



# Сжимаемость ядерной материи и нейтронные звезды

19 октября 2010 года  
Е. Крышень, Б. Л. Бирбраир



# Открытие нейтронных звезд

## Теоретические предсказания:

1932 – Ландау: звезда-ядро (ещё до открытия нейтрона)

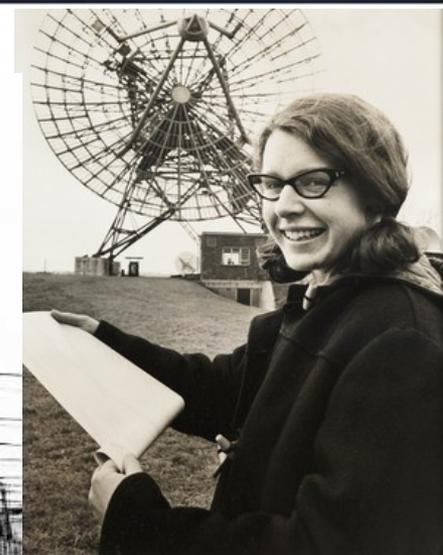
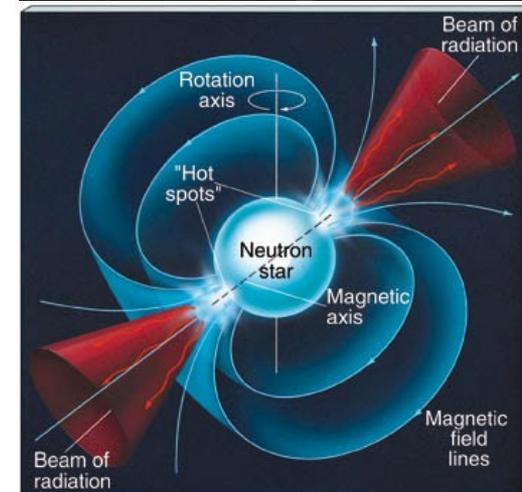
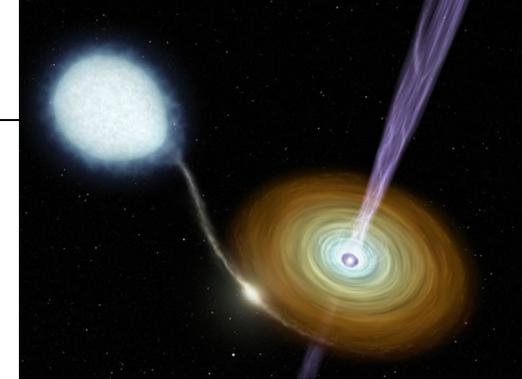
1934 – астрономы Бааде и Цвикки предположили, что нейтронные звезды могут быть результатом взрыва сверхновых

## Экспериментальное обнаружение:

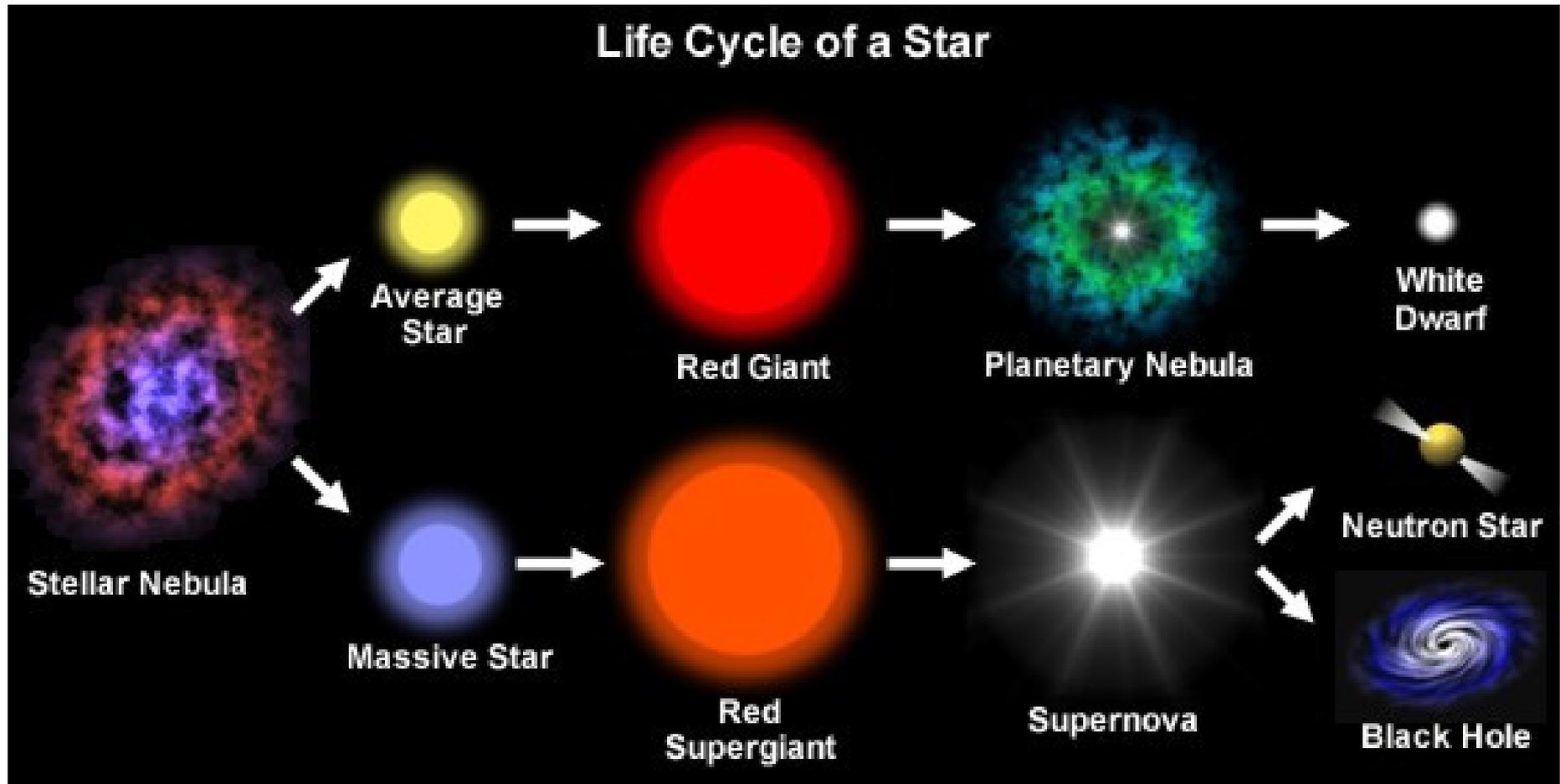
1962 – Первые рентгеновские детекторы выведены на орбиту. Были обнаружены источники рентгена, но их происхождение оставалось загадкой. Позднее оказалось, что это эффект аккреции в двойных системах: вещество с компаньона в двойной системе перетекает на поверхность нейтронной звезды и разогревает их. При падении вещества на нейтронную звезду выделяется до 10% от  $mc^2$ . Разогретые области излучают в рентгене, что и регистрируется как пульсирующее рентгеновское излучение.

1967 - серендипическое открытие – изучали мерцание радиоисточников, нашли пульсирующие источники с очень точным и коротким периодом (Джоселин Белл). Энтони Хьюиш – руководитель проекта (1974 – нобелевская премия).

1968 – открытие пульсара в Крабовидной туманности



# Происхождение нейтронных звезд



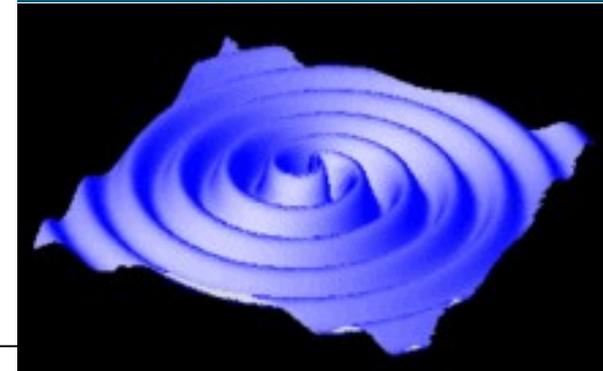
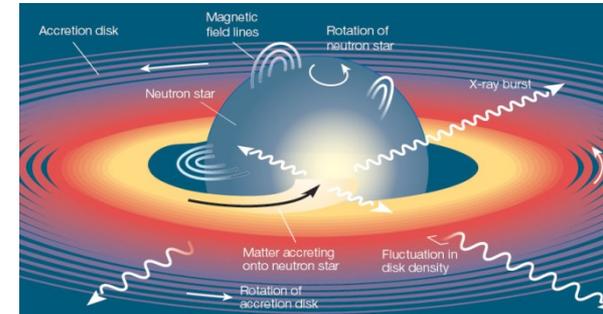
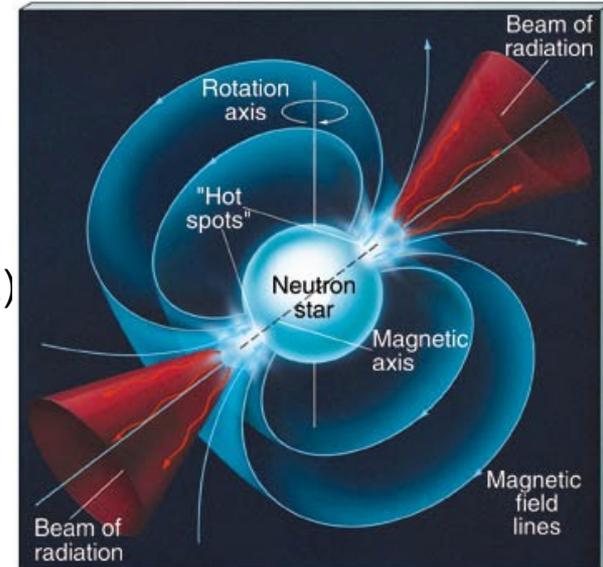
# Типы нейтронных звезд и наблюдаемые

Типы нейтронных звезд:

- Пульсары – периодическое излучение в радиодиапазоне
- Аккрецирующие нейтронные звезды - рентгеновское излучение в двойных системах с белым карликом или обычной звездой
- Радиотихие молодые нейтронные звезды (рентген + оптика)
- Магнитары ( $B > 10^{14}$  Гс)
- Источники гамма-всплесков
- Быстрые транзиенты (очень короткие импульсы) и пр.

Наблюдаемые:

- Спектр масс ( $\sim 1 - 2$  массы солнца)
- Период вращения (от  $\sim 1$  мс до 10 с)
- Глитчи
- Гравитационное красное смещение ( $z$  до 0.35)
- Спектры излучения
- Динамика аккреции
- Сейсмология звездотрясений
- Момент инерции
- Нейтрино от взрывов сверхновых
- Испускание гравитационных волн



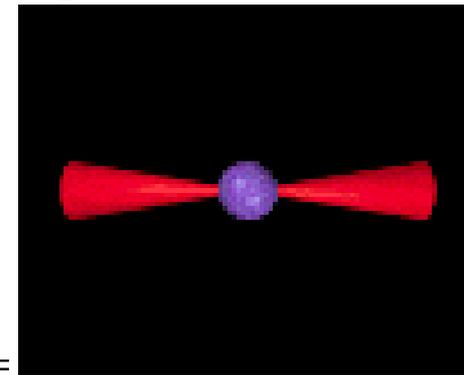
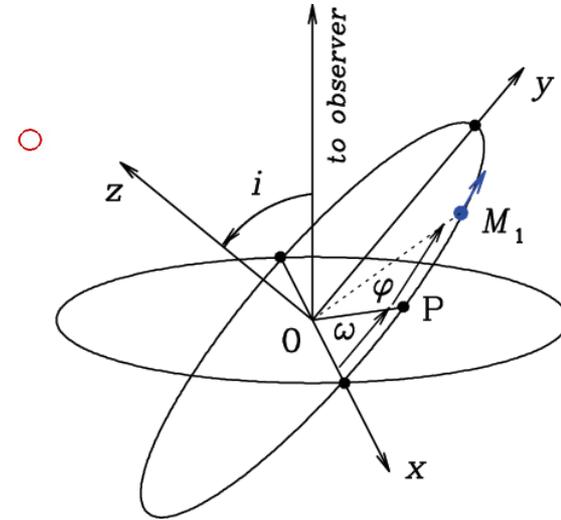
# Пример: измерение масс звезд в двойных НЗ

## Кеплеровские параметры:

- $e$  – эксцентриситет орбиты
- $a$  – большая полуось
- $i$  – угол наклона орбиты к картинной плоскости
- $K$  – полуамплитуда кривой лучевых скоростей
- $P$  – период вращения

## Релятивистские параметры (эффекты ОТО):

- $dP/dt$  – уменьшение орбитального периода
- $d\omega/dt$  – вековой дрейф периастра ( $e \gg 0$ )
- $\gamma$  – поперечный эффект Доплера + гравитационное красное смещение ( $e \gg 0$ )
- $s, r$  – параметры гравитационного запаздывания (эффект Шапиро) ( $i \sim 90^\circ$ )



## Пример – пульсар Халса – Тейлора

Кеплеровские параметры:  $e = 0.617, a = 2.1 \times 10^8 \text{ km}, i = 47^\circ$

$$v_{\max} \approx 400 \text{ km/s}, P = 59 \text{ ms} \approx 7.75 \text{ hrs}$$

## Релятивистские параметры:

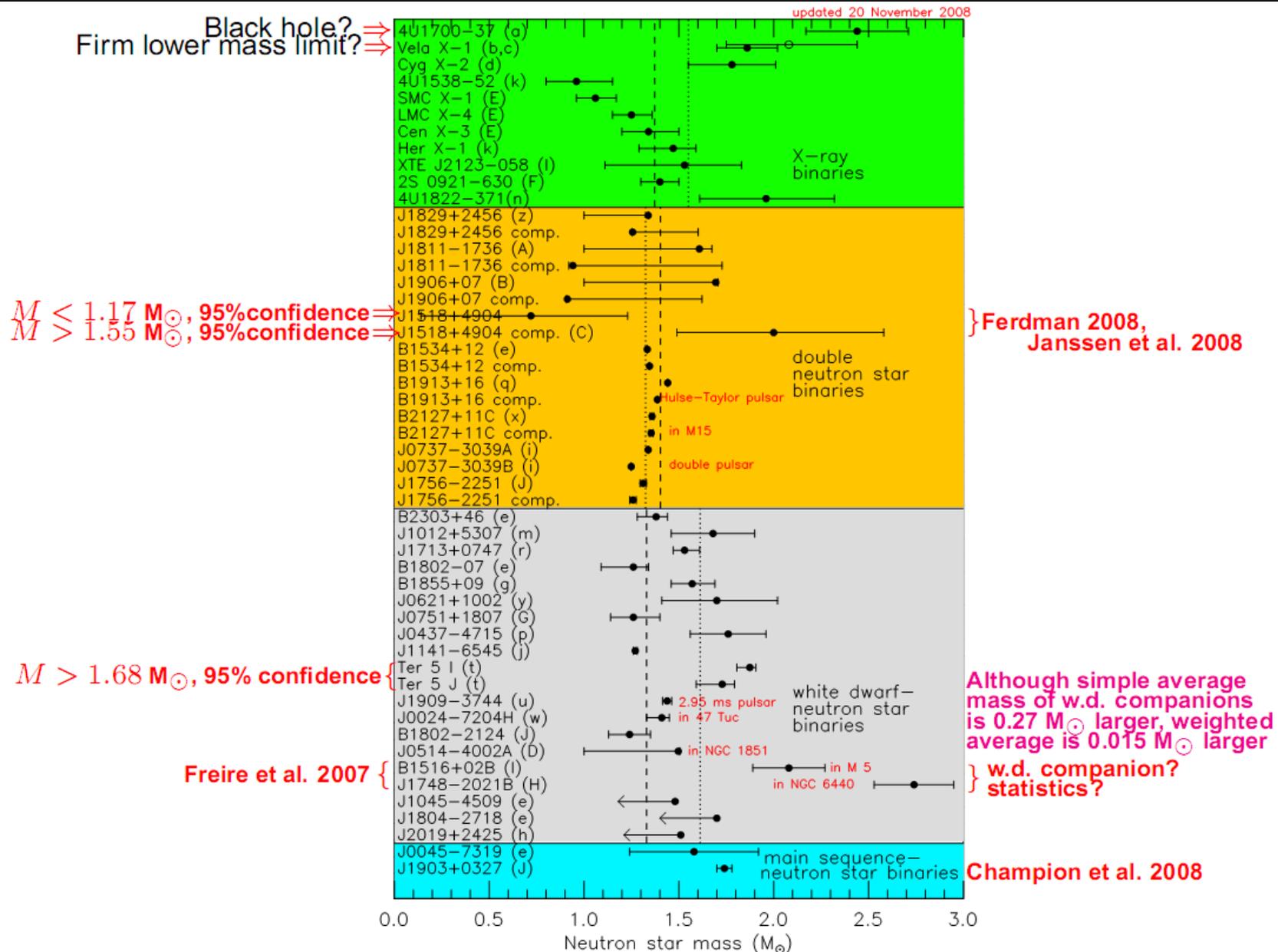
$$d\omega / dt = 4.226607 \pm 0.000007 \text{ deg/year} \quad dP_b / dt = -(2.4086 \pm 0.0052) \times 10^{-12} \text{ s/s}$$

$$\gamma = 0.004294 \pm 0.000001$$

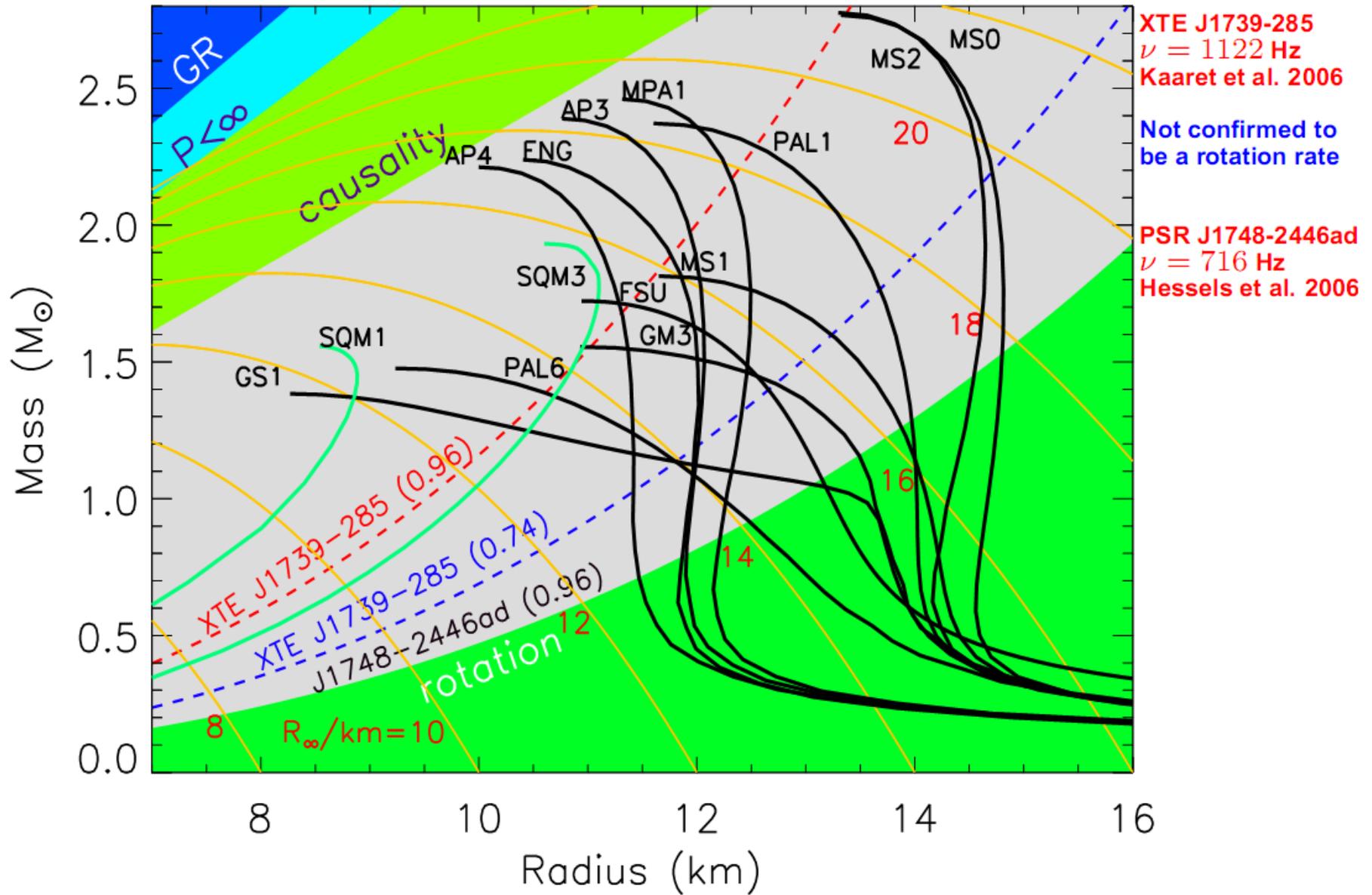
$$M_1(2\sigma) = (1.4408 \pm 0.0006) M_e$$

$$M_2(2\sigma) = (1.3873 \pm 0.0006) M_e$$

# Измеренные массы нейтронных звезд



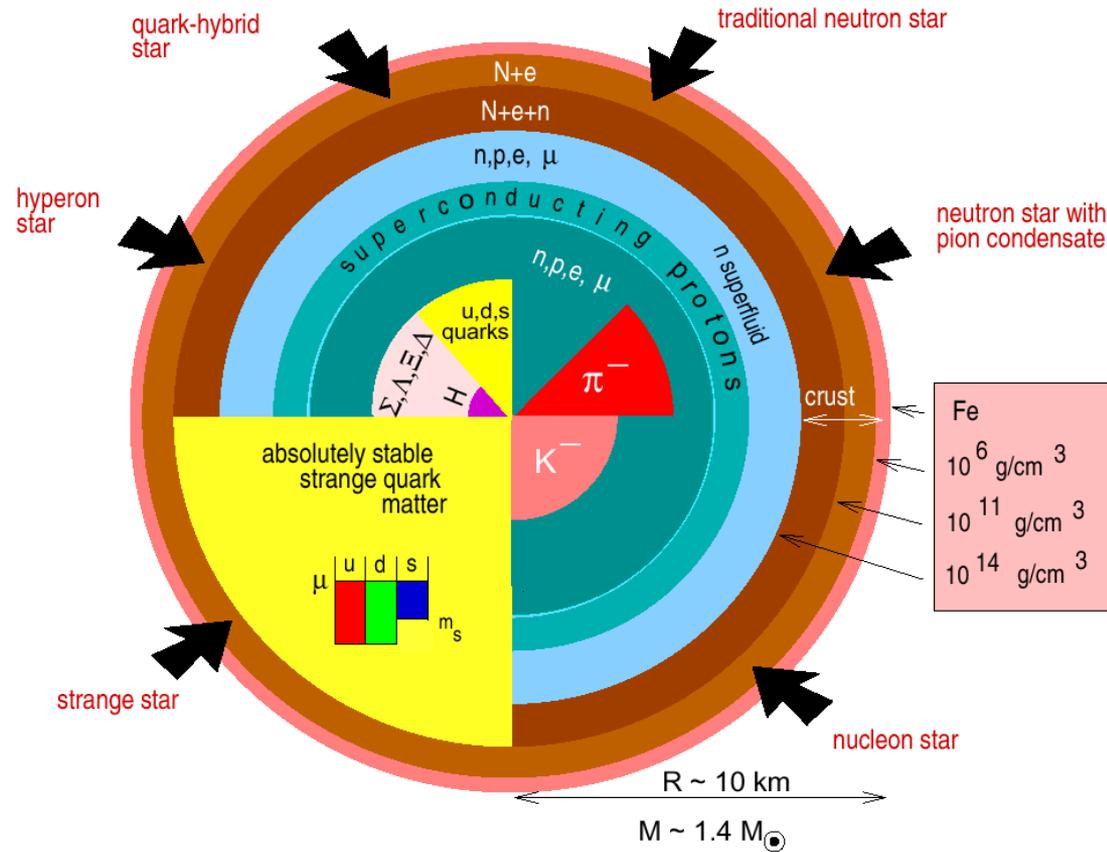
# Диаграмма масса-радиус и теоретические предсказания



# Внутреннее строение нейтронных звезд

## Характеристики НЗ:

- Радиус  $\sim 10$  км
- Массы  $\sim 1 - 2$  солнечной
- Плотность  $\sim$  до 10 ядерных
- Сильные магнитные поля до  $10^{15}$  Гс
- Быстрое вращение ( до 1000 об/сек)

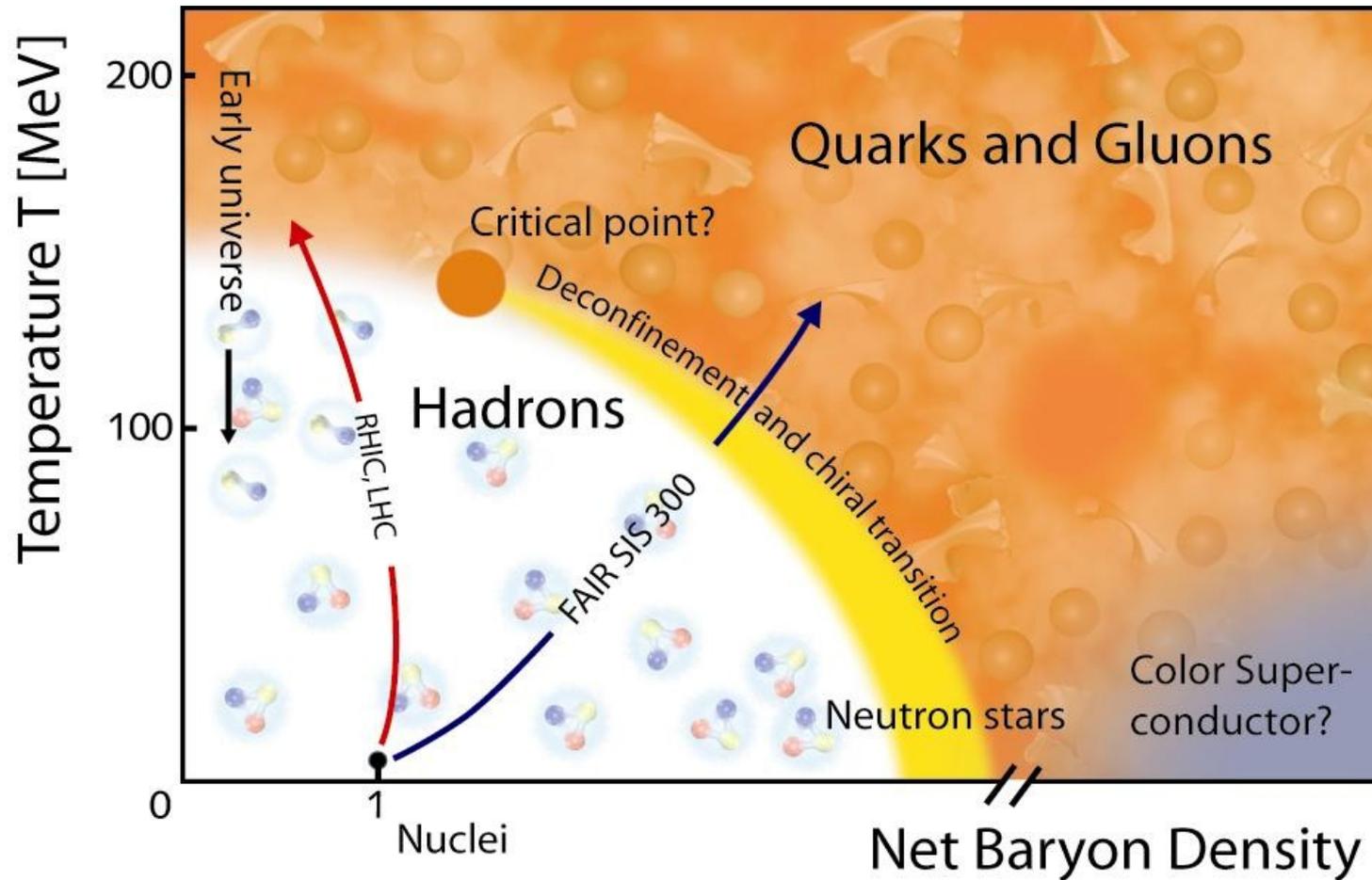


## Различные гипотезы строения НЗ:

- 1) Стандартные НЗ: преу
- 2) гиперонная звезда
- 3) звезда с пионным конденсатом
- 4) звезда с каонным конденсатом
- 5) Кварковая звезда
- 6) Нейтронная звезда с кварковым ядром

(c) F. Weber

# Место нейтронных звезд на фазовой диаграмме



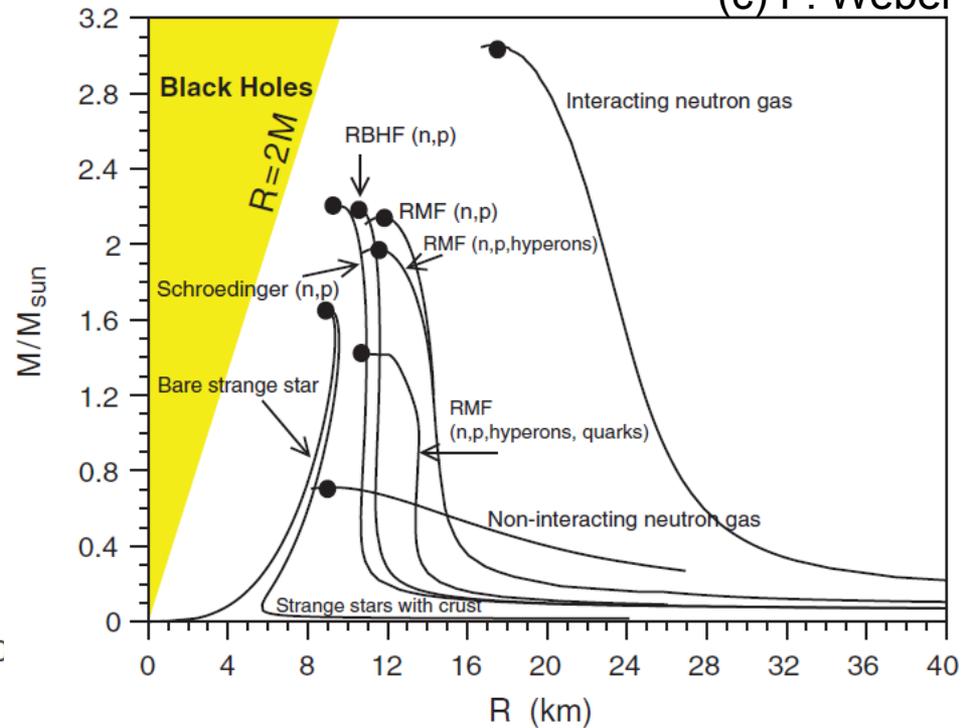
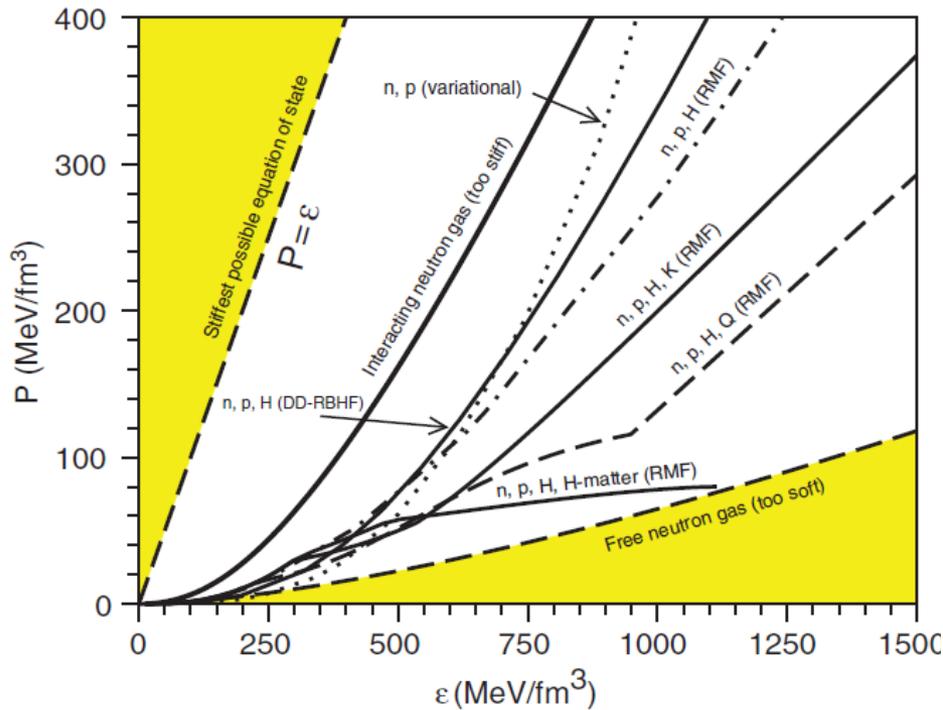
# Различные подходы к описанию ядерной материи

- Методы, основанные на модели Томаса-Ферми
- Вариационные методы
- Методы с применением Монте-Карло техники
- Метод функций Грина
- Модель релятивистского среднего поля (RMF)
- Метод Хартри-Фока (RHF), метод Хартри-Фок-Бракнера (RBHF), метод Хартри-Фок-Бракнера с зависимостью от плотности (DD-RBHF).
- Модель Намбу-Йона-Лазинио (NJL)
- SU(3)-киральная модель среднего поля

Все модели должны хорошо описывать основные характеристики ядерной материи при нормальной ядерной плотности (энергия связи на нуклон, энергия симметрии, сжимаемость)

# Уравнения состояния и массы нейтронных звезд

(c) F. Weber



- Различные гипотезы о поведении ядерной материи при больших плотностях приводят к различным EOS и, как следствие, к различным предсказаниям на массы нейтронных звезд.
- Результаты зависят от деталей модели (RBHF, RMF и другие)
- При определенной центральной плотности достигается максимальная масса нейтронной звезды. Звезды с большей центральной плотностью и с большей массой оказываются неустойчивыми.
- Максимальное значение массы можно сравнить с верхней границей наблюдаемого спектра нейтронных звезд, что позволяет отобрать удачные теории ядерной материи.

# Модель релятивистского среднего поля (RMF)

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_0 = \sum_B \bar{B} [ & \gamma_0 (q_0 - s_\omega B g_\omega \omega - s_\rho B g_\rho \rho - s_\phi B g_\phi \phi) - \boldsymbol{\gamma} \mathbf{q} - m_B - s_\sigma B g_\sigma \sigma - s_\delta B g_\delta \delta - s_f B g_f f ] B + \\ & + \frac{1}{2} m_\omega^2 \omega^2 + \frac{1}{4} \lambda_\omega \omega^4 + \frac{1}{2} m_\rho^2 \rho^2 + \frac{1}{2} m_\phi^2 \phi^2 - \frac{1}{2} m_\sigma^2 \sigma^2 - \frac{1}{3} \lambda_3 \sigma^3 - \frac{1}{4} \lambda_4 \sigma^4 - \frac{1}{2} m_\delta^2 \delta^2 - \frac{1}{2} m_f^2 f^2 + \\ & + \mathcal{L}_{em}. \end{aligned} \quad (2)$$

Барионы:  $B = n, p, \Sigma^-, \Lambda, \Sigma^0, \Sigma^+, \Xi^-, \Xi^0$

Мезоны:  $\sigma, \rho, \omega, \delta, \phi, f$

Лептоны:  $e, \mu$

Основные особенности модели RMF, используемой в данной работе:

- используются пустотные константы нуклон-нуклонных взаимодействий, полученные из различных версий Боннского потенциала
- гиперонные константы связи определяются по правилам кваркового счета
- Зависимость от плотности учитывается путем введения нелинейностей и прямым учетом многочастичных сил
- Рассмотрено влияние странных скалярного и векторного мезонов ( $f$  и  $\phi$ )

Основные характеристики ядерной материи, используемые для определения параметров модели:

- равновесная плотность  $n_0 = 0.16 \text{ ФМ}^{-3}$
- Энергия связи на нуклон  $B_0 = 17.035 \text{ МэВ}$
- Энергия симметрии  $S = 31.45 \text{ МэВ}$
- Сжимаемость ядерной материи  $K = 234 \text{ МэВ}$

# Введение многочастичных сил

1. Введение нелинейностей в изоскалярных каналах:

$$\begin{array}{l}
 -\frac{1}{2}m_\sigma^2\sigma^2 - \frac{1}{3}\lambda_3\sigma^3 - \frac{1}{4}\lambda_4\sigma^4 \\
 + \frac{1}{2}m_\omega^2\omega^2 + \frac{1}{4}\lambda_\omega\omega^4
 \end{array}
 \iff
 \begin{array}{c}
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array}
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array} \\
 \text{---} \\
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array}
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array}
 \end{array}
 =
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array}
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array}
 +
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array}
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array}
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array}
 +
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array}
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array}
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array}
 +
 \begin{array}{c} \uparrow \\ \bullet \\ \uparrow \end{array}
 + \dots$$

2. Прямое введение многочастичных сил в изовекторных каналах:

а) мягкая версия:

$$\mathcal{L}_{\text{soft}} = \mathcal{L}_0 + \frac{1}{2}\beta n_\sigma n_\delta^2 - \sum_B \bar{B} \left( \frac{1}{2}\beta s_{\sigma B} n_\delta^2 + \beta s_{\delta B} n_\sigma n_\delta \right) B$$

б) жесткая версия:

$$\mathcal{L}_{\text{stiff}} = \mathcal{L}_0 + \xi n_\omega^2 n_\rho^2 - \sum_B \bar{B} \gamma_0 \left( \xi s_{\omega B} n_\omega n_\rho^2 + \xi s_{\rho B} n_\rho n_\omega^2 \right) B$$

Определение параметров нелинейностей:

$\lambda_3 \lambda_4 \lambda_\omega$  – по равновесной плотности  $n_0$ , энергии связи  $B_0$  и сжимаемости  $K$

$\beta(\xi)$  – по наблюдаемой энергии симметрии  $S$

# Сжимаемость ядерной материи

$$K = 9 \left. \frac{\partial P}{\partial n} \right|_{n=n_0} = 9n \left. \frac{\partial^2 \mathcal{E}}{\partial n^2} \right|_{n=n_0}$$

Общепринятым на сегодняшний день является значение  $\sim 230$  МэВ

Способы определения сжимаемости:

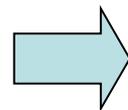
- Энергии возбуждения гигантских монопольных резонансов — вызывает сомнения, так как энергии ГМР меньше энергии соответствующих частично-дырочных переходов в спектре одночастичных состояний.
- Модель Маерса-Святецкого — Thomas-Fermi фит на измеренные массы ядер, содержит 7 подгоночных параметров.
- Эксперименты по столкновению тяжелых ионов (изучение выхода странности и эллиптических потоков) — результаты получены при конечных температурах, при допущении пустотных сечений взаимодействия нуклонов. Полученные значения зависят сильно моделезависимы.

# Расчет уравнения состояния ядерной материи

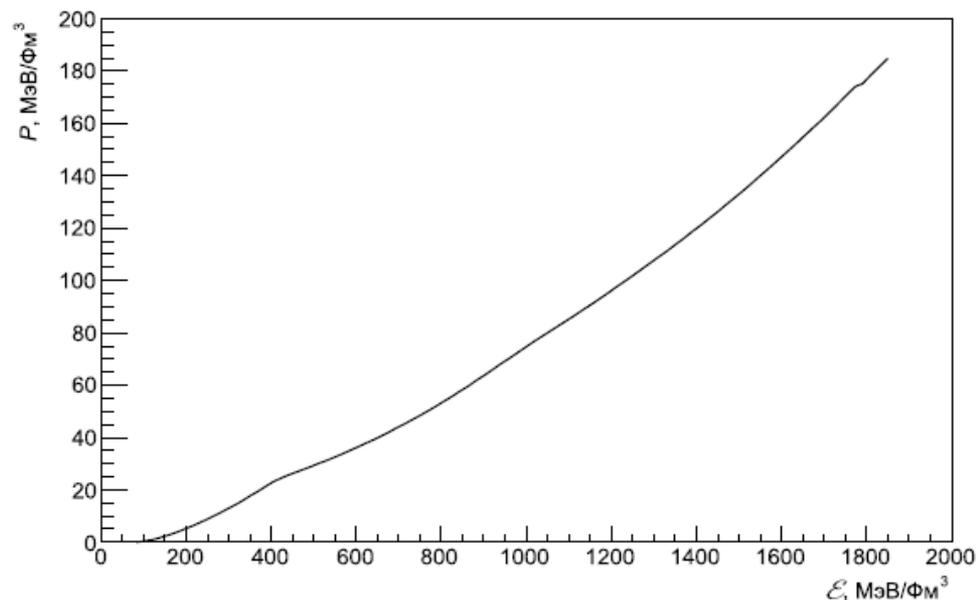
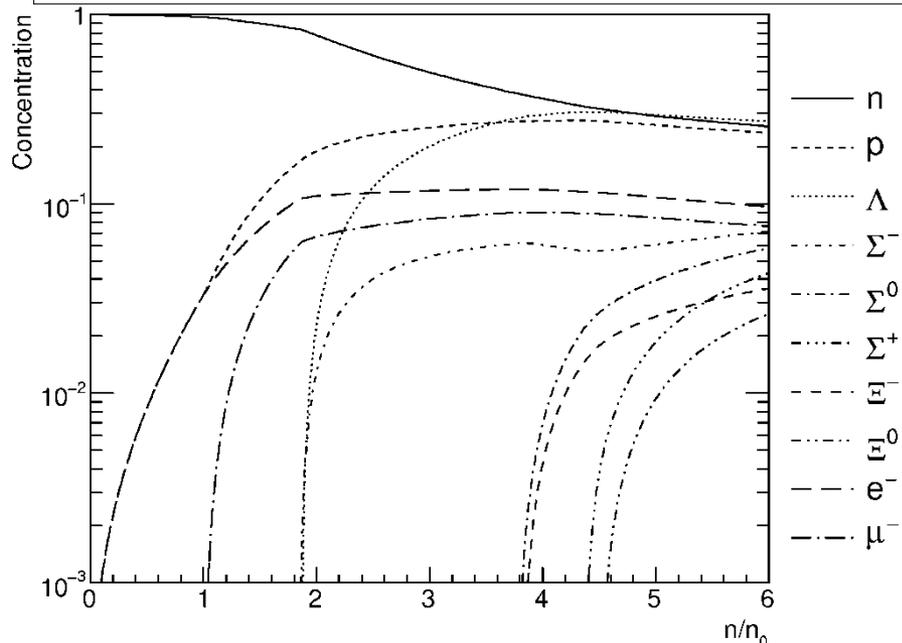
химическое равновесие  
электронейтральность

$$\mu_B = \mu_n - q_B \mu_e$$

$$\sum_B q_B c_B = c_L$$



Концентрации барионов +  
плотности мезонных полей



$$\mathcal{E}_{\text{soft}} = \frac{1}{4} \sum_B (3n_B E_B + n_{sB} m_B) + \frac{1}{4} b_\omega \eta (3n_\omega - \eta) + \frac{1}{2} b_\rho n_\rho^2 + \frac{1}{2} b_\phi n_\phi^2 + \frac{1}{4} b_\sigma \chi^2 y^2 \left(1 + \frac{y}{x}\right) +$$

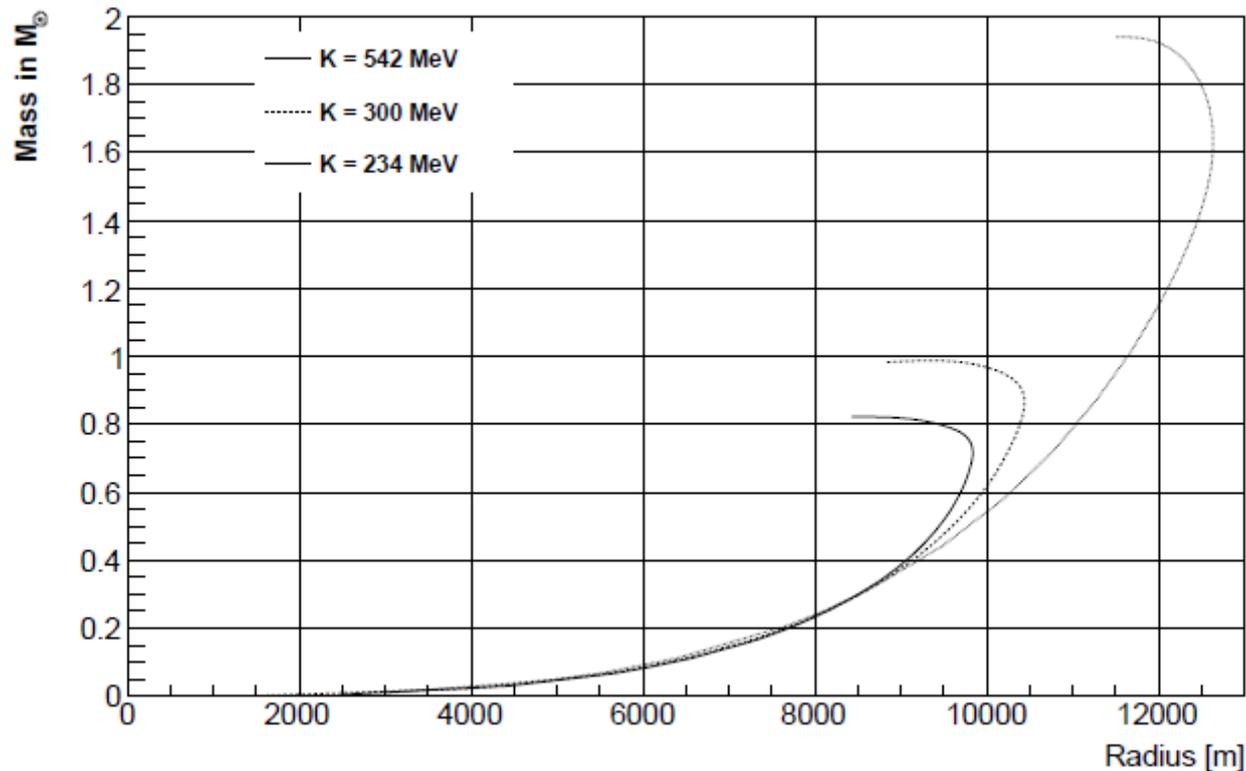
$$+ \frac{1}{4} b_\delta n_\delta^2 + \frac{1}{4} b_f n_f^2 - \frac{1}{8} \beta n_\sigma n_\delta^2 + \frac{\mu_e^4}{4\pi^2} + \left[ \frac{\mu_e}{4\pi^2} (\mu_e^2 - m_\mu^2)^{3/2} + \frac{m_\mu}{4} n_{s\mu} \right] \Theta(\mu_e - m_\mu),$$

$$P_{\text{soft}} = \frac{1}{4} \sum_B (n_B E_B - n_{sB} m_B) + \frac{1}{4} b_\omega \eta (n_\omega + \eta) + \frac{1}{2} b_\rho n_\rho^2 + \frac{1}{2} b_\phi n_\phi^2 - \frac{1}{4} b_\sigma \chi^2 y^2 \left(1 + \frac{y}{x}\right) -$$

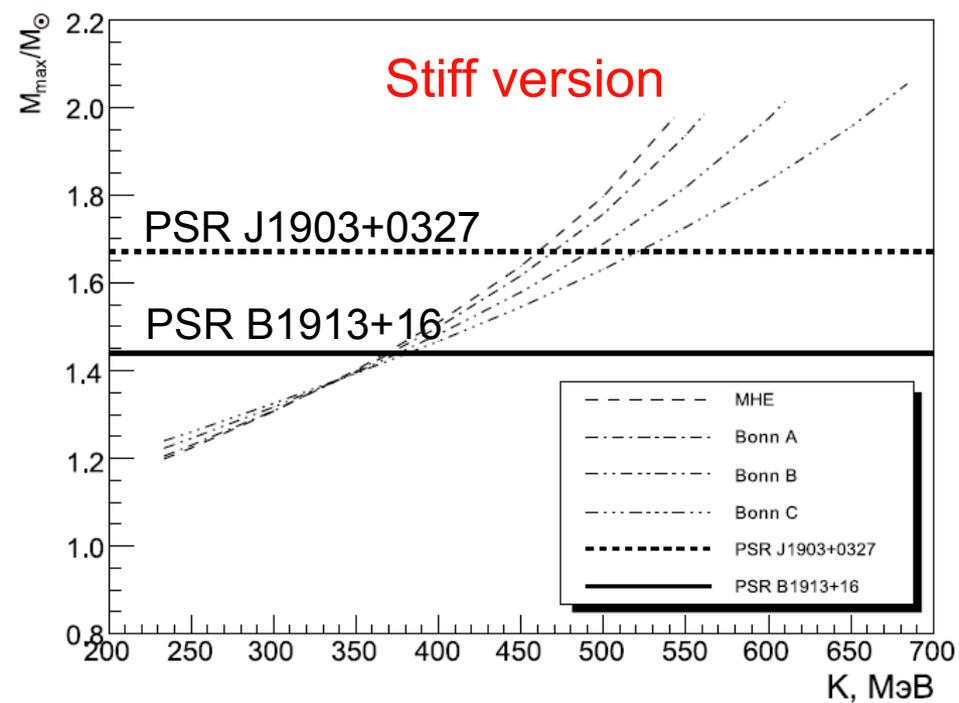
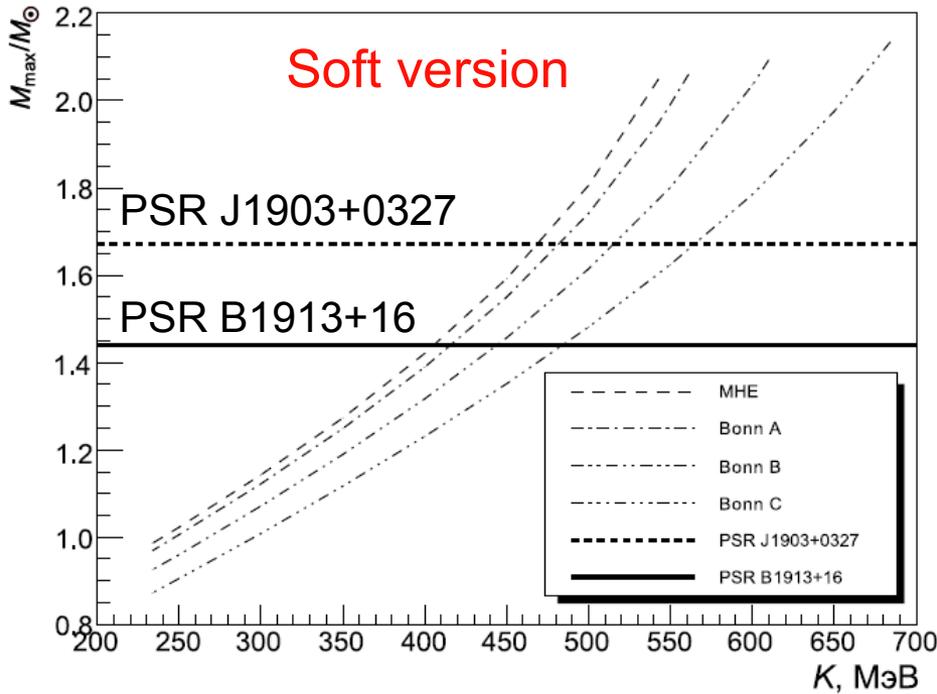
$$- \frac{1}{4} b_\delta n_\delta^2 - \frac{1}{4} b_f n_f^2 + \frac{1}{8} \beta n_\sigma n_\delta^2 + \frac{\mu_e^4}{12\pi^2} + \left[ \frac{\mu_e}{12\pi^2} (\mu_e^2 - m_\mu^2)^{3/2} - \frac{m_\mu}{4} n_{s\mu} \right] \Theta(\mu_e - m_\mu)$$

# Уравнение Толмена-Оппенгеймера-Волкова

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{G\rho m}{r^2} \left(1 + \frac{P}{\rho c^2}\right) \left(1 + \frac{4\pi P r^3}{mc^2}\right) \left(1 - \frac{2Gm}{c^2 r}\right)^{-1}$$
$$\frac{dm}{dr} = 4\pi r^2 \rho,$$



# Зависимость максимальной массы НЗ от сжимаемости



- Нижний предел сжимаемости составляет  $\sim 370$  МэВ в случае жесткой версии EOS
- Нижний предел сжимаемости составляет  $\sim 400$  МэВ в случае мягкой версии EOS
- Общепринятое значение 234 МэВ существенно ниже полученного ограничения
- Учет дополнительных фаз приводит к смягчению EOS и к ещё большему ограничению на сжимаемость ядерной материи

B.L. Birbrair, E.L. Kryshen. Nuclear matter within the relativistic-mean-field model involving free-space nucleon-nucleon forces. *Yad. Phys.* 72, 1092 (2009) [*Phys. At. Nucl.* 72, 1154 (2009)]

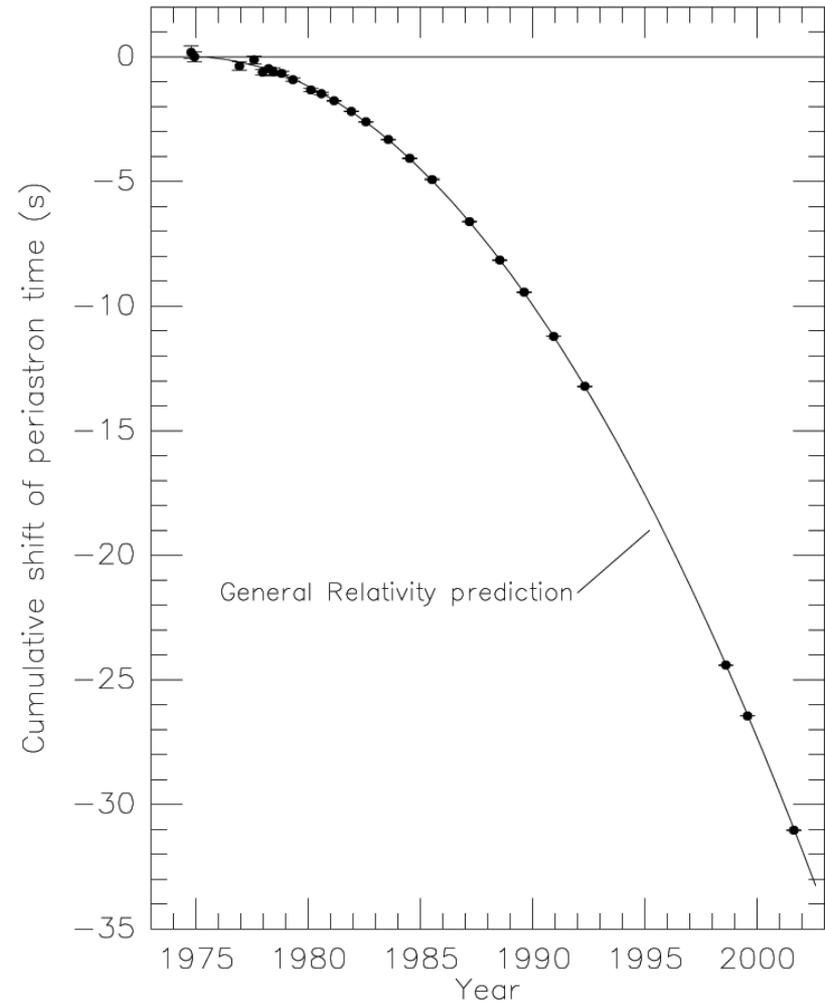
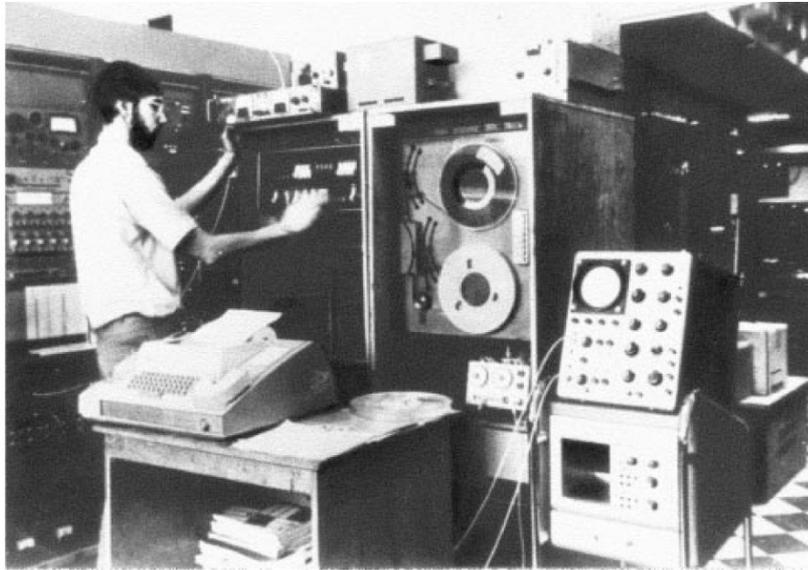
B.L. Birbrair, E.L. Kryshen. Incompressibility of nuclear matter and neutron stars. *Yad. Phys.* 73, 1597 (2010) [*Phys. At. Nucl.* 73, 1551 (2010)]

Конец



<http://www.bradcovington.com>

# Backup



**Открытие: Lundgren et al. (1995)**

$$P = 3.48 \text{ ms}, \quad P_b = 6.3 \text{ hr}, \quad e = 0.000003 \quad =$$

**Измерен один релятивистский параметр:  $dP_b/dt$**

**Эффект Шапиро плохо различим:  $i \sim 65-85^\circ$**

**Массы компаньонов (Nice, Splaver, Stairs 2004, 2005):**

$$\text{PSR: } M_1(2\sigma) = 2.1_{-0.5}^{+0.4} M_e$$

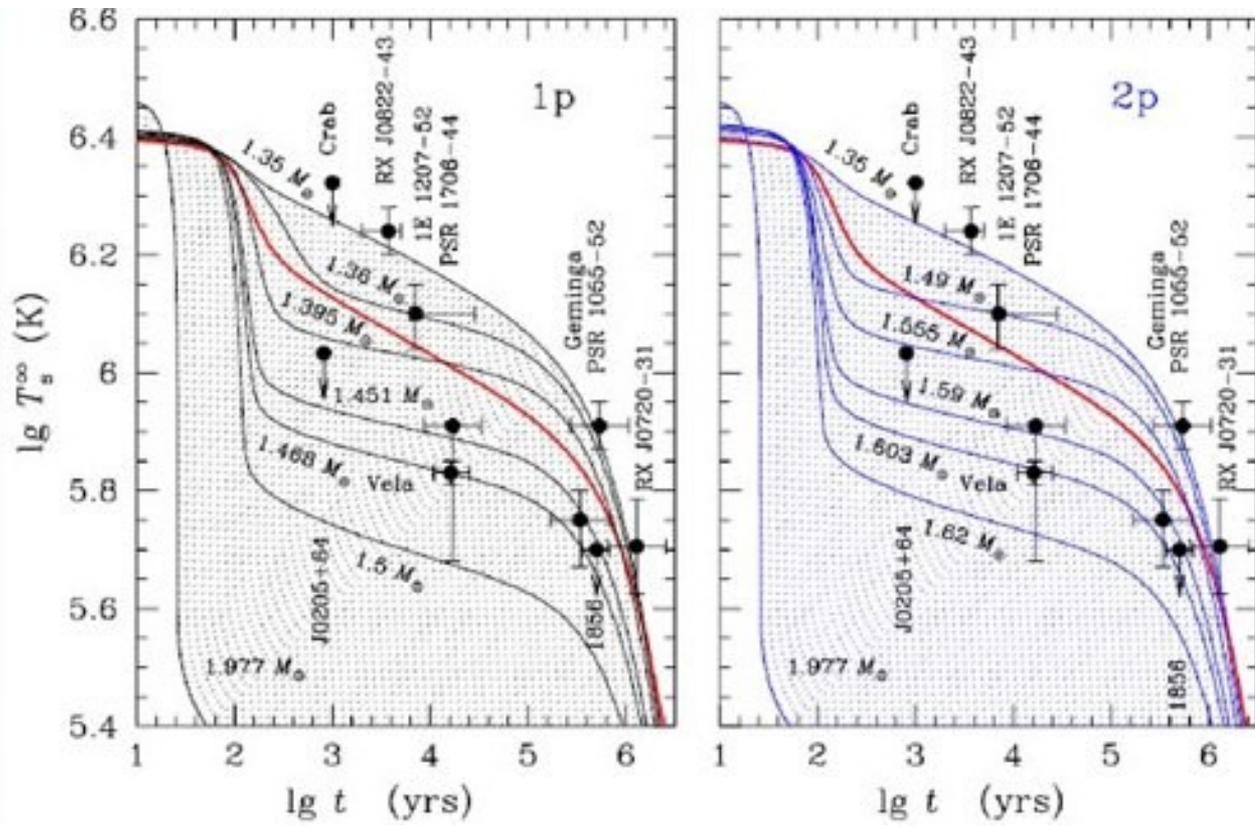
$$\text{WD: } M_2(2\sigma) = (0.19 \quad 0.03) M_e$$

**После 2007 года (Nice, Stairs, Kasian 2008):**

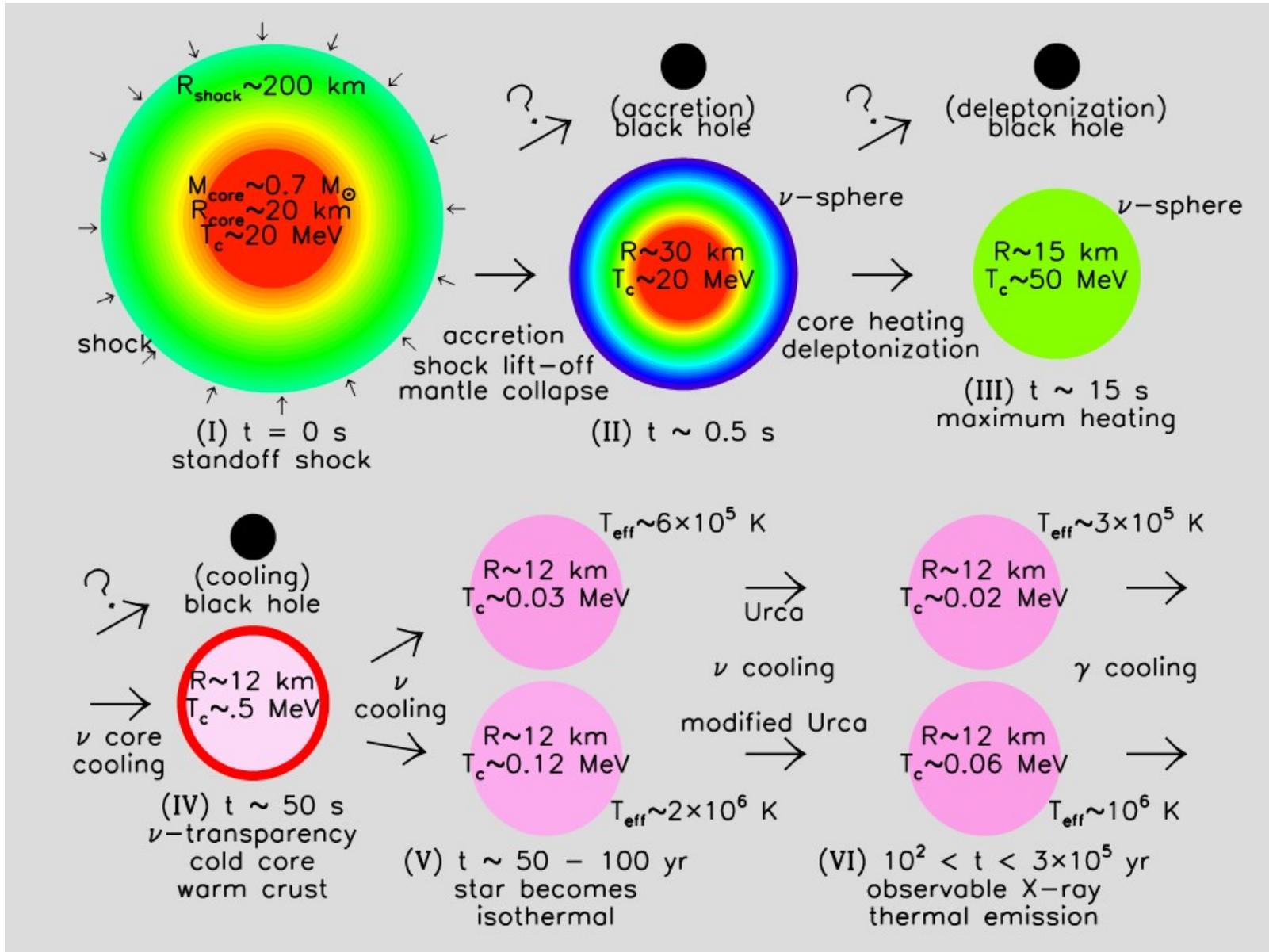
$$\text{PSR: } M_1(2\sigma) = (1.26 \quad 0.28) M_e$$

$$\text{WD: } M_2 \sim 0.2 M_e$$

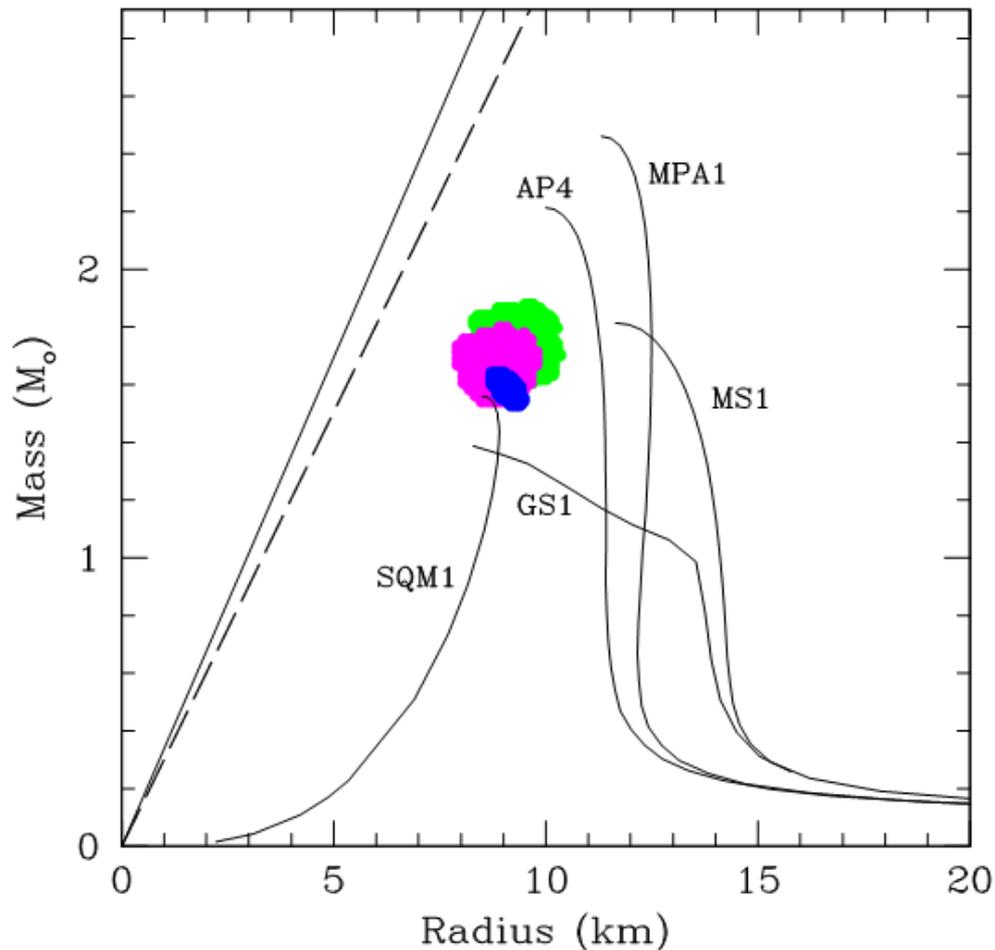
# Backup



# Backup



# Backup



Авторы много лет развивают подход, в котором набор измерений свойств аккрецирующих нейтронных звезд в тесных двойных позволяет выделить относительно небольшую область параметров на плоскости масса--радиус. Сейчас они рапортуют о том, что для трех источников удалось получить совсем небольшие области возможных параметров. Они расположены достаточно кучно (что не удивительно, но не очень хорошо, на мой взгляд). Малые размеры областей позволяют исключить львиную долю обсуждаемых уравнений состояния.

arxiv:1002.3153

## Backup

$$S_{\text{soft}} = \frac{k_{\text{F}}^2}{6E_{\text{F}}} \left( 1 + \frac{M^2}{4E_{\text{F}}^2} \right) + \frac{1}{4} \frac{M}{E_{\text{F}}} \left( 2 + \frac{M^2}{E_{\text{F}}^2} \right) n\alpha + \frac{1}{4} \left( \frac{3k_{\text{F}}^2 n}{2E_{\text{F}}^3} + \frac{b_{\delta} + \beta n_s - \frac{1}{2}\beta MD}{(\beta n_s - b_{\delta})^2} \right) n\alpha^2$$
$$+ \frac{1}{2} b_{\rho} n + \frac{1}{4} n C \frac{m(x + 6y - 9y^2) + b_{\sigma} \chi y(2x + 3y) - 3b_{\sigma} x n_s + M b_{\sigma} x D}{x + 6y - 9y^2 + b_{\sigma} x D},$$