



ВНУТРЕННЕЕ СТРОЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД

Теория и наблюдения

Д.Г. ЯКОВЛЕВ

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, С.-Петербург

Лекция 2. Наблюдения. Сравнение с теорией

- ***Введение***
- ***Вращение нейтронных звезд, гравитационные красные смещения, массы-радиусы***
- ***Массы нейтронных звезд***
- ***Заключение***

Дубна, 7 февраля 2014 г.

ВВЕДЕНИЕ

МНОГОЛИКИЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Обнаружено: более 2000 нейтронных звезд в нашей Галактике

Наблюдаются: во всех диапазонах электромагнитного спектра

Одиночные звезды и в двойных системах

Излучение подпитывается: вращением, аккрецией, магнитным полем, внутренним теплом

**Излучение: постоянное, периодическое (пульсары),
меняющееся нерегулярно**

**Трудности: слабые источники, расстояние, межзвездное поглощение,
теоретические модели для интерпретации наблюдений (модель
атмосферы, модель радиопульсара и пр.?)**

Источники мощного гравитационного излучения

Источники нейтринного излучения

Ускорители потоков плазмы и космических лучей

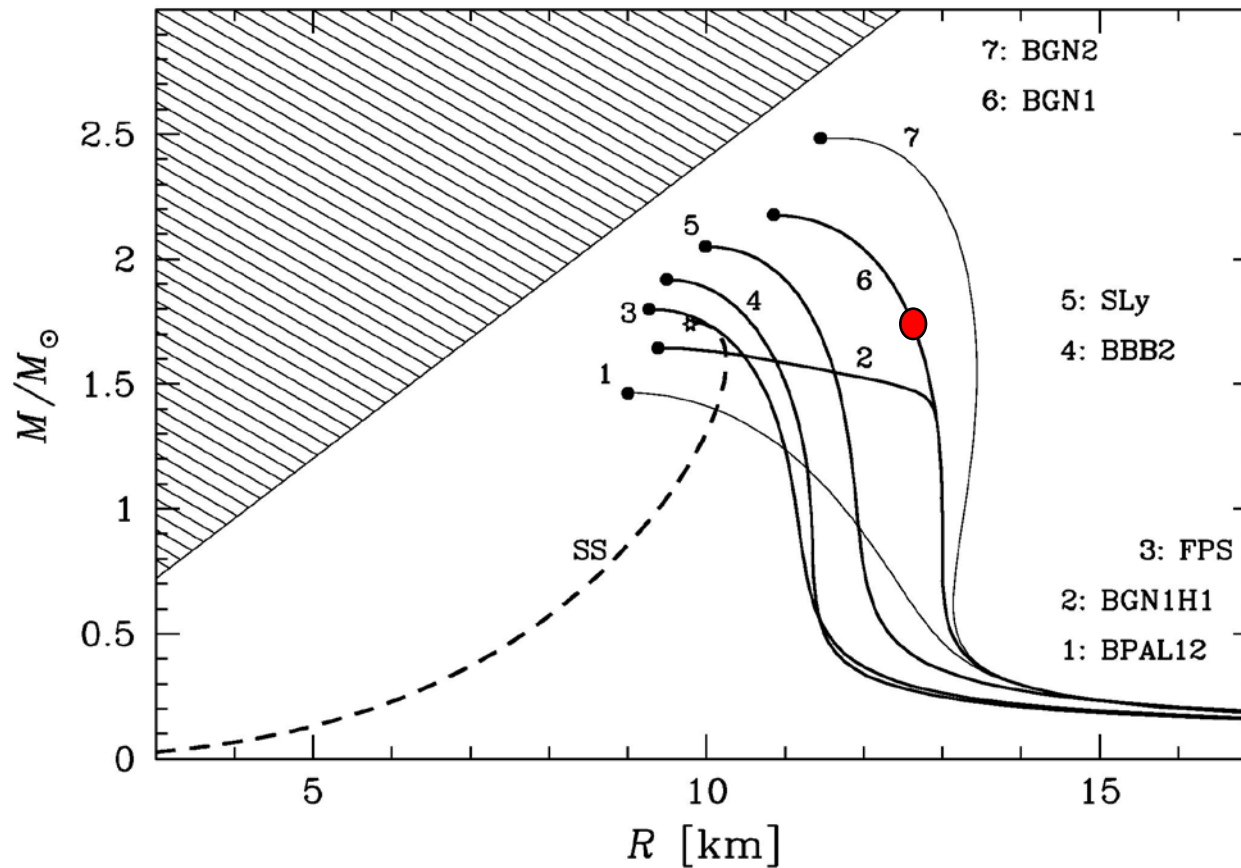
Методы изучения внутреннего строения нейтронных звезд

- *Измерение масс нейтронных звезд в двойных системах*
- *Измерение радиусов нейтронных звезд по наблюдениям теплового излучения*
- *Измерение гравитационного красного смещения спектральных линий, излученных с поверхности нейтронных звезд*
- *Наблюдения теплового излучения остывающих изолированных нейтронных звезд*
- *Наблюдения теплового излучения нейтронных звезд в маломассивных рентгеновских двойных (SXTs in quiescence)*
- *Изучение глитчей и свободной прецессии пульсаров*
- *Наблюдения рентгеновских барстеров*
- *Наблюдения источников QPO*
- *Поиски быстровращающихся нейтронных звезд*
- *Наблюдения вспышек сверхновых (излучение фотонов, нейтрино и гравитационных волн)*
- *Наблюдение релятивистских эффектов в двойном радиопульсаре J0737–3039*

И ПРОЧЕЕ!!!!

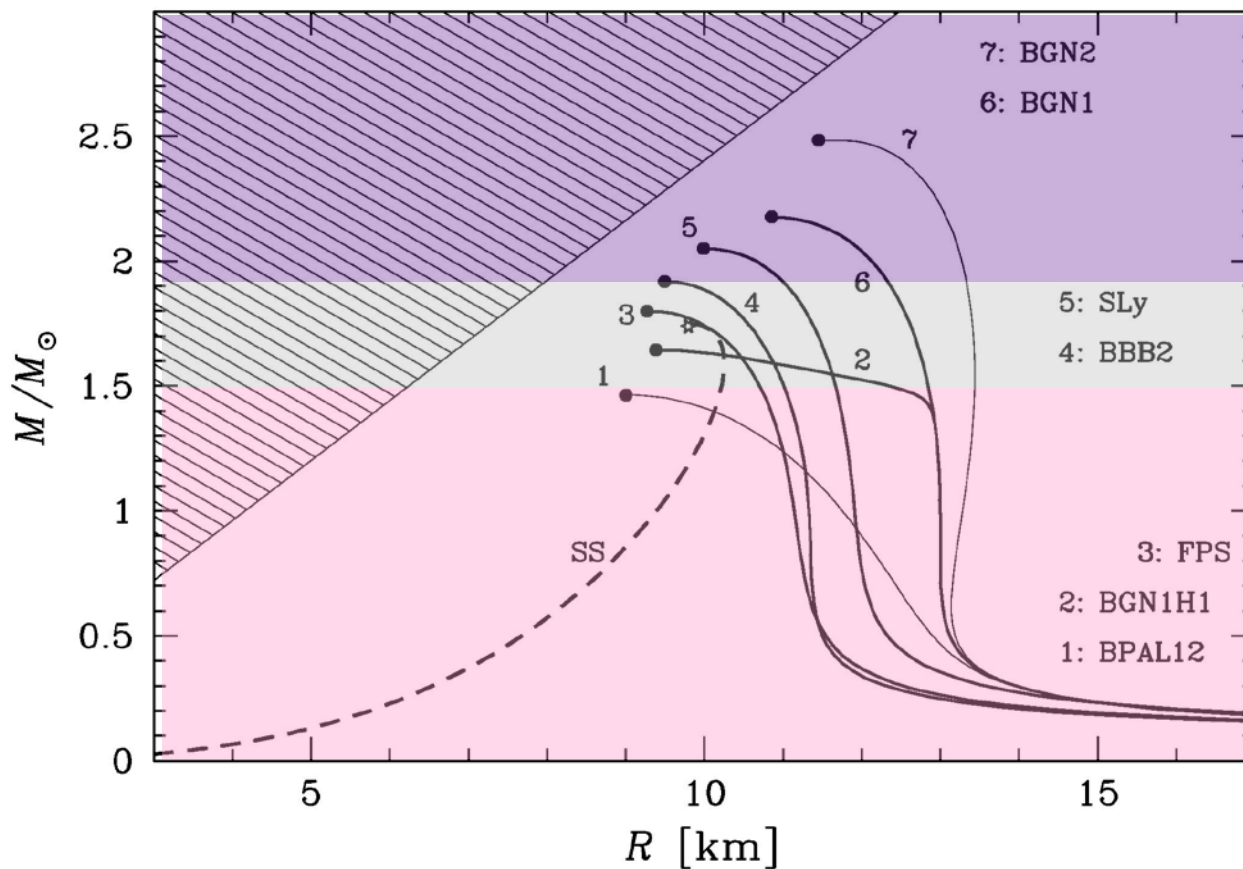
ИЗМЕРЕНИЯ МАСС И РАДИУСОВ

L. Lindblom (1992): по известной зависимости $M(R)$ можно однозначно
восстановить зависимость $P(\rho)$



Мягкие, умеренные и жесткие уравнения состояния

Охота за массивными нейтронными звездами



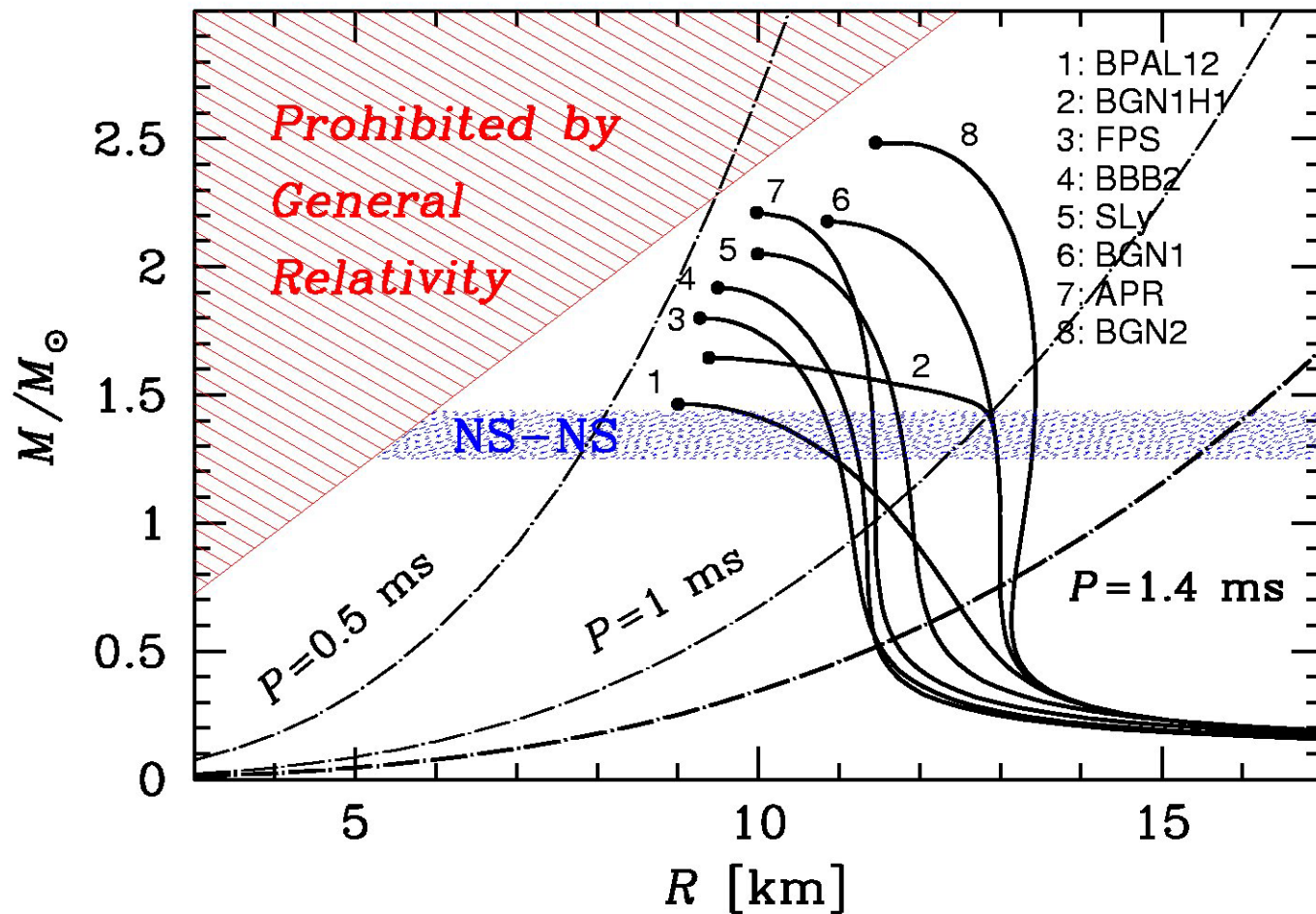
$M_{\text{max}}/M_{\text{sun}}$	EOS
<1.5	Soft (1)
1.5—1.9	Moderate (2—4)
>1.9	Stiff (5—7)

**ВРАЩЕНИЕ НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД,
ГРАВИТАЦИОННОЕ КРАСНОЕ
СМЕЩЕНИЕ,
РАДИУСЫ**

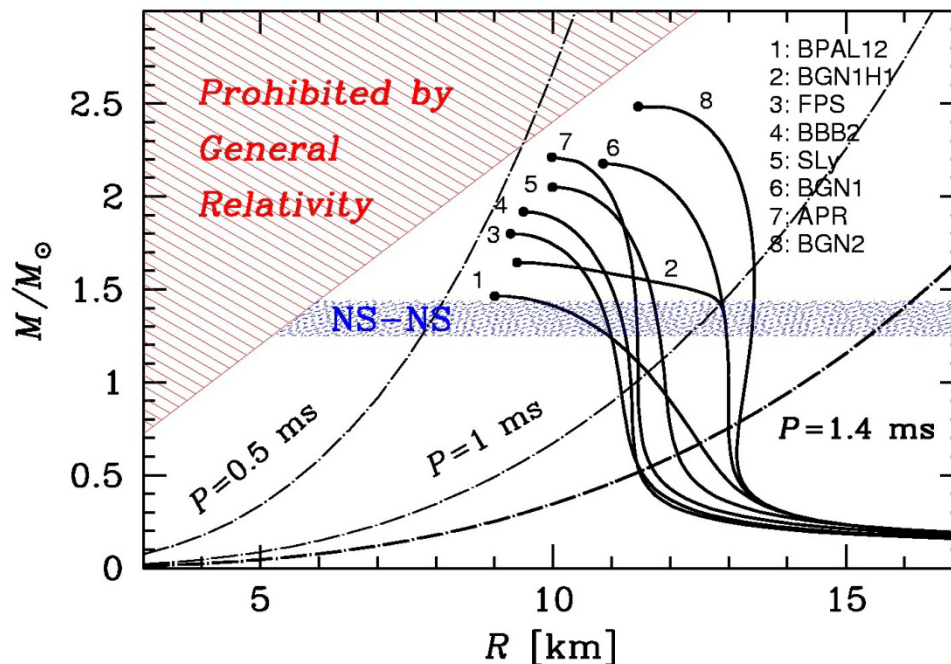
Быстровращающиеся нейтронные звезды (сегодня)

Критерий ротационной устойчивости: $P > P_{\min}$

Самый быстро вращающийся пульсар: PSR J1748—2446ad в шаровом скоплении Terzan 5: $P=1.396$ ms (Hessels et al. 2006)



Взлеты и падения быстрого вращения



A $P=0.5$ ms pulsar: discovered on January 18, 1989 in SNR 1987A with the Cerro Tololo 4-m telescope in Chile
The discovery was proved to be false in February 1990, in observations with the Las Campanas telescope in Chile

Kaaret et al. (2006) discovered $P=0.891$ ms (1122 Hz) oscillations (NS rotation?) in an X-ray burst of XTE J1739-285
No confirmation from other groups

Гравитационное красное смещение

$$\omega_{\infty} = \omega_0 \sqrt{1 - r_g / R}$$

$$z_{\text{surf}} = \frac{\omega_0 - \omega_{\infty}}{\omega_{\infty}} = \frac{1}{\sqrt{1 - r_g / R}} - 1 = \text{гравитационное смещение}$$

Измеряя z_{surf} , можно определить

$$\frac{r_g}{R} = 0.285 \left(\frac{M}{M_{\text{Sun}}} \right) \left(\frac{10 \text{ km}}{R} \right)$$

Гравитационное смещение можно измерить, наблюдая спектральные линии (features), излучаемые с поверхности звезды

Примеры:

(a) **1E 1207.4—5209** (compact central object in supernova remnant G296.5+10): «линии» на энергиях 0.7 and 1.4 keV, обнаруженные Sanwal, Pavlov, Zavlin and Teter (2002), но неотожествленные

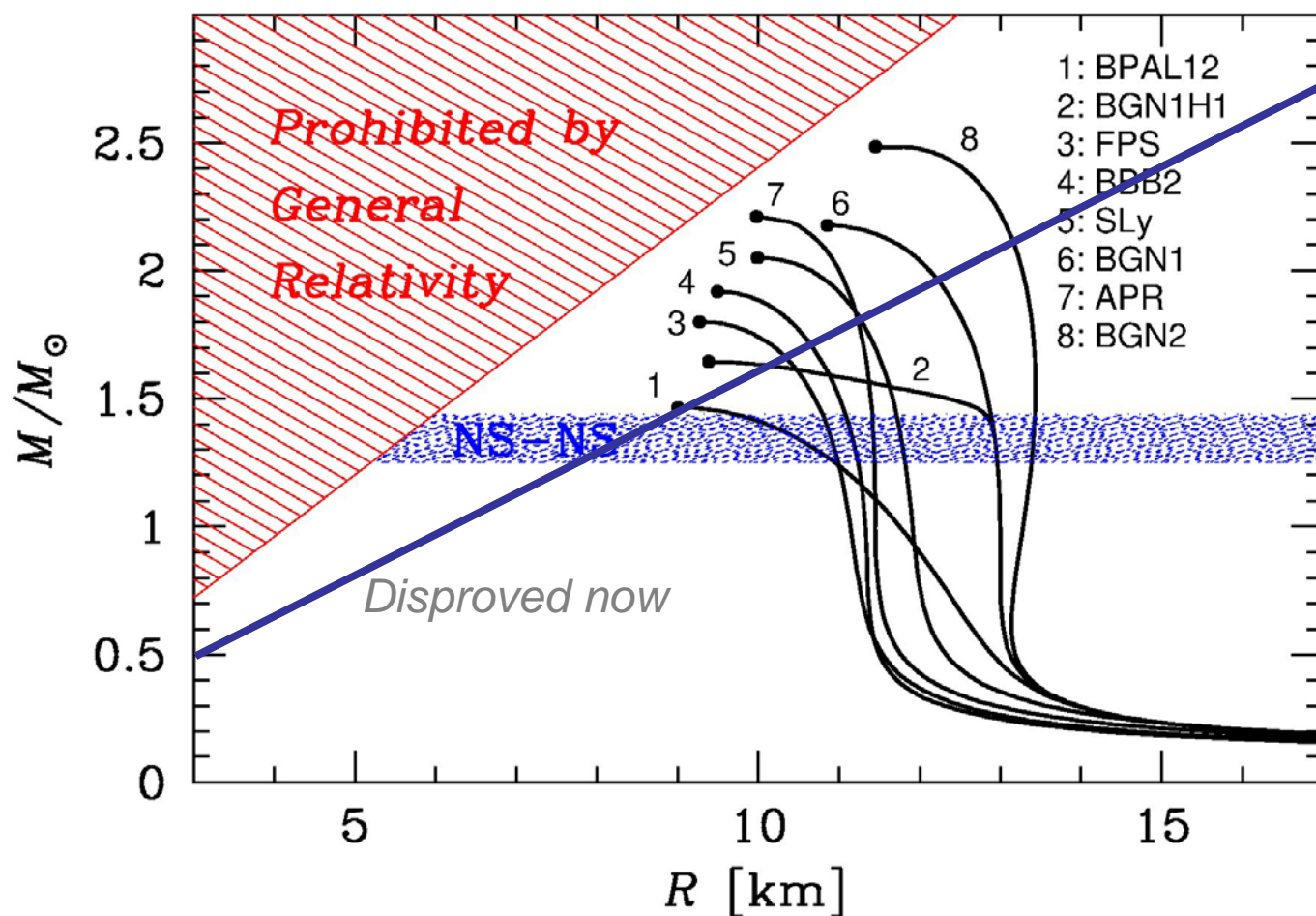
(b) **EXO 0748—676** – маломассивная рентгеновская двойная: узкие абсорбции (highly ionized oxygen); $z=0.35$ (Cottam et al. 2002)

Взлеты и падения измерений гравитационных красных смещений

Гравитационное красное смещение в EXO 0748-767

- маломассивная рентгеновская двойная: узкие абсорбционные линии (сильно ионизованного кислорода); $z=0.35$ (Cottam et al. 2002)
- нет подтверждений (фактически закрыто)

Результат: в настоящее время надежные измерения отсутствуют



Радиусы-массы нейтронных звезд

$$R = \text{окружный радиус}; \quad R_\infty = \frac{R}{\sqrt{1 - r_g / R}} = \text{"видимый" радиус}$$

Наблюдения теплового излучения поверхности нейтронных звезд

Нужно измерить: расстояние D ;

эффективную температуру поверхности T_{eff}^∞ ;

и болометрическую тепловую светимость $L_{\text{th}}^\infty \Rightarrow$

$$\text{Тепловая светимость: } L_{\text{th}}^\infty = 4\pi\sigma R^2 (T_{\text{eff}}^\infty)^4 (1 - r_g / R)$$

Трудности: рентген, расстояние, состав атмосферы и магнитное поле, межзвездное поглощение, теоретическая модель атмосферы

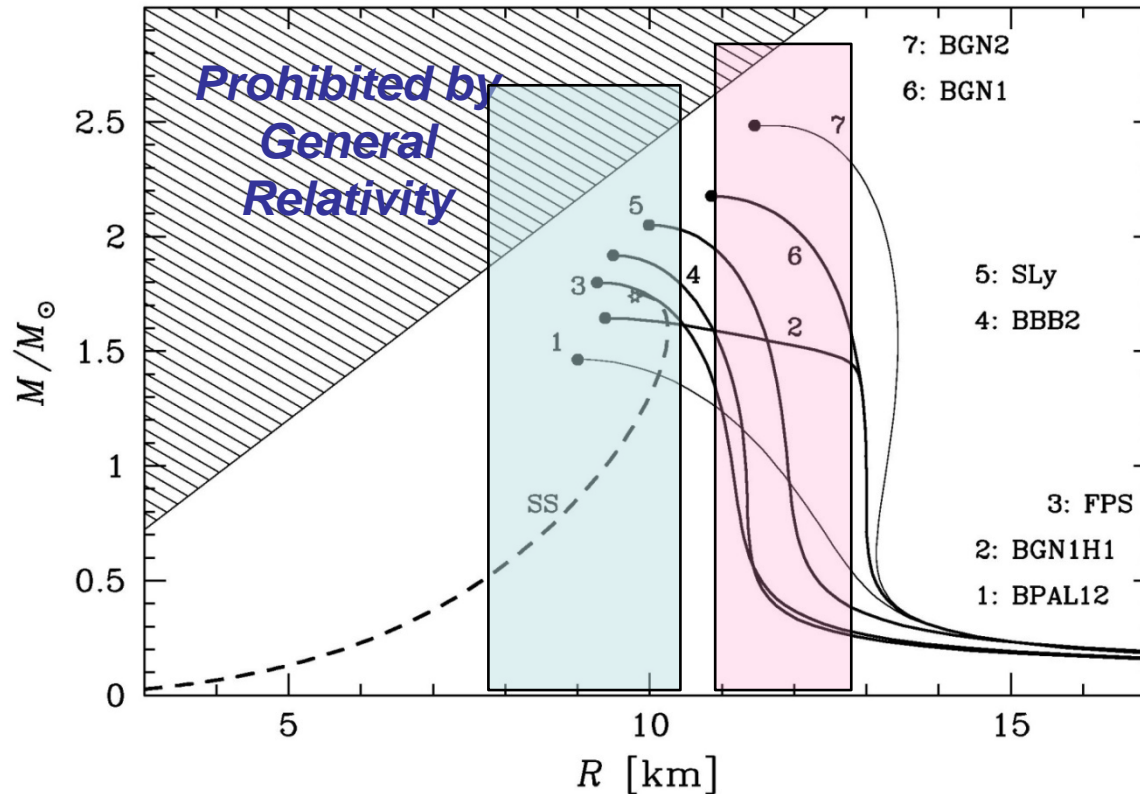
Объекты:

Изолированные нейтронные звезды среднего возраста (10^{3-6} years)

Аккрецирующие нейтронные звезды (SXTs in quiescent states)

Диапазон $T_{\text{eff}}^\infty \sim 3 \times 10^5 - 10^6$ К

Измерения радиусов нейтронных звезд: взлеты и падения



Guillot et al. (2013): 5 SXT в шаровых скоплениях, модели незамагниченных водородных атмосфер, считая, что радиус не зависит от массы и одинаков (комбинируя все данные): $R= 7.6—10.4$ km (90%)

Lattimer and Steiner (2013): те же 5 источников, с учетом принципа причинности и существования звезд с $M=2M_{SUN}$: $R= 10.9—12.7$ km (90%)

Одновременное измерение масс и радиусов

Рентгеновские вспышки с большой светимостью (выше эддингтоновского предела) вызывают расширение фотосферы $R=R(t)$ с последующим оседанием к обычному радиусу $R=R_0$ и к переходу на стадию спокойного остывания.

В момент окончания оседания ($t=t_0$, “touchdown point”) поток излучения поверхности все еще эддингтоновский:

$$F_{Edd}^{\infty} = \frac{GM}{\kappa D^2} \sqrt{1 - \frac{r_g}{R}}$$

На дальнейшей стадии спокойного остывания ($t > t_0$) отношение

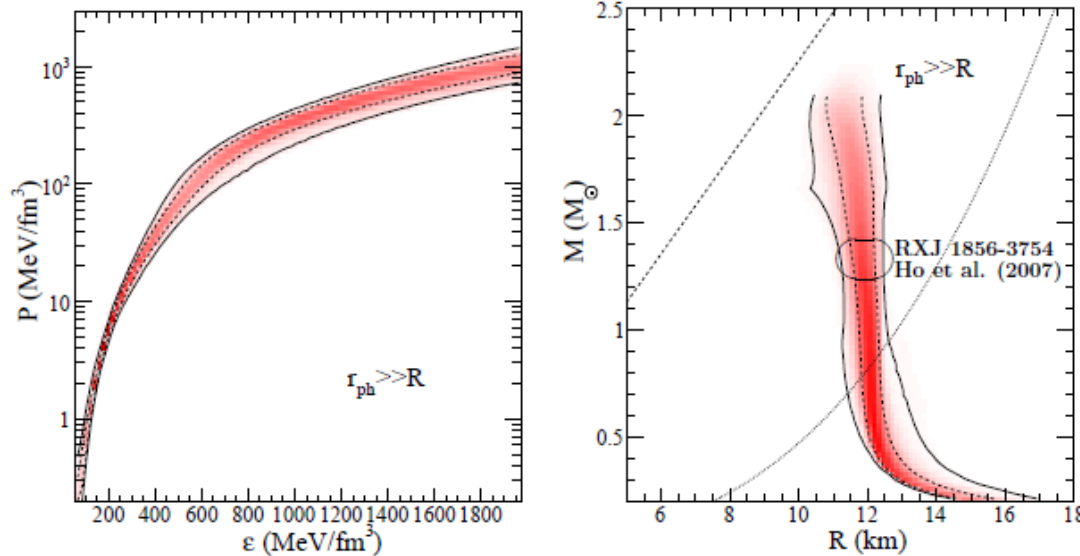
$$\frac{F_{\infty}}{\sigma T_{e\infty}^4} = \left(\frac{R}{D}\right)^2 \left(1 - \frac{r_g}{R}\right)^{-1}$$

остается примерно постоянным. При этом $T_{e\infty} = f_c T_{bb\infty}$ где f_c – поправочный фактор (color correction factor, модельно зависим).

Решая систему уравнений, можно одновременно определить M и R (пока что с большими неопределенностями).

Одновременное измерение масс и радиусов Фотороботы внутреннего строения НЗ

The Nuclear Equation of State and Neutron Star Masses
J. Lattimer. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 62, 485 (2012)



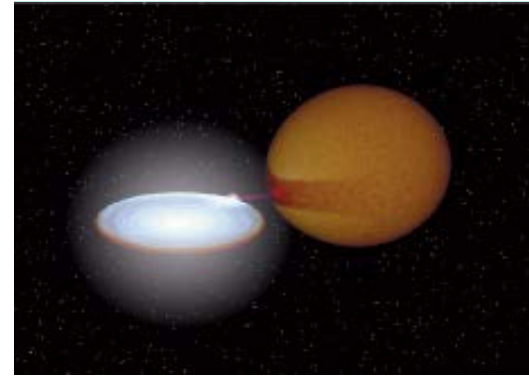
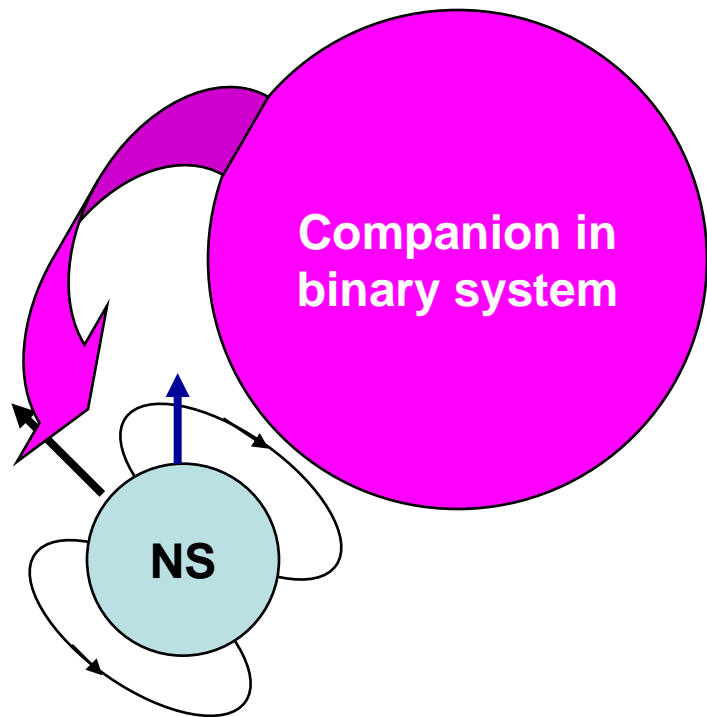
← Фотороботы

Данные: 4 SXT (в спокойном состоянии) в шаровых скоплениях;
4 источника рентгеновских вспышек с расширением фотосферы
Учтены лишь неопределенности, связанные с измерением расстояния

ИЗМЕРЕНИЯ МАСС НЕЙТРОННЫХ ЗВЕЗД В ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

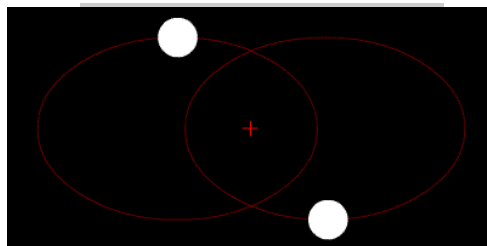
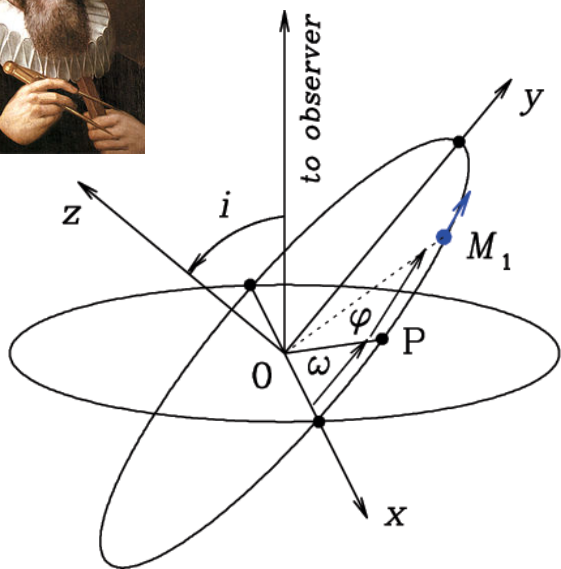
- Рентгеновские двойные
- Радиопульсары в компактных двойных
- Двойные нейтронные звезды
- Радиопульсары в парах с белыми карликами

Рентгеновские двойные



Riccardo Giacconi
Nobel Prize: 2002

Кеплеровские орбиты



$$M_1, M_2, a_1, a_2, e$$

$$M = M_1 + M_2, \quad a = a_1 + a_2$$

$$a_1 = aM_2 / M, \quad a_2 = aM_1 / M$$

Интегралы движения:

$$E = -GM_1M_2 / (2a), \quad J^2 = GM_1^2M_2^2a(1-e^2) / M$$

Орбитальный период:

$$P_b = 2\pi / \Omega_b, \quad \Omega_b^2 = GM / a^3$$

**Нужно еще
параметров:**

Измерения лучевых скоростей компаньона 1:

$$P_b, \quad e, \quad K_1 = \frac{\Omega_b x_1}{\sqrt{1-e^2}} \Rightarrow x_1 = a_1 \sin i, \quad f_1 = \frac{(M_2 \sin i)^3}{M^2} = \frac{x_1^3 \Omega_b^2}{G}$$

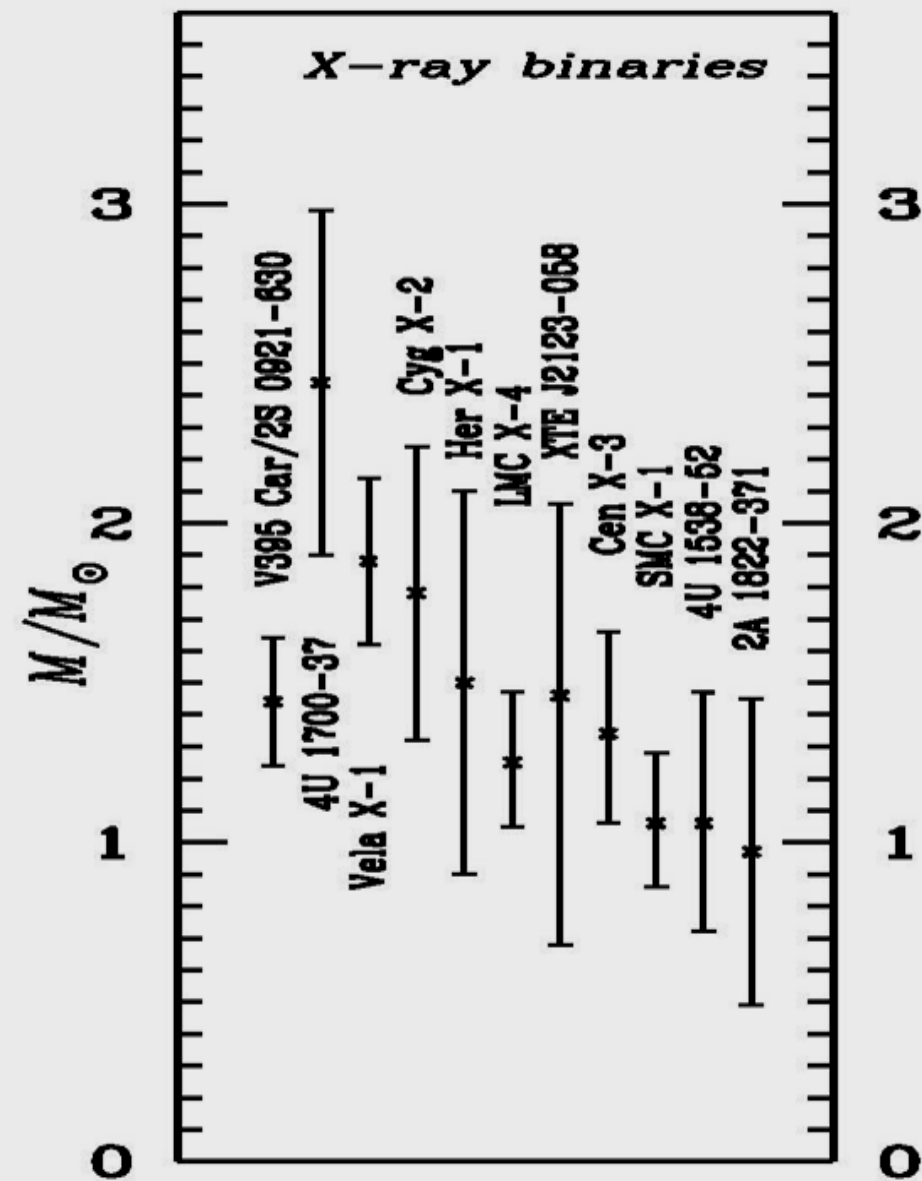
2

Измерения лучевых скоростей компаньона 2:

$$K_2, \quad f_2$$

1

Измерения масс нейтронных звезд в рентгеновских двойных

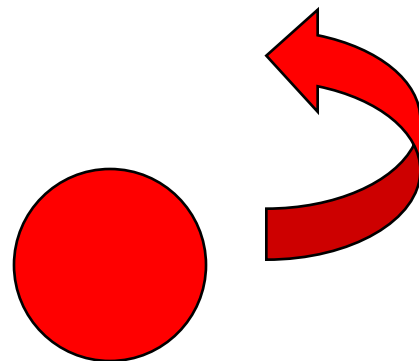
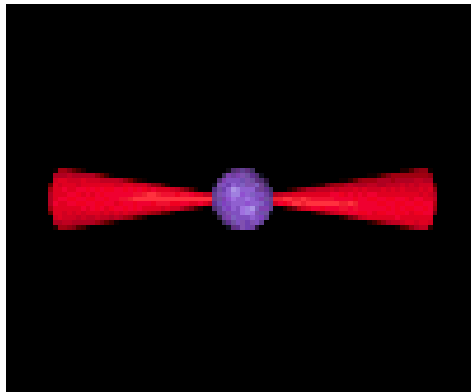
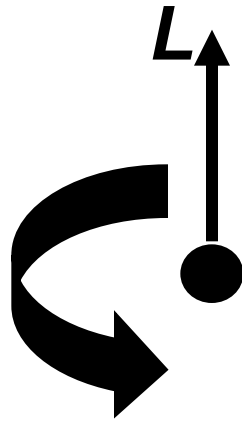
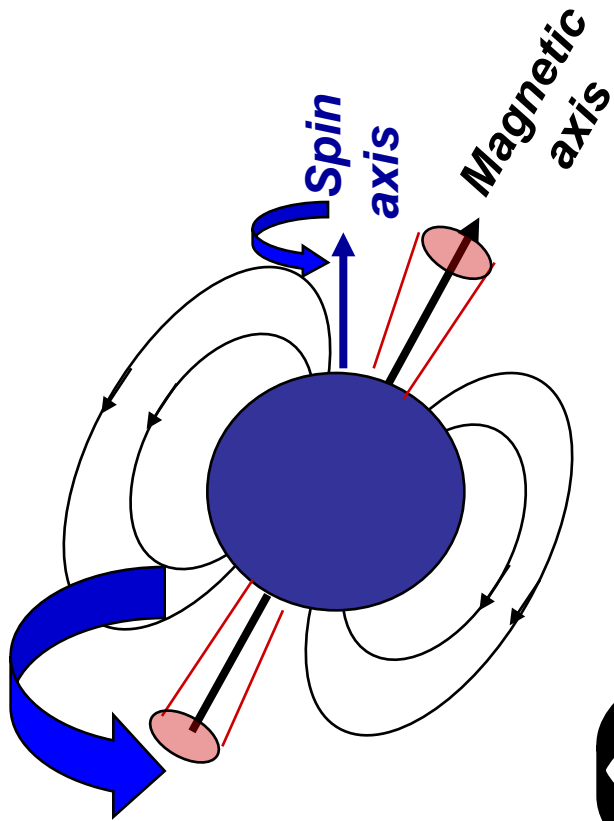


(1) Спектр масс НЗ широкий

(2) Почти наверняка есть массивные НЗ, но ошибки измерений масс велики

(3) Перспективы аккуратных измерений масс сомнительны

Радиопульсары в КОМПАКТНЫХ ДВОЙНЫХ



Релятивистские объекты: радиопульсар – компактный КОМПАНИОН

Преимущества:

- (1) *Очень точный тайминг $P(t)$*
- (2) *Почти точечные массы*
- (3) *Эффекты ОТО*

Peters & Mathews (1963), Peters (1963)

Энергия и орбитальный момент:

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{32G^4 M_1^2 M_2^2 M}{5c^5 a^5 (1-e^2)^{7/2}} \left(1 + \frac{73}{24} e^2 + \frac{37}{96} e^4 \right),$$

$$\frac{dJ}{dt} = -\frac{32G^{7/2} M_1^2 M_2^2 M^{1/2}}{5c^5 a^{7/2} (1-e^2)^2} \left(1 + \frac{7}{8} e^2 \right).$$

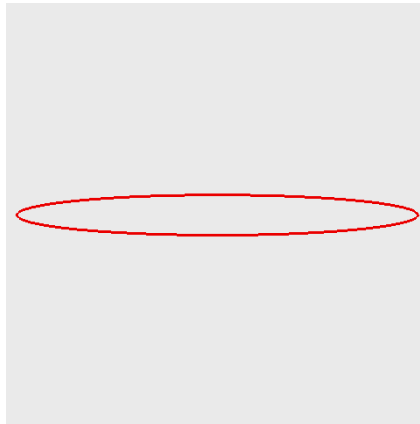
Эволюция орбитальных параметров:

$$\frac{da}{dt} = -\frac{64G^3 M_1 M_2 M}{5c^5 a^3 (1-e^2)^{7/2}} \left(1 + \frac{73}{24} e^2 + \frac{37}{96} e^4 \right)$$

$$\frac{de}{dt} = -\frac{304eG^3 M_1 M_2 M}{15c^5 a^4 (1-e^2)^{5/2}} \left(1 + \frac{121}{304} e^2 \right)$$

$$\frac{dP_b}{dt} = P_b \frac{3}{2a} \frac{da}{dt},$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{3\Omega_b GM}{a(1-e^2)c^2} = \frac{3\Omega_b^{5/3} (GM)^{2/3}}{(1-e^2)c^2}$$



Тайминг пульсаров: $P(t)$

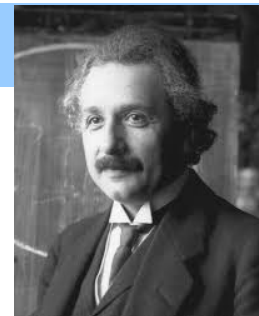


Этап 1: Измерение кеплеровских параметров

$P_b, K_1, e, x_1, \omega, f_1$: нужно еще два уравнения

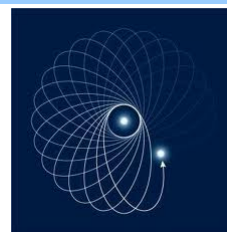


Этап 2: Измерение релятивистских параметров



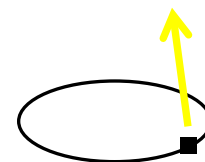
(a) *Вековой дрейф периастра:* $d\omega / dt$

$$(e \neq 0) \Rightarrow M = M_1 + M_2; M_{1\text{MAX}}; M_{1\text{MIN}}$$



(b) *Поперечный эффект Доплера + грав. красное смещение в поле M_2 :*

$$\frac{v^2}{2c^2} + \frac{GM_2}{r_{12}c^2} \Rightarrow \gamma = \frac{eGM_2(M_1 + 2M_2)}{\Omega_b c^2 aM} \quad (e \neq 0)$$



(c) *Гравитационное запаздывание:*

$$s \equiv \sin i = \frac{\Omega_b^{2/3} M^{2/3} x_1}{G^{1/3} M_2}, \quad r = \frac{GM_2}{c^3} \quad (i \approx 90^\circ)$$



(d) *Уменьшение орбитального периода:* dP_b / dt



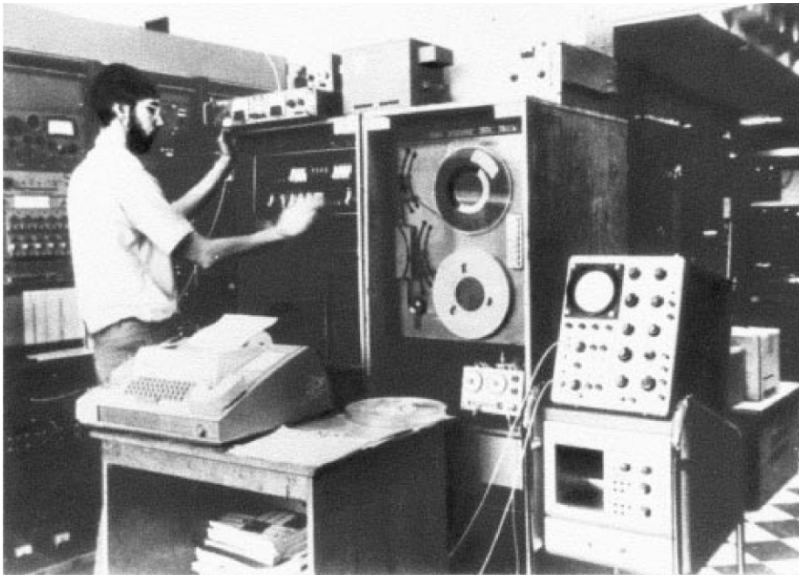
Можно получить до пяти новых уравнений !

ДВОЙНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЕЗДЫ

Russel Hulse and Joseph Taylor



The Arecibo 305-m radio telescope (NAIC-Arecibo Observatory, NSF)



Пульсар Халса-Тейлора (PSR B1913+16)

Открытие: 2 June 1974 (ApJ Lett, January 15, 1975)

5083 наблюдений с 1981 по 2001

Nobel Prize: 1993

Орбита: $e = 0.617$, $a = 2 \times 10^6 \text{ km}$, $i = 47^\circ$
 $v_{\text{max}} \approx 400 \text{ km/s}$, $P = 59 \text{ ms}$, $P_b = 7.75 \text{ hrs}$

Релятивистские эффекты (Weisberg & Taylor, 2010) :

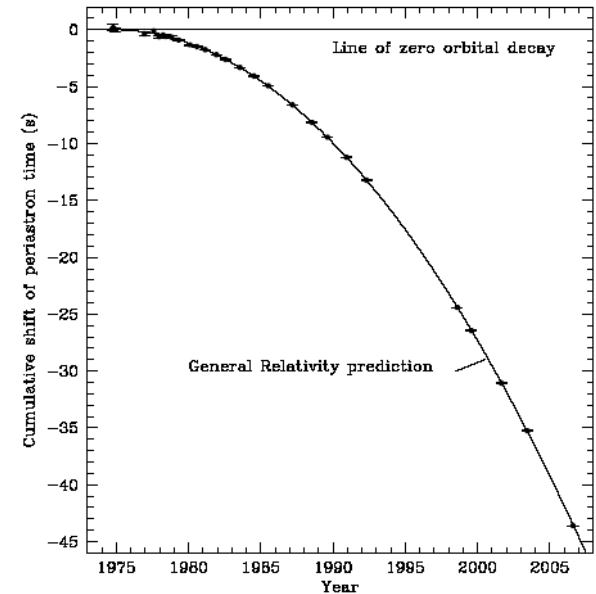
(a) $d\omega / dt = 4.226598 \pm 0.000005 \text{ deg/year}$

Поворот на 125° за 30 лет (до пульсаров – Меркурий: $43''$ за 100 лет)

(b) $\gamma = 0.0042992 \pm 0.0000009 \text{ s}$

(c) **Наблюдения:** $dP_b / dt = -(2.398 \pm 0.005) \times 10^{-12} \text{ s/s}$

Теоретическое предсказание: $dP_b / dt = -(2.402531 \pm 0.000014) \times 10^{-12} \text{ s/s}$



Масса пульсара Халса-Тейлора (PSR B1913+16)

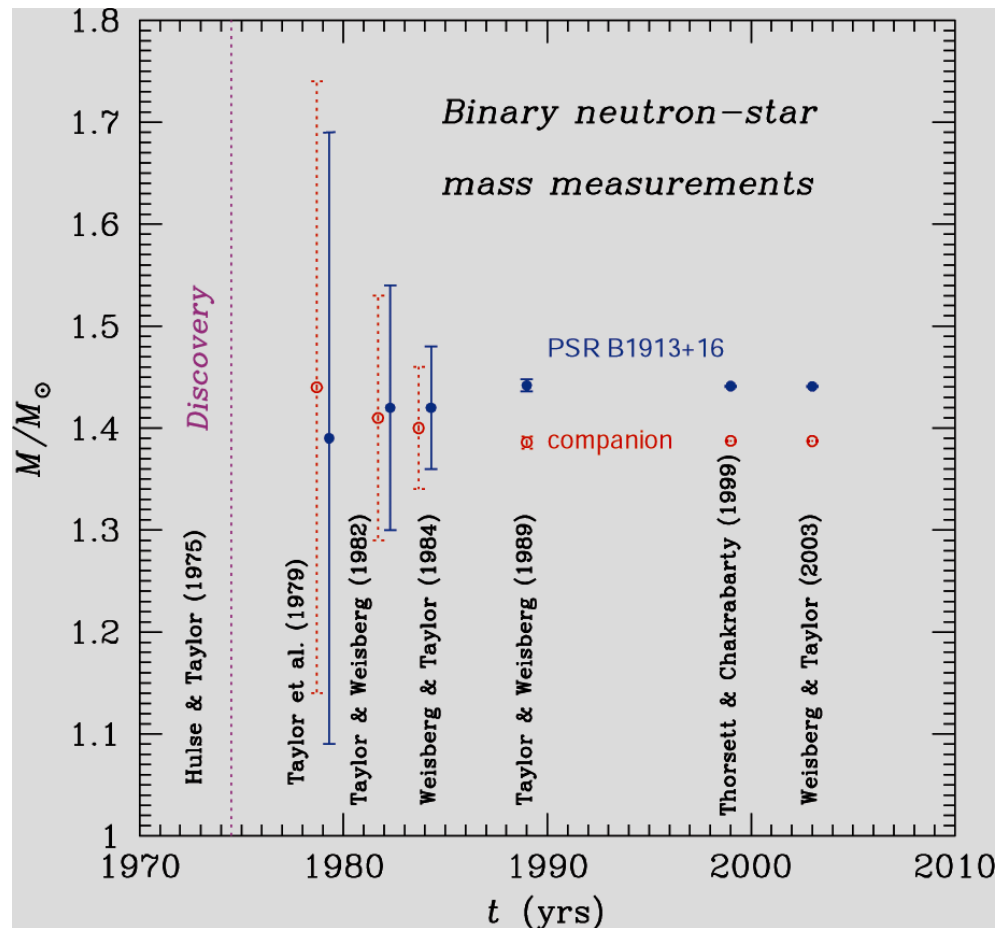
Массы PSR B1913+16 & КОМПАНИОН

(Weisberg, Nice, Taylor, 2010)

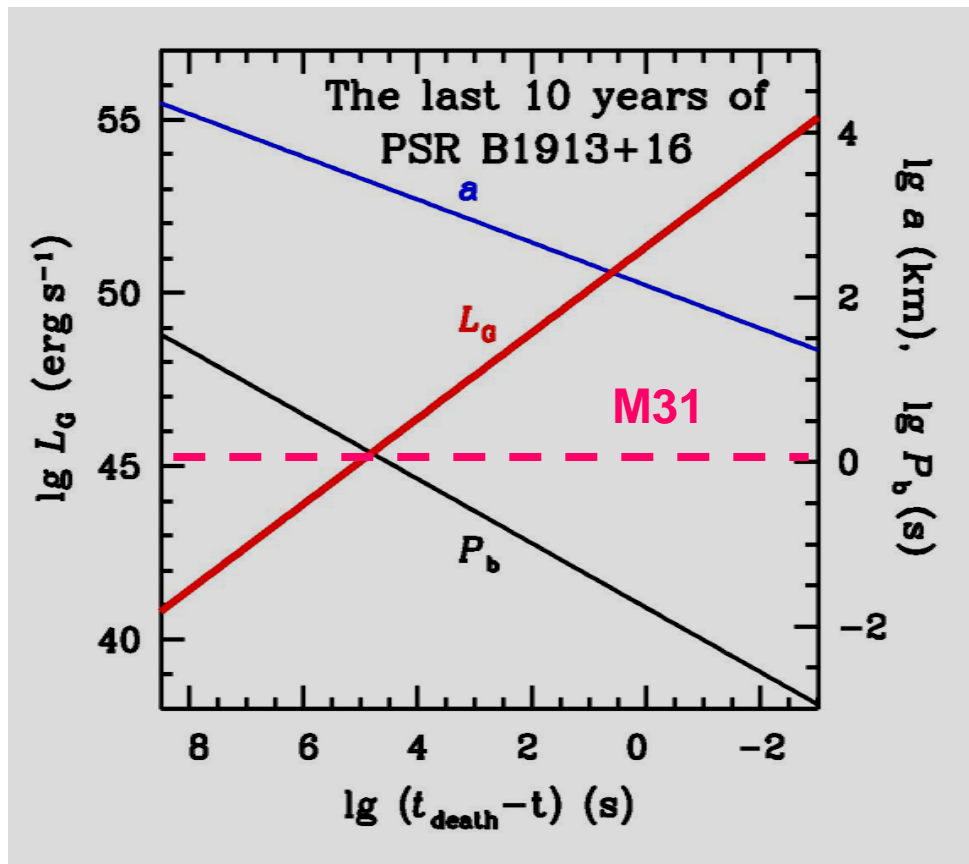
$$M_1(2\sigma) = (1.4398 \pm 0.0004) M_{SUN}$$

$$M_2(2\sigma) = (1.3886 \pm 0.0004) M_{SUN}$$

In M_{SUN} !!!



10 последних лет пульсара Халса-Тейлора



Время до слияния = 300 Myr



10 лет до смерти: $e = 0.00081$, $a = 17300 \text{ km}$, $P_b = 23 \text{ s}$, $d\omega/dt = 39.6 \text{ deg/hr}$,
 $L_G = 1.2 \times 10^{41} \text{ erg/s}$

1 ms до смерти: $a \approx 40 \text{ km}$, $P_b \approx 1 \text{ ms}$, $L_G \approx 10^{55} \text{ erg/s}$

Идеальный пульсар Волщана (PSR B1534+12)

Открытие: Wolszczan (1991)

$$P = 37.9 \text{ ms}, \quad P_b = 10.1 \text{ hr}, \quad e = 0.274, \quad d\omega/dt = 1.76 \text{ deg/yr}$$
$$i = 77^\circ \Rightarrow$$

Измерены все 5 релятивистских параметра:

$$d\omega/dt, \quad \gamma, \quad dP_b/dt, \quad s, \quad r$$

Массы нейтронных звезд (Stairs et al. 2003):

$$M_1(2\sigma) = (1.3332 \pm 0.0020) M_{SUN}$$

$$M_2(2\sigma) = (1.3452 \pm 0.0020) M_{SUN}$$

J0737-3039 A и B: Двойной пульсар

Пульсар А

Burgay et al. (2003) Observation:

4.5 min in August 2001 + systematic observations since 2003 (5 months)

$$P = 22.7 \text{ ms}, \quad P_b = 2.45 \text{ hr}, \quad e = 0.0878, \quad d\omega/dt = 17 \text{ deg/yr} \Rightarrow$$

$$M = (2.58 \pm 0.02) M_{Sun}$$

Пульсар В

Lyne et al. (2004)

Systematic observations since May 2003 (7 months)

$$P = 2.773 \text{ s}, \quad f_2 + \gamma; r, s \Rightarrow i \approx 87^\circ$$

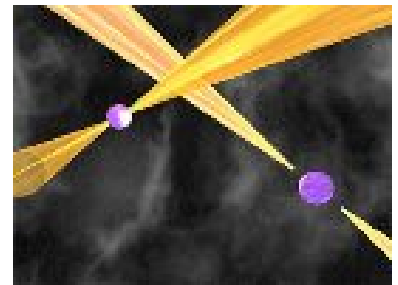
$$M_1(1\sigma) = (1.337 \pm 0.005) M_{Sun}, \quad M_2(1\sigma) = (1.250 \pm 0.005) M_{Sun}$$

Результаты:

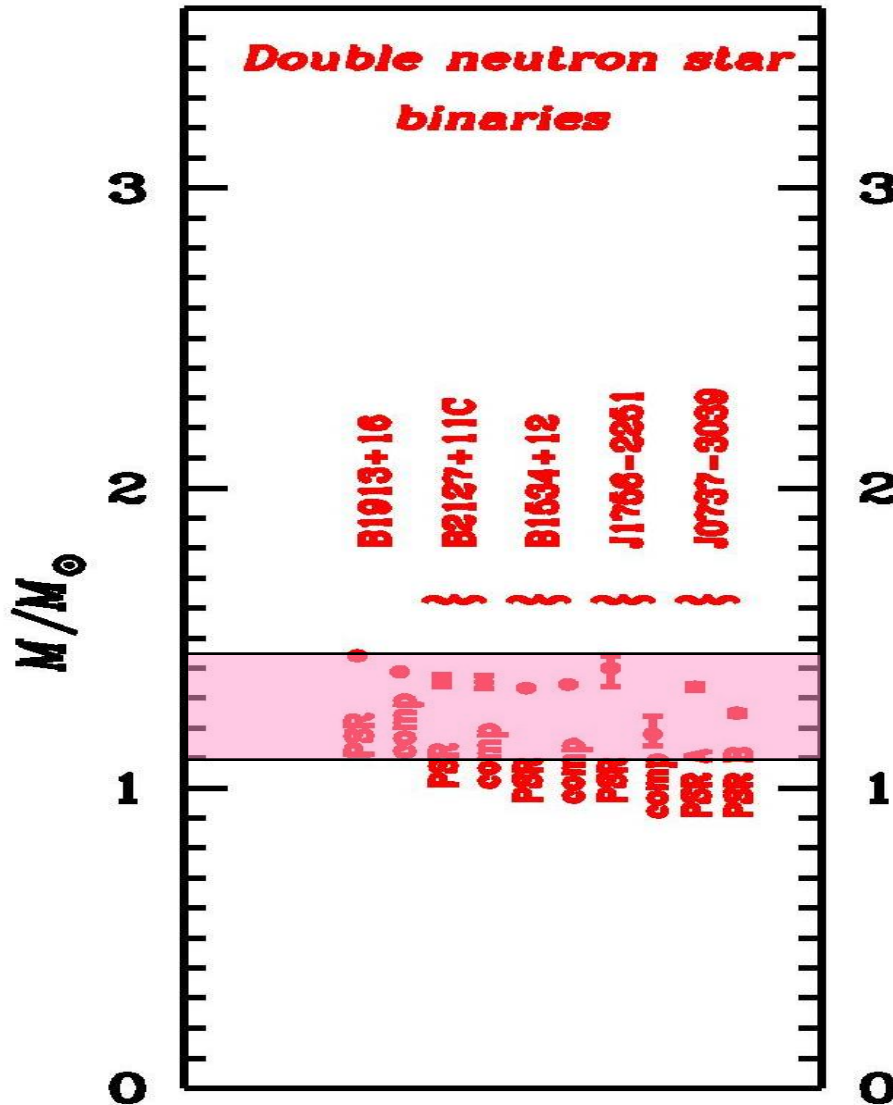
$$t_{death} = 86 \text{ Myrs} \Rightarrow \text{Fifth binary with short lifetime}$$

$$t_{prec1} \approx 75 \text{ yrs}, \quad t_{prec2} \approx 71 \text{ yrs}$$

Radio eclipses



Массы в системах двойных нейтронных звезд



- 5 систем = 10 нейтронных звезд с точно измеренными массами
- Все массы – в узком интервале
- Пульсар ХТ – самый массивный (а хорошо бы по массивнее)
- Перспективы обнаружить более массивную НЗ в таких системах сомнительны

Радиопульсары в парах с белыми карликами

Преимущества:

- *Компактные звезды – точечные массы*
- *Часто – раскрученные аккрецией миллисекундные пульсары: такие пульсары могут быть массивны, короткие периоды – хороший тайминг, слабые магнитные поля – нет глитчей или пульсарного шума*

Недостатки:

- *Прошли фазу активной аккреции – обычно орбиты циркулярные = трудно измерить вековой дрейф периастра или параметр гамма*
- *Маломассивные компаньоны – трудно измерить эффект Шапиро и dP_p/dt*

Особенность:

- *Часто наблюдаются в шаровых скоплениях*



Идеальная система

Радиопульсар—белый карлик (PSR J1141—6545)

Открытие: Kaspi et al. (2000)

$$P = 394 \text{ ms}, \quad P_b = 4.75 \text{ hr}, \quad e = 0.172, \quad d\omega/dt = 5.3 \text{ deg/yr}$$
$$i \sim 76^\circ$$

Измерено 3 релятивистских параметра:

$$d\omega/dt, \quad \gamma, \quad dP_b/dt$$

Массы (Bailes et al. 2003):

$$\text{PSR: } M_1(2\sigma) = (1.30 \pm 0.04) M_{SUN}$$

$$\text{WD: } M_2(2\sigma) = (0.99 \pm 0.04) M_{SUN}$$

Взлеты и падения измерений масс: Падший ангел радиопульсар—белый карлик (PSR J0751+1807)

Открытие: Lundgren et al. (1995)

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

Измерен 2 релятивистский параметр: dP_b/dt
Эффект Шапиро проявляется слабо: $i \sim 65\text{-}85^\circ$

Массы в 2004 году (Nice, Splaver, Stairs 2004, 2005):

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

$$\text{WD: } M_2(2\sigma) = (0.19 \pm 0.03) M_{SUN}$$

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

$$\text{PSR: } M_1(2\sigma) = (1.26 \pm 0.28) M_{SUN}$$

$$\text{WD: } M_2 \sim 0.2 M_{SUN}$$

САМАЯ МАССИВНАЯ НЕЙТРОННАЯ ЗВЕЗДА

PSR J1614-2230 + WD

LETTER

doi:10.1038/nature09466

A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay

P. B. Demorest¹, T. Pennucci², S. M. Ransom¹, M. S. E. Roberts³ & J. W. T. Hessels^{4,5}

28 Oct. 2010, Nature 467, 1081

Открытие: 2002 (Hessels et al. 2005)

$$P = 3.15 \text{ ms}, \quad P_b = 8.69 \text{ d}, \quad e = 1.3 \times 10^{-6}, \quad i = 89.17^\circ$$

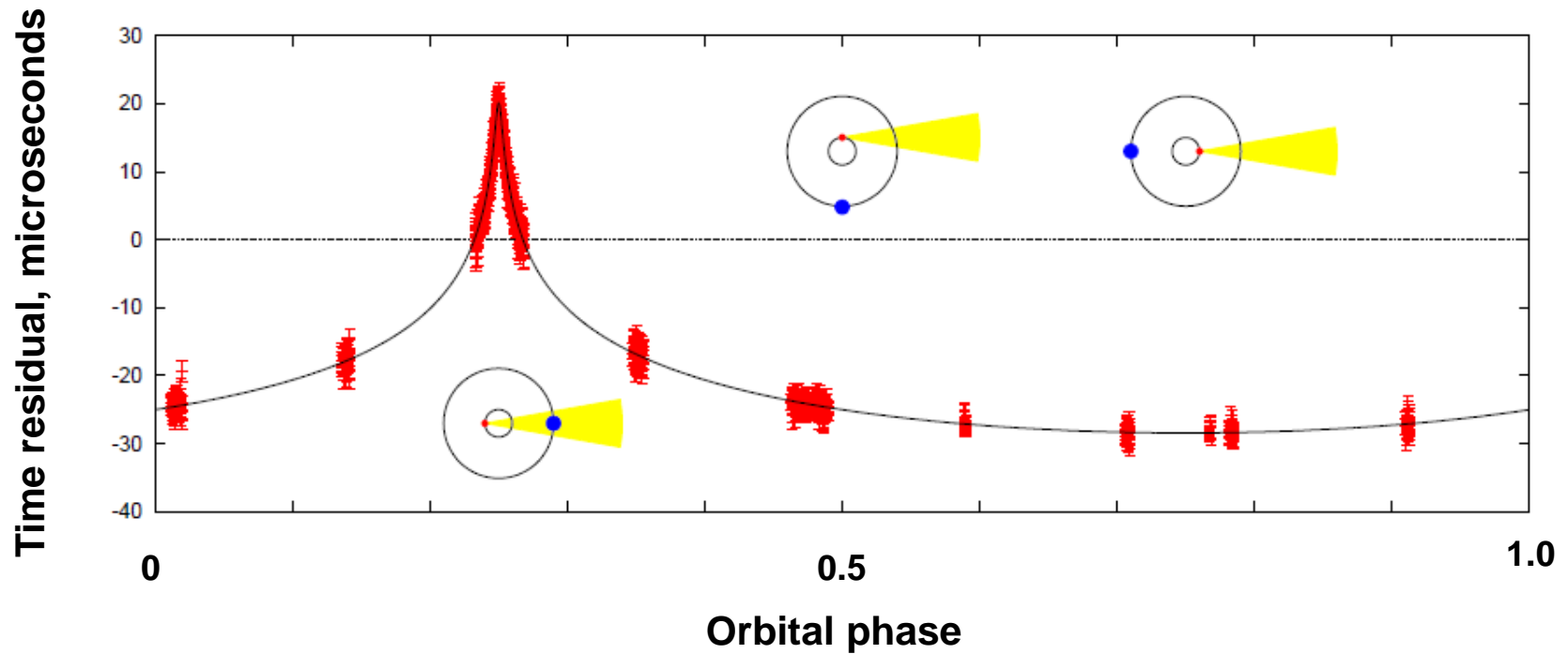
Измерен: эффект Шапиро, s , r

$$\text{PSR: } M_1(1\sigma) = 1.97 \pm 0.04 M_{SUN}$$

$$\text{WD: } M_2(1\sigma) = 0.500 \pm 0.006 M_{SUN}$$

Самая массивная нейтронная звезда с точно измеренной массой

Эффект Шапиро в системе PSR J1614-2230 + белый карлик



Demorest et al. (2010)

ВТОРАЯ САМАЯ МАССИВНАЯ НЕЙТРОННАЯ ЗВЕЗДА

PSR J0348+0432 + белый карлик

Science, 26 April 2013, Vol. 340, Issue 6131

A Massive Pulsar in a Compact Relativistic Binary*

John Antoniadis,¹ † Paulo C. C. Freire,¹ Norbert Wex,¹ Thomas M. Tauris,^{2,1}
Ryan S. Lynch,³ Marten H. van Kerkwijk,⁴ Michael Kramer,^{1,5} Cees Bassa,⁵
Vik S. Dhillon,⁶ Thomas Driebe,⁷ Jason W. T. Hessels,^{8,9} Victoria M. Kaspi,³
Vladislav I. Kondratiev,^{8,10} Norbert Langer,² Thomas R. Marsh,¹¹
Maura A. McLaughlin,¹² Timothy T. Pennucci,¹³ Scott M. Ransom,¹⁴
Ingrid H. Stairs,¹⁵ Joeri van Leeuwen,^{8,9}
Joris P. W. Verbiest,¹ David G. Whelan,¹³

Радионаблюдения:

Green Bank (USA) 2007

Публикация: Lynch et al. (2013)

$$P = 39 \text{ ms}, \quad P_b = 2.46 \text{ h}, \quad i = 40.2^\circ, \quad d = 2.1 \text{ крс}$$

Пульсар: умеренно раскрученный аккрецией

Белый карлик: маломассивный с гелиевым ядром

Возраст системы: около 3 млрд. лет

*Измерены: лучевые скорости пульсара и белого карлика,
масса белого карлика (спектроскопически)*

Массы PSR J0348+0432 и белого карлика

$$\text{PSR: } M_1(1\sigma) = 2.01 \pm 0.04 M_{SUN}$$

$$\text{WD: } M_2(1\sigma) = 0.172 \pm 0.003 M_{SUN}$$

Измерены без
эффектов ОТО

Проверка:

Теория

$$dP_b / dt = -2.58_{-0.11}^{+0.07} \times 10^{-13}$$

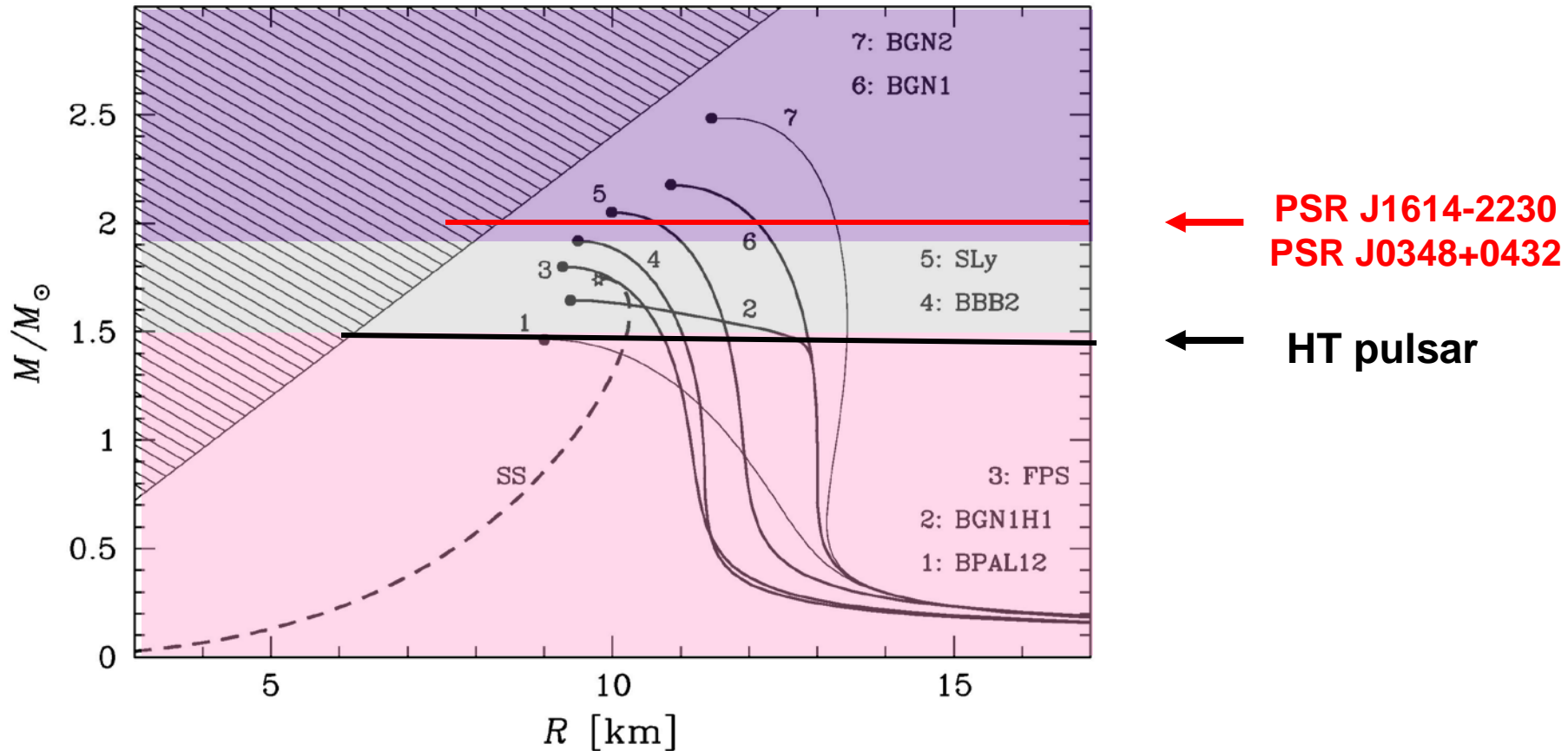
Наблюдения

$$dP_b / dt = (-2.73 \pm 0.45) \times 10^{-13}$$

Время до слияния: 400 Myr

Идеальная система для проверки ОТО!

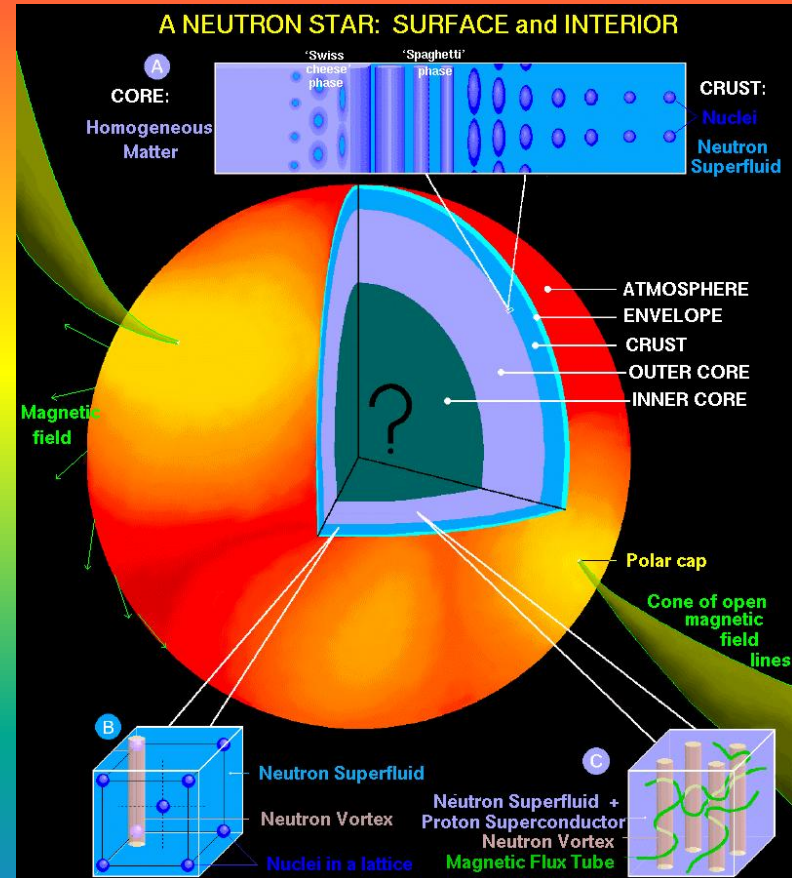
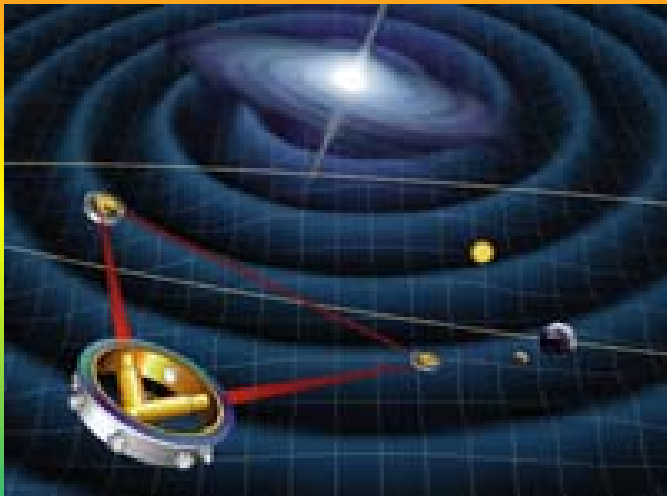
Диаграмма масса-радиус для разных моделей нейтронных звезд



Наблюдения:

- 1) Позволили отбросить мягкие и умеренные уравнения состояния
- 2) Благоприятствуют нуклонным уравнениям состояния

ИТОГИ И ПЕРСПЕКТИВЫ



Итоги: массы-радиусы

Сделано:

- Надежно обнаружены две массивные НЗ ($M=2 M_{\text{SUN}}$)
- Уравнение состояния – жесткое
- Экзотическое вещество становится менее вероятным

Осталось понять:

- Насколько жесткое уравнение состояния
- Есть ли экзотическое вещество?
- Какова максимальная масса нейтронной звезды?

Попутные итоги

- Открыто много нейтронных звезд разных типов
- Радиопульсары – точные часы, легко измерять расстояния и пр.
- Проверена общая теория относительности
- Открыто гравитационное излучение
- Построены и будут строиться новые наземные орбитальные телескопы для наблюдения нейтронных звезд
- Основные мишени для нейтринных и гравитационных обсерваторий нового поколения

СОВРЕМЕННЫЙ СТАТУС

- Мощный прогресс наблюдений и теории, но основная проблема определения свойств сверхплотного вещества не решена

ПЕРСПЕКТИВЫ

- Новые наблюдения и подстройка теории
- Тесное взаимодействие наблюдений и теории, физики и астрофизики (иначе не выйдет!)
- Астрофизические перспективы:
 - поиски массивных звезд
 - точные измерения M и R у одной звезды
 - сейсмология (с учетом сверхтекучести)
 - глитчи и пульсарный шум (проявления сверхтекучести)