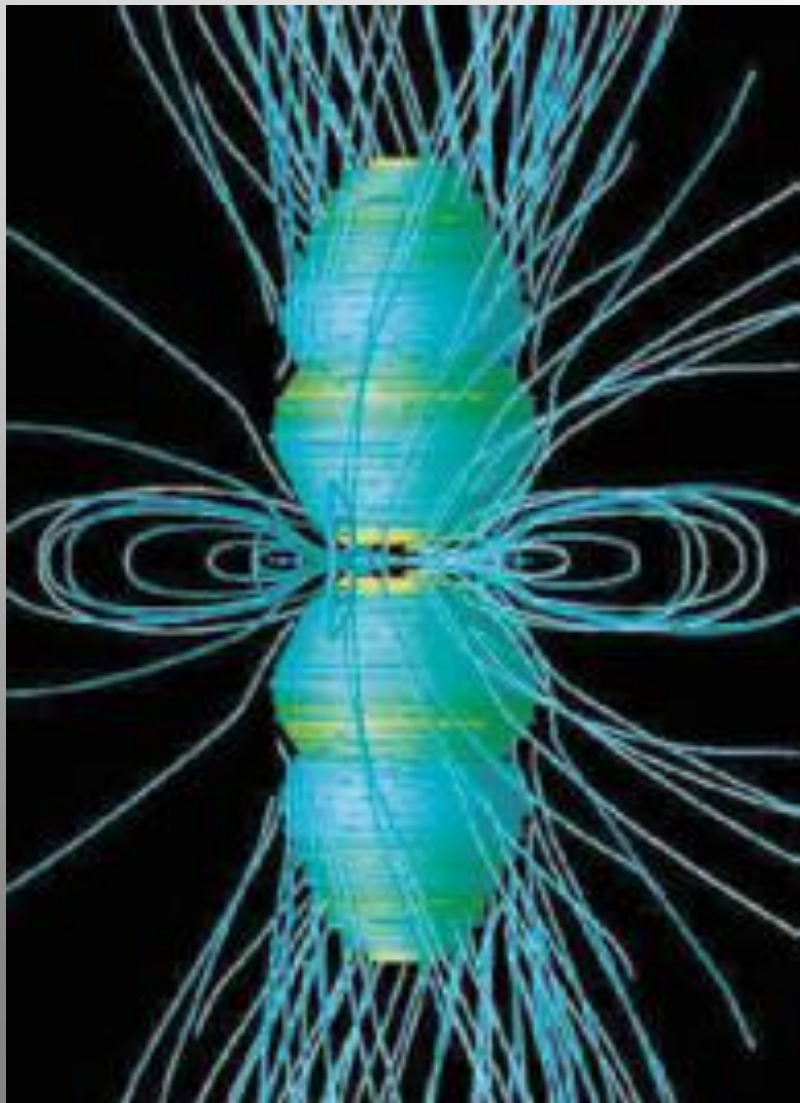
Наблюдения на спутнике INTEGRAL позволили обнаружить излучение от распада титана-44 в остатке сверхновой 1987А.



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



# ПРОГРЕСС В ИЗУЧЕНИИ СВЕРХНОВЫХ



## Теория

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



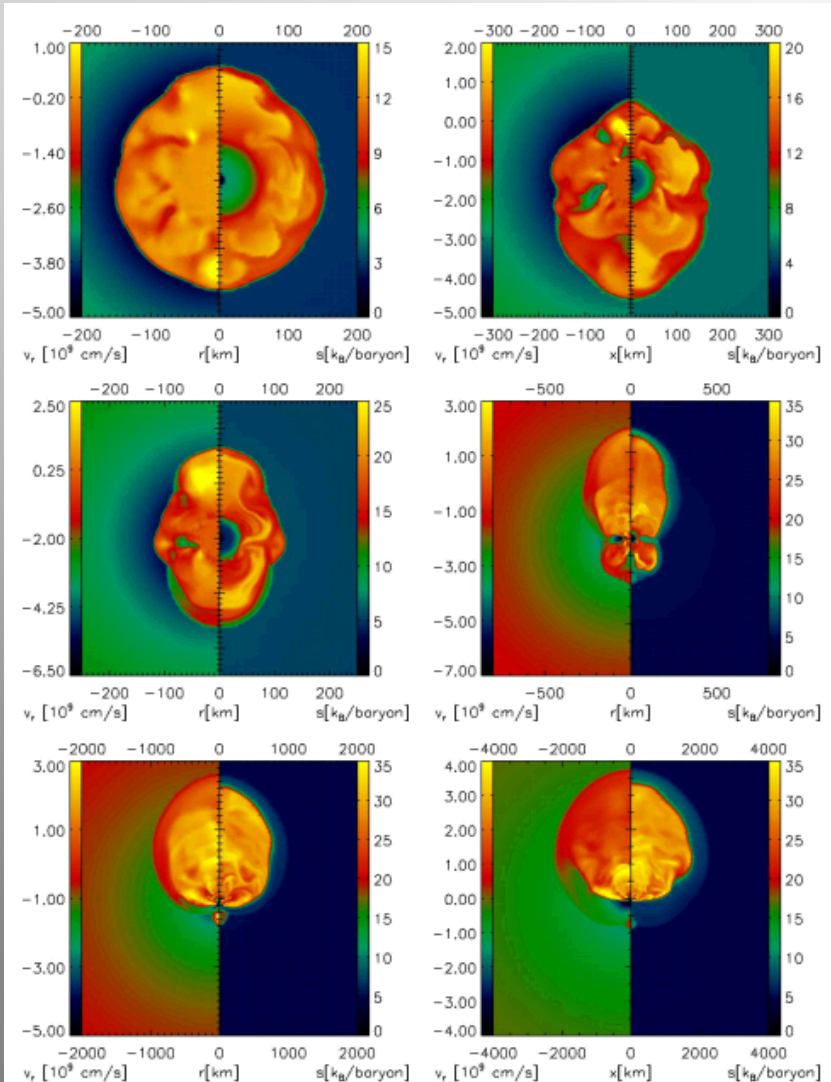
## Наблюдения

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

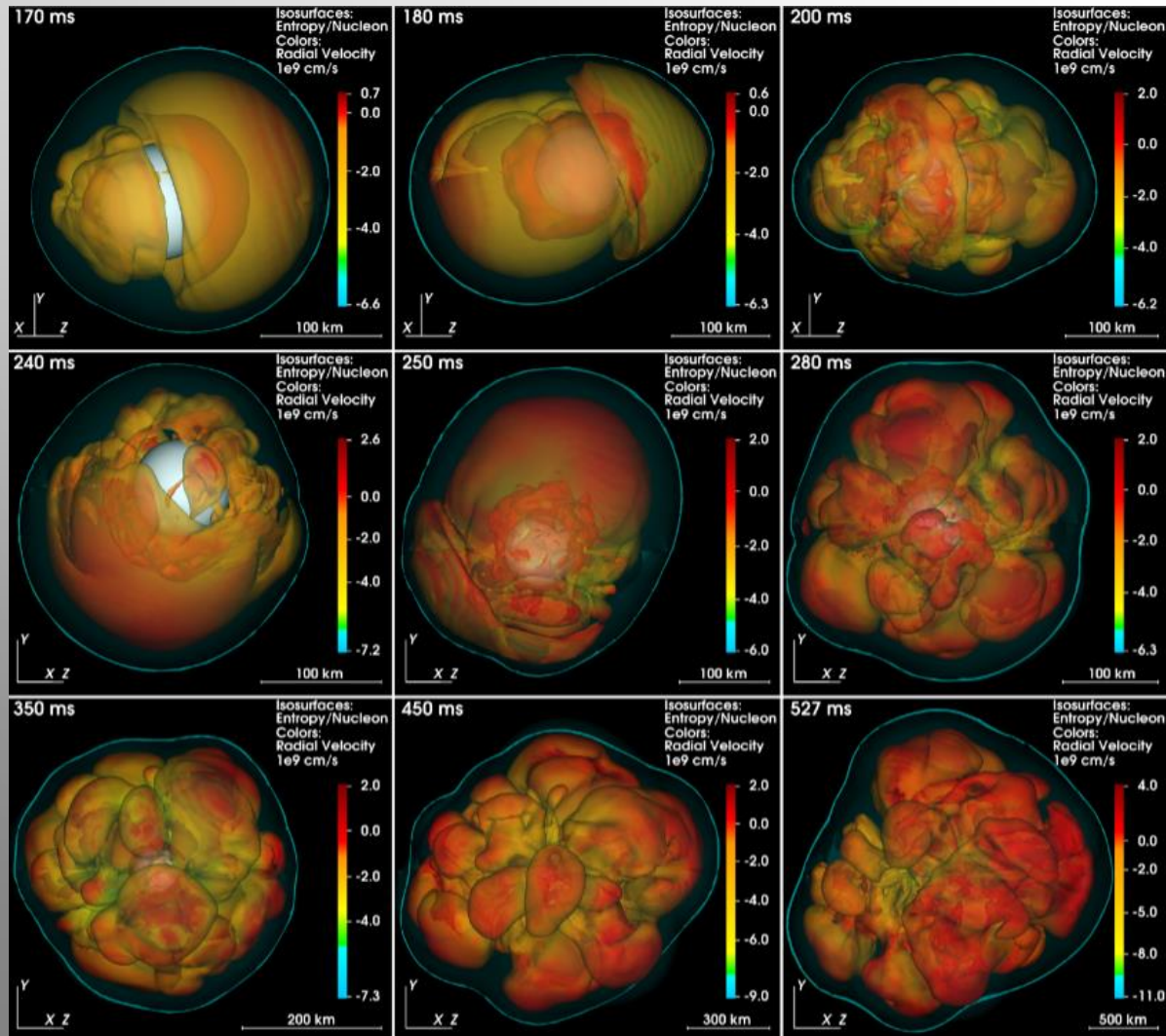
# НАКОНЕЦ-ТО СВЕРХНОВАЯ ВЗОРВАЛАСЬ В КОМПЬЮТЕРЕ!

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

Но в трехмерных расчетах не все так хорошо.



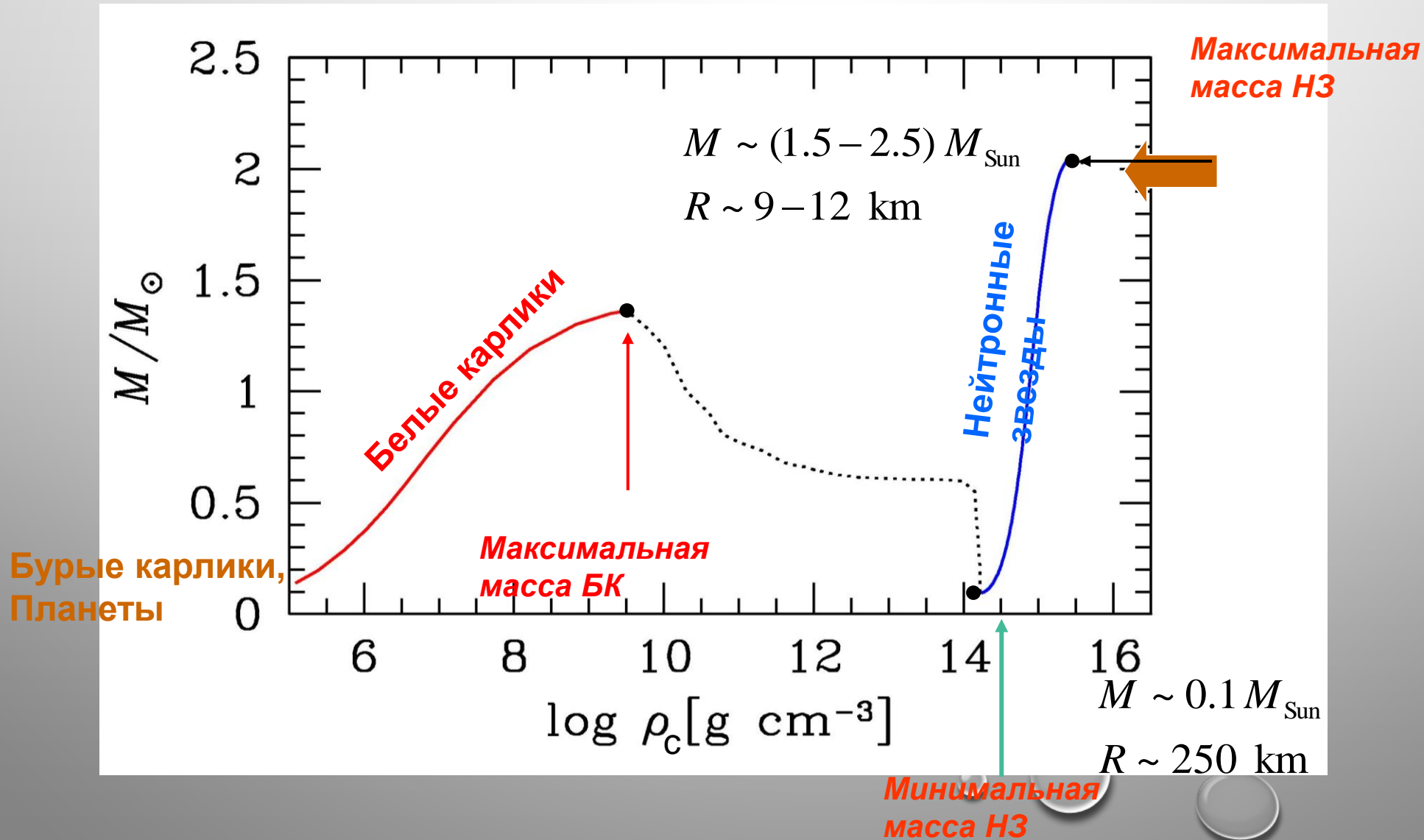
# СТРАННЫЕ КВАРКИ И СВЕРХНОВЫЕ



Авторы добавили в расчеты процессы с участием странных кварков.

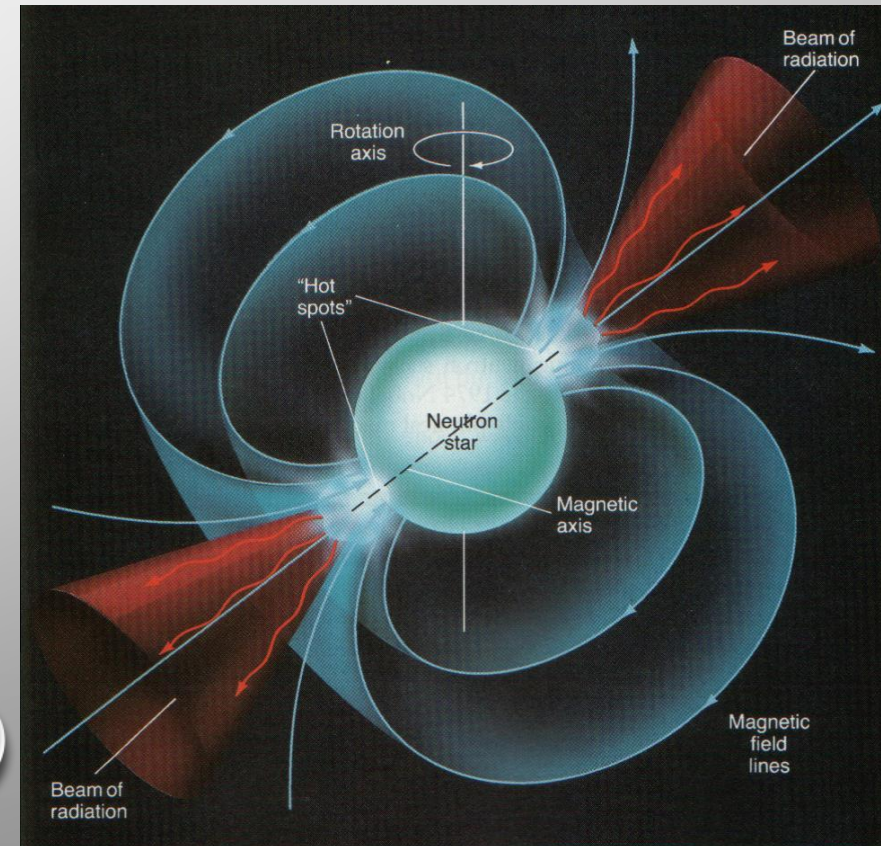
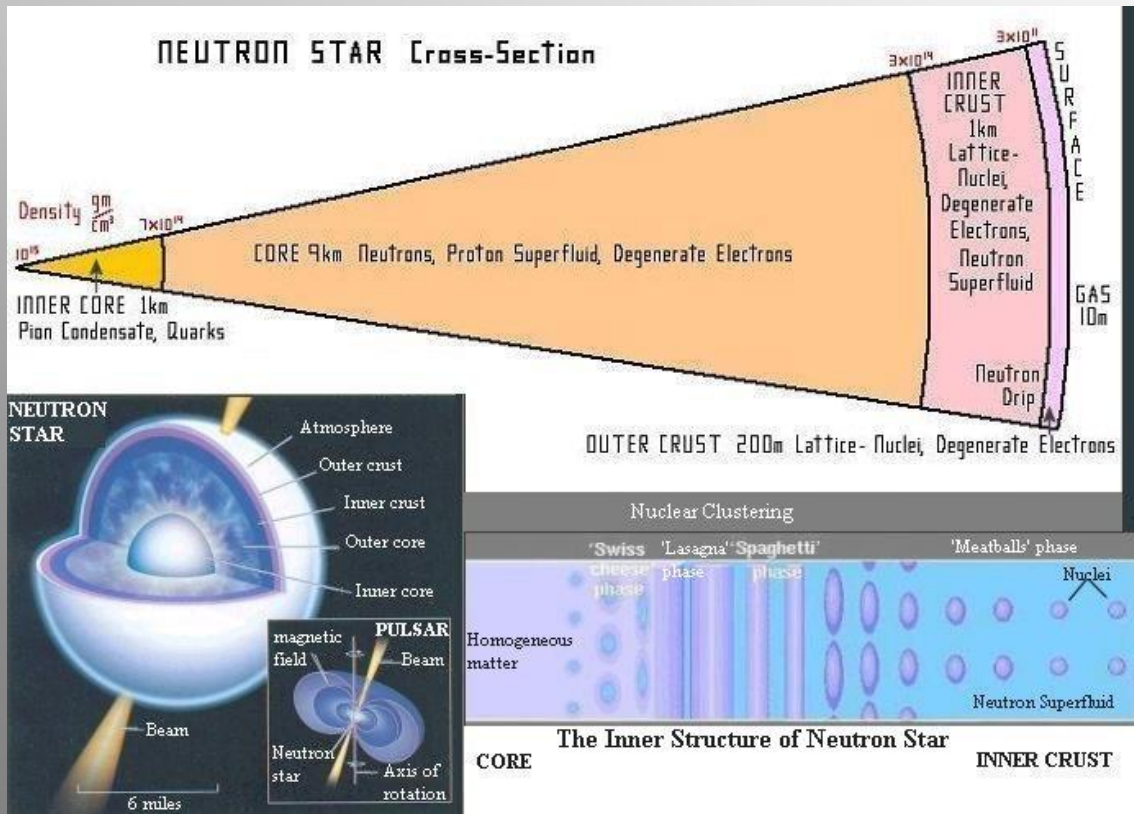
Это помогло взорвать звезду с массой 20 солнечных в трехмерном (!) расчете.

# 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)



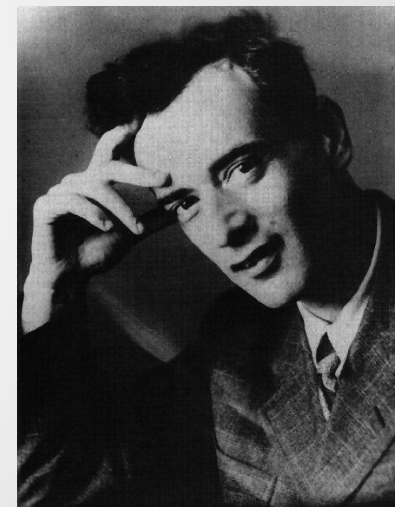


# ПРЕДСКАЗАНИЕ ...

Нейтронные звезды были предсказаны в 30-е гг.

Л.Д. Ландау: Звезда-ядро

Бааде и Цвикки: нейтронные звезды и сверхновые



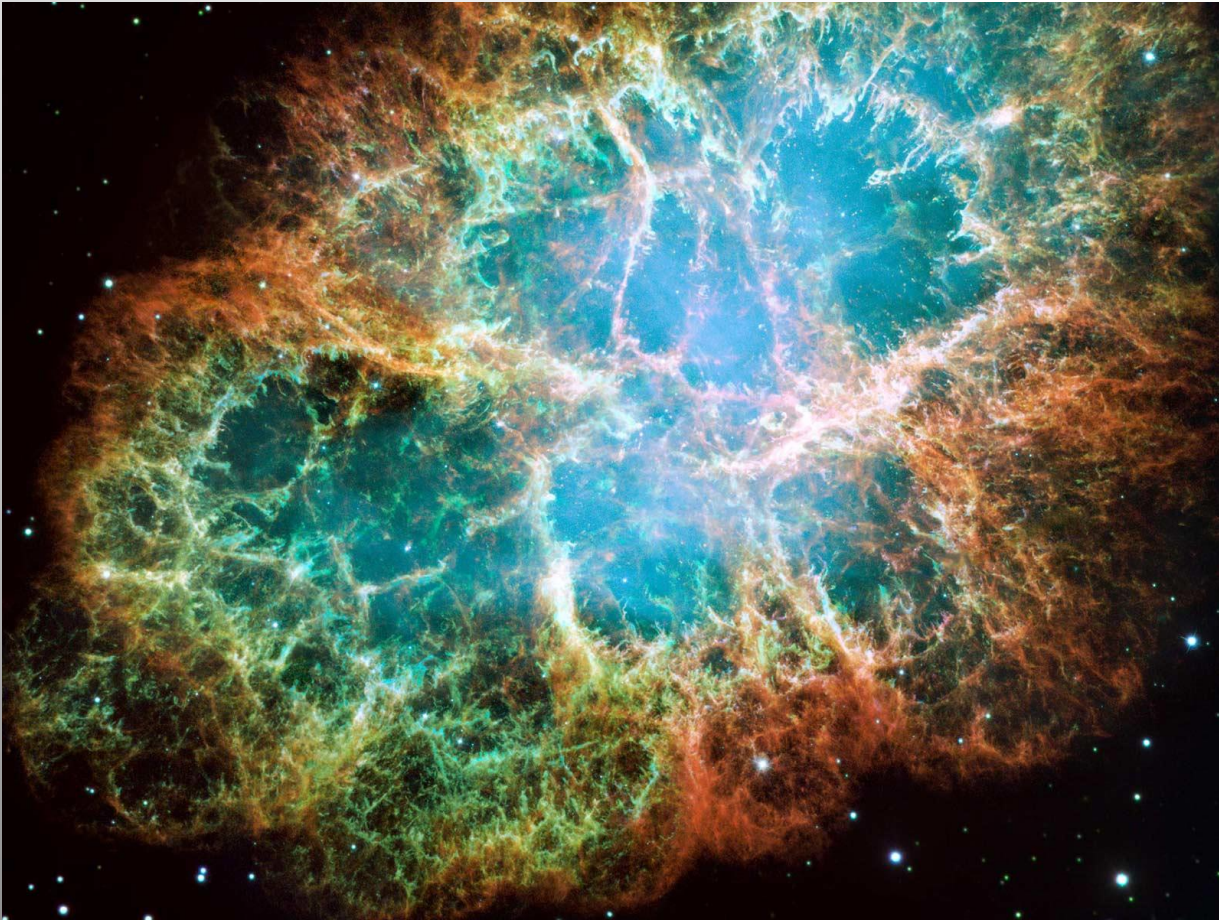
Ландау



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.

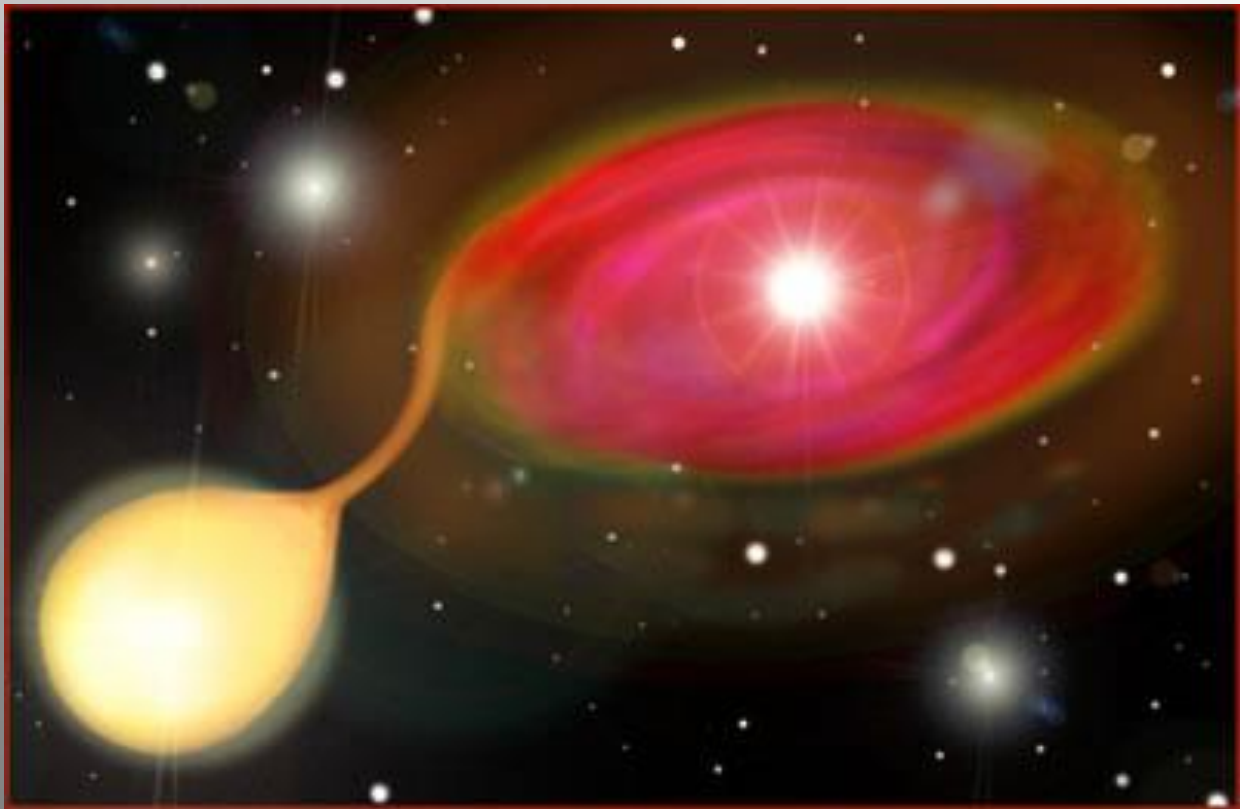
Внутри туманности может  
существовать плерион.

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»....

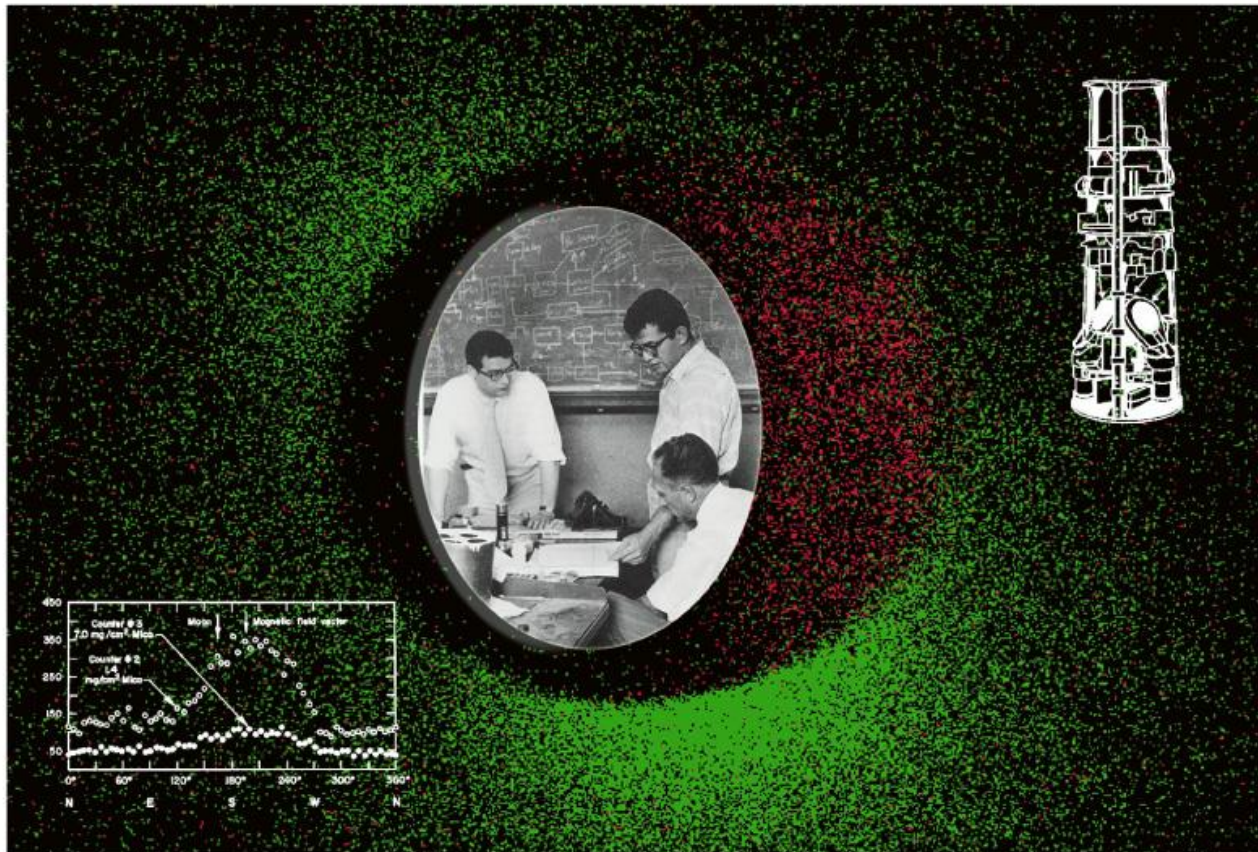


Сейчас известны сотни  
рентгеновских двойных  
с нейтронными звездами  
в нашей и других галактиках.

# 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.

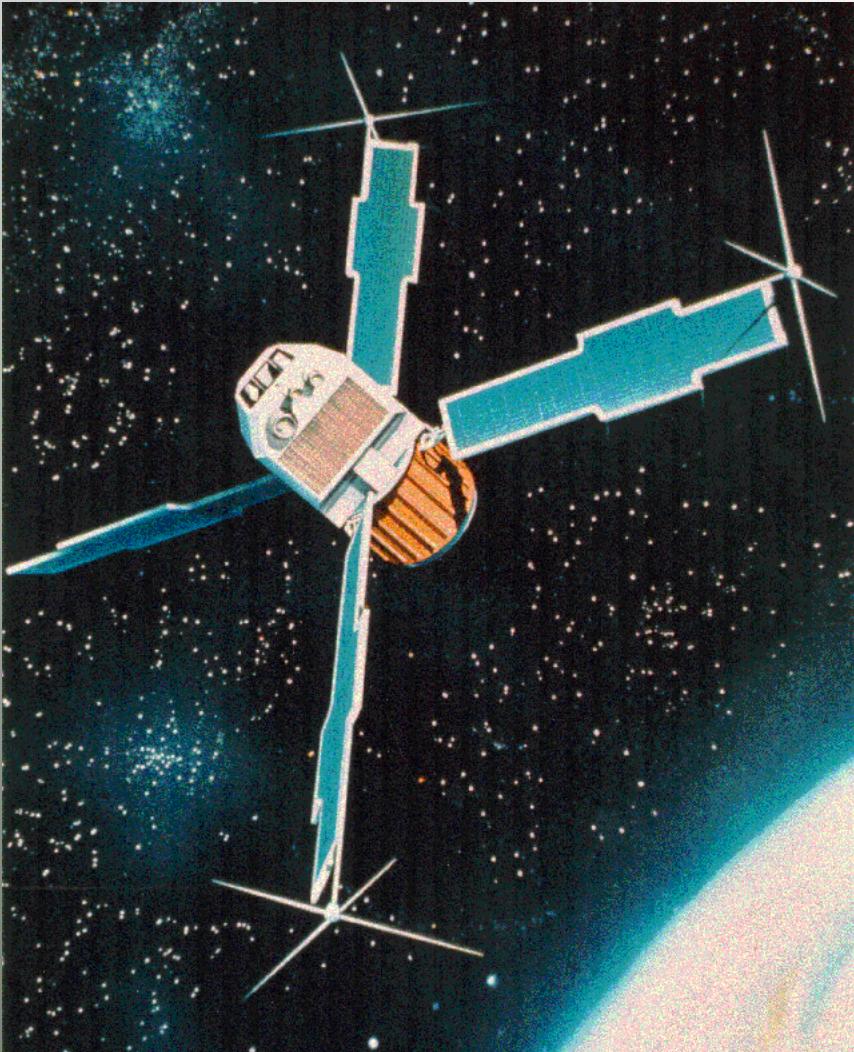
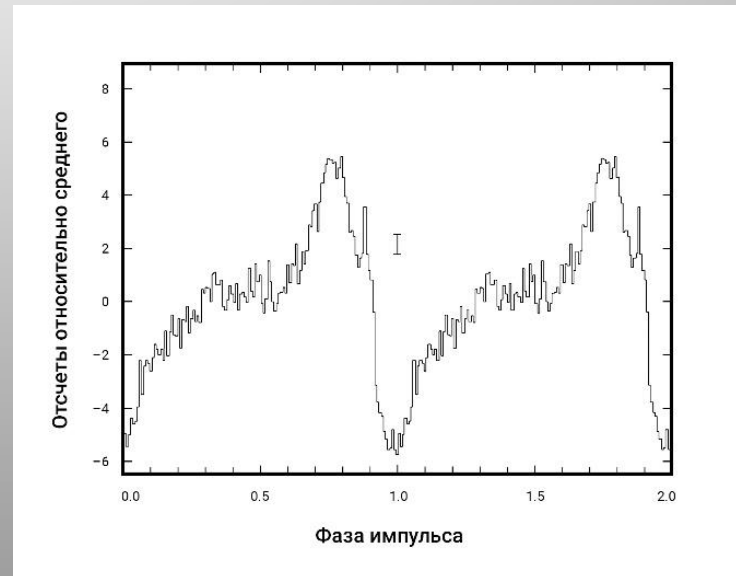
# UHURU

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

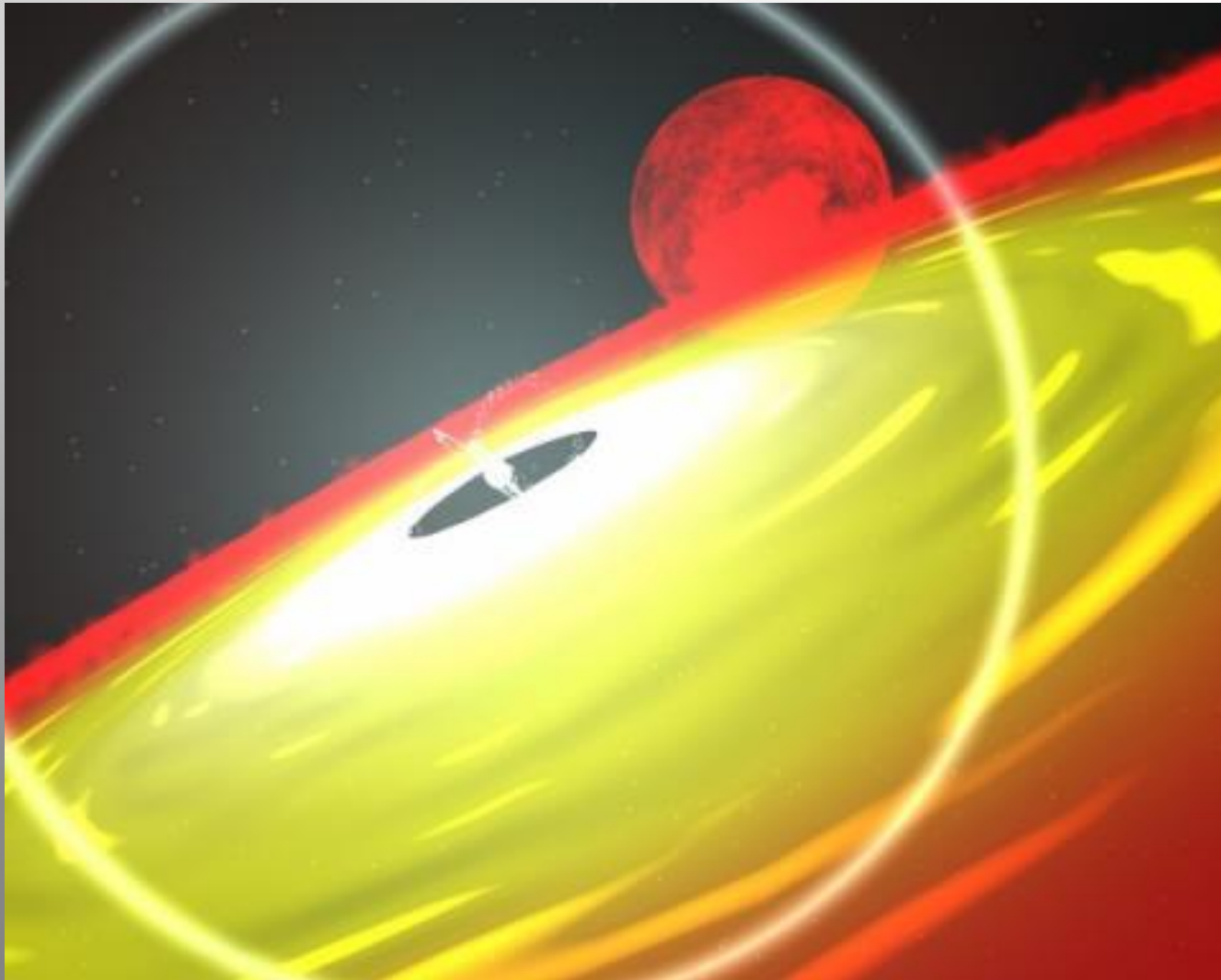
Другое название SAS-1

2-20 кэВ

Первый полный обзор неба.  
339 источника.



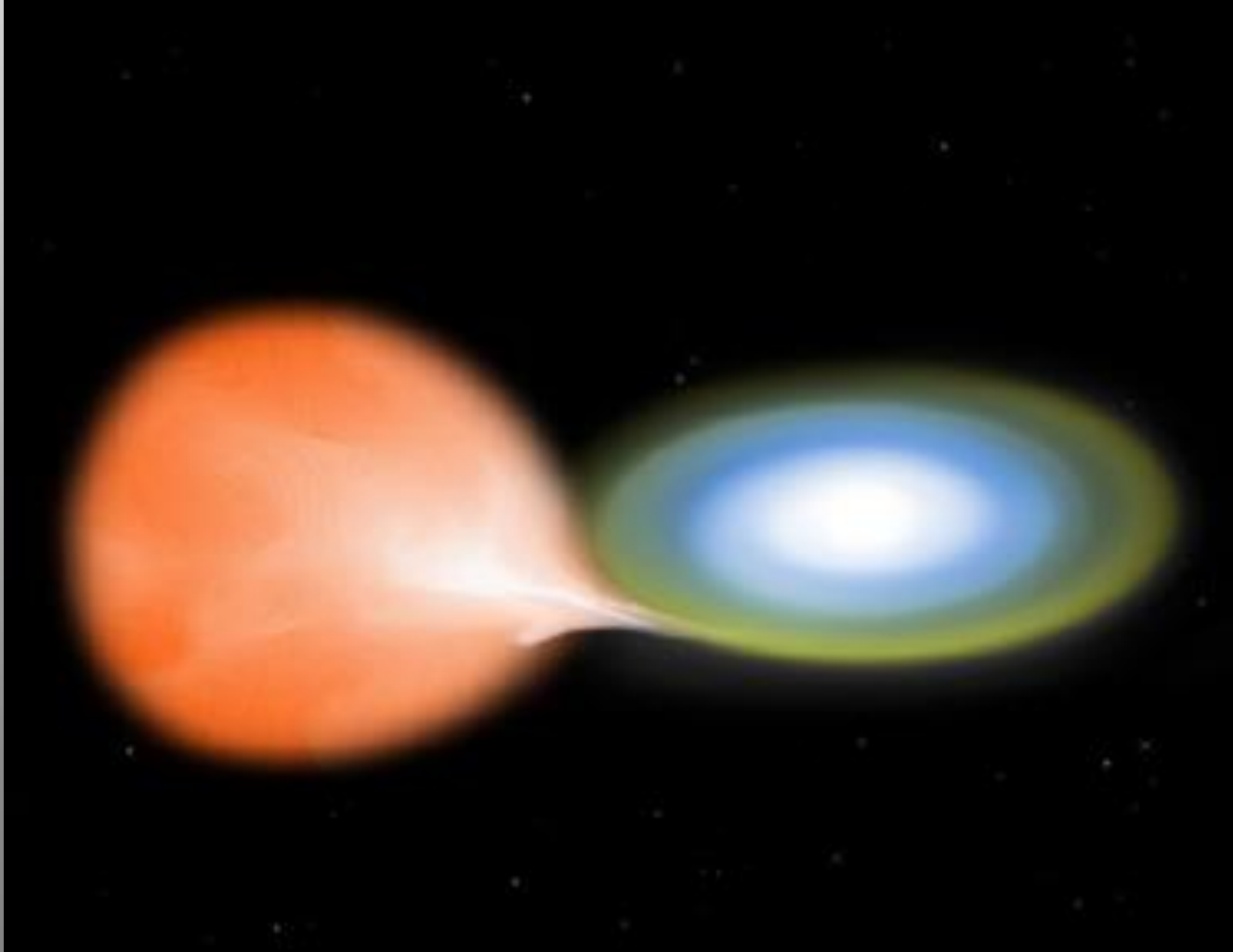
# АККРЕЦИЯ В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ



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  $mc^2$

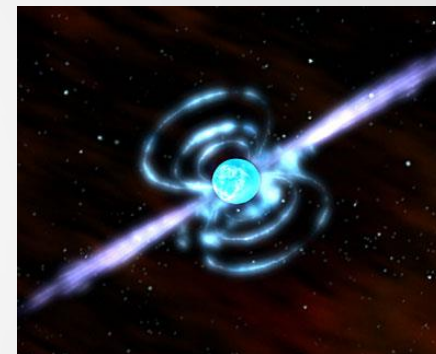
# ТЕСНЫЕ ДВОЙНЫЕ СИСТЕМЫ



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

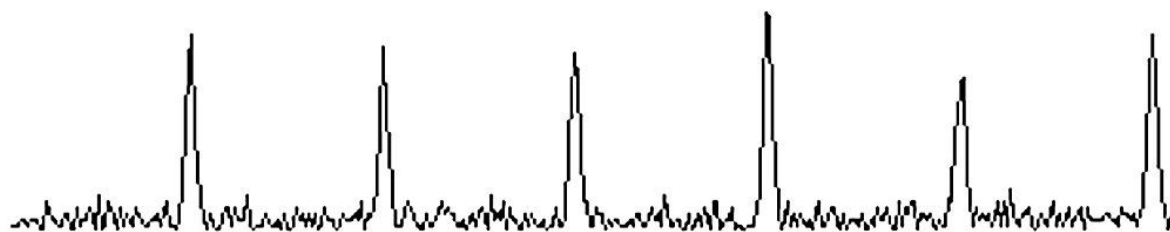
Сейчас в тесных двойных  
системах известны многие  
сотни нейтронных звезд.

# ОТКРЫТИЕ !!!!



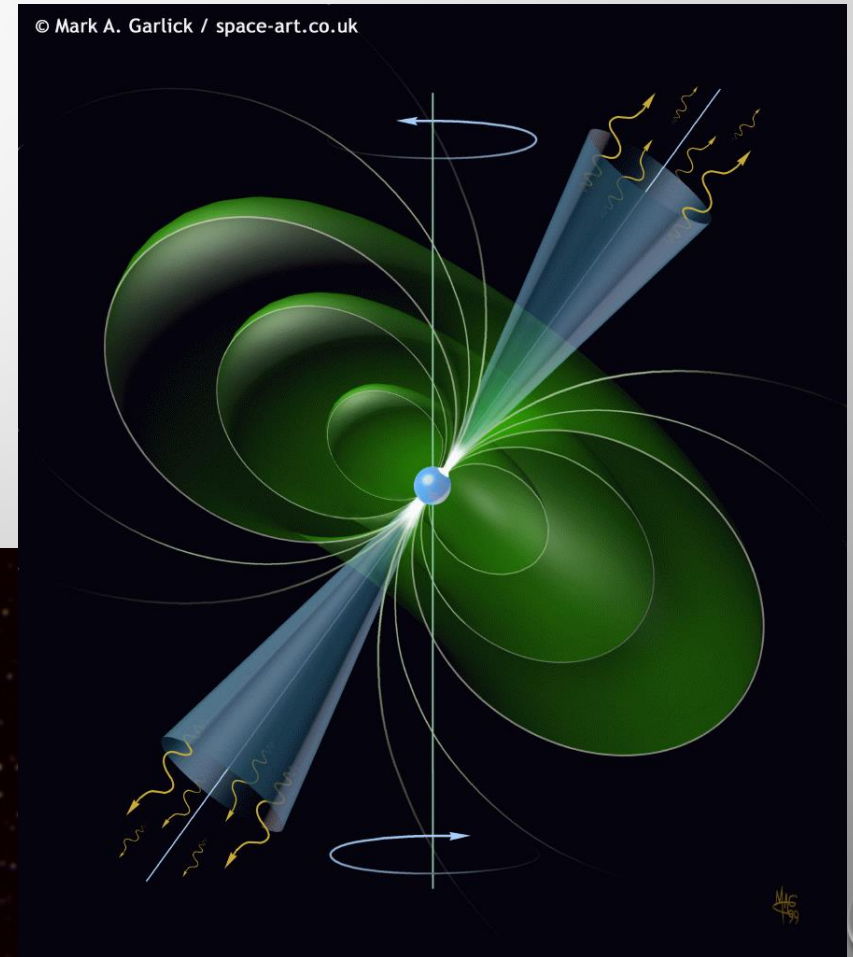
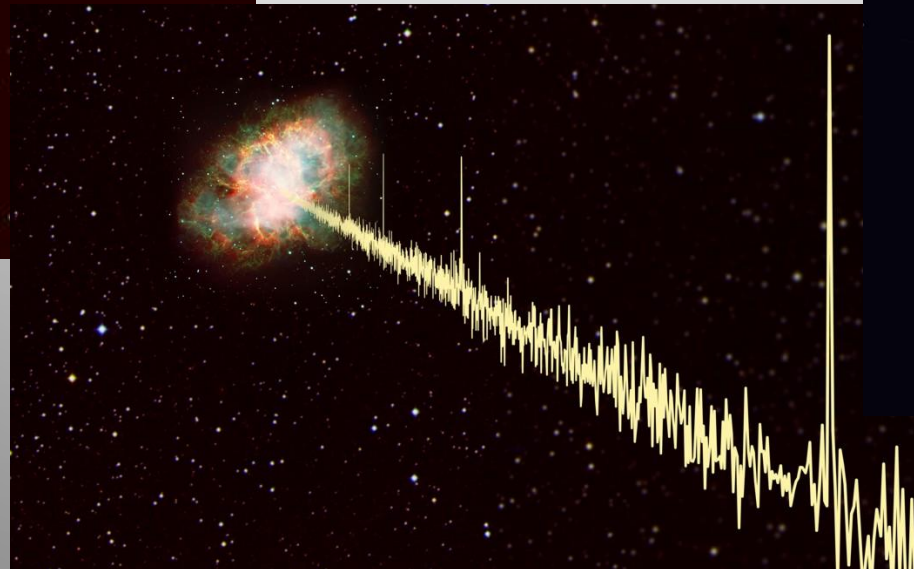
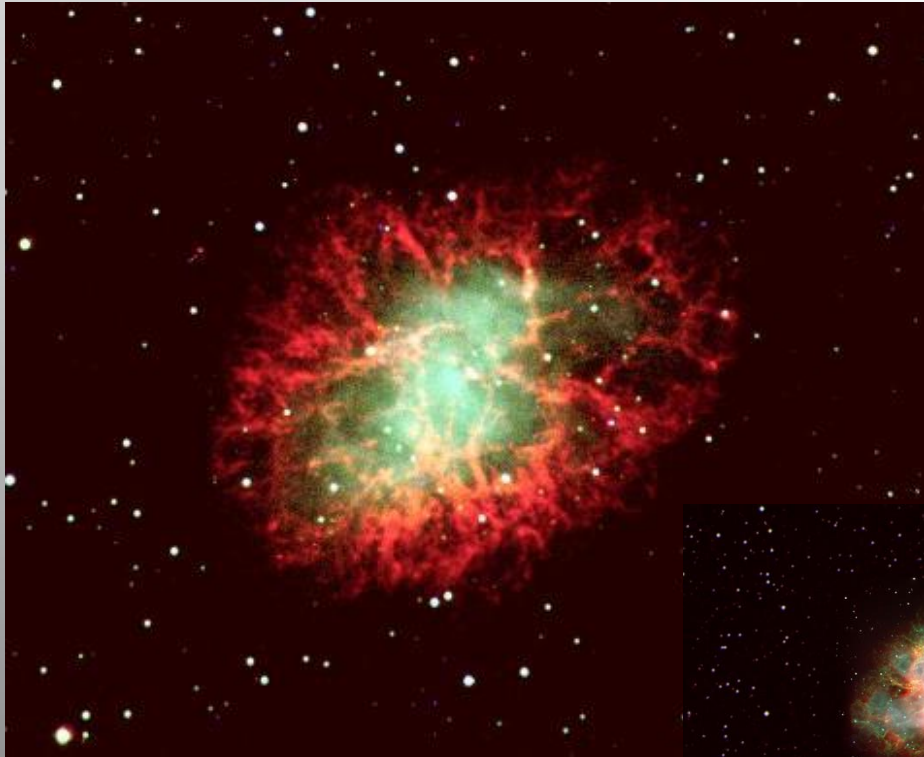
1967: Джоселин Белл. Радиопульсары.

Серендипическое открытие.

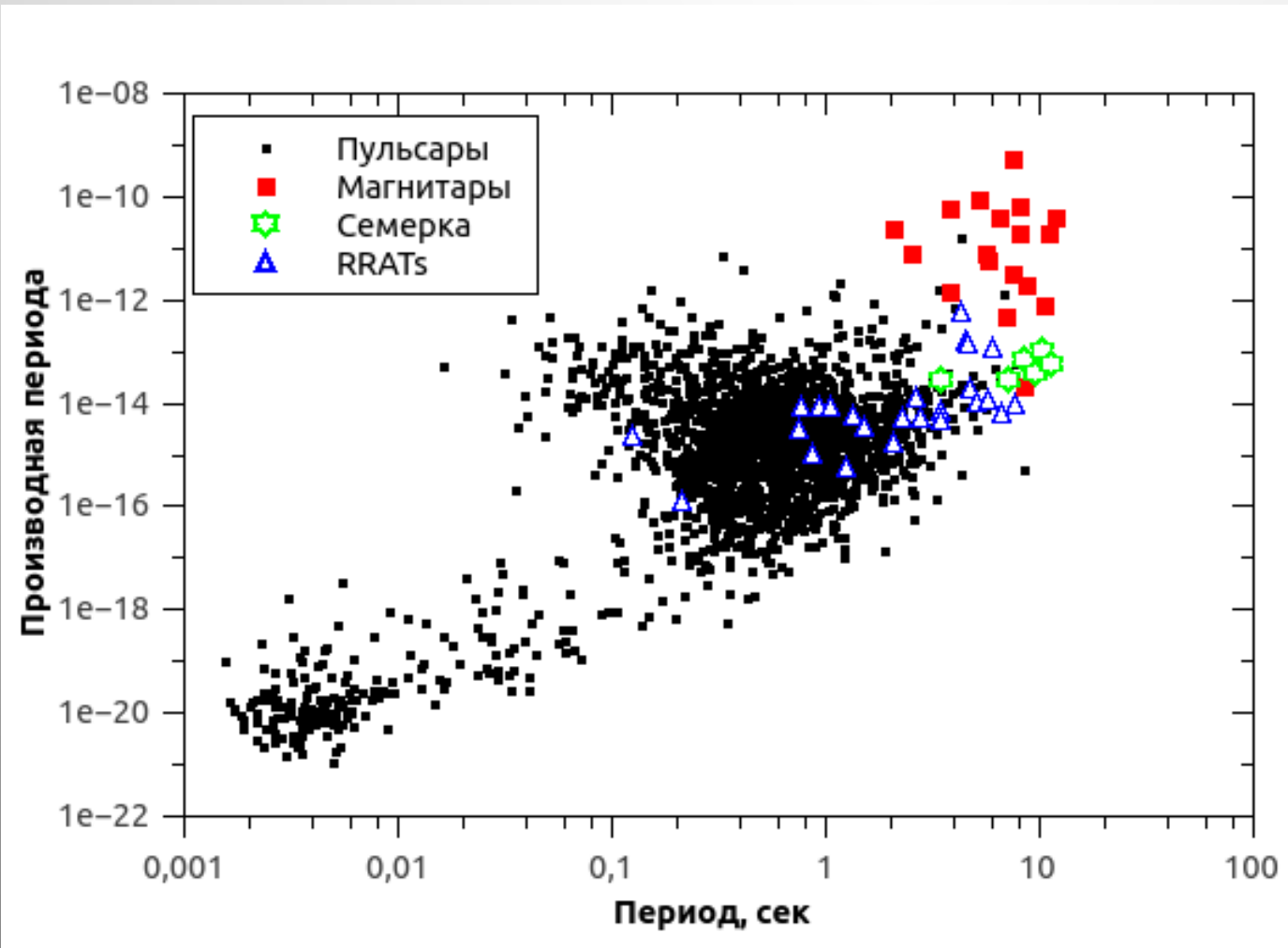




# ПУЛЬСАР В КРАБОВИДНОЙ ТУМАННОСТИ

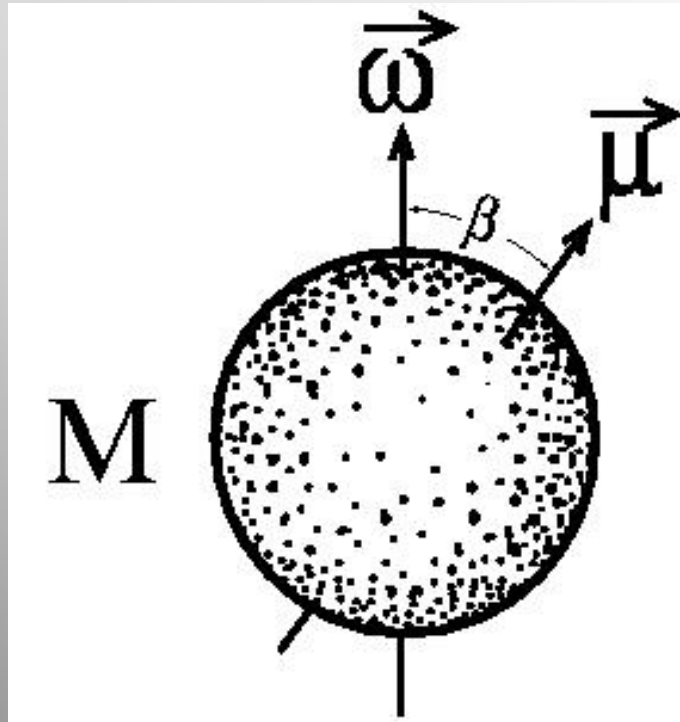


# ДИАГРАММА ПЕРИОД - ПРОИЗВОДНАЯ ПЕРИОДА



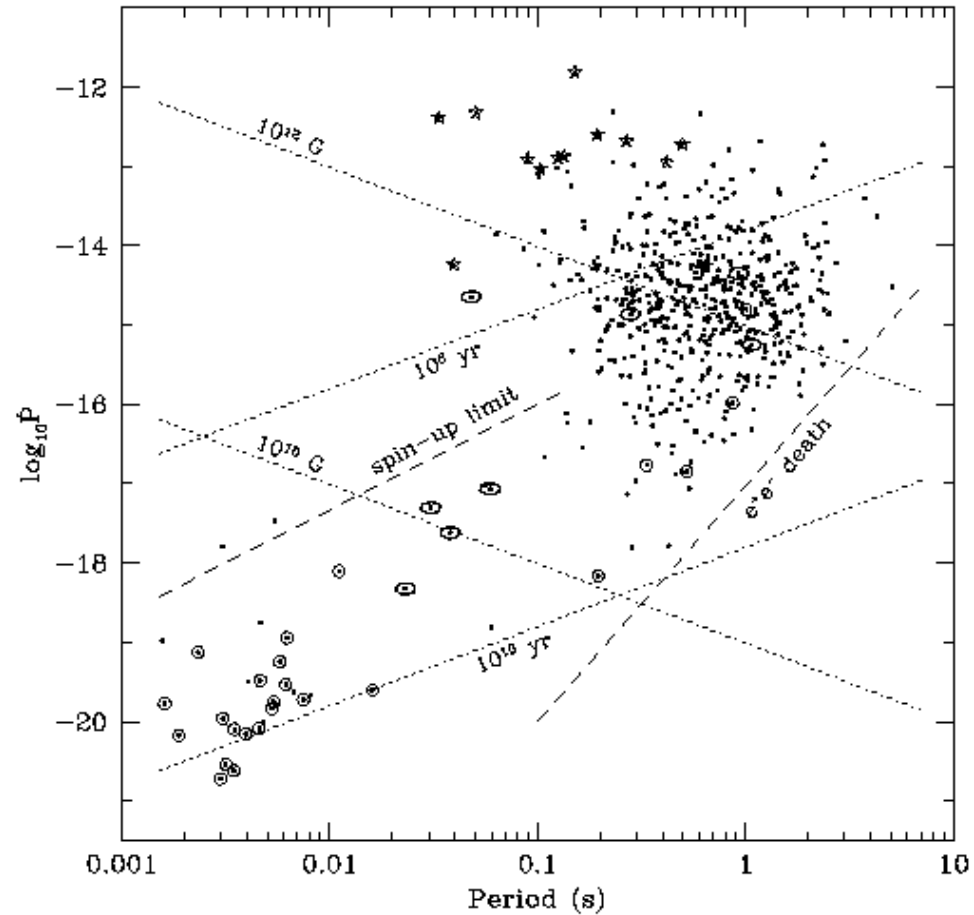
На диаграмме представлены только прямо наблюдаемые величины, которые легко и очень точно измеряются.

# МАГНИТНЫЙ РОТАТОР

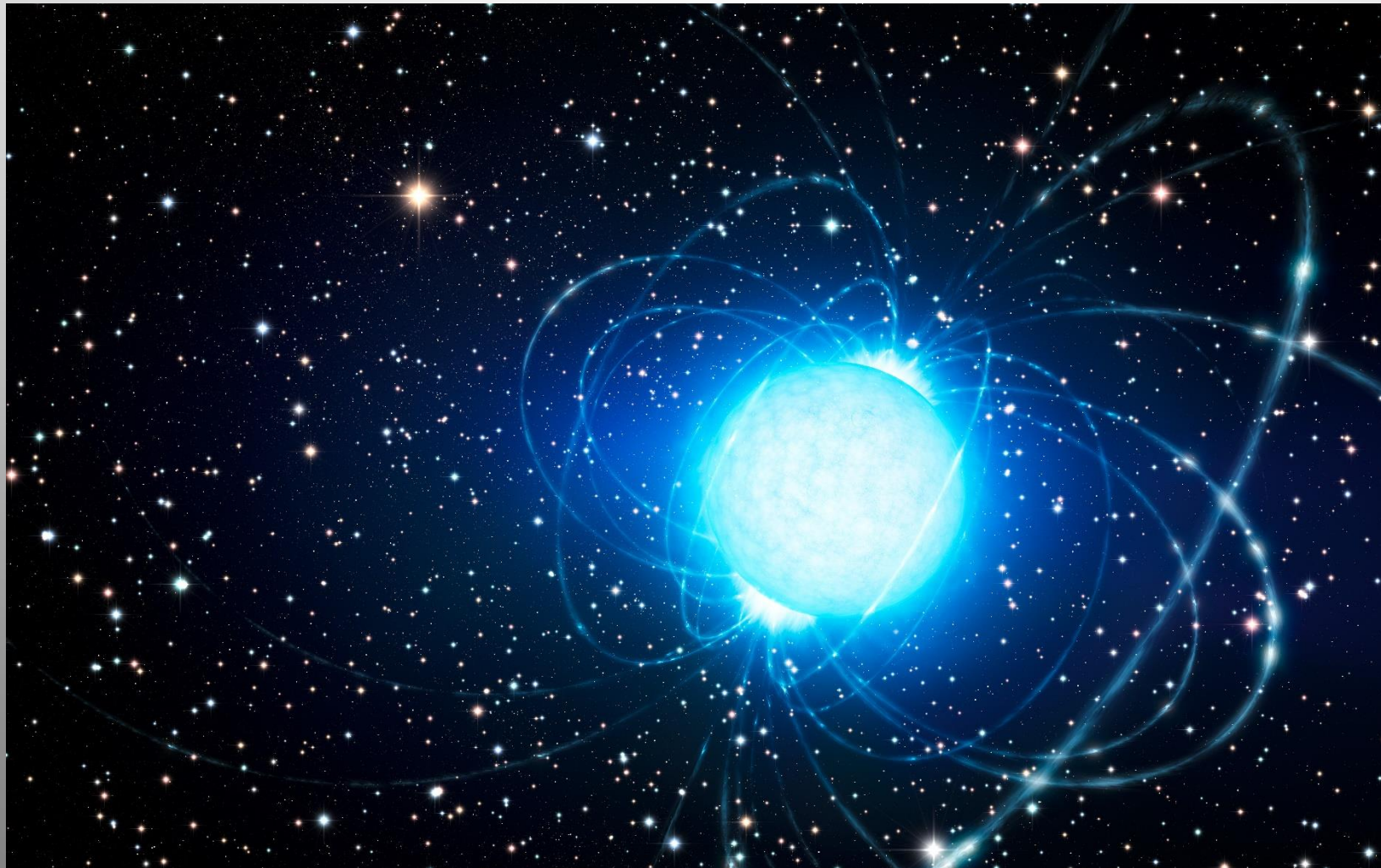


$$L_m = \frac{2}{3} \frac{\mu^2 \omega^4}{c^3} \sin^2 \beta = \kappa_t \frac{\mu^2}{R_t^3} \omega,$$

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



# МАГНИТНОЕ ПОЛЕ И ВРАЩЕНИЕ

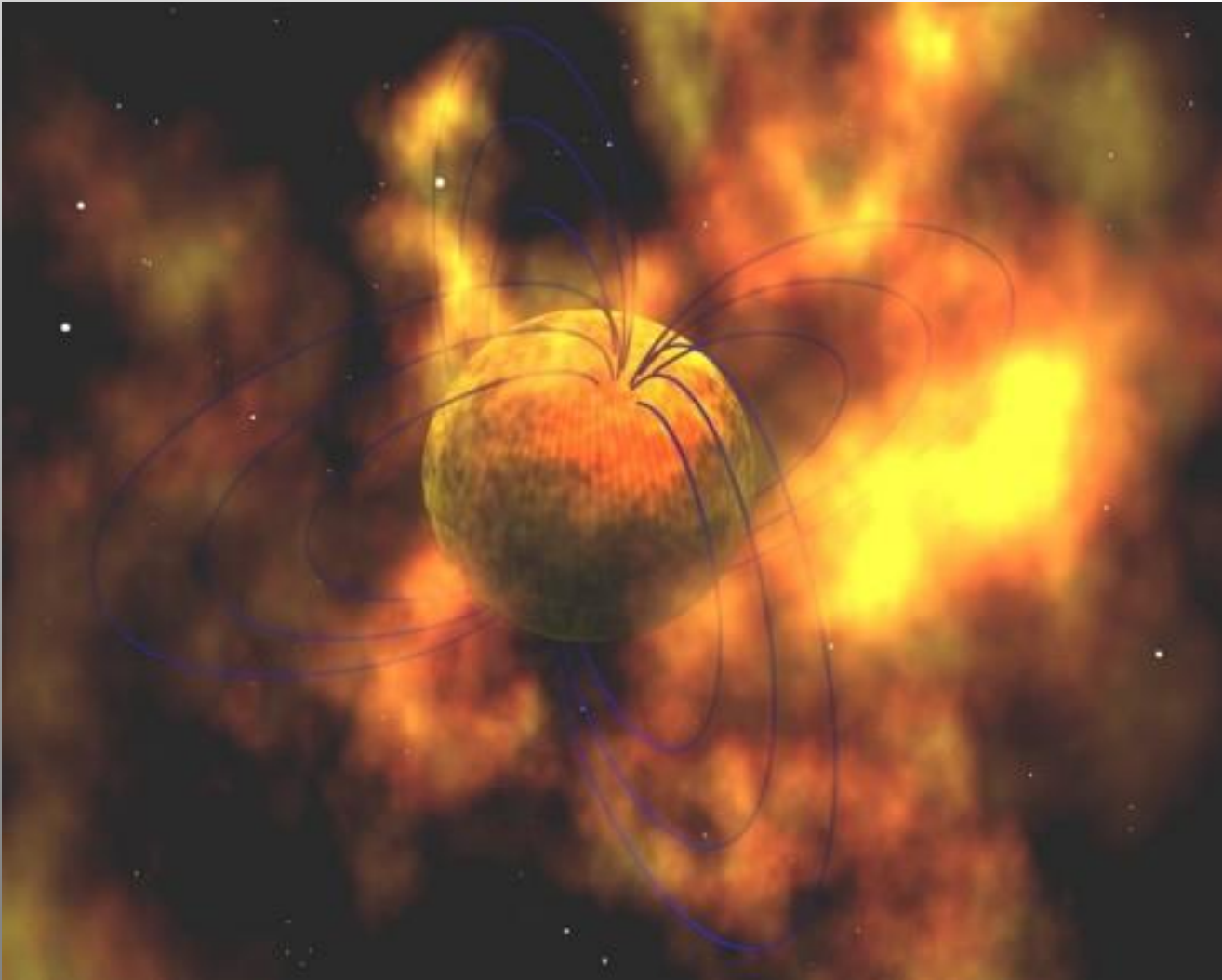


$$t_p = \frac{2\tau_c}{n-1} \left[ 1 - \left( \frac{P_0}{P} \right)^{n-1} \right]$$

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...

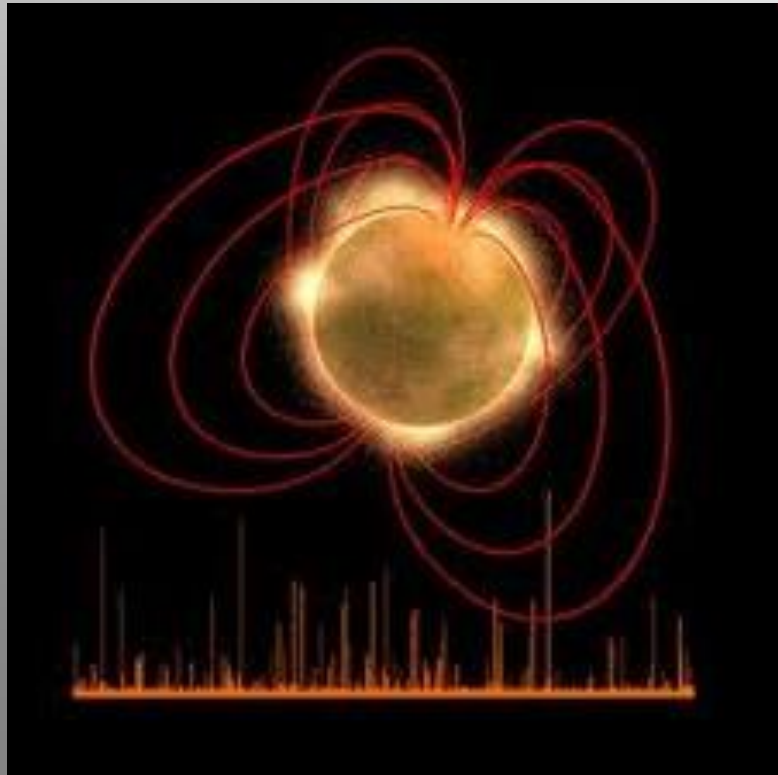
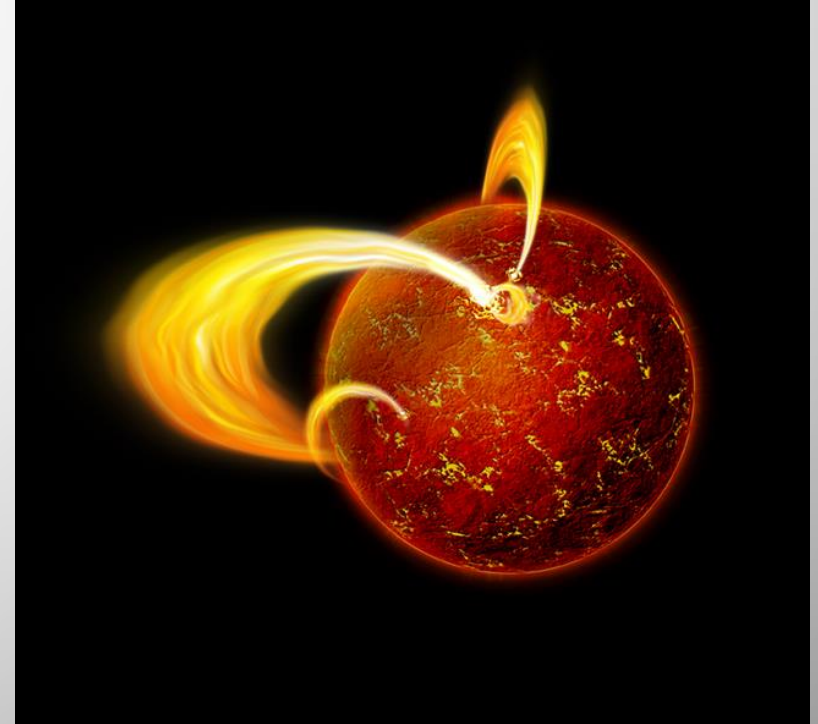
# МАГНИТАРЫ

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

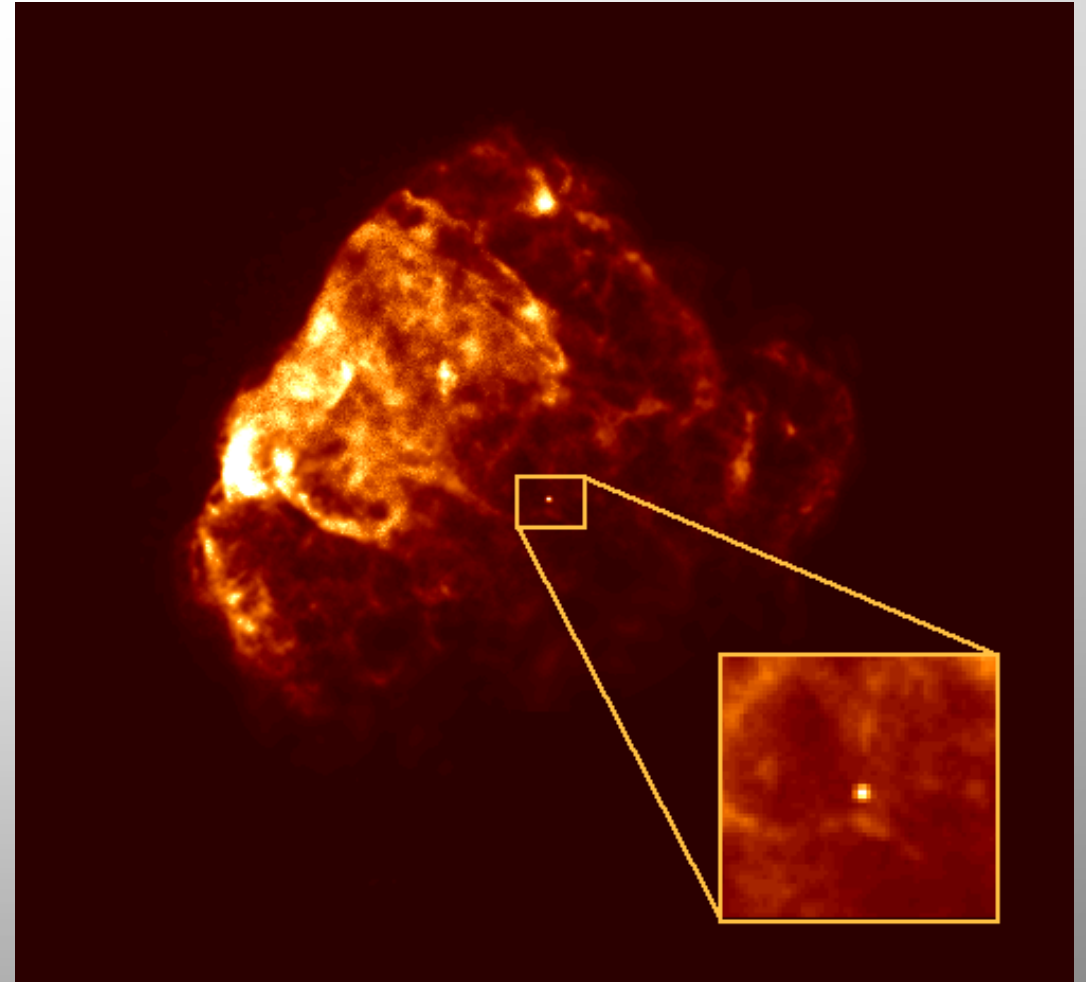
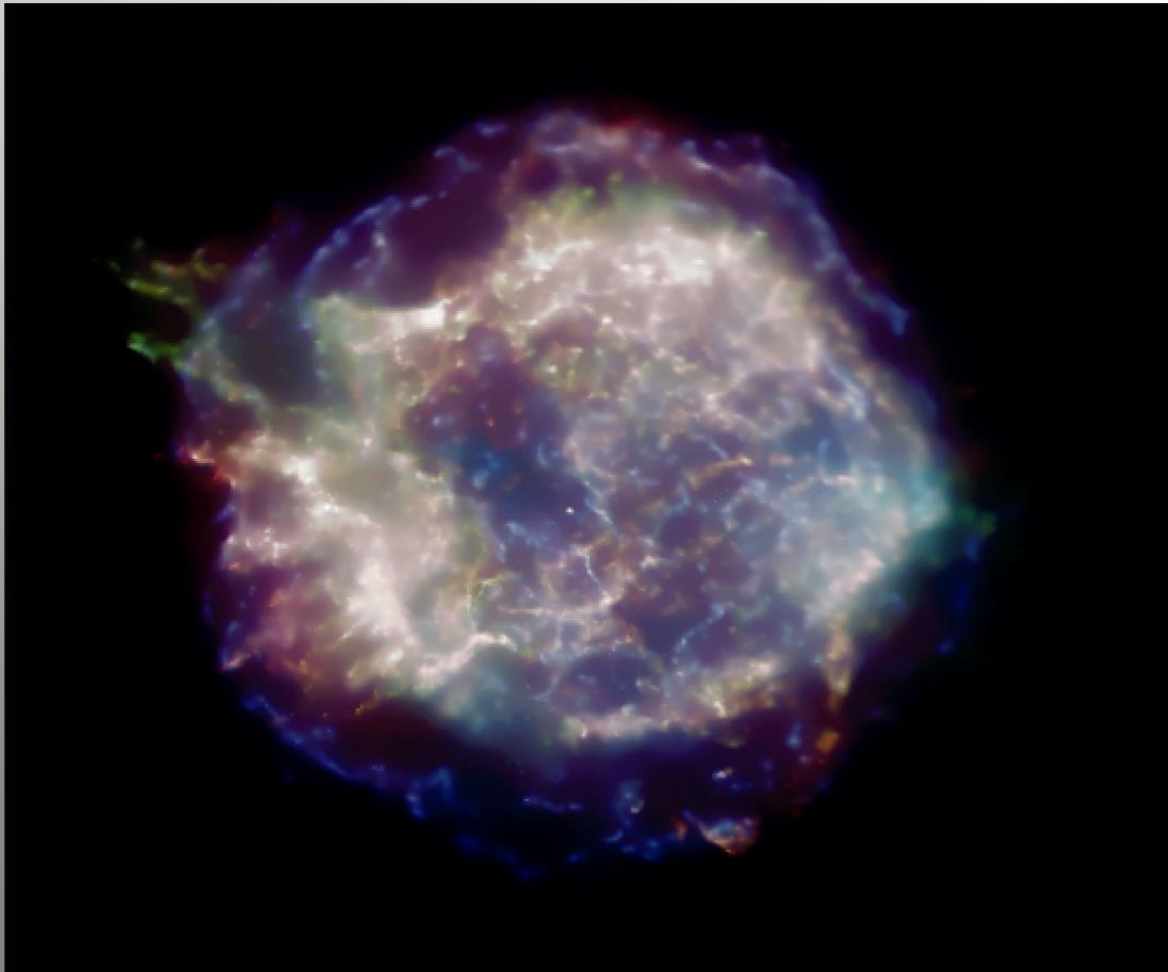
Основными кандидатами в магнитары являются аномальные рентгеновские пульсары и источники мягких повторяющихся гамма-всплесков.

**Магнитные поля  $10^{14}$ – $10^{15}$  Гс**

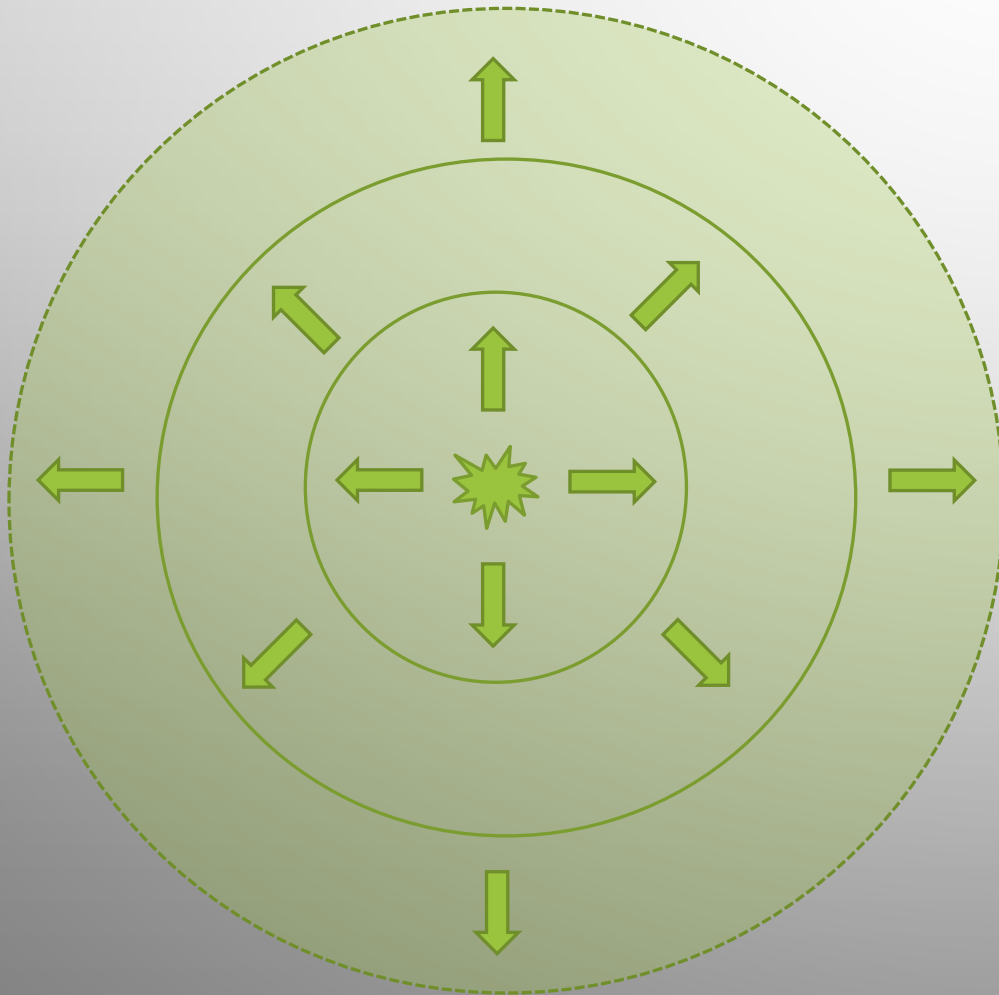
Расходуется энергия магнитного поля. Иногда – постепенно, иногда – в виде вспышек.



# ЦЕНТРАЛЬНЫЕ КОМПАКТНЫЕ ОБЪЕКТЫ В ОСТАТКАХ СВЕРХНОВЫХ



# РАСШИРЕНИЕ ОСТАТКА



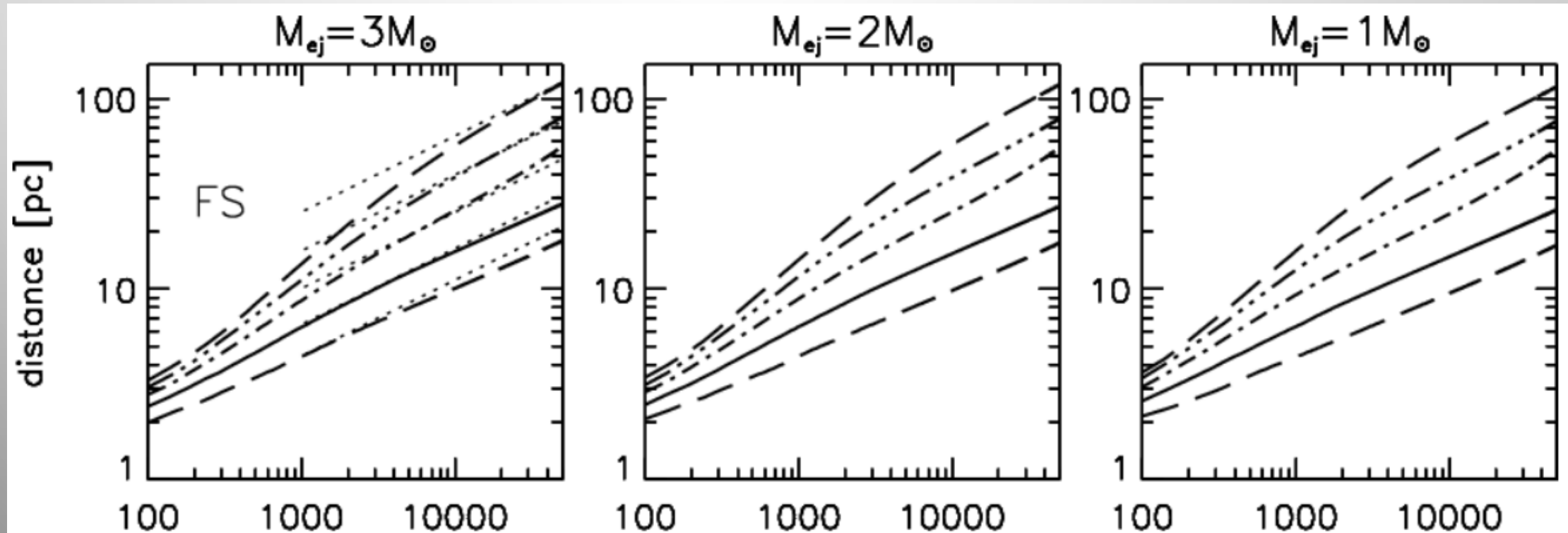
Построены модели для расширения остатков в разной среде.

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



# ЧИСЛЕННЫЕ МОДЕЛИ

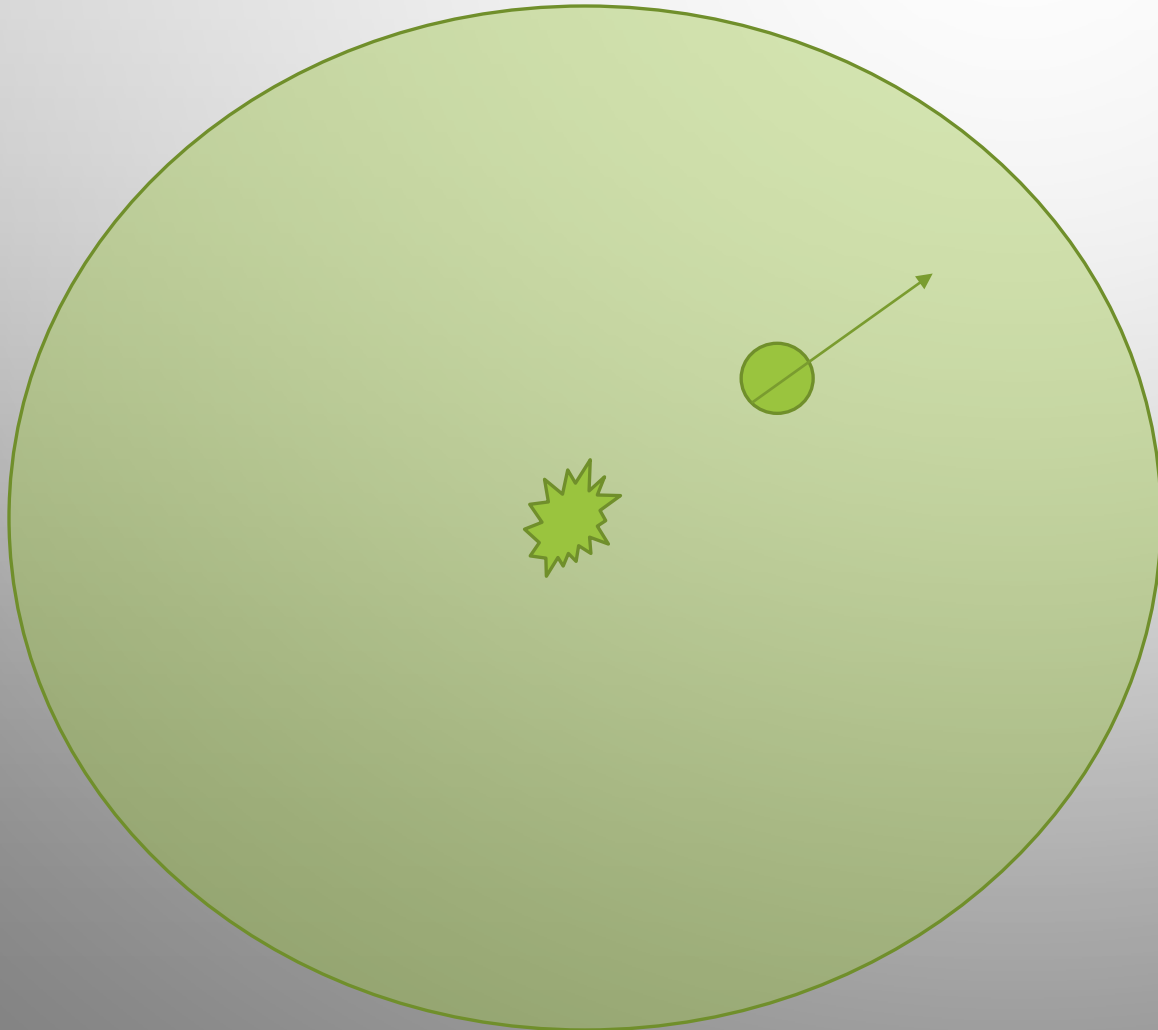
Ferreira, de Jager (2008)



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/см<sup>3</sup>).

Наблюдаемые параметры остатка позволяют оценить его возраст.

# СМЕЩЕНИЕ НЕЙТРОННОЙ ЗВЕЗДЫ

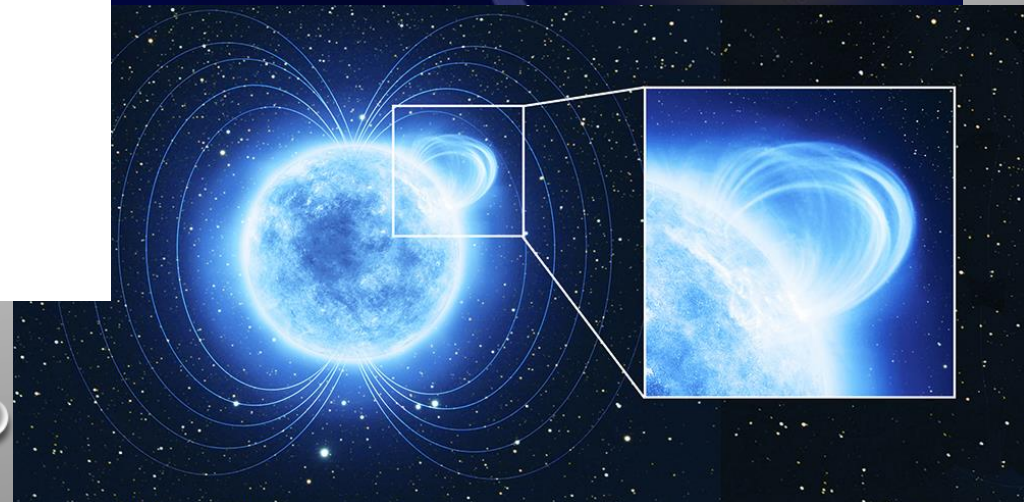
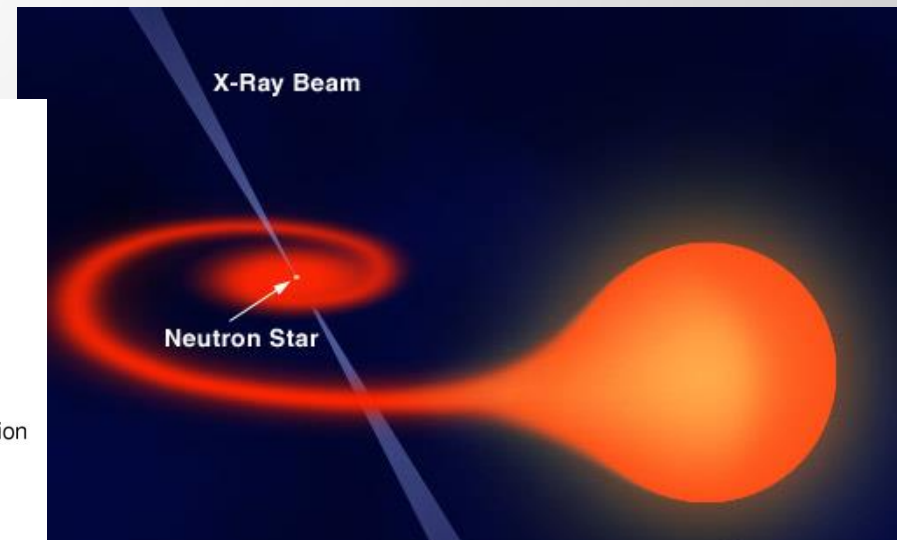
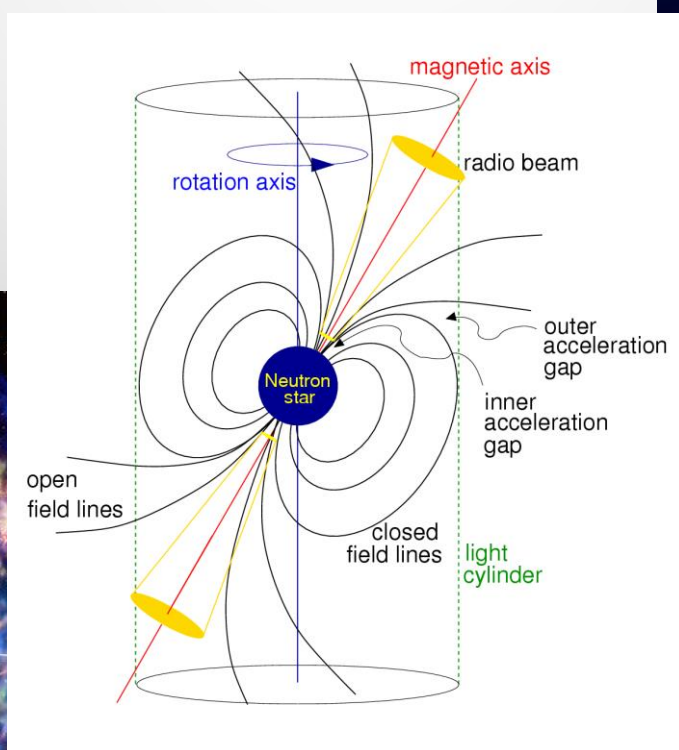
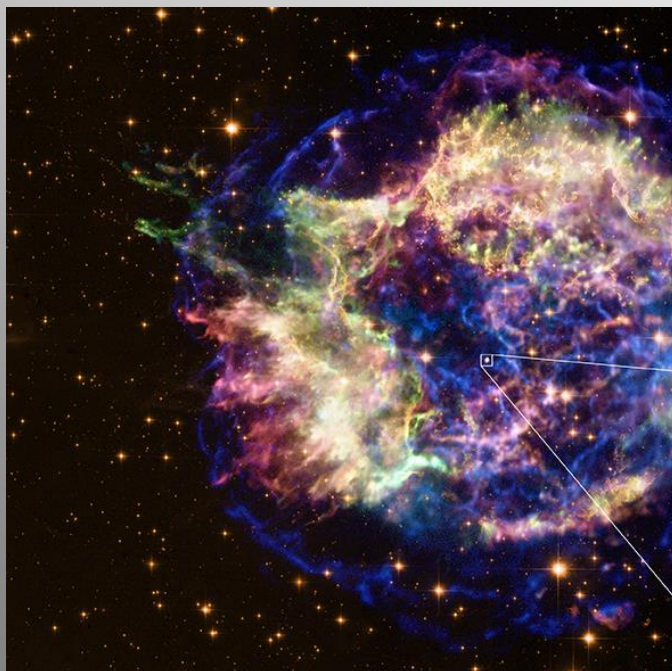


Если можно определить место взрыва,  
то можно:

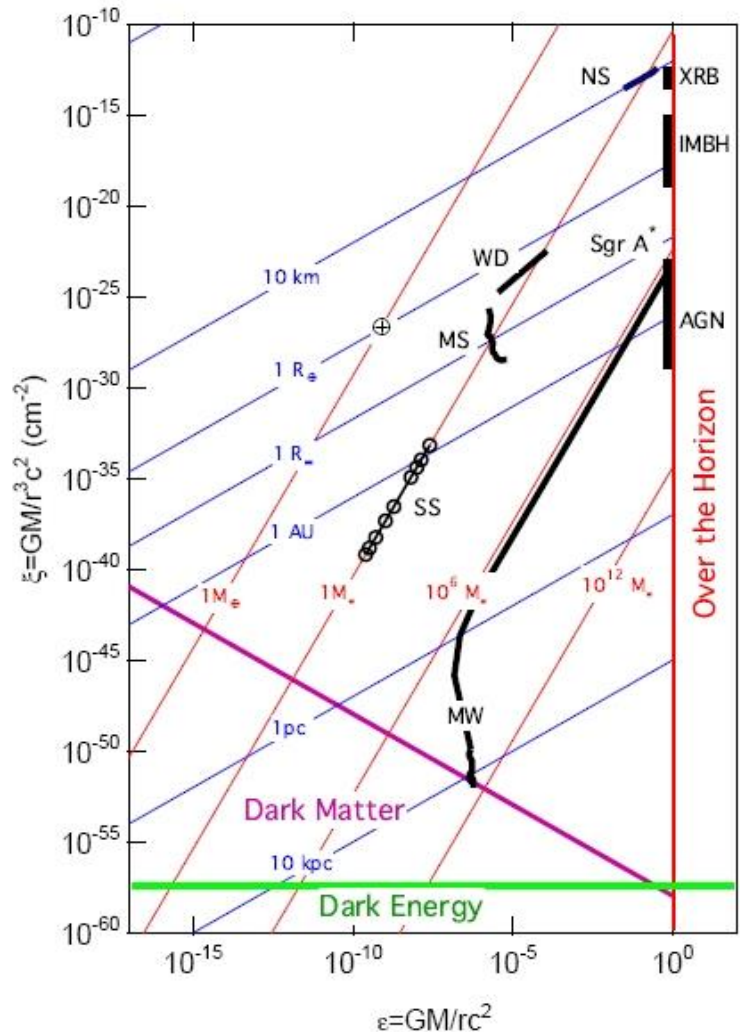
- или, зная возраст, определить скорость,
- или, зная скорость, определить возраст

# ИСТОЧНИК ЭНЕРГИИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

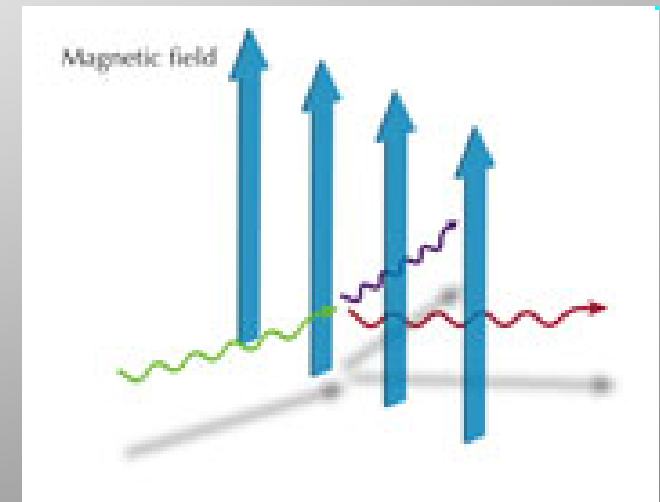
- Вращение
- Аккреция
- Затухание токов (магнитное поле)
- Тепловая энергия



# ЧЕМ ВАЖНЫ

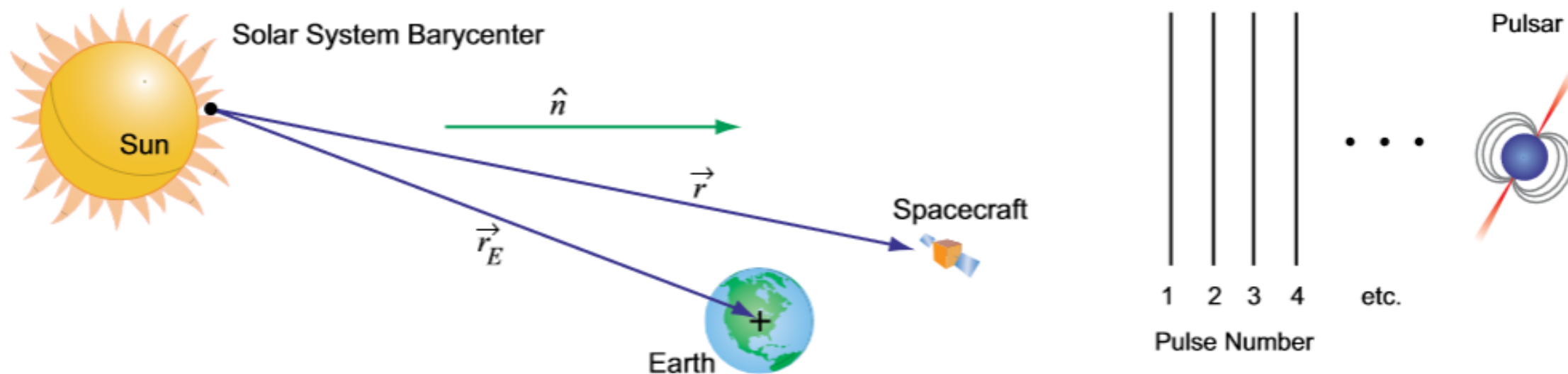


- Инструменты для физиков и астрофизиков
  - радиопульсары – тесты теорий гравитации
  - регистрация гравитационных волн
  - точное время
- Теория поведения вещества при высокой плотности – квантовая хромодинамика
- Процессы в сильном магнитном поле



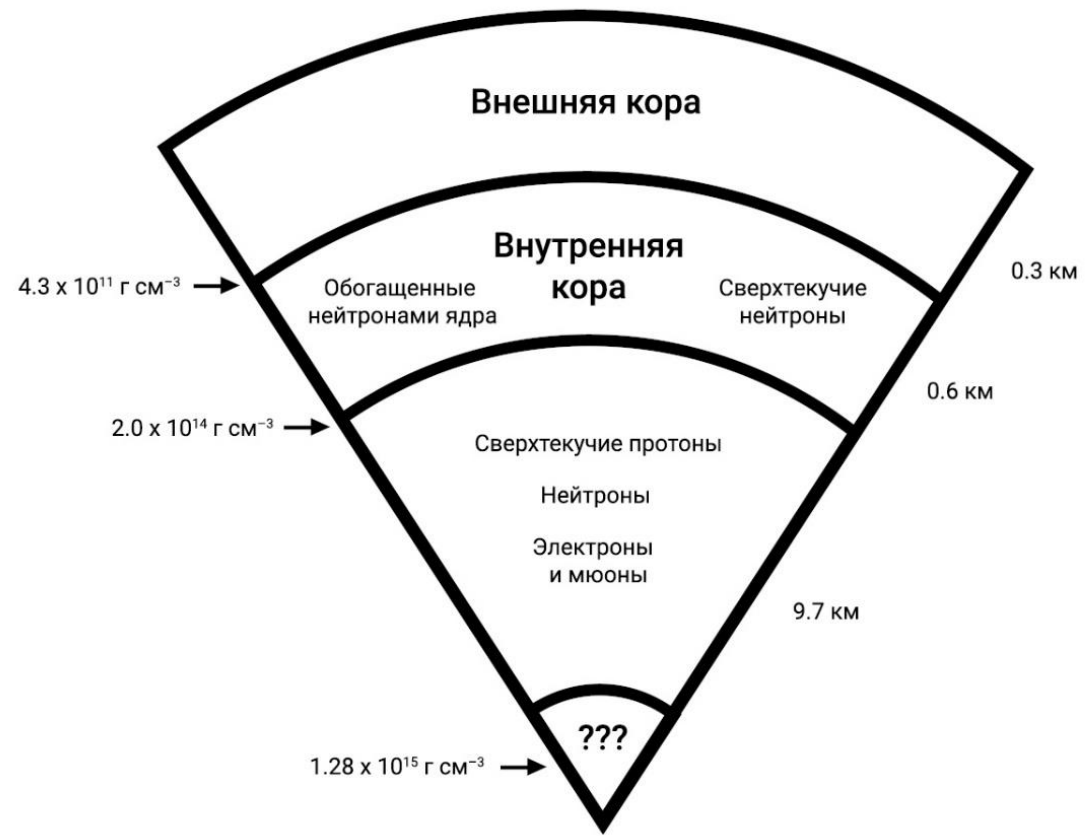
# ОРИЕНТАЦИЯ СПУТНИКОВ ПО РЕНТГЕНОВСКИМ ПУЛЬСАРАМ

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

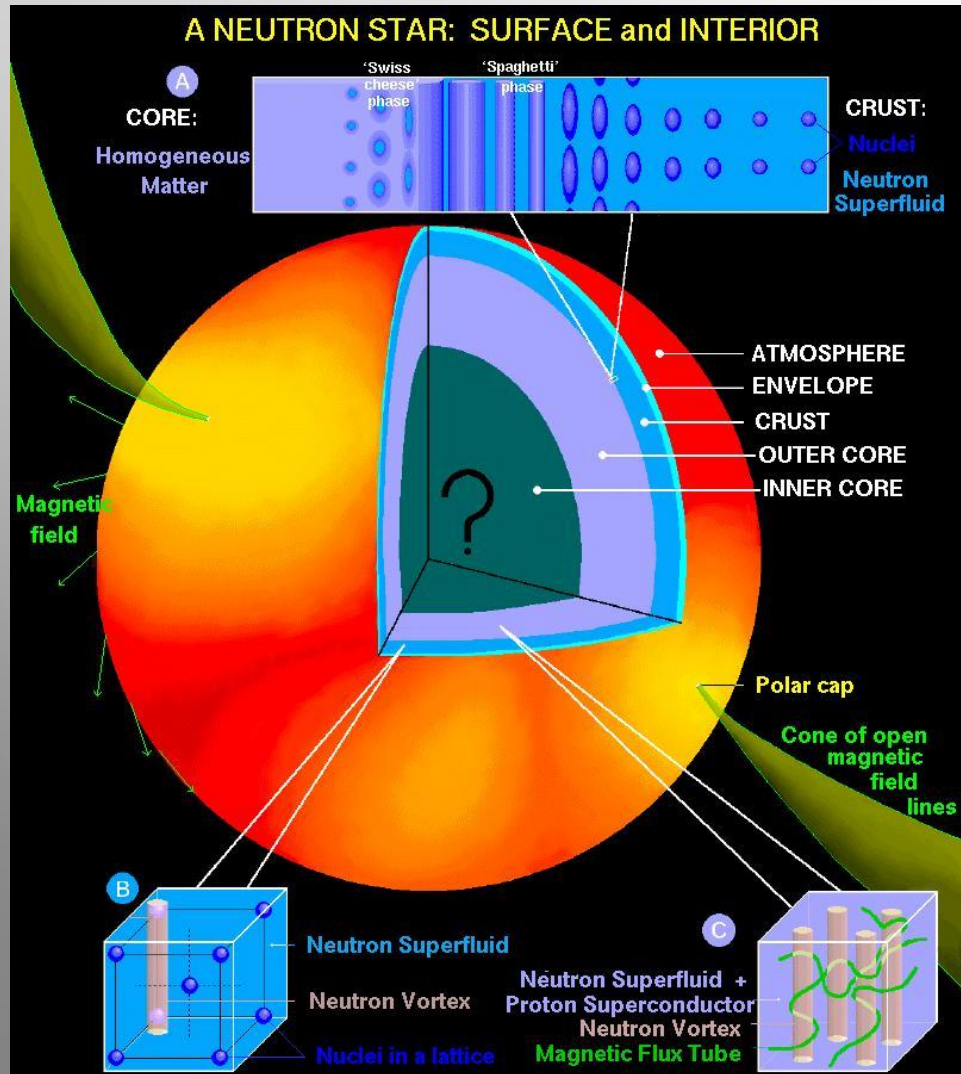


Все ведущие космические агентства в мире (включая российское) сейчас работают над созданием систем навигации, основанных на наблюдении рентгеновского излучения стабильных одиночных пульсаров.

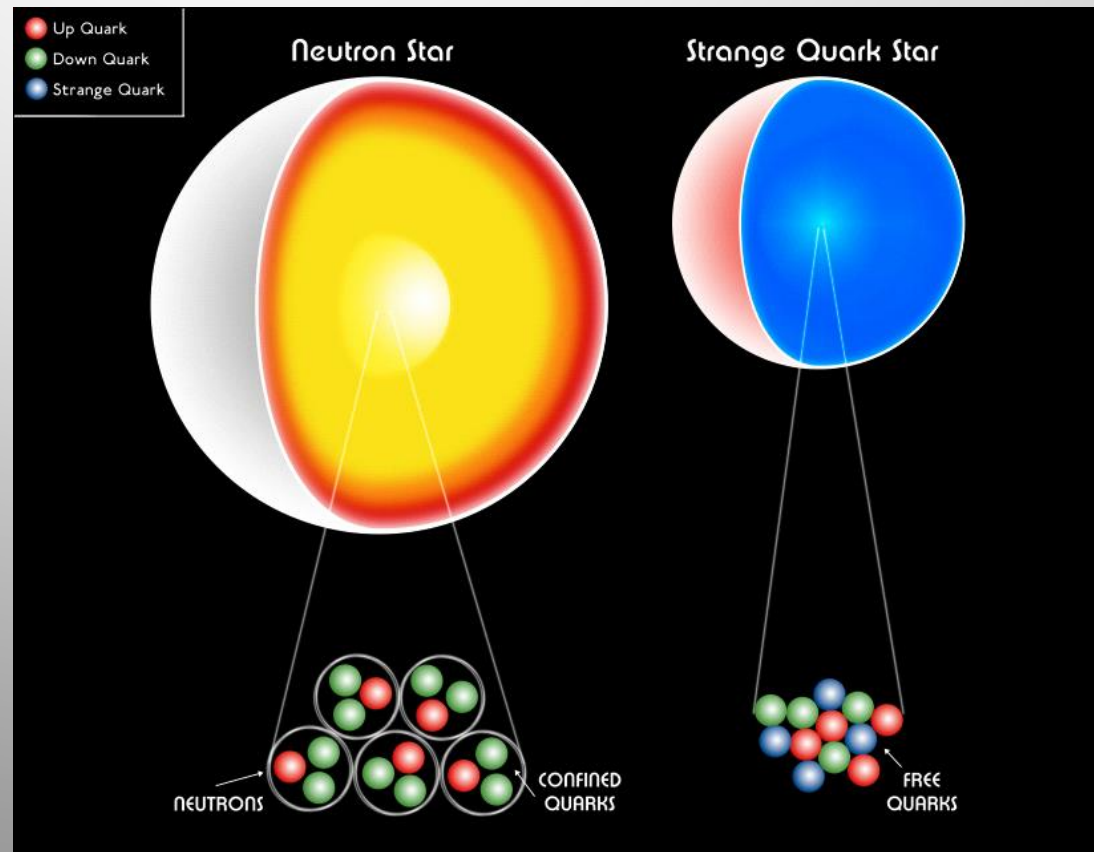
# ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ



# МНОЖЕСТВО ВАРИАНТОВ И СЛОЕВ



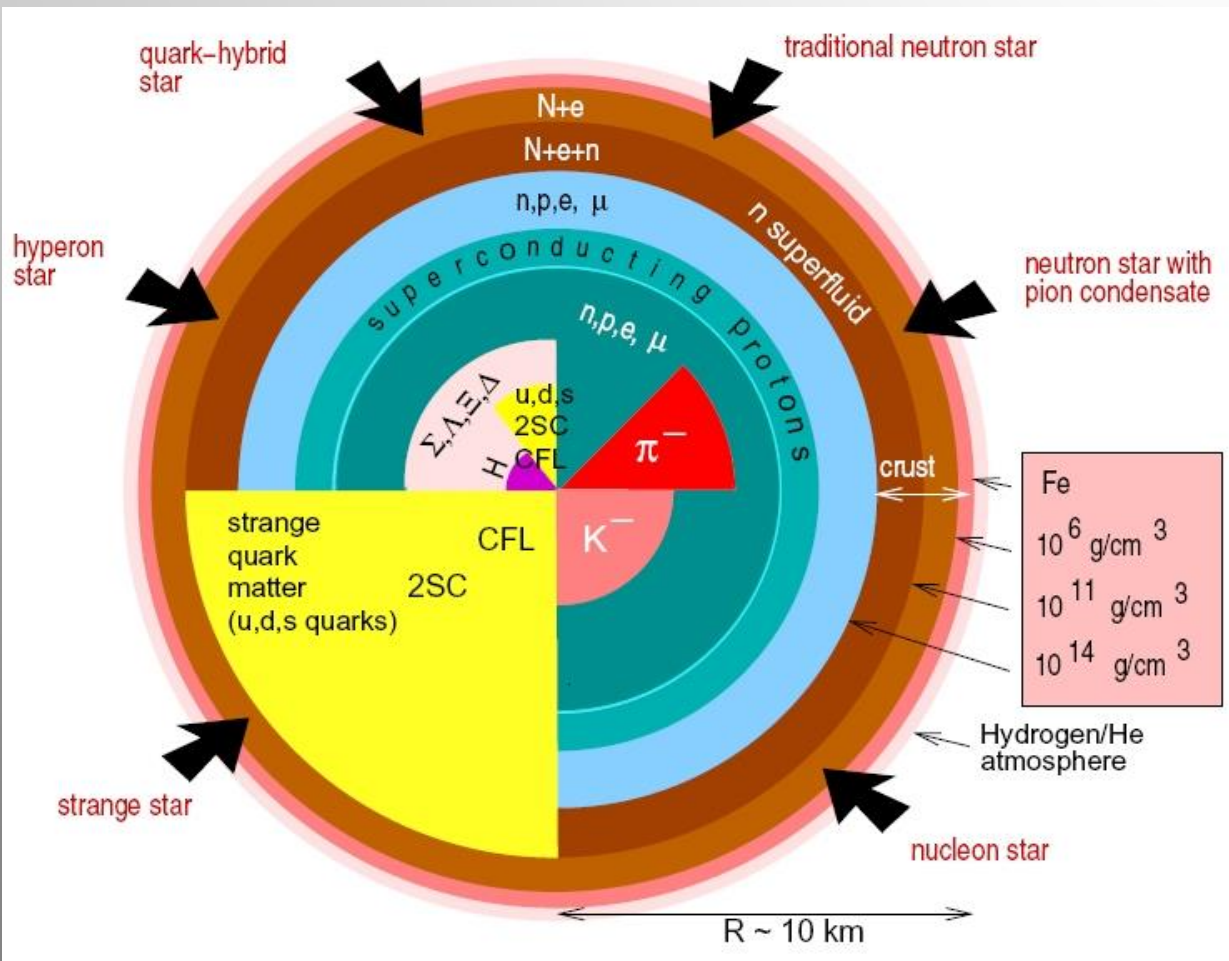
В зависимости от модели объекты, которые мы называем нейтронными звездами, могут иметь очень разное строение



# ЗАГАДКА НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

В недрах – очень плотное вещество.

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

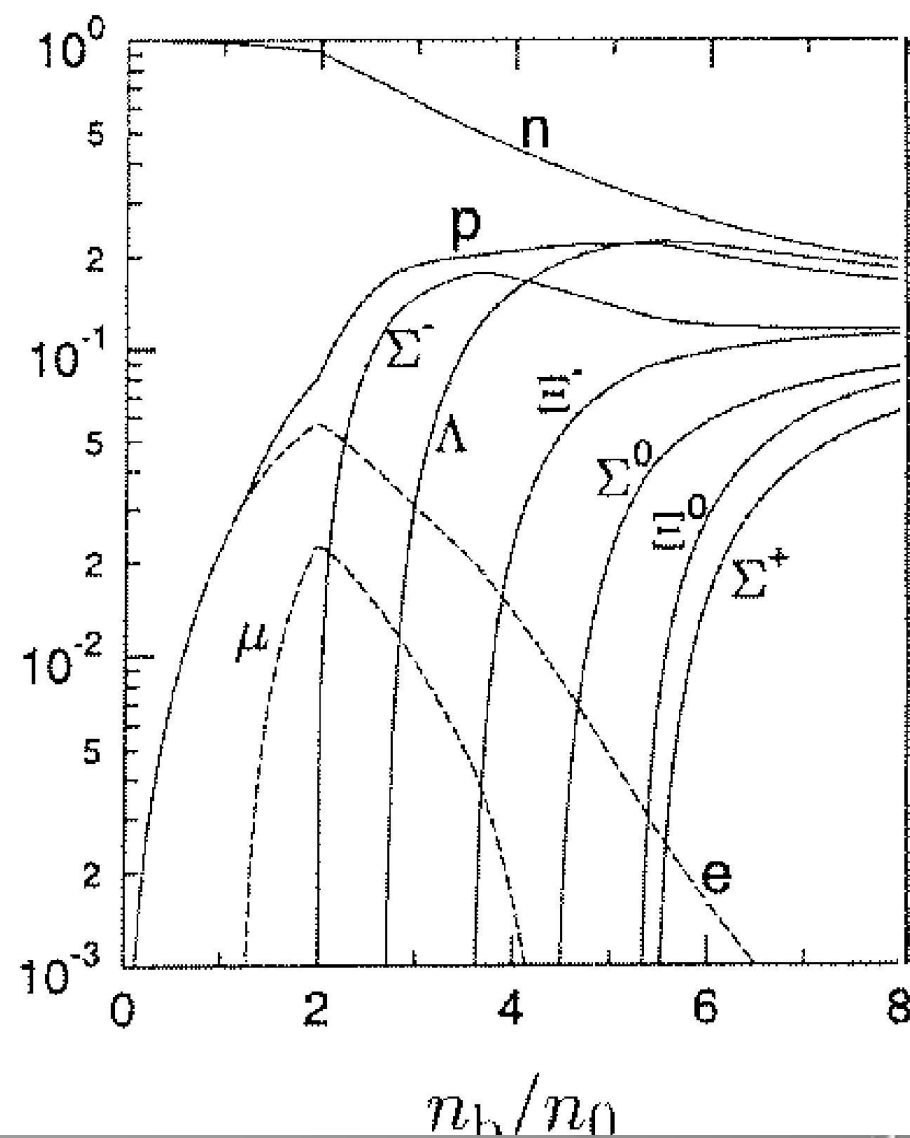
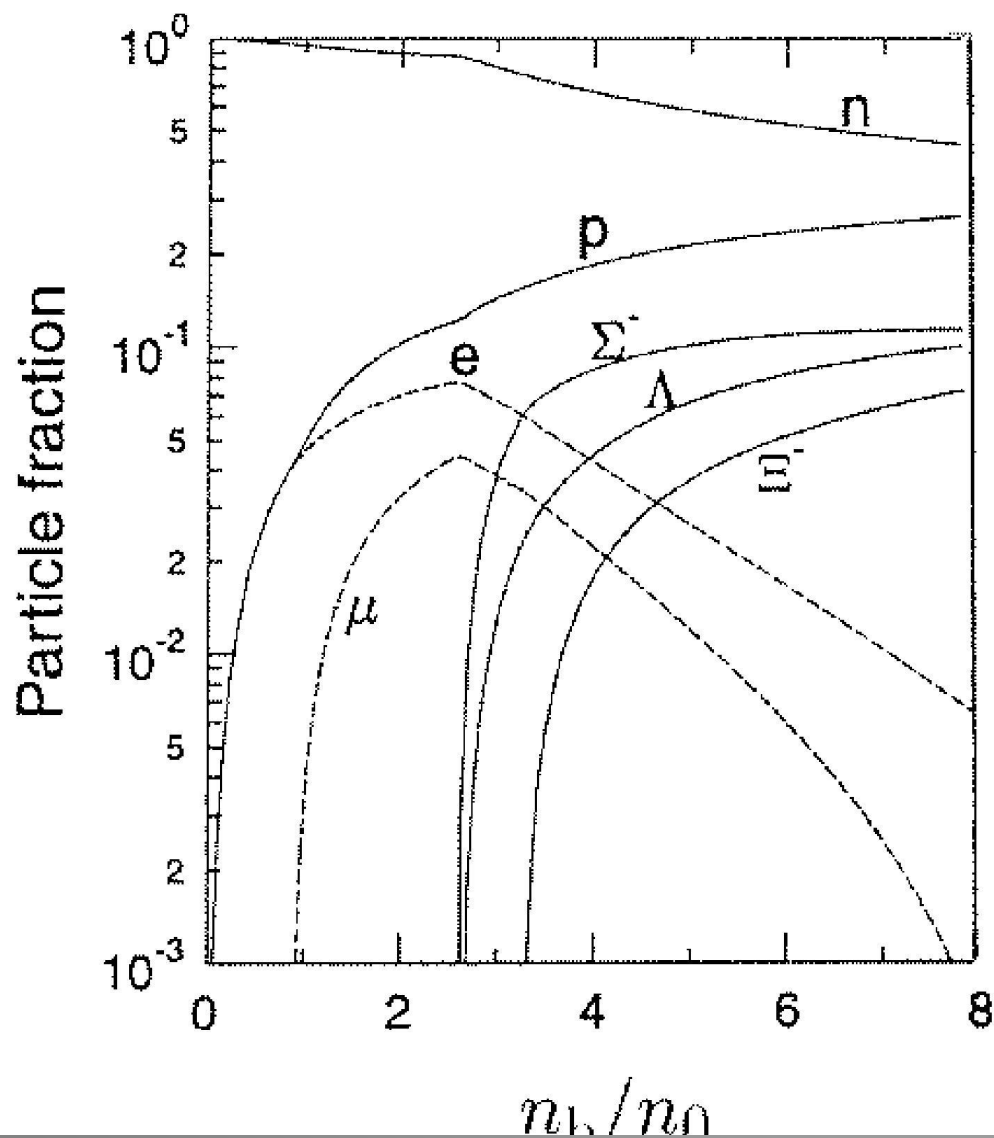


- Обычные нейтронные звезды
- Пионный конденсат
- Каонный конденсат
- Странные звезды
- Гиперонные звезды
- Гибридные звезды

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



# ЧАСТИЦЫ ВНУТРИ



Effective chiral model of  
Hanuske et al. (2000)

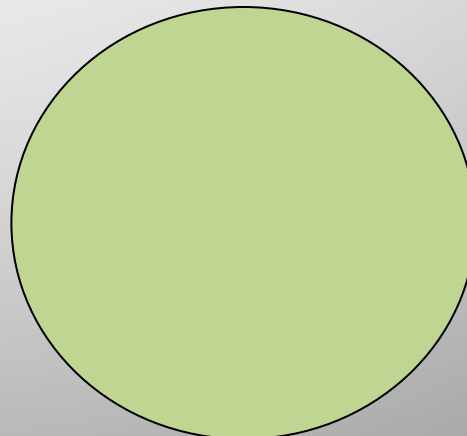
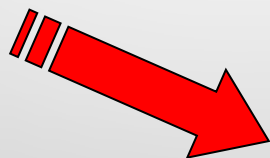
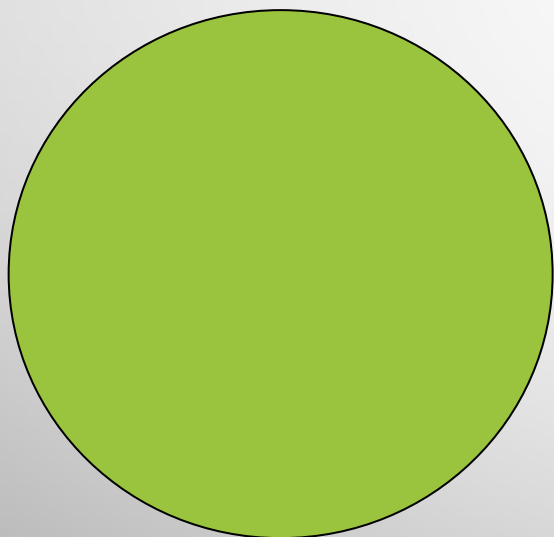
Relativistic mean-field model  
TM1 of Sugahara & Toki (1971)

# 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

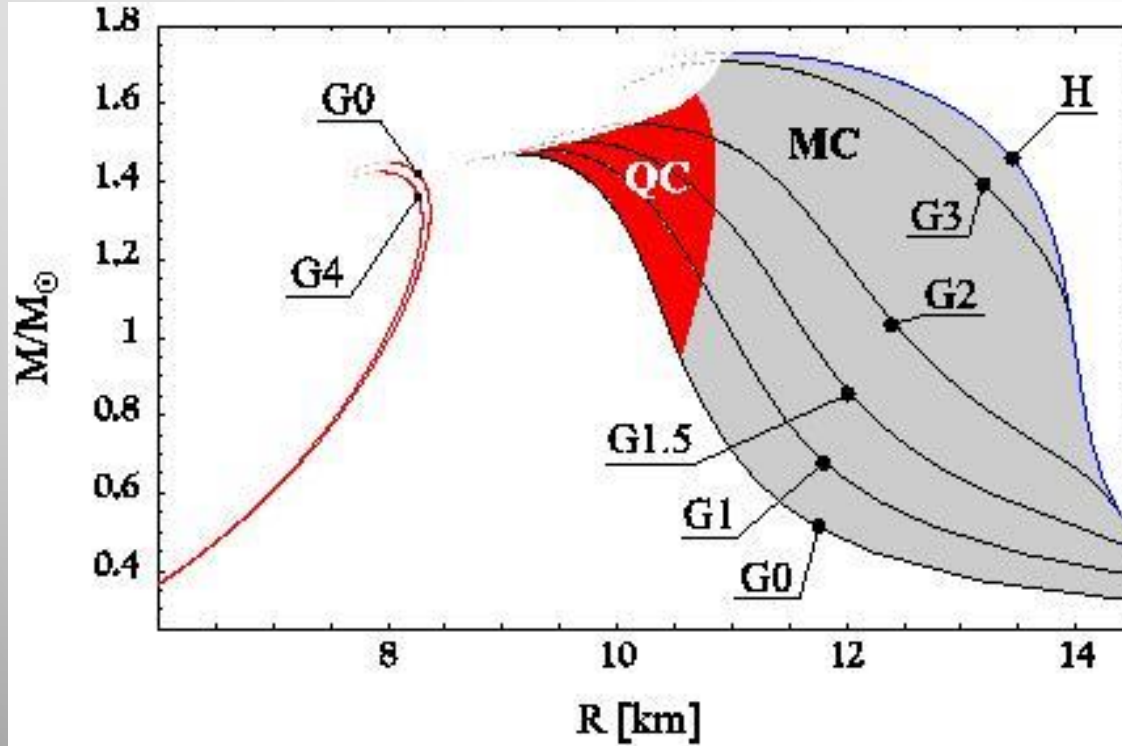
Барионная масса больше гравитационной.  
При коллапсе ядра часть его массы  
превращается в энергию:  $E=mc^2$   
И высвечивается.  
Похоже на энергию связи атомного ядра.



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

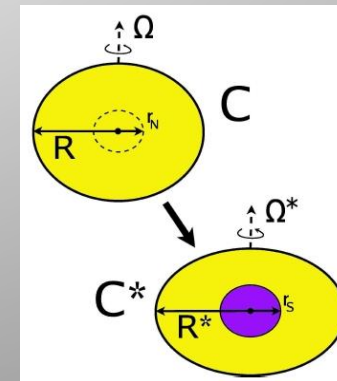
- Максимальная масса
- Разные семейства (кварковые и адронные)
- Жесткие и мягкие EoS
- Небольшая разница при реалистичных параметрах
- Смягчение уравнения состояния про росте массы

Здесь мы пренебрегли вращением

Вращение влияет на:

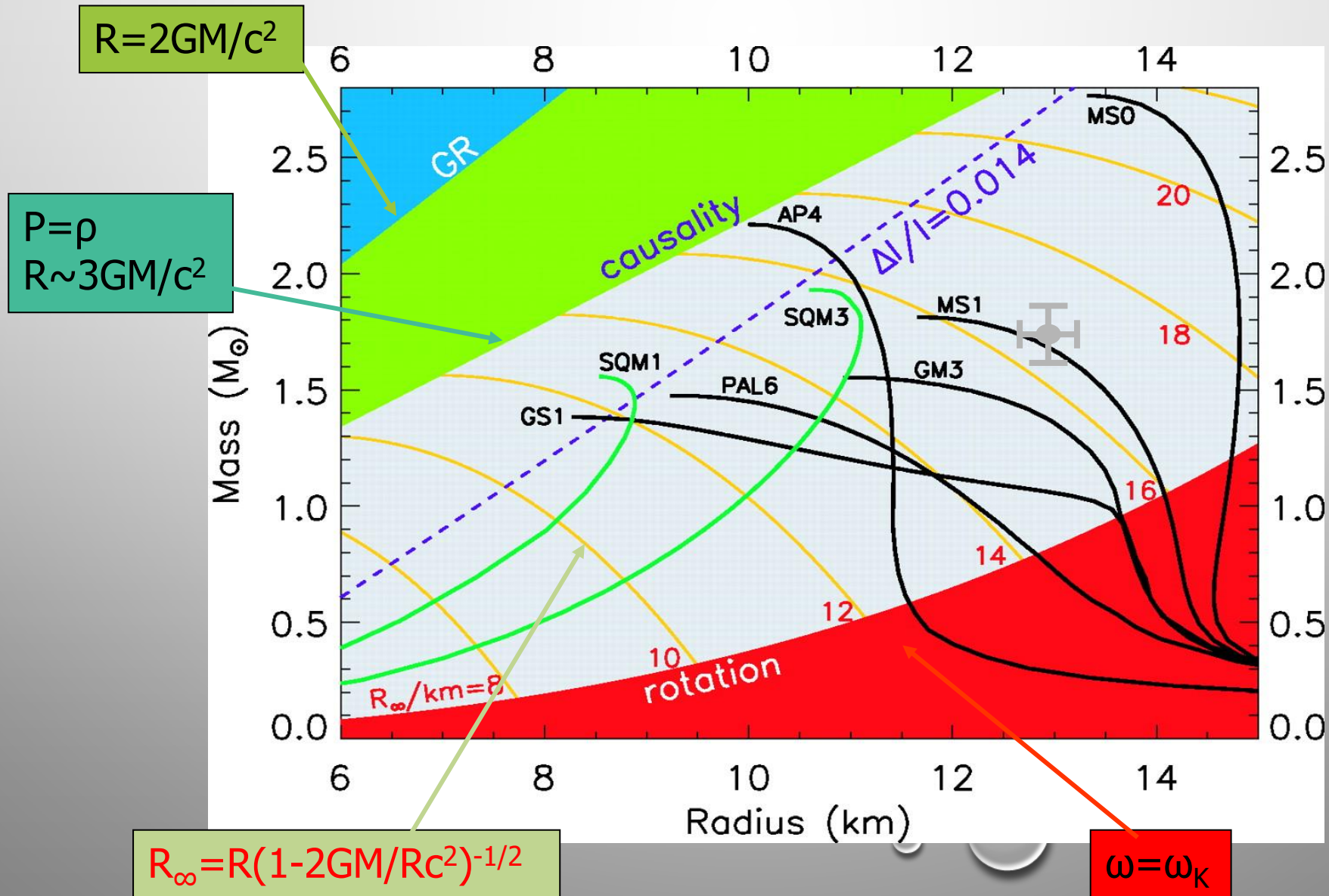
- максимальную массу (растет)
- экваториальный радиус (растет)

Замедление может вести к фазовому превращению.

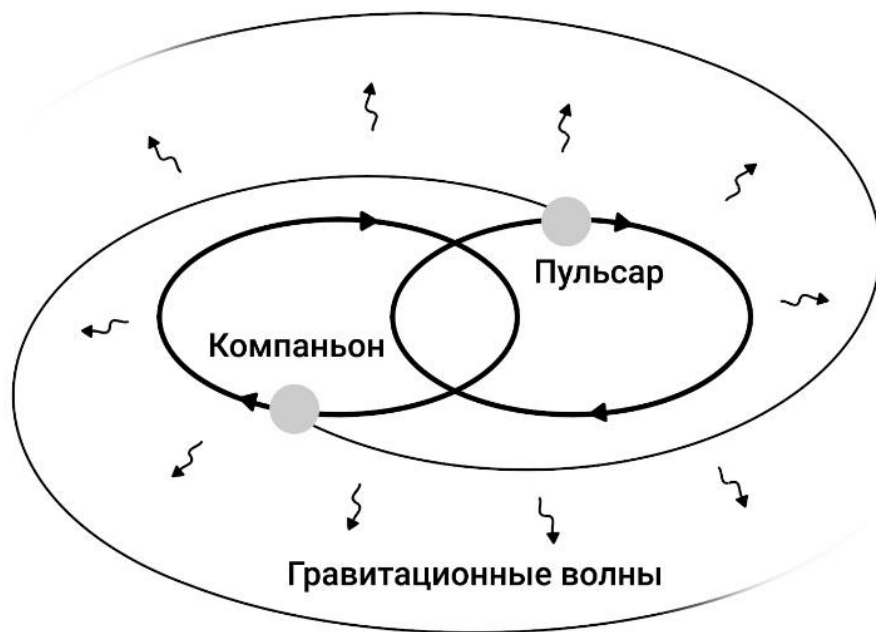


Haensel, Zdunik  
astro-ph/0610549

# МАССА-РАДИУС



# ДВОЙНЫЕ ПУЛЬСАРЫ



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

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

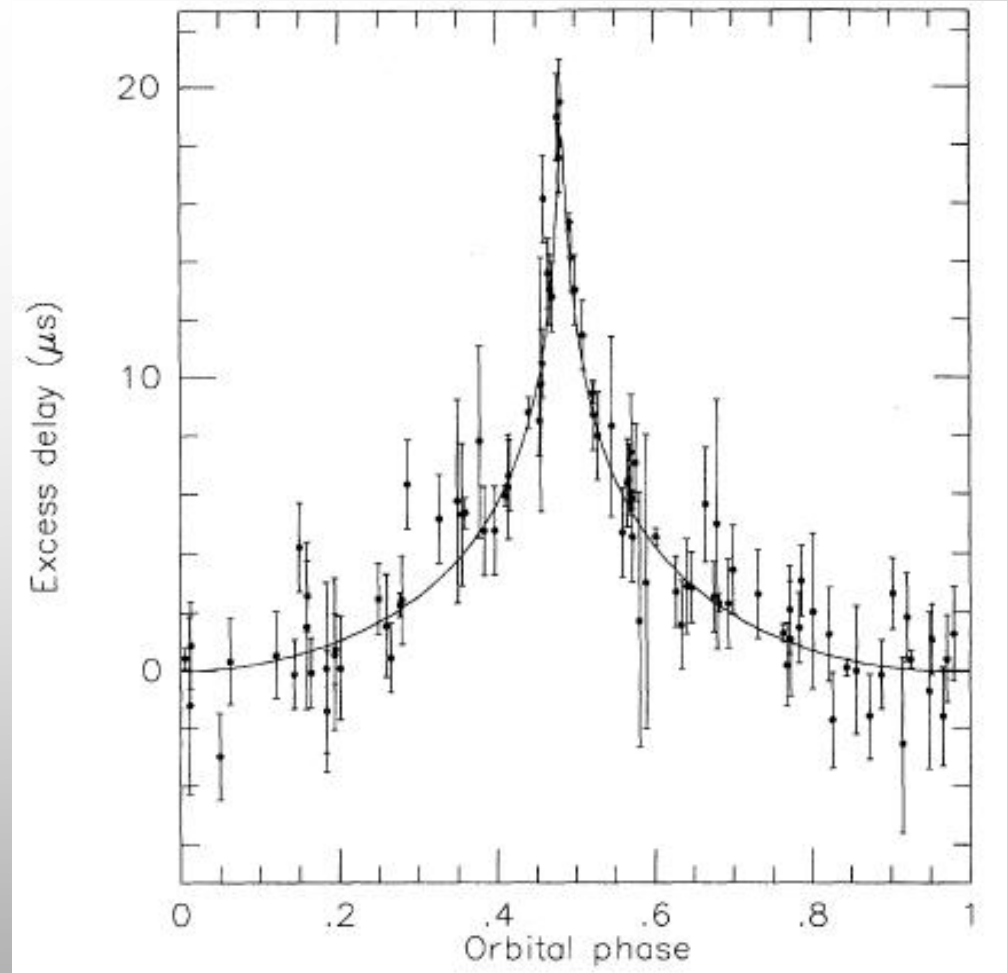
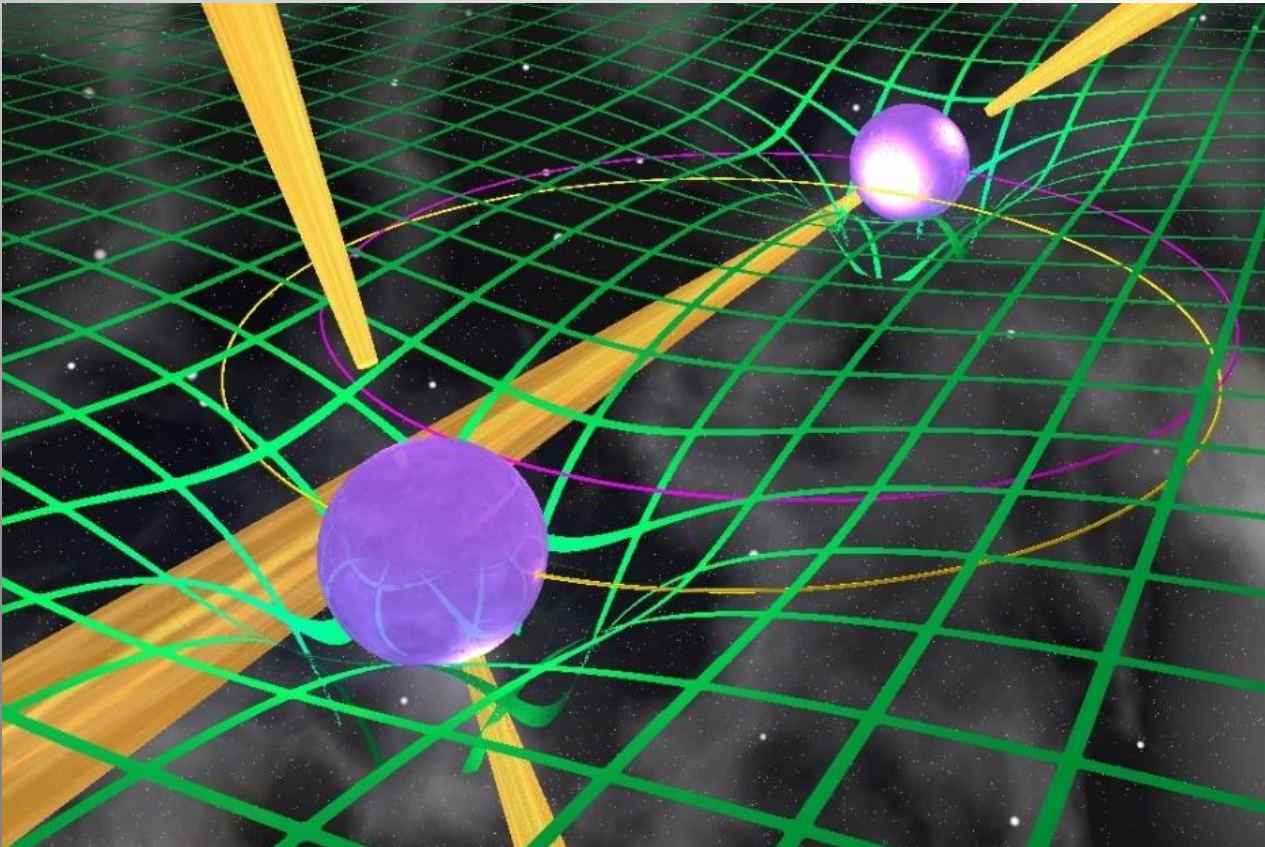
Наблюдения двойных радиопульсаров позволяют определять массы нейтронных звезд с очень высокой точностью благодаря наблюдению ряда эффектов Общем теории относительности.

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

# ЗАДЕРЖКА ШАПИРО

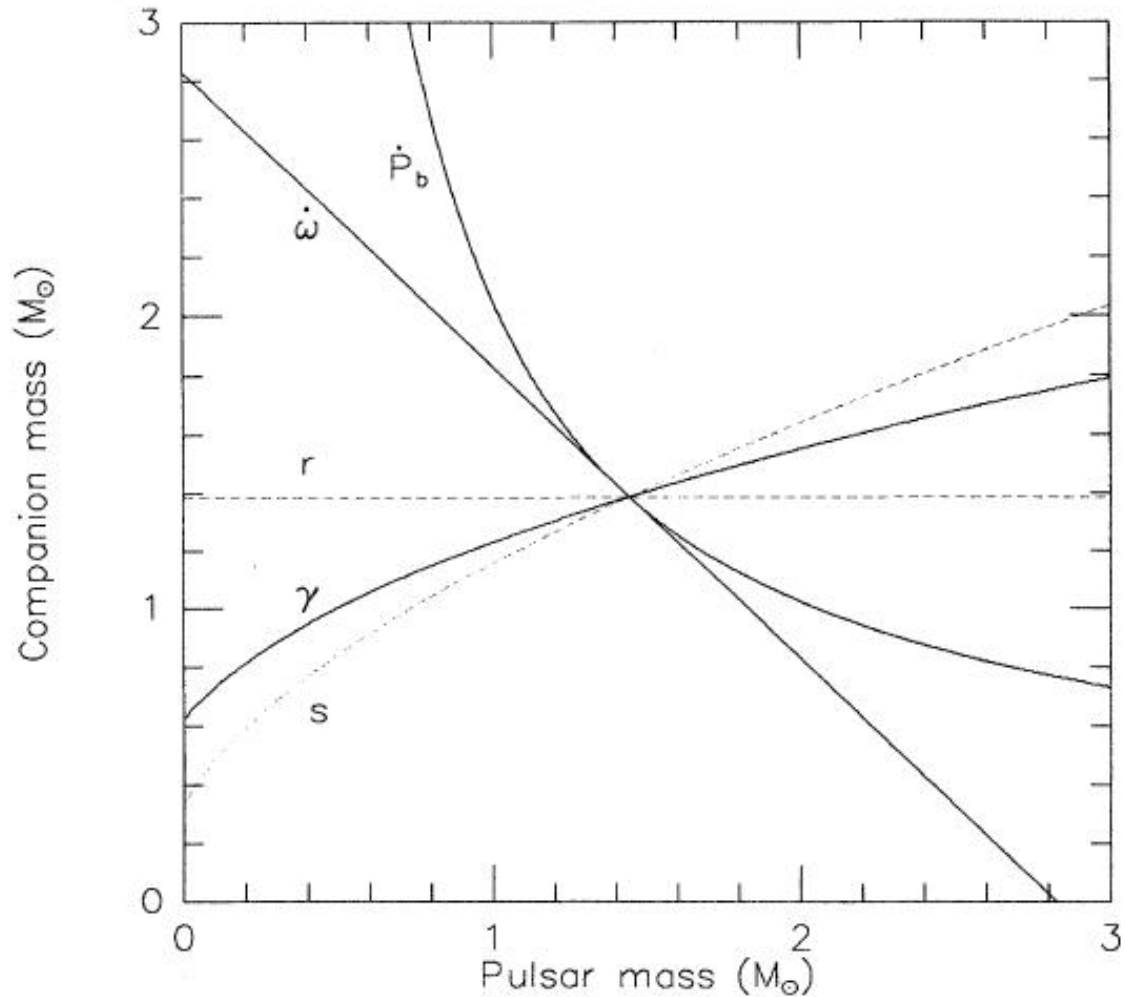
$$\Delta_S = -2r \log(1 - s \cos[2\pi(\phi - \phi_0)])$$

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



PSR 1855+09 (Taylor, Nobel lecture)

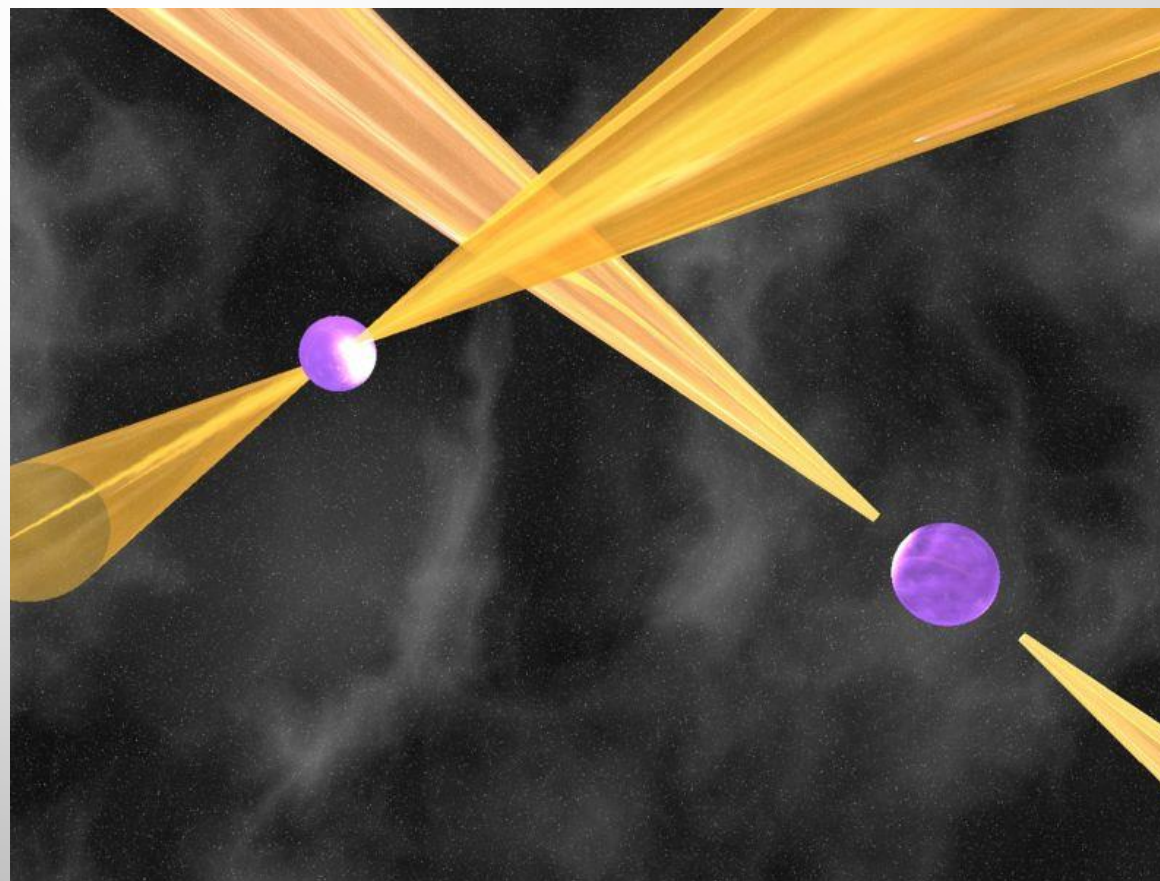
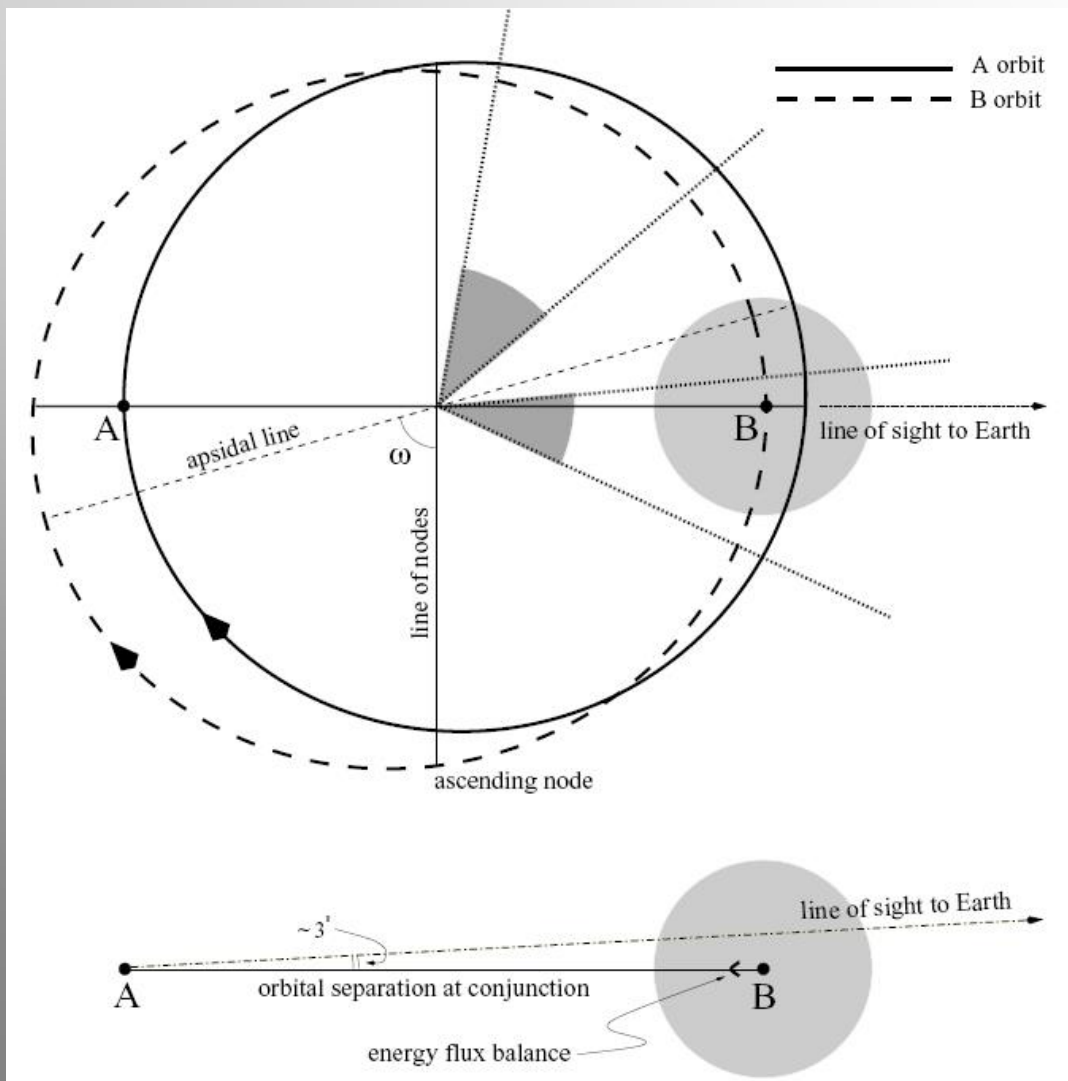
# ИЗМЕРЕНИЯ МАССЫ



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

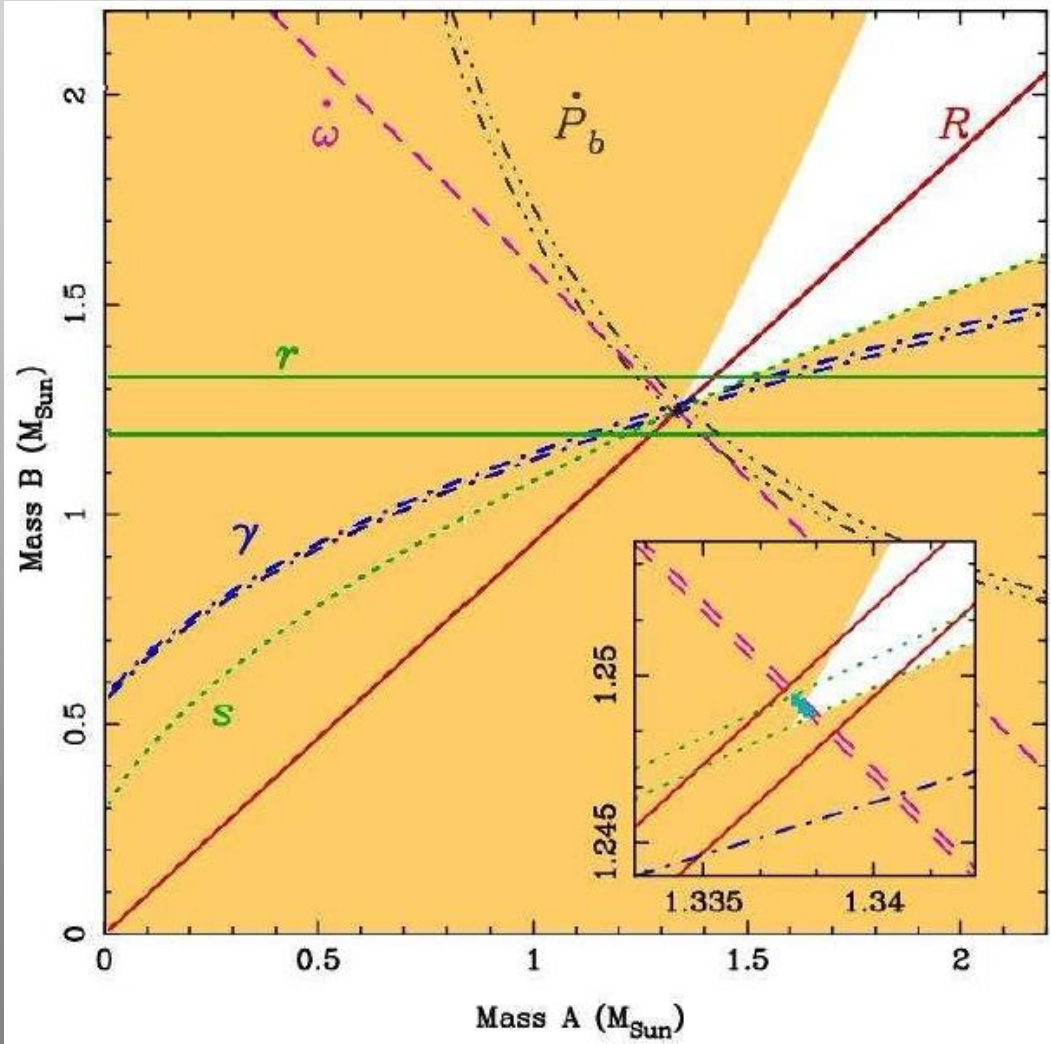


# ДВОЙНОЙ PSR J0737-3039



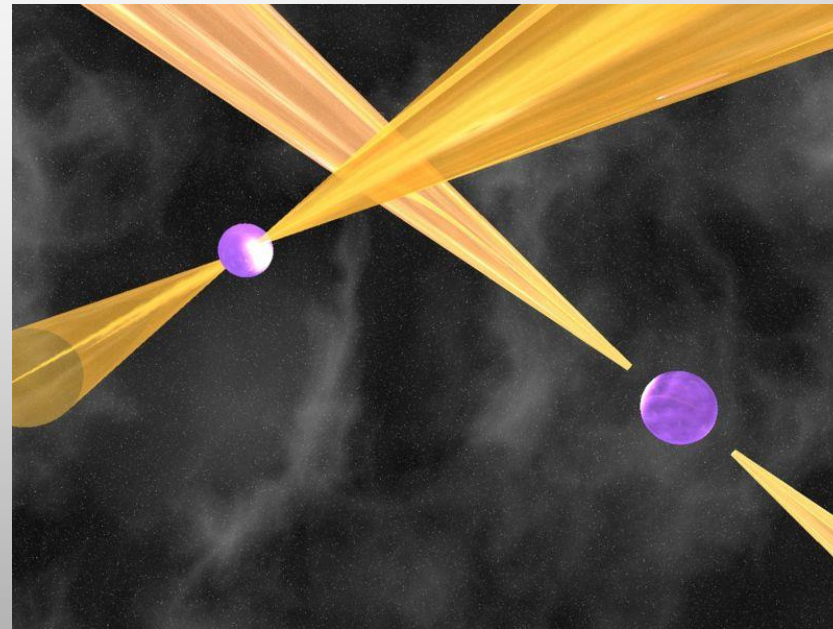
Уникальная система,  
открытая в 2003 г.

# MACCA PSR J0737-3039

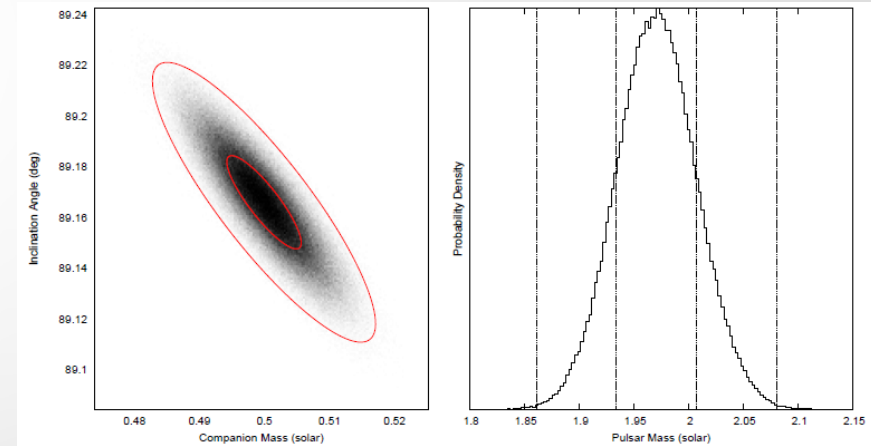
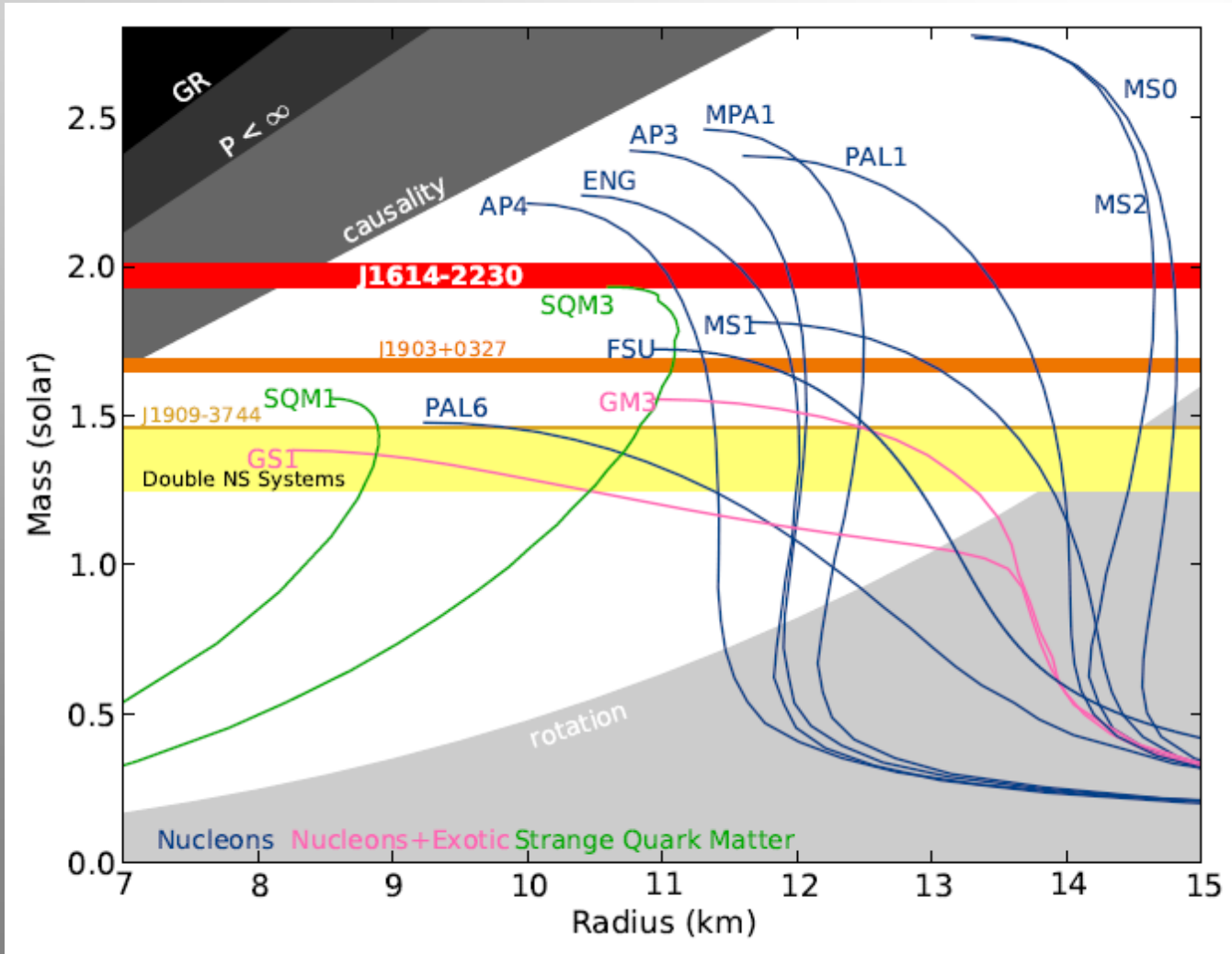


Наиболее точные значения.

Это очень тесная система,  
где наблюдается два радиопульсара.



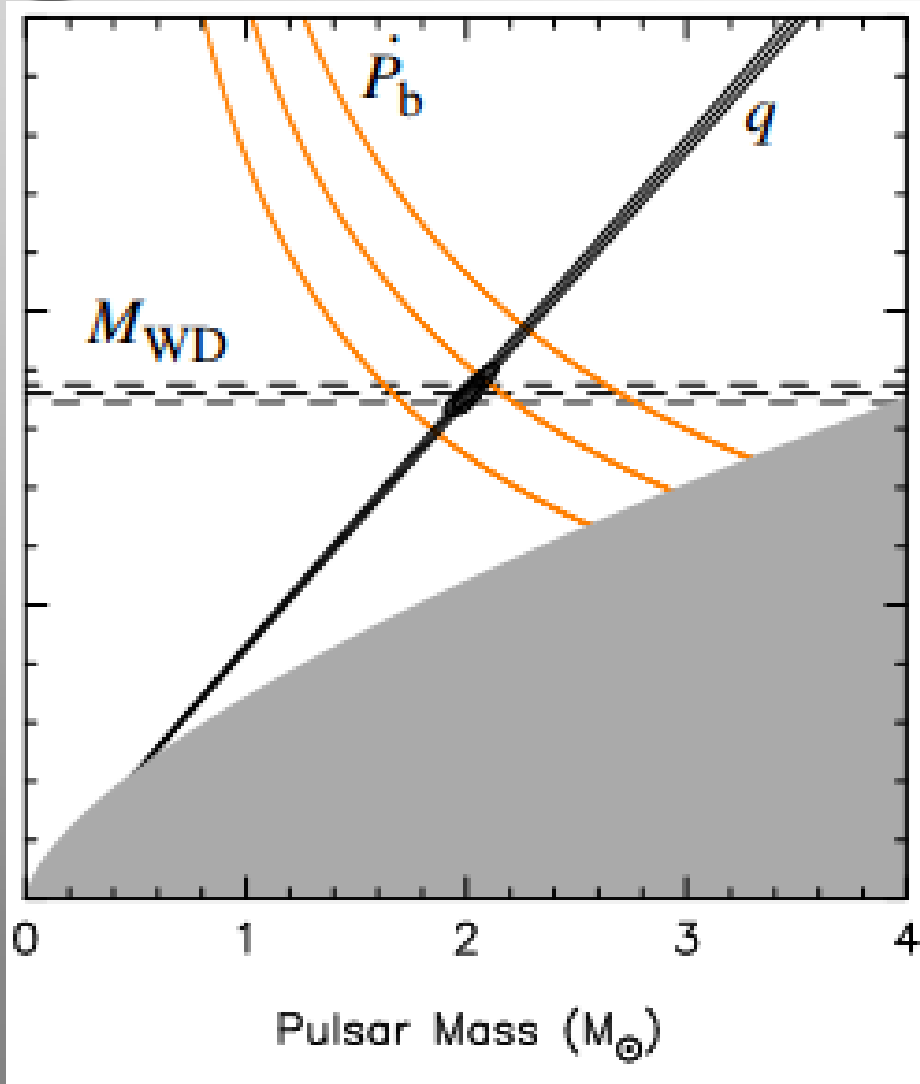
# ПОЧЕМУ ВАЖНО ИСКАТЬ МАССИВНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ?



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:

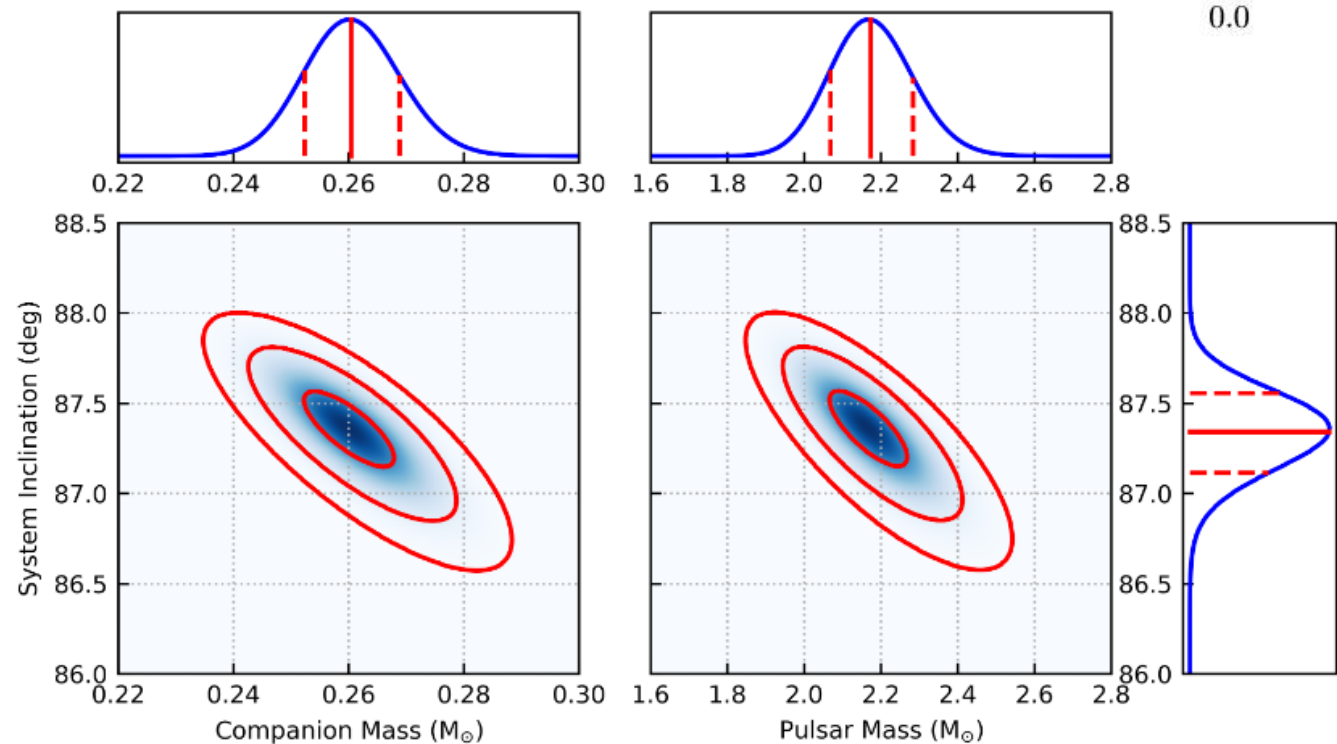
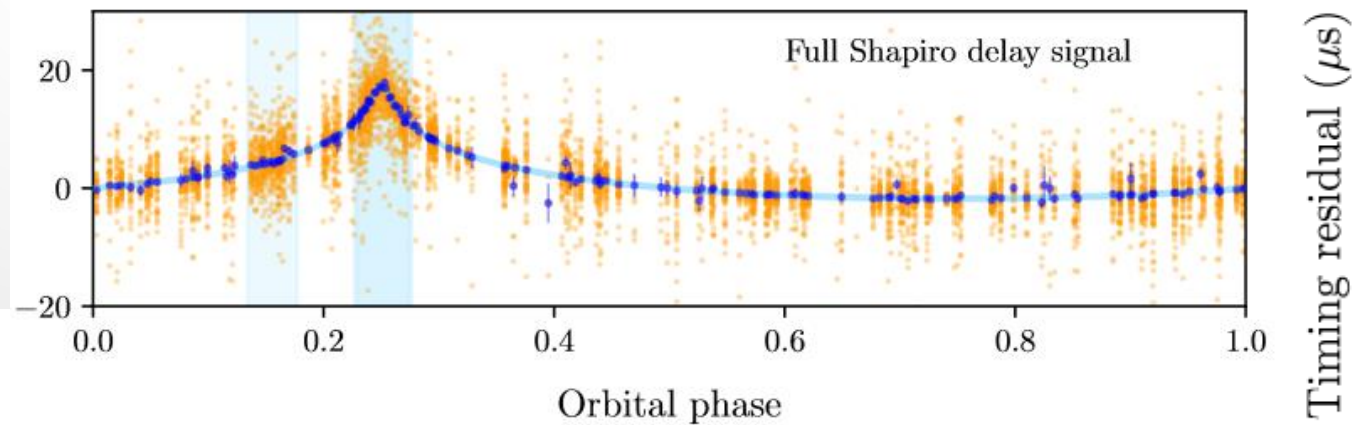
1.97 – 2.05 масс Солнца (68.27%)

1.90 – 2.18 масс Солнца (99.73%)

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

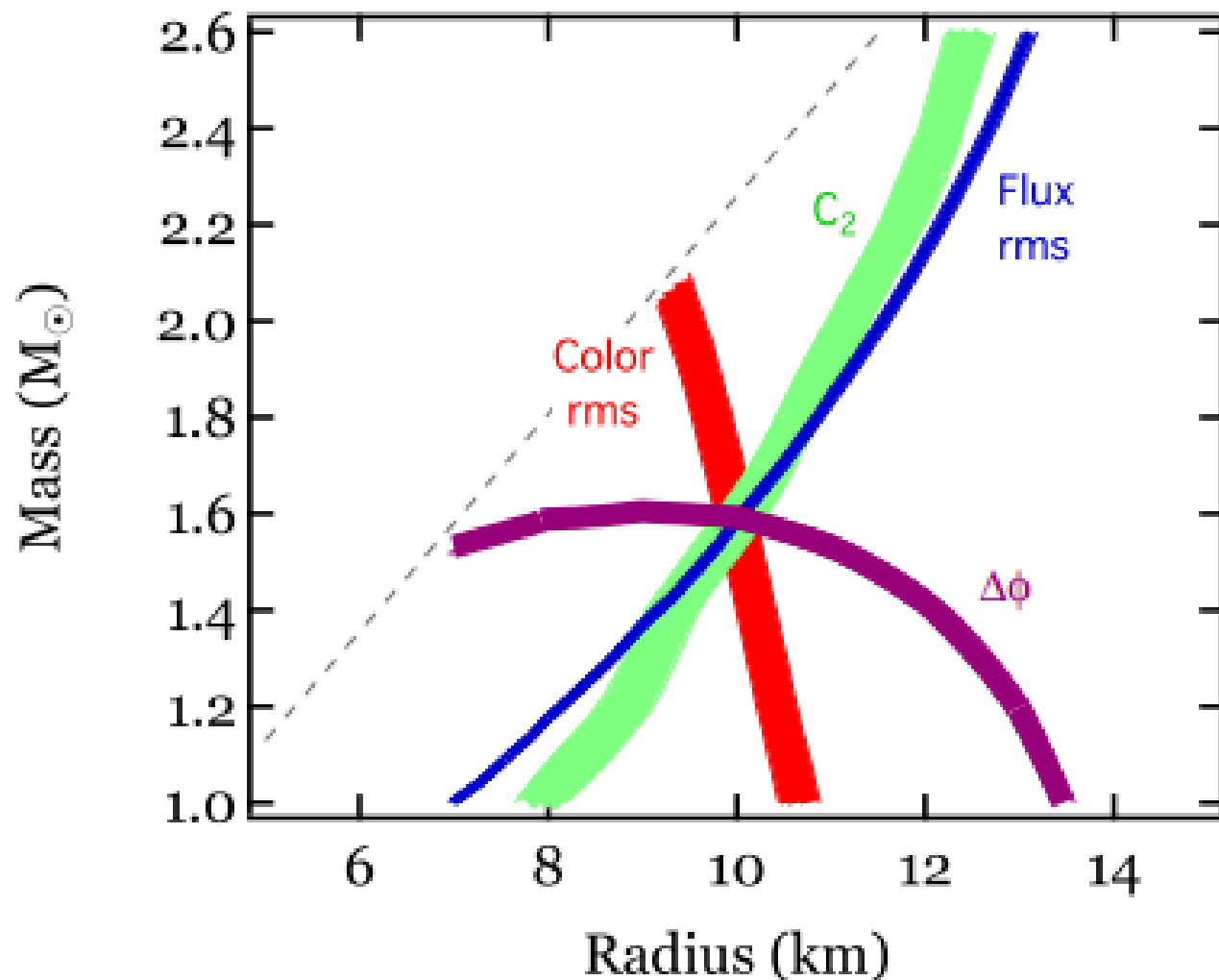
# НЕЙТРОННАЯ ЗВЕЗДА С МАССОЙ 2.14 МАССЫ СОЛНЦА

J0740+6620  
2.14 масс Солнца



1904.06759

# БУДУЩИЕ РЕНТГЕНОВСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ



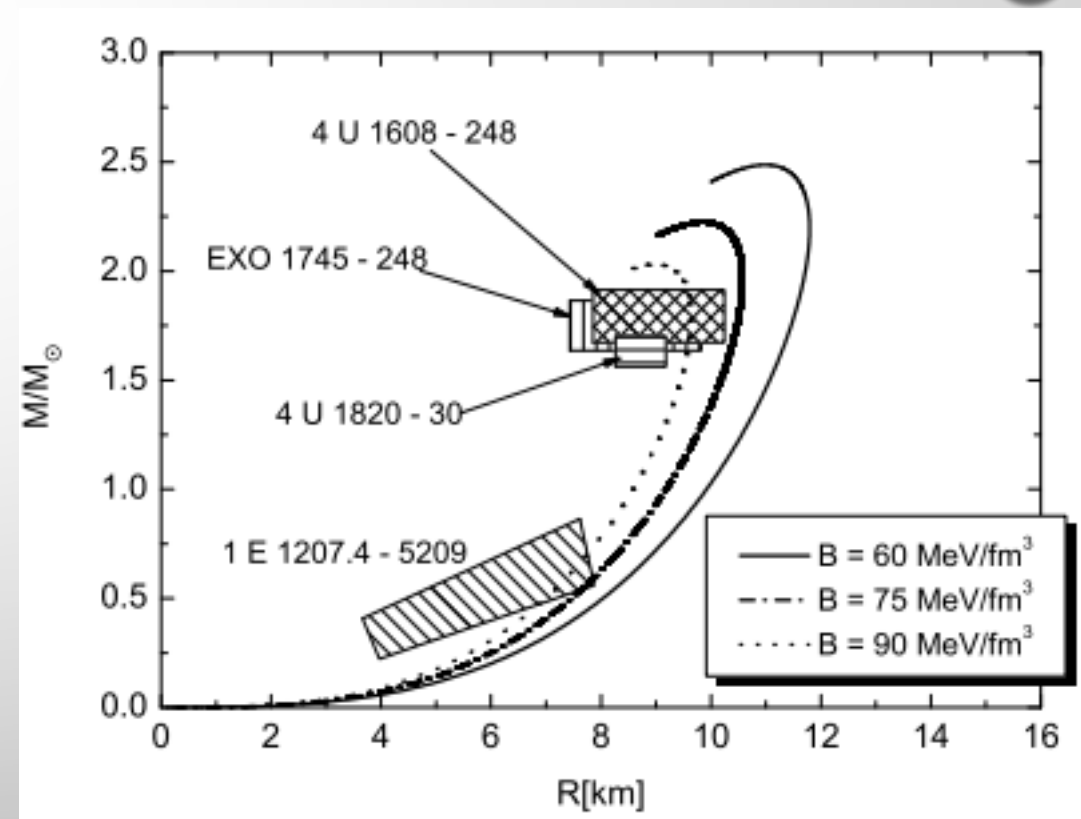
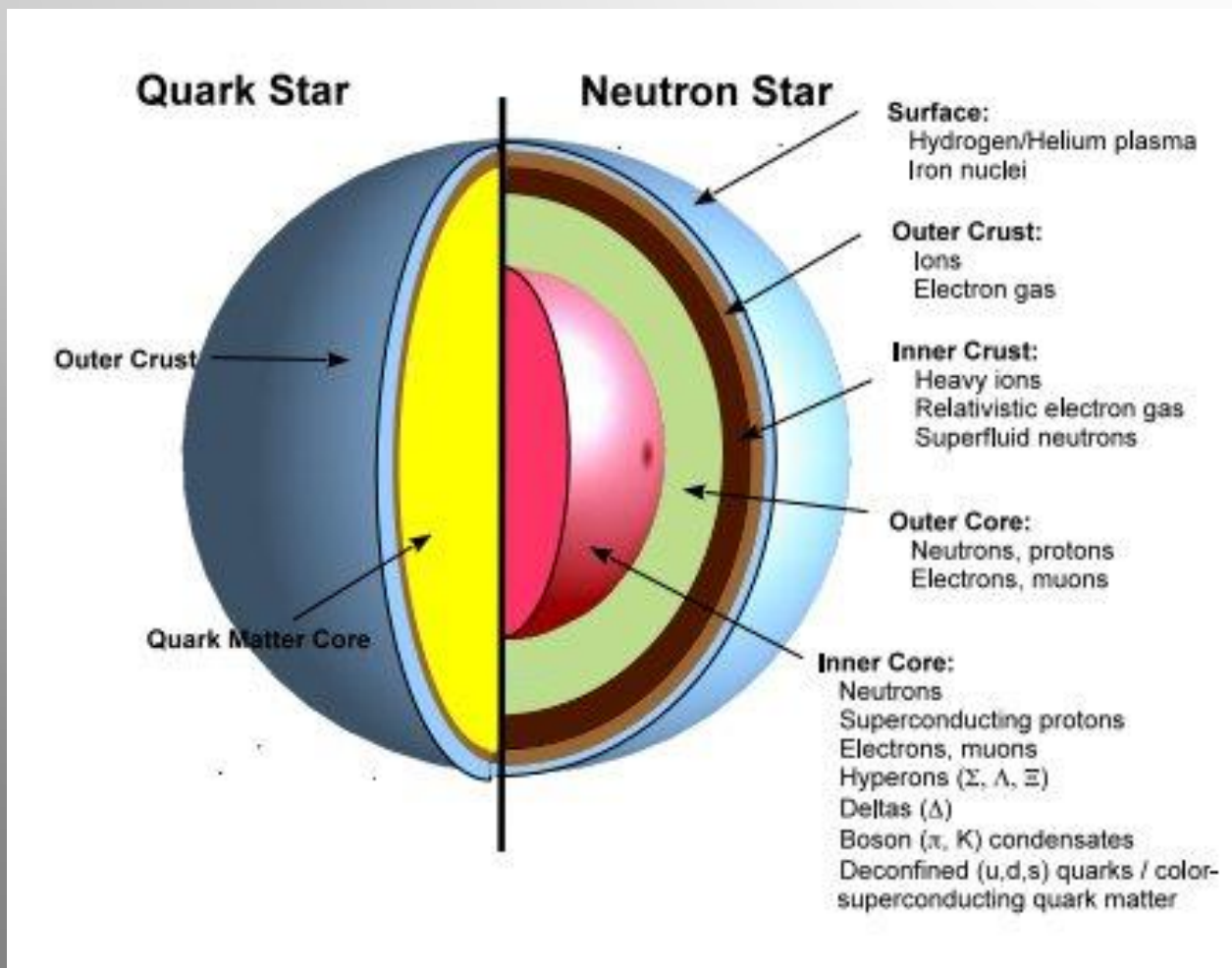
Возможно, что на будущих аппаратах NICER и LOFT можно будет очень точно измерять сразу и массу, и радиус хотя бы для небольшого числа звезд.

Данные основаны в первую очередь на анализе профиля импульса.

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

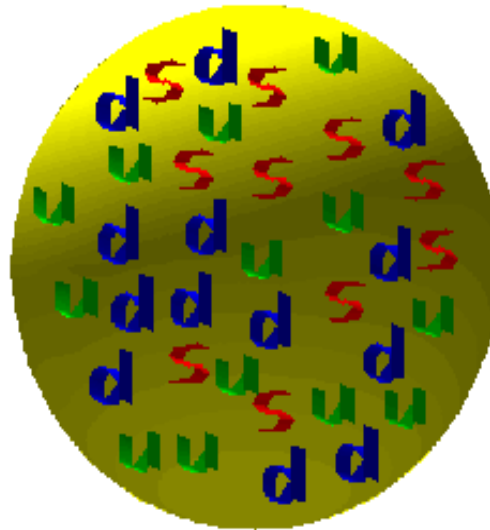
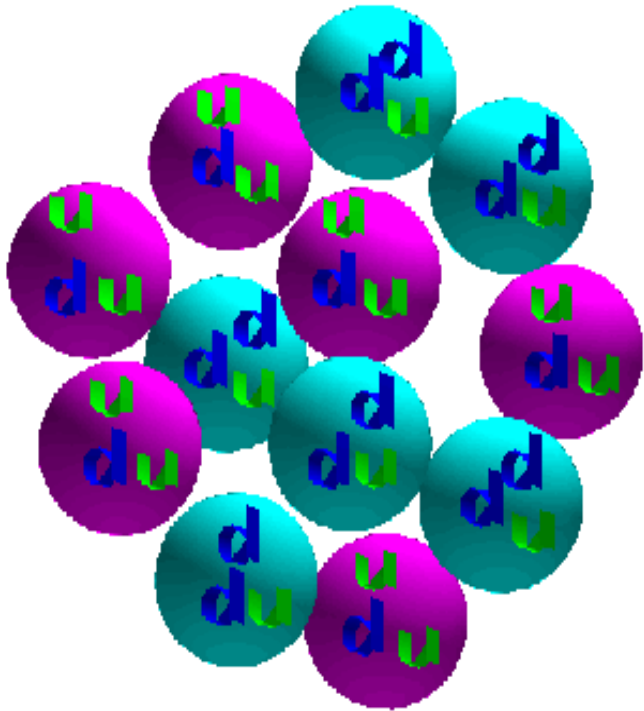
# КВАРКОВЫЕ ЗВЕЗДЫ

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.

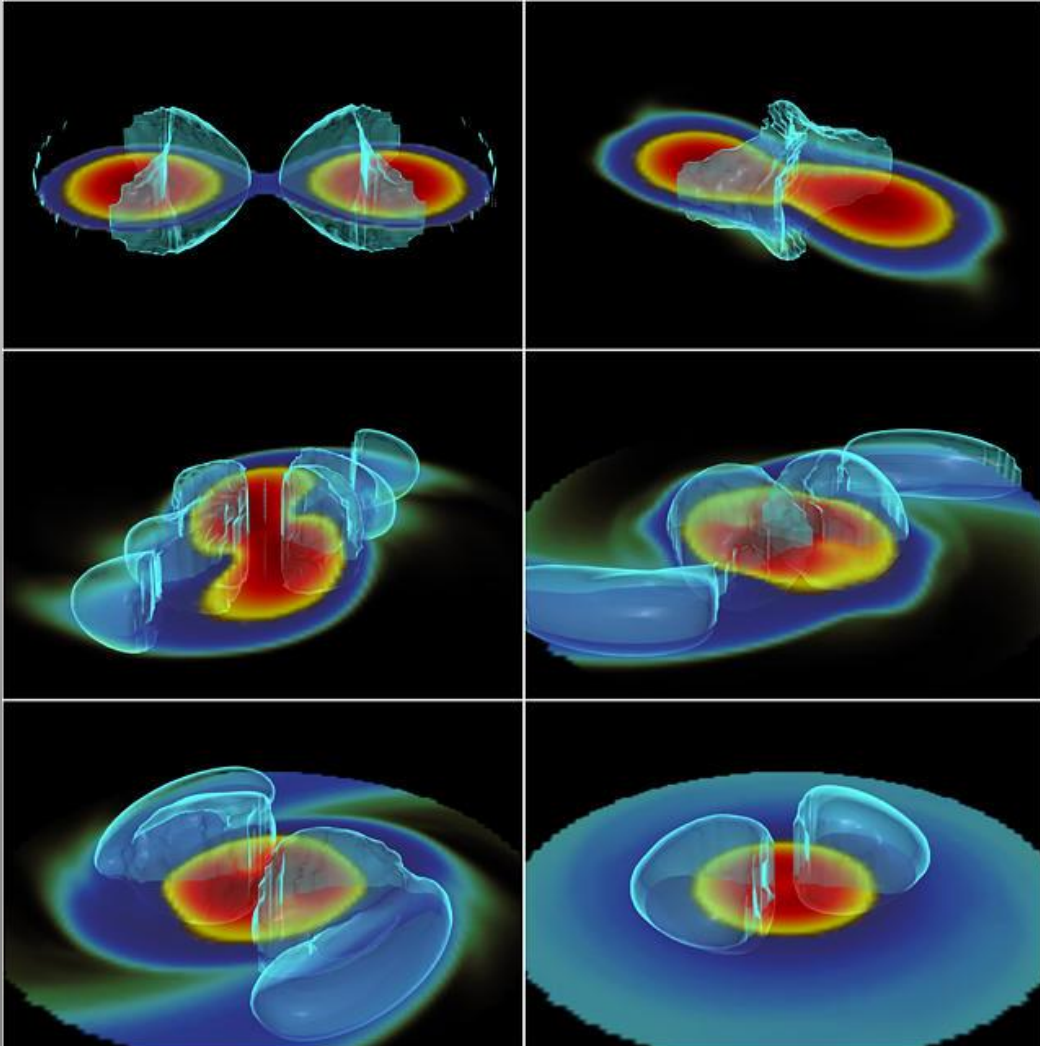


Страпельки могут встречаться  
в космических лучах.  
Это будут частицы с  
большой массой, но с зарядом  
относительно небольшим.



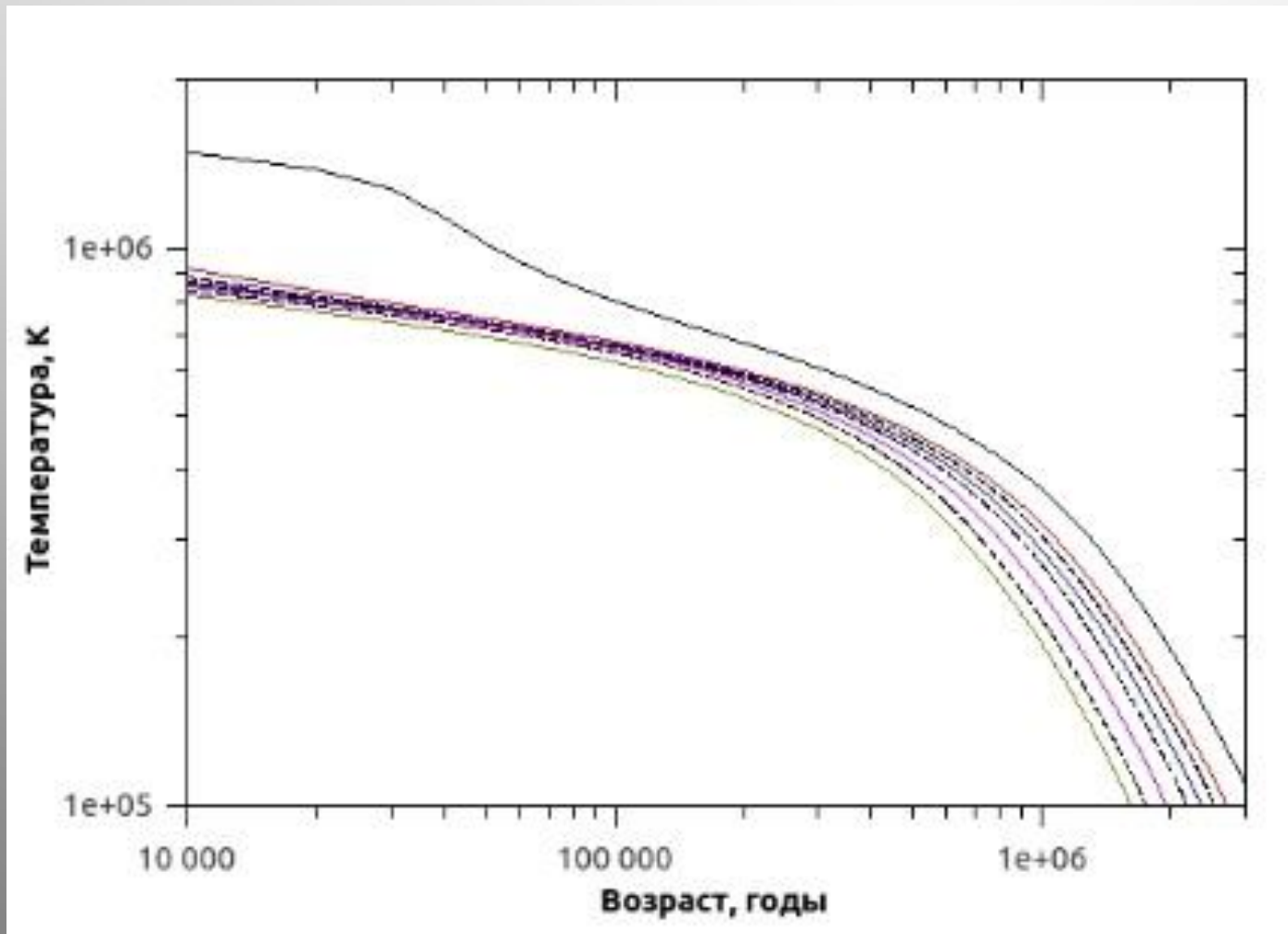
# СТРАННАЯ КВАРКОВАЯ ЭПИДЕМИЯ

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...



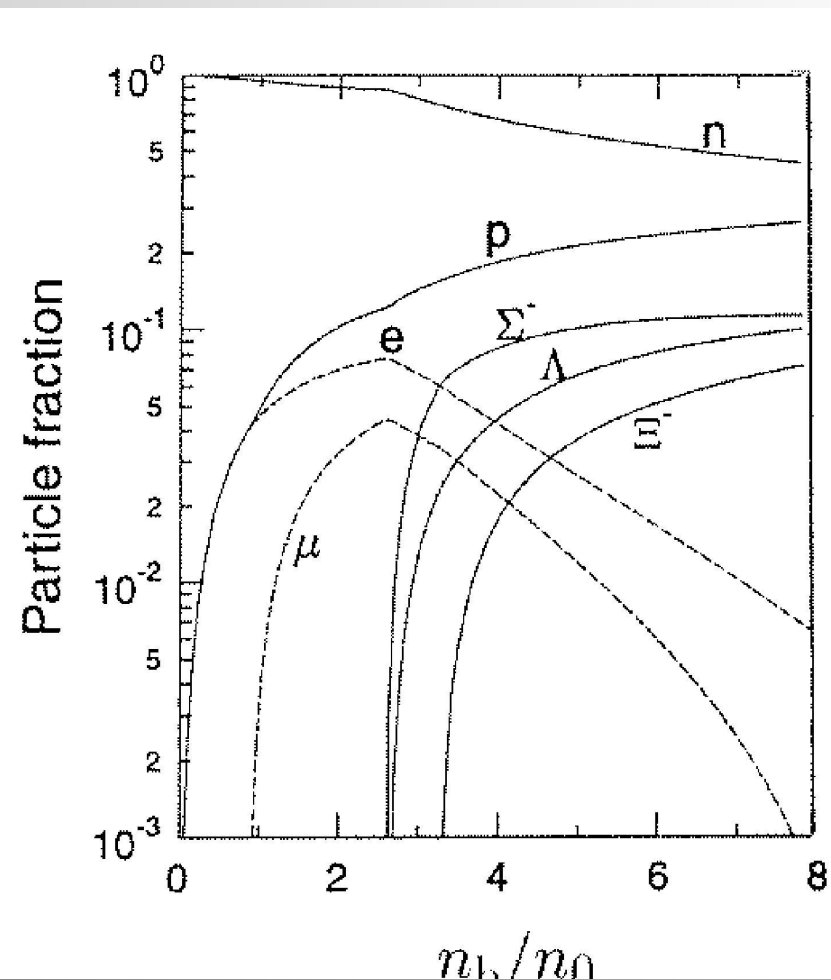
AMS на МКС

# ОСТЫВАНИЕ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

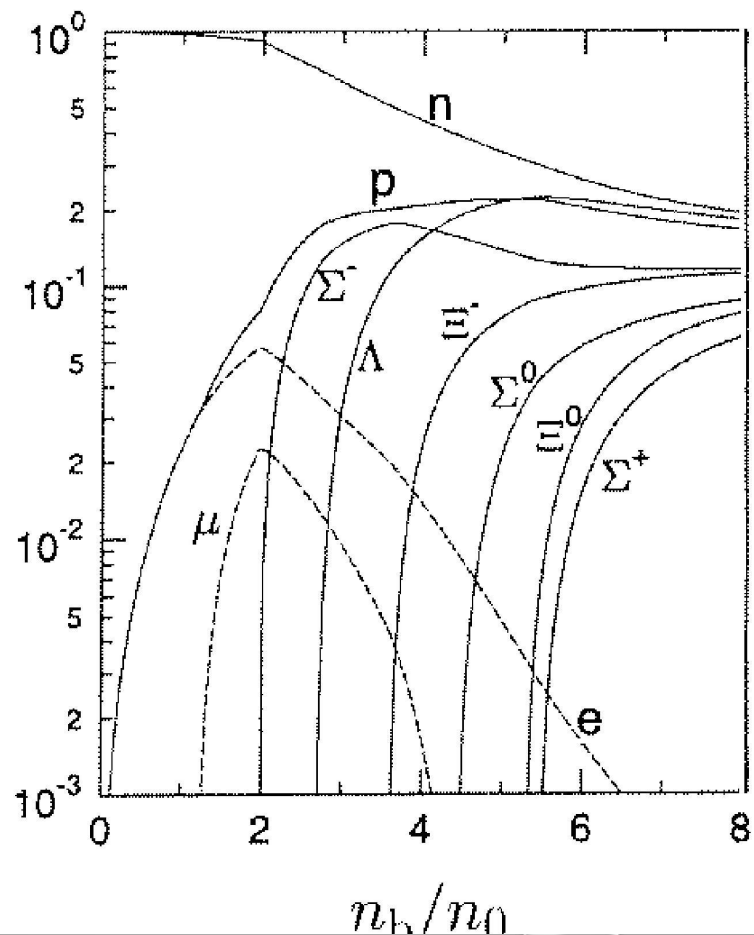


Рождаясь очень горячими, нейтронные звезды остывают со временем в начале за счет излучения нейтрино, а затем — за счет излучения фотонов с поверхности.

# ЧАСТИЦЫ ВНУТРИ



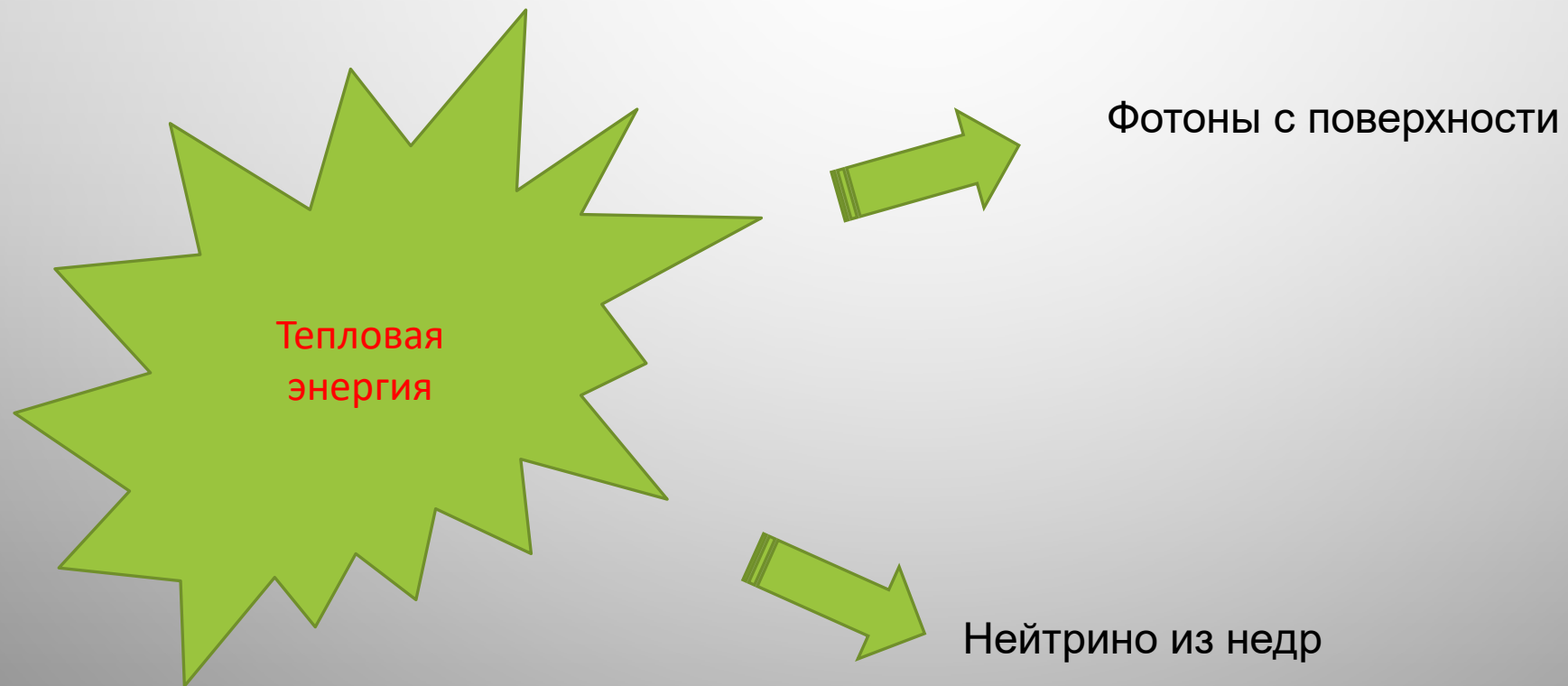
Effective chiral model of Hanauske et al. (2000)



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.

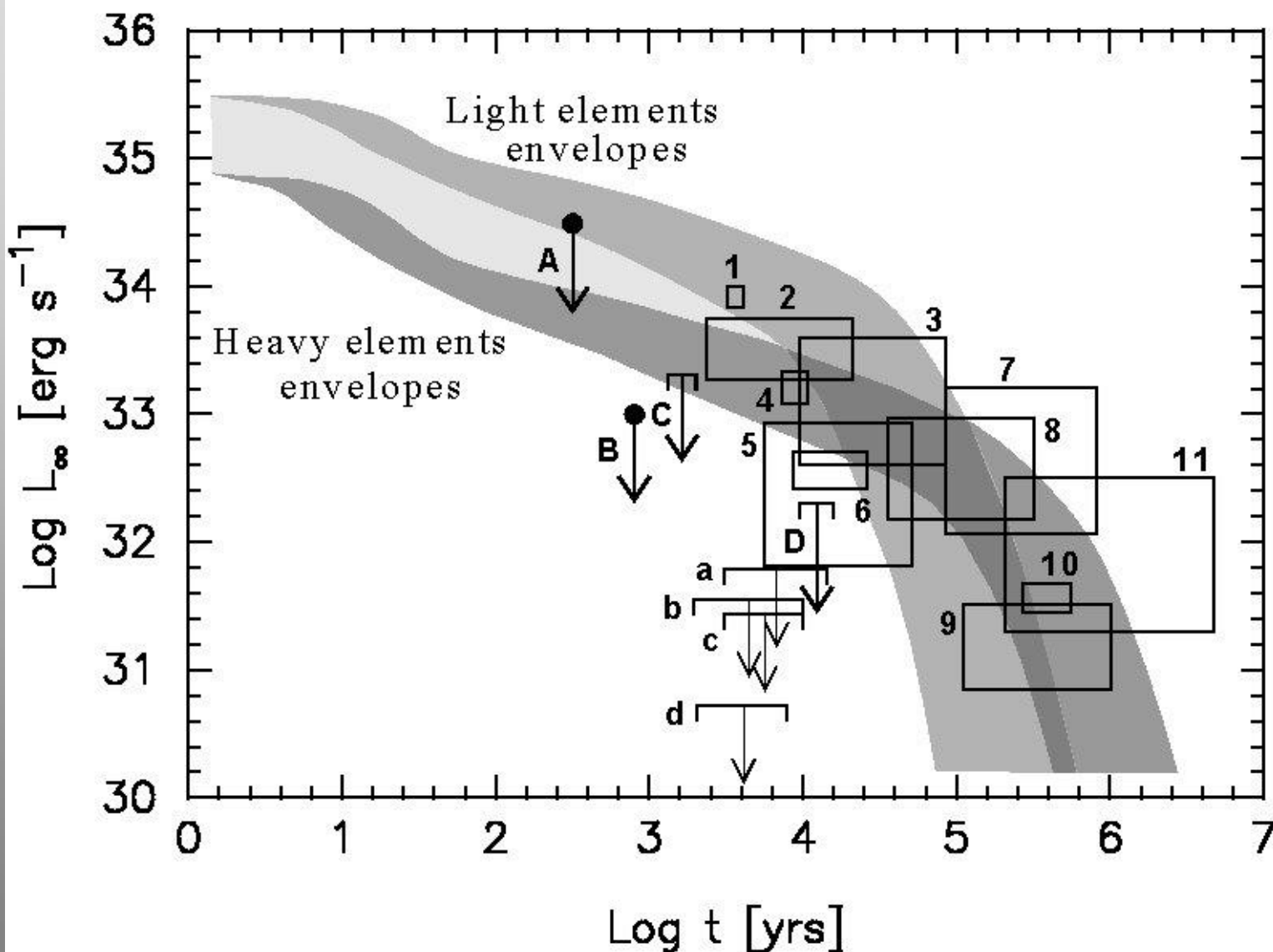
# ОСНОВНЫЕ НЕЙТРИННЫЕ ПРОЦЕССЫ

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

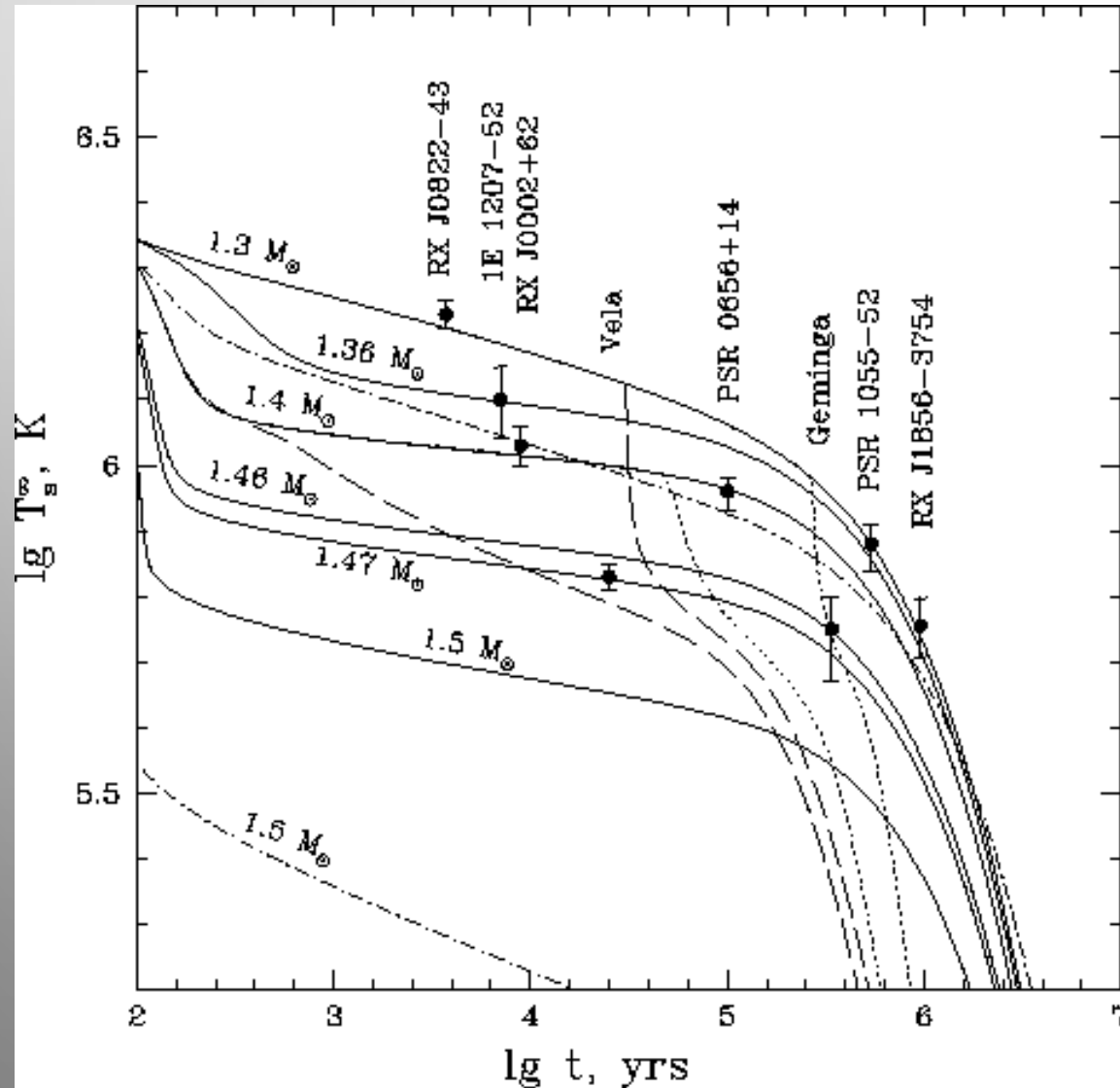
$$Q_{\text{slow}} = Q_s T_9^8, \quad Q_{\text{fast}} = Q_f T_9^6$$

# КРИВЫЕ ОСТЫВАНИЯ



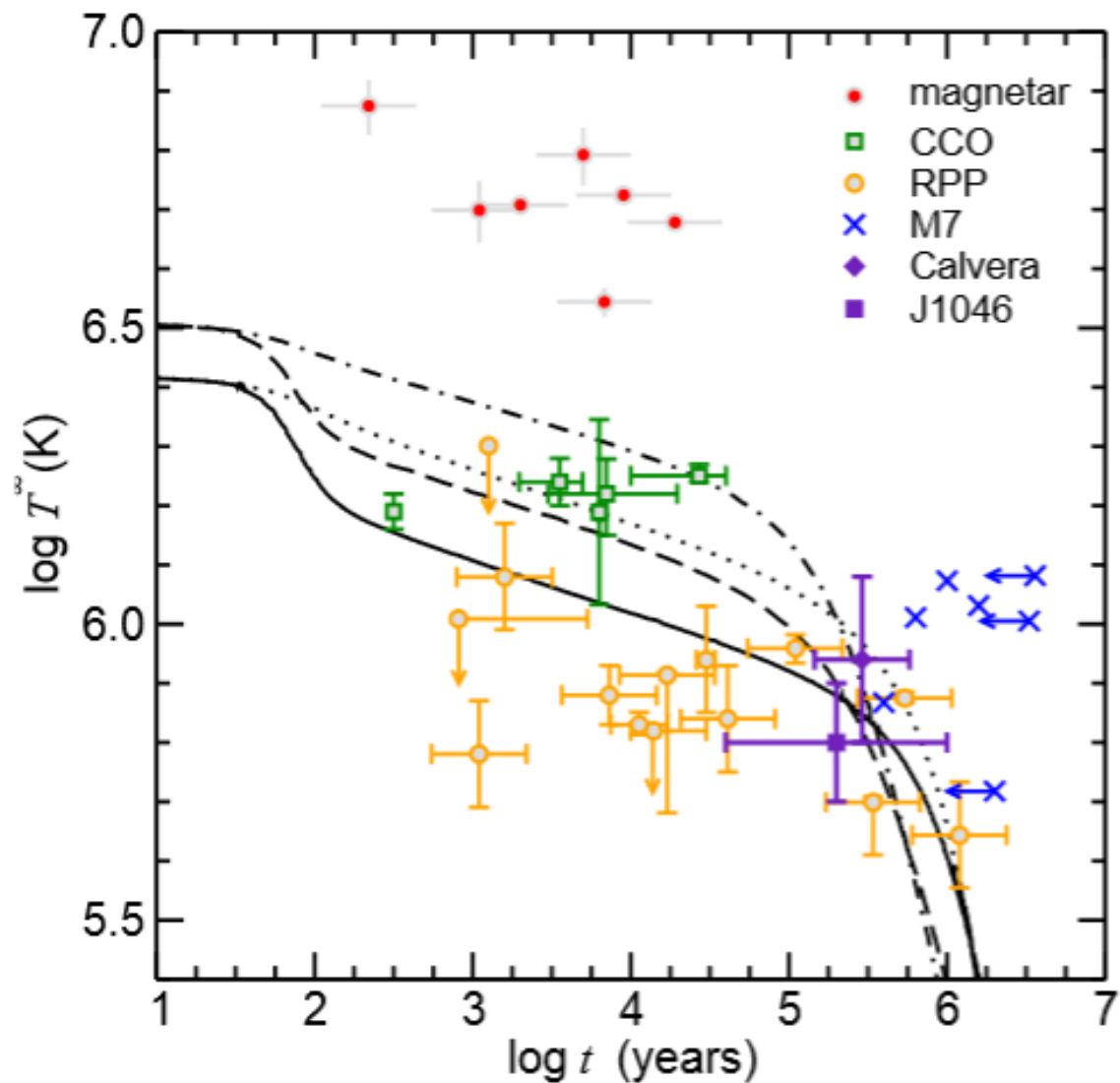
Теоретические кривые необходимо сопоставлять с данными наблюдений.

# 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.

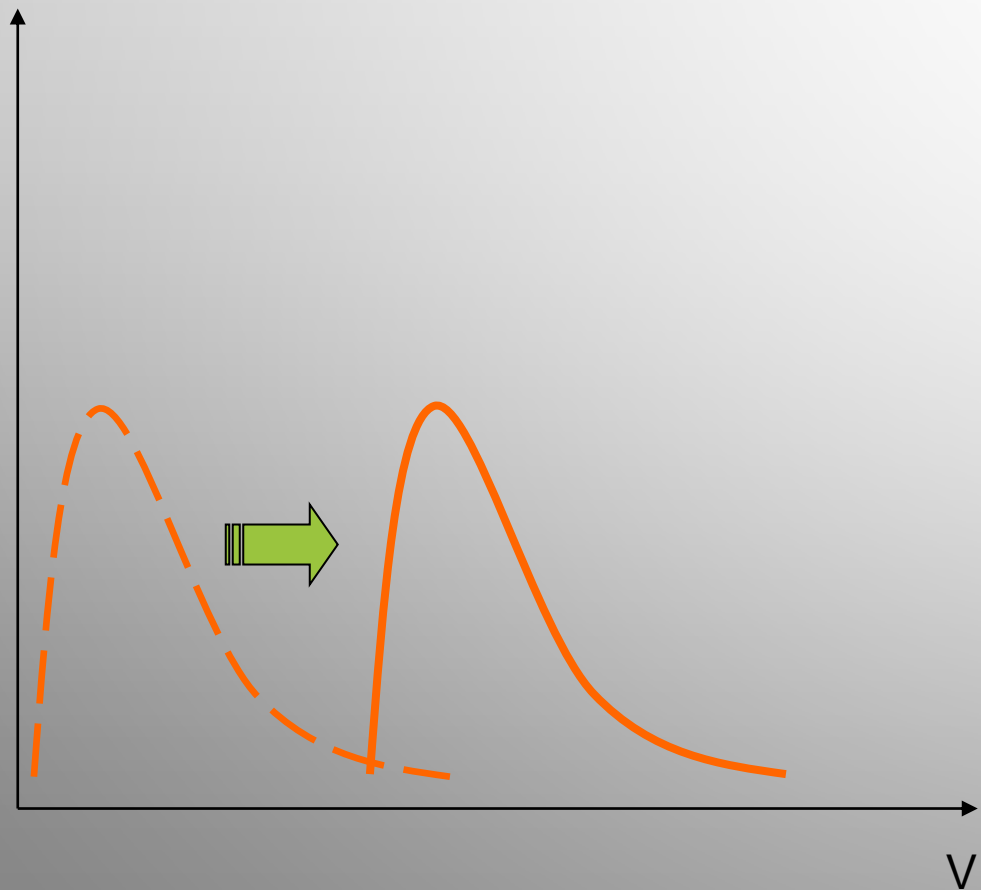


# КИНЕМАТИЧЕСКИЙ ВОЗРАСТ

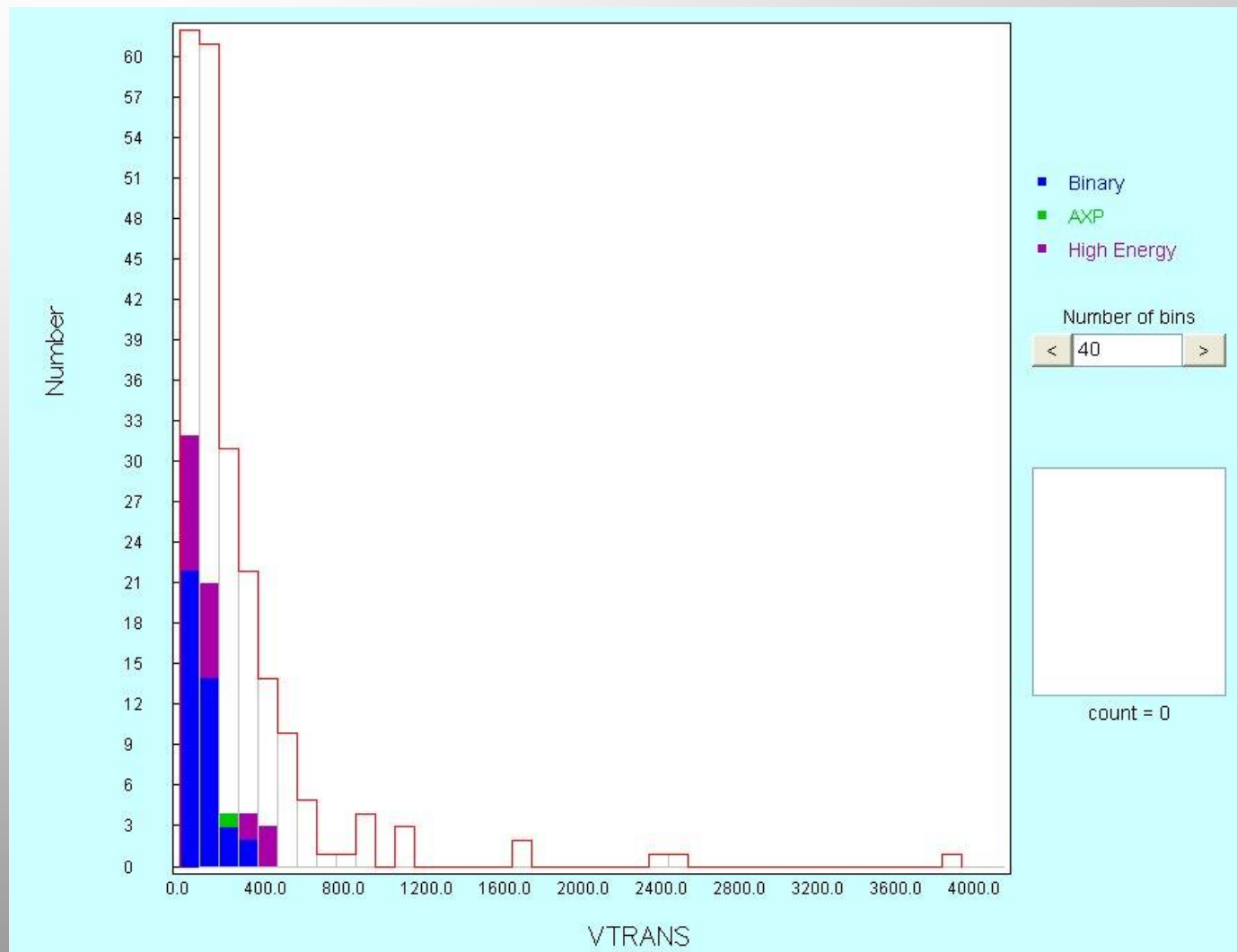


Если мы знаем, где объекты родились, то по их современному положению и скоростям можно определить возраст.

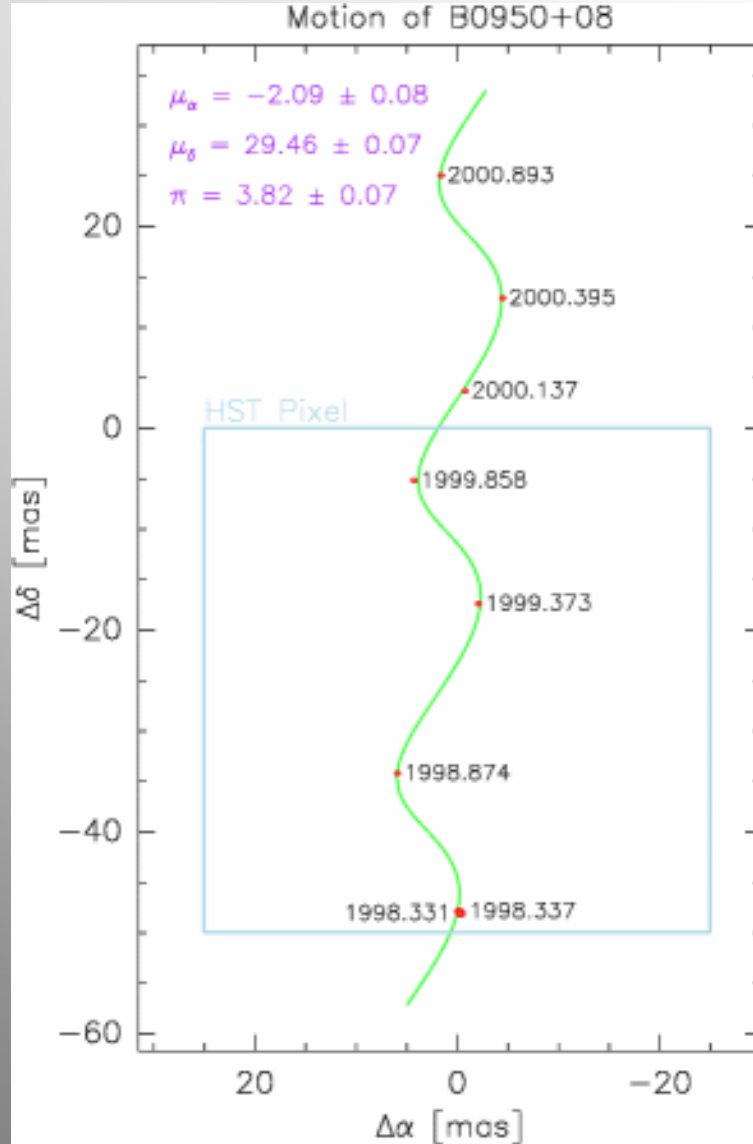
# СКОРОСТИ



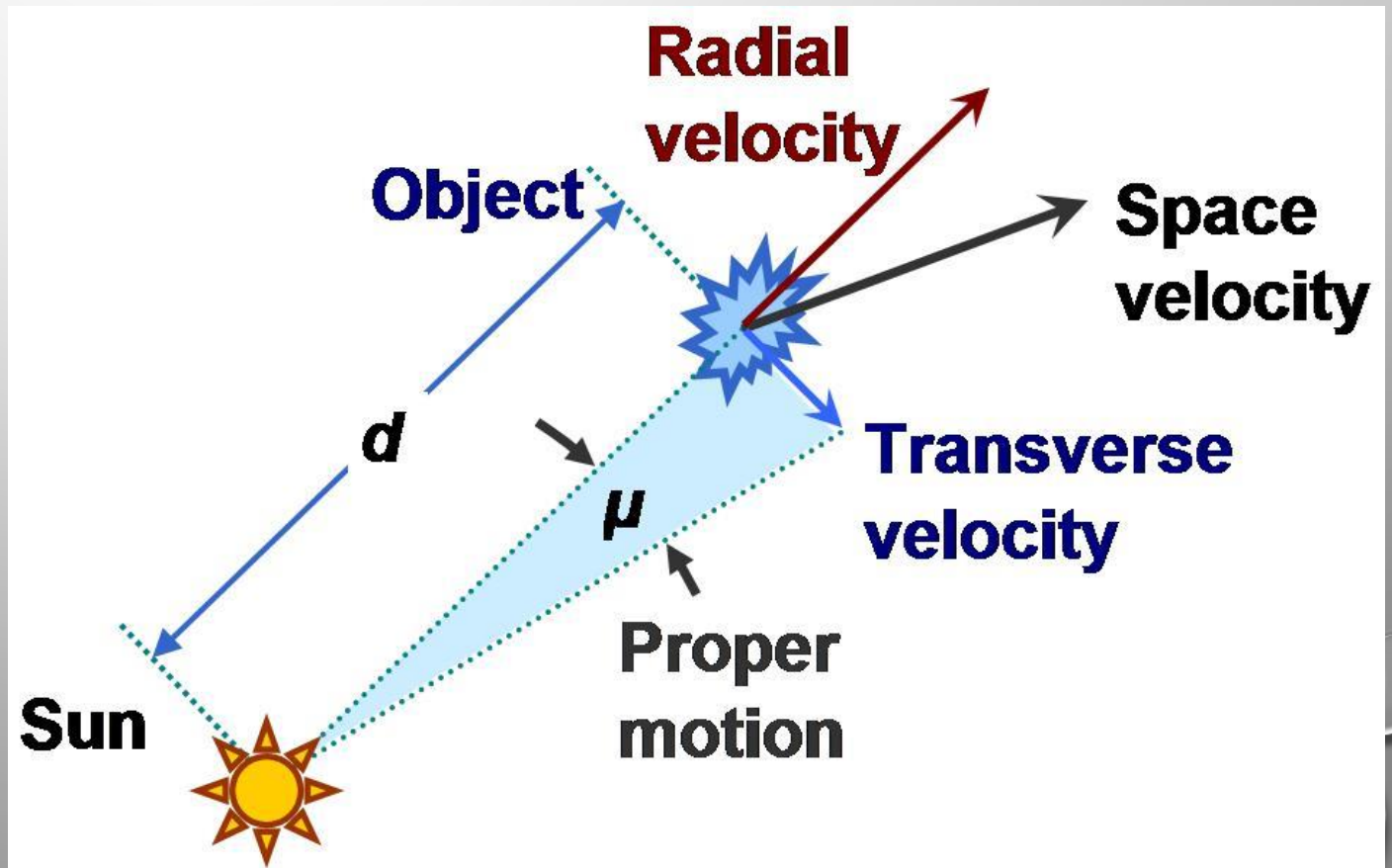
Прародители имеют скорости  $\sim 10-30$  км/с  
А пульсары имеют скорости  $\sim 100-500$  км/с



# ДВИЖЕНИЕ ПУЛЬСАРОВ

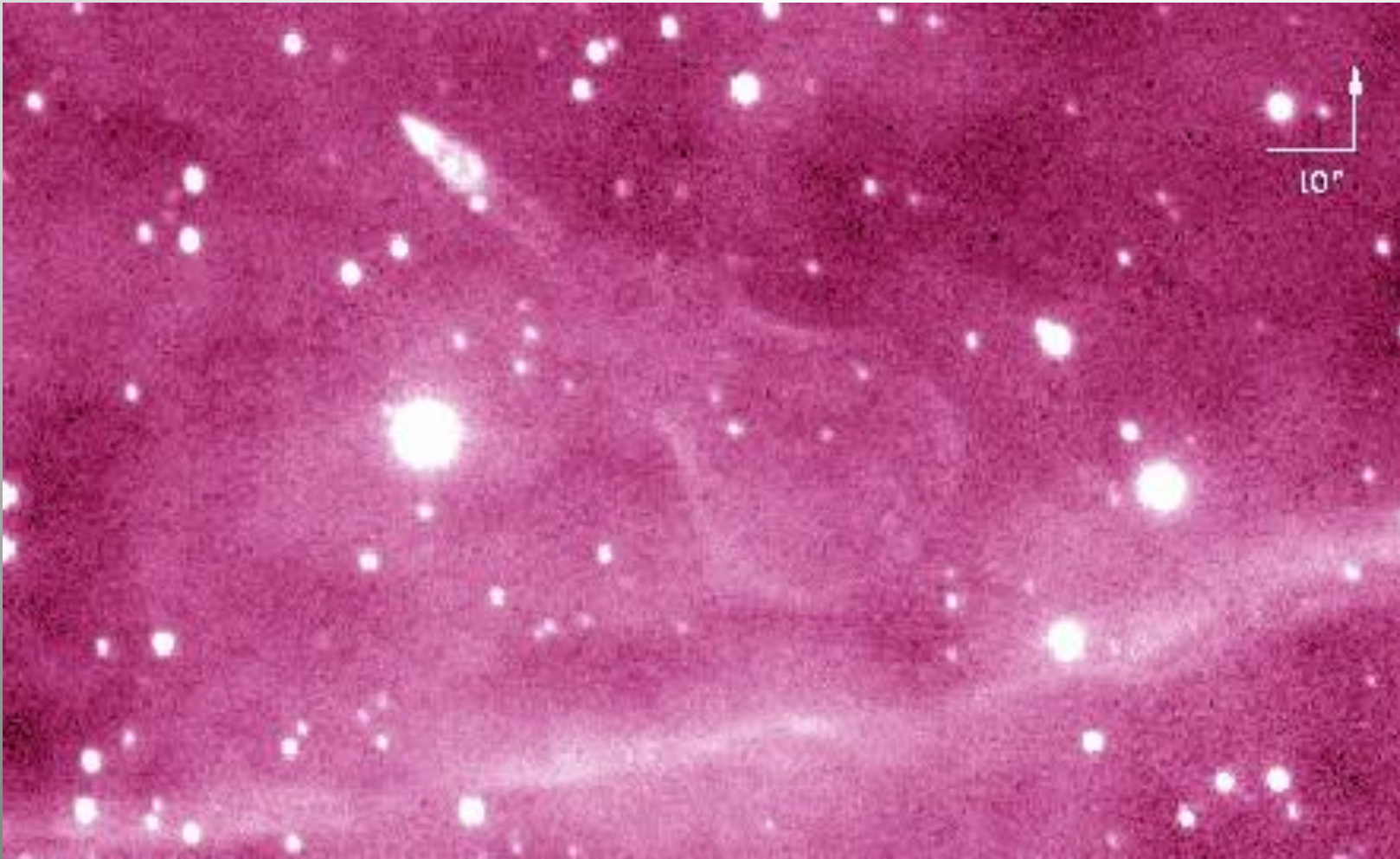


Пульсары имеют большие скорости.  
Это измеряют по их собственному движению.



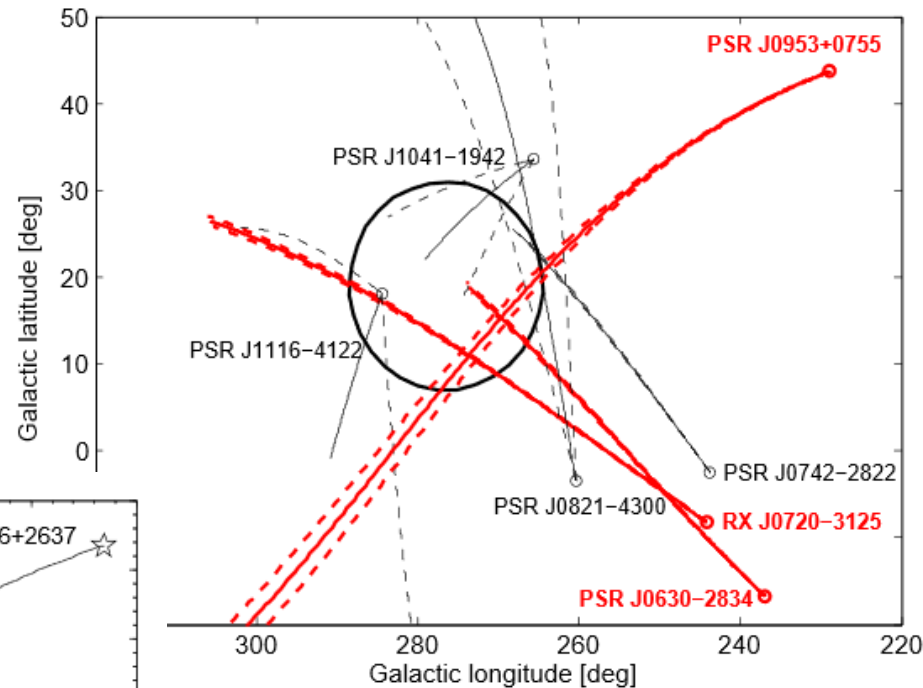
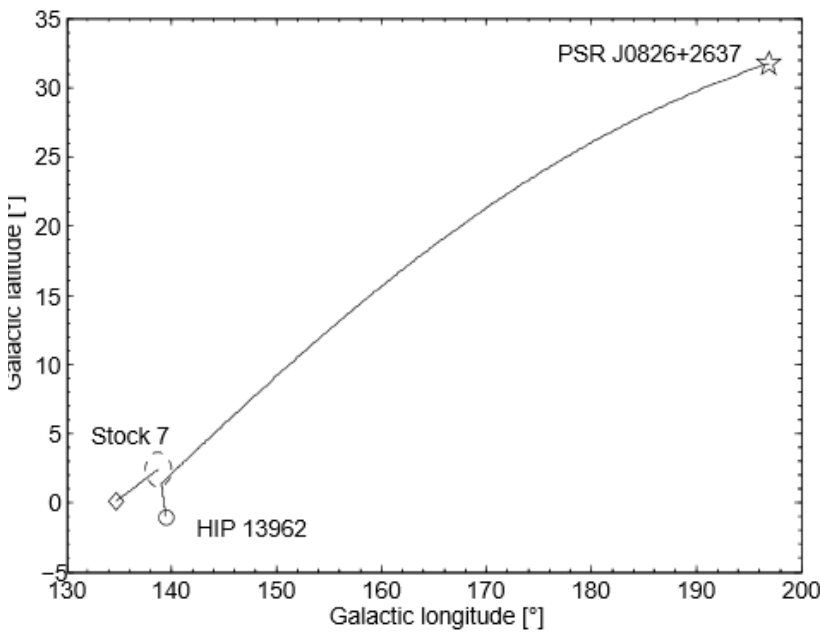
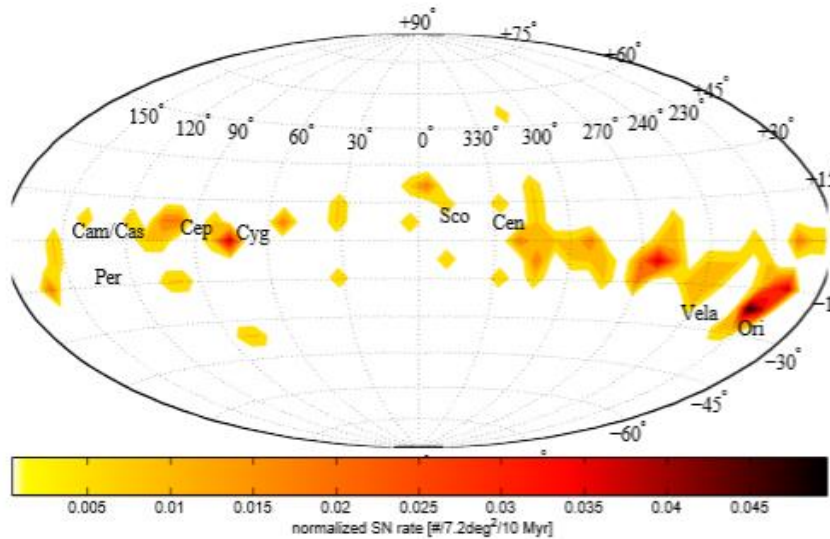
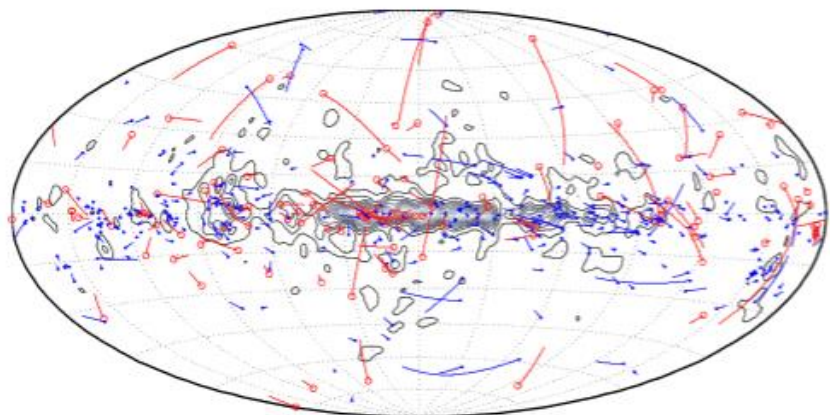
# СКОРОСТИ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД В ТУМАННОСТЯХ

<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

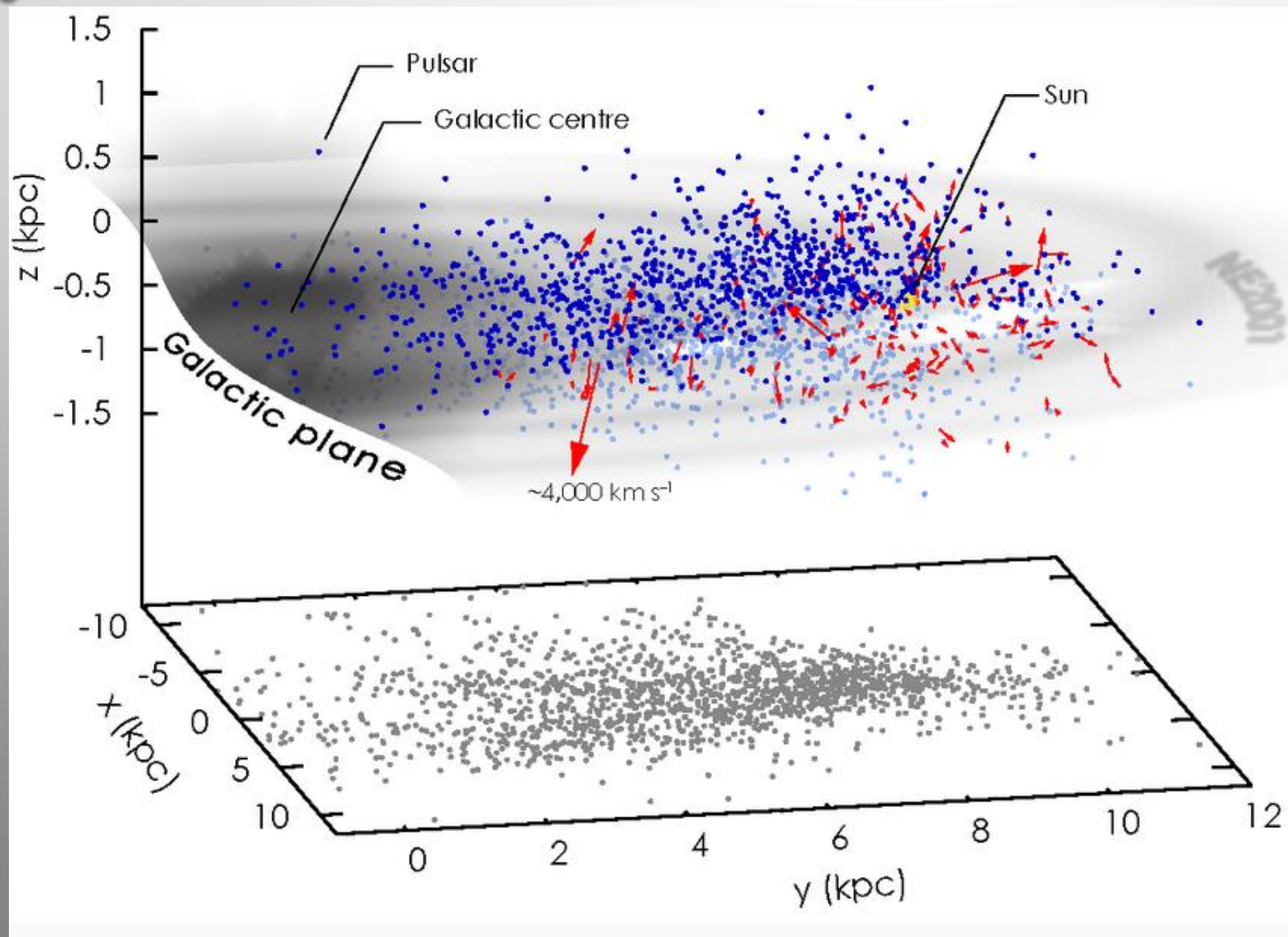


1202.1388

1401.4678

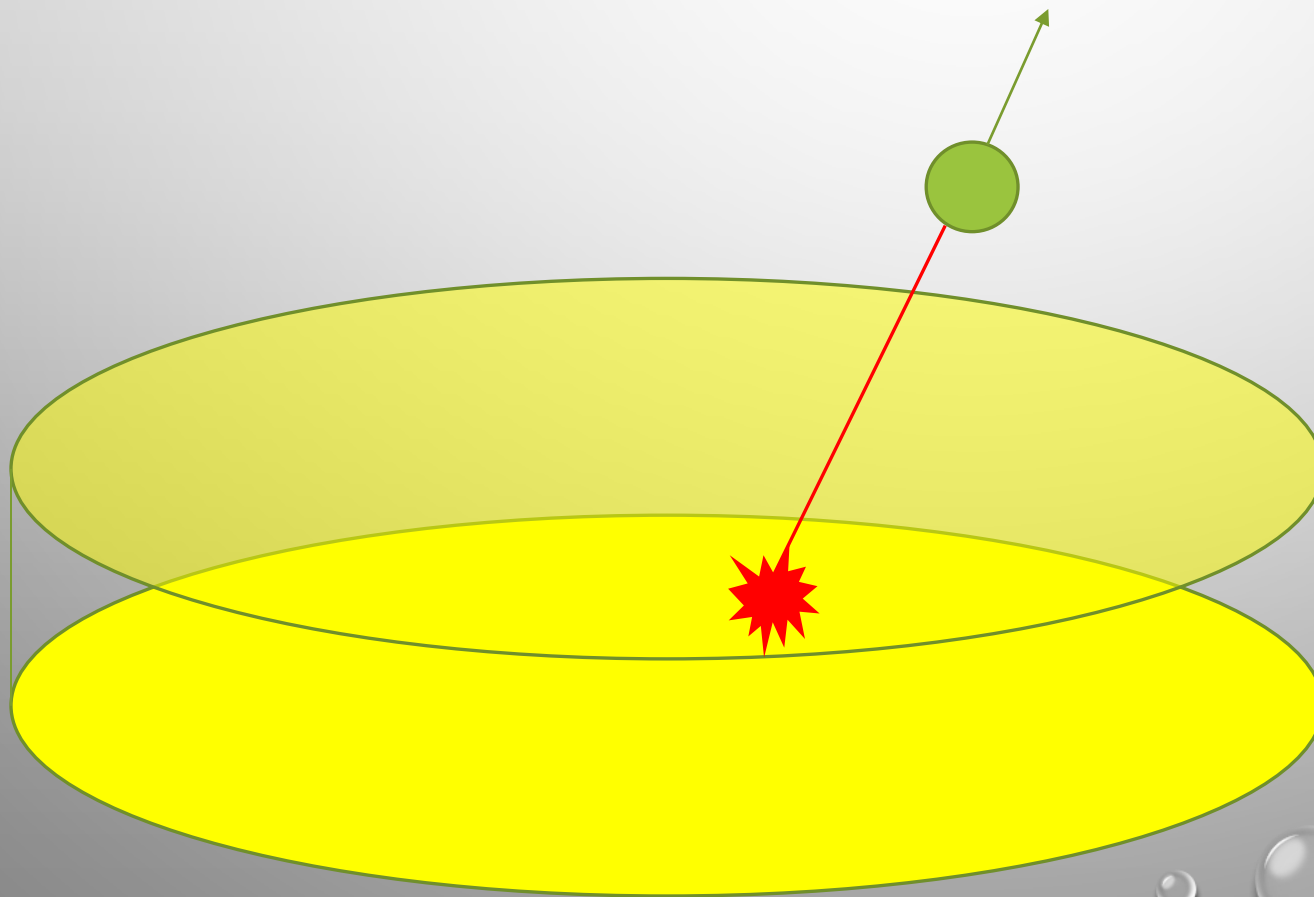
1307.5616

# 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.