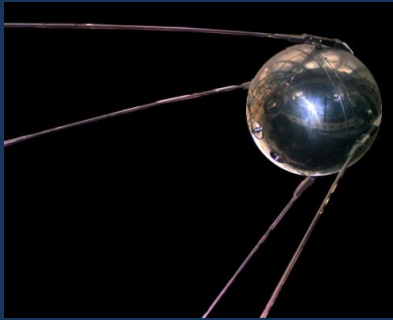


Нейтронные звезды: от рождения до слияния

Александр Лутовинов
(ИКИ РАН)

1967 год



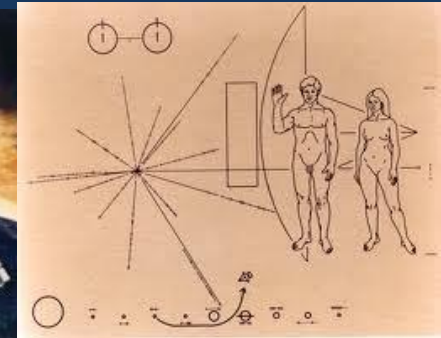
1957



1961



1969



1972

В Кэмбридже (Англия) закончено строительство нового радиотелескопа (площадь 4 акра)

Цель – изучение мерцаний космических радиоисточников

Руководитель – А. Hewish

Среди сотрудников аспирантка

Joselyn Bell (Дж. Белл)



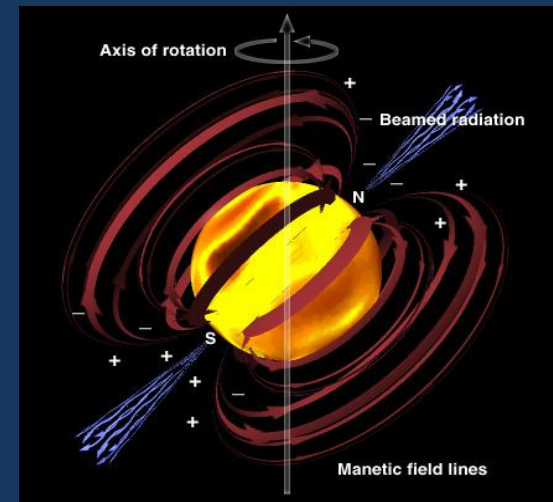
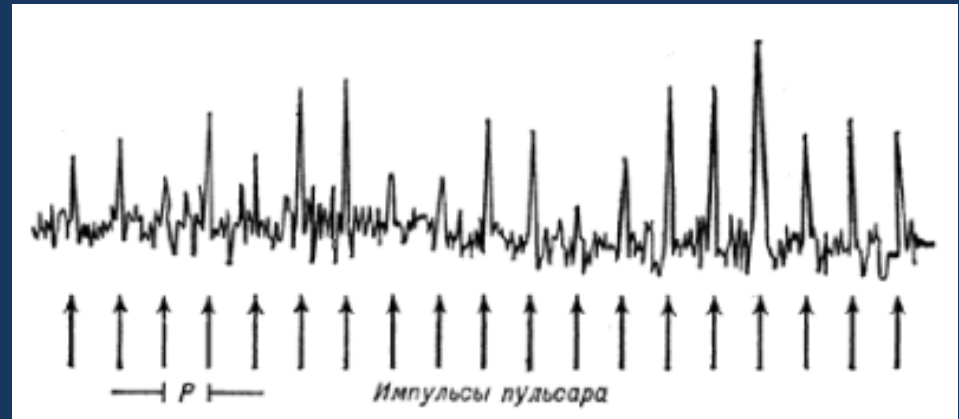
28 ноября 1967 года

Дж. Белл обнаруживает
первые серии
периодических импульсов
период $\sim 1,34$ сек

Первые попытки
объяснений: помехи
земного происхождения,
сигналы самолетов и
спутников

Сигналы внеземных
цивилизаций, попытки
распознать код

Источники излучения – небесные
тела, предположительно
нейтронные звезды



Нобелевская премия 1974 г.
A.Hewish

Нейтронные звезды. Пульсары

$$M \approx 1.4 M_{\text{Sun}} \quad R \approx 10 \text{ км}$$
$$E_g \approx GM^2 / R \sim 5 \times 10^{53} \text{ эрг}$$
$$\rho \approx 7 \times 10^{14} \text{ г/см}^3$$

Давление вырожденных нейтронов

Идея – Л. Ландау (1932)

НЗ рождаются во время
вспышек Сверхновых

W.Baade, F.Zwicky (1934)

$$E_{\text{SN}} \sim 10^{53} \text{ эрг} \sim E_g (\text{NS})$$

Только нейтронные звезды могут
вращаться с такой скоростью!

$\nu \sim 0.1 \text{ с}$ на поверхности!

Сила тяжести ~ 100 миллиардов g !
(иначе – разрушение)



Ппульсирующее
излучение -
“маяк”

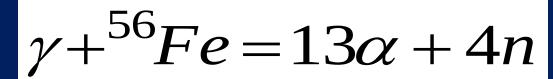
Образование компактных объектов

Взрыв сверхновой с $M > 8 M_{\text{sun}}$ приводит к сбросу внешних слоев

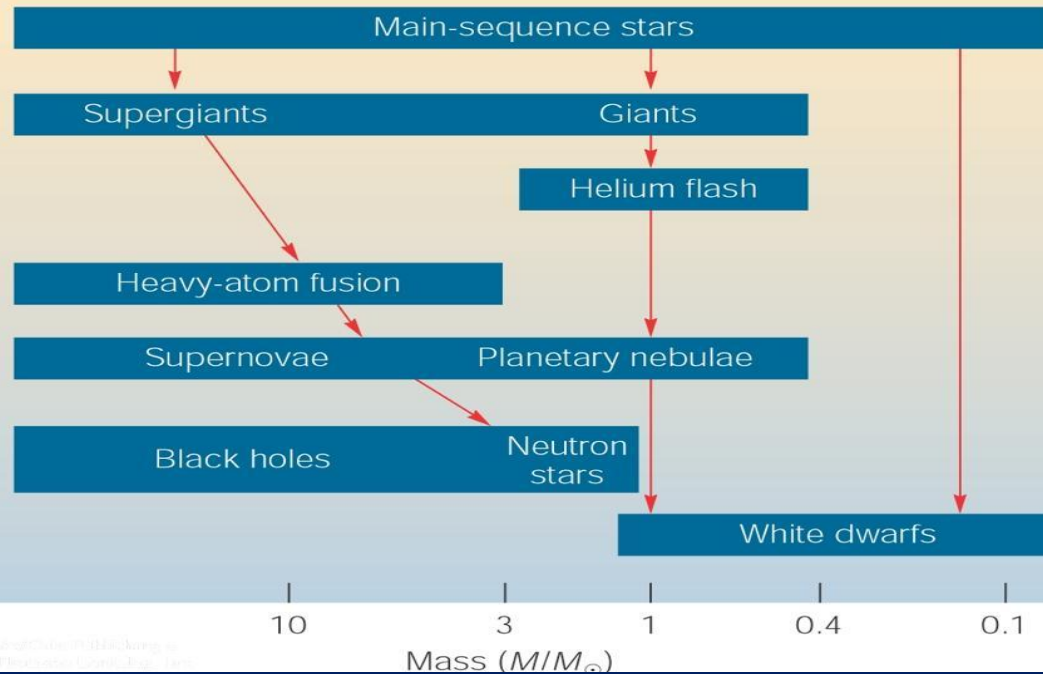
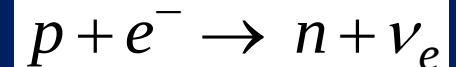
Центральное ядро будет сжиматься в компактный объект $\sim \text{неск } M_{\text{sun}}$

Причина – гравитационное сжатие железного ядра

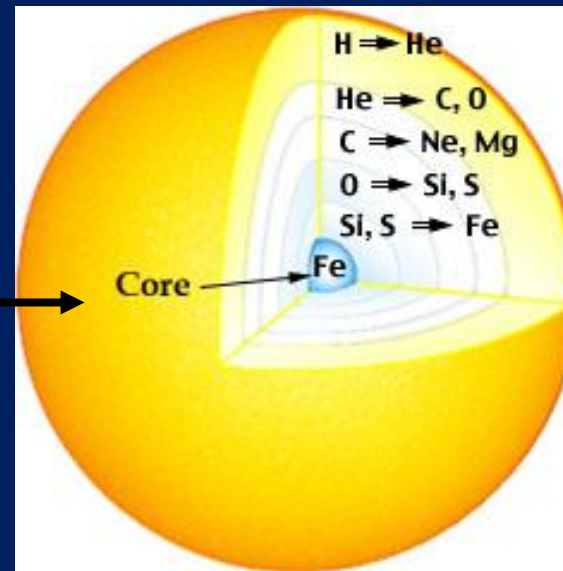
Распад ядер железа



Нейтронизация



Сверхновая II типа
последняя стадия
массивной звезды

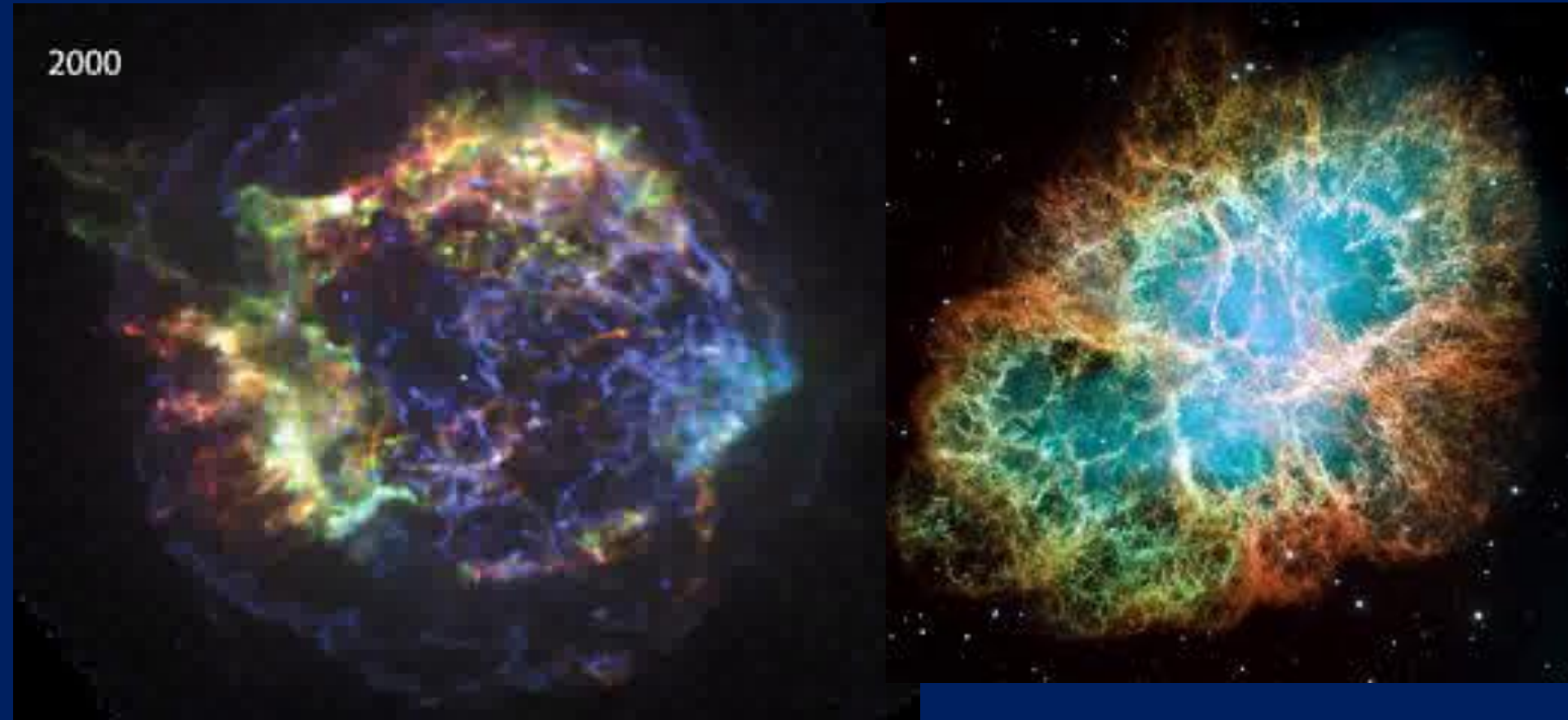


Где можно ожидать увидеть НЗ

Остатки вспышек сверхновых, взрывы размером 15 световых лет

Сверхновые в созвездиях Кассиопеи (1680 г?) и Тельца (1054 г)

2000



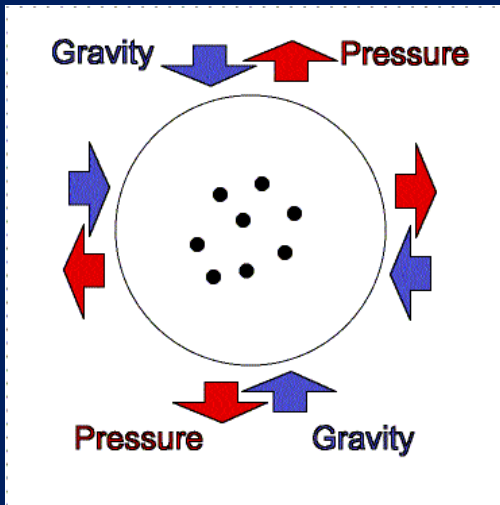
Взрывы на расстояниях 11000 и 6000 световых лет от нас!

Компактные объекты

конечный продукт звездной эволюции

начальная масса звезды	компактный объект	размер масса	внутреннее строение
$M_* < 8 M_\odot$	белый карлик	$R \sim 10^{-2} R_\odot$ $M < 1.2 M_\odot$	вырожденный электронный газ
$8 M_\odot < M_* < 30 M_\odot$	нейтронная звезда	$R \sim 15\text{-}20 \text{ км}$ $M = 1.4 M_\odot$	вырожденный нейтронный газ
$M_* > 30 M_\odot$	черная дыра	$R = R_g (3 \text{ км} / M_\odot)$ $M > 3 M_\odot$	горизонт событий R_g

Как звезды противостоят гравитации?



Обычные — давление горячего газа

БК — давление вырожденного электронного газа ($M < 1.4 M_{\text{Солнца}}$)

НЗ — давление вырожденного газа нейтронов ($M \sim < 3 M_{\text{Солнца}}$)

А дальше?

Черные дыры?

Звезды из вырожденного вещества

1. Коричневые карлики ($T \sim 700-2000\text{K}$)
2. Белые карлики ($T \sim 10000-100000\text{K}$)
3. Нейтронные звезды ($T \sim 0.1-0.3 \text{ кэВ}$)

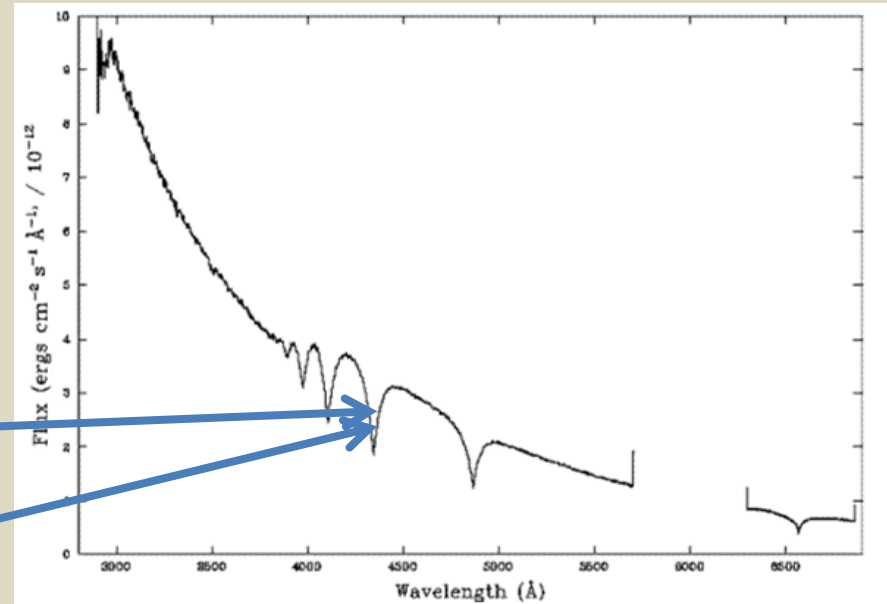
Немного из истории

У.Адамс (1914): Двойная система Сириус (А,В)

- спектры обоих компаньонов похожи ($T \sim 8000 \text{ K}$)
- масса Сириус В $0.75\text{-}0.95 M_{\text{sun}}$
- светимость $\sim 1/360 M_{\text{sun}}$
- радиус $R \sim 19000 \text{ км}$ (???)

Необычные линии в спектре:

- форма линий $\rightarrow$ сила тяжести на поверхности ($\log g \sim 8.556$)
- положение линий $\rightarrow$



гравитационное красное смещение ($\sim 20\text{-}80 \text{ км/сек}$)

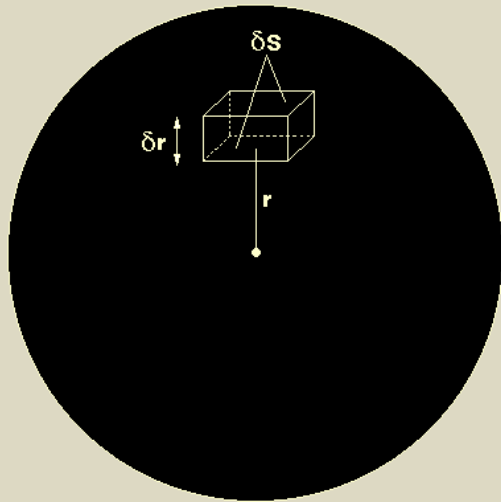
$\Rightarrow$ высокое отношение M/R , высокая плотность, имеем дело с чем-то необычным

август 1926 – статистика Ферми-Дирака

декабрь 1926 – объяснение белых карликов (Фаулер)

1930-е годы – развитие моделей БК (Чандрасекар)

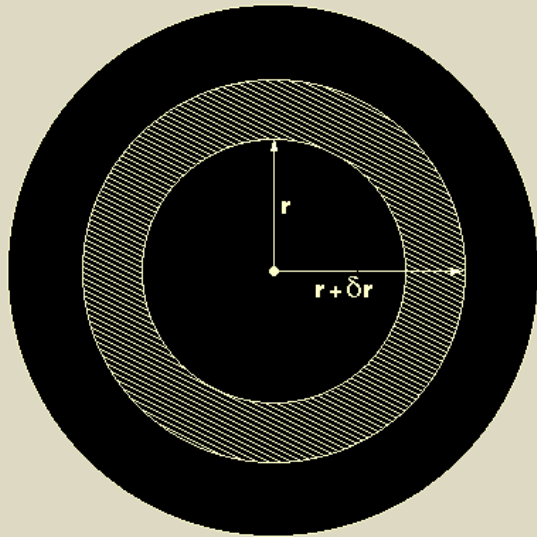
Уравнения гидростатического равновесия



Масса внутри сферы радиуса r

$$\frac{dm(r)}{dr} = 4\pi r^2 \rho$$

Если звезда в равновесии, то силы гравитации уравновешиваются силами давления



$$-\frac{dP}{dr} dr dA = \frac{Gm(r)}{r^2} dm$$

$$\frac{dP}{dr} = -\frac{Gm(r)\rho}{r^2}$$

Теорема вириала для звезд

Гравитационная потенциальная энергия звезды

$$\begin{aligned} W &= - \int_0^R \frac{Gm(r)}{r} \rho 4\pi r^2 dr \\ &= \int_0^R \frac{dP}{dr} 4\pi r^3 dr \\ &= -3 \int_0^R P 4\pi r^2 dr, \end{aligned}$$

$$W = -3(\Gamma - 1)U \quad \text{где} \quad U = \int_0^R \epsilon' 4\pi r^2 dr$$

Для газа, описывающегося адиабатическим уравнением состояния

$$P = K \rho_0^\Gamma$$

плотность энергии газа

$$\epsilon' = \frac{P}{\Gamma - 1}$$

тогда

полная внутренняя энергии звезды

Если $\Gamma = 5/3$

$$E_T = -\frac{1}{2} W$$

Теорема вириала для звезд

Полная энергия звезды

$$E = - \frac{3\Gamma - 4}{3(\Gamma - 1)} |W|$$

Без ядерного горючего полная энергия E убывает благодаря излучению. Принимая во внимание, что

$$W = - \frac{3(\Gamma - 1)}{5\Gamma - 6} \frac{GM^2}{R}$$

звезда сжимается при $\Gamma > 4/3$. Что дальше?

Для идеального газа Максвелла-Больцмана

$$P = \frac{\rho_0}{\mu m_u} kT$$

$$-W = 3 \int_0^R P 4\pi r^2 dr = \frac{3k\bar{T}}{\mu m_u} \int_0^R \rho_0 4\pi r^2 dr = \frac{3M}{\mu m_u} k\bar{T}$$

При сжатии $T \propto M/R$, но $\rho \propto M/R^3$, т.е. при давлении растет быстрее! Нарушение Максвелла-Больцмана $\Rightarrow$ газ становится вырожденным

**Средний импульс
электронов**

$$\Delta p \sim \left(6m_e k \bar{T}_s\right)^{1/2} \sim \left(\frac{12m_e GMm_p \mu}{7R}\right)$$

**Среднее расстояние
между электронами**

$$\Delta q \sim \left(\frac{\mu m_p}{\rho}\right)^{1/3} \sim \left(\frac{4\mu m_p R^3}{M}\right)^{1/3}$$

**Занимаемый
фазовый объем**

$$\begin{aligned} (\Delta q \Delta p)^3 &\sim \left(\frac{4\mu m_p R^3}{M}\right) \left(\frac{12m_e GMm_p \mu}{7R}\right)^{3/2} \\ &\sim 180 h^3 \left(\frac{M}{M_{Sun}}\right)^{1/2} \left(\frac{R}{R_{Sun}}\right)^{3/2} \end{aligned}$$

При $R \sim 0.03 R_{Sun}$ объем становится $\sim h^3$

Вырождение

Уравнение состояния вырожденного идеального газа фермионов

$$P = K \rho_0^\Gamma$$

Нерелятивистский газ электронов/нейтронов

$$\Gamma = \frac{5}{3}, \quad K = \frac{3^{2/3} \pi^{4/3}}{5} \frac{\hbar^2}{m_e m_u^{5/3} \mu_e^{5/3}}$$

$$\Gamma = \frac{5}{3}, \quad K = \frac{3^{2/3} \pi^{4/3}}{5} \frac{\hbar^2}{m_n^{8/3}}$$

Релятивистский газ электронов/нейтронов

$$\Gamma = \frac{4}{3}, \quad K = \frac{3^{1/3} \pi^{2/3}}{4} \frac{\hbar c}{m_u^{4/3} \mu_e^{4/3}}$$

$$\Gamma = \frac{4}{3}, \quad K = \frac{3^{1/3} \pi^{2/3}}{4} \frac{\hbar c}{m_n^{4/3}}$$

Предел массы белого карлика/ нейтронной звезды

Плотность фермионов
в звезде

$$n \sim N/R^3$$

Объем на фермион

$$\Delta V \sim R^3/N$$

Импульс фермиона

$$\Delta p \sim \eta n^{1/3}$$

Энергия Ферми
релятивистского фермиона

$$E_F \sim \eta n^{1/3} c \sim \frac{\eta c N^{1/3}}{R}$$

Гравитационная энергия
фермиона

$$E_G \sim -\frac{GMm_p}{R}$$

Предел массы белого карлика/ нейтронной звезды

Предельное число фермионов, удерживаемых
гравитацией

$$E_F = E_G \rightarrow \frac{\eta c N^{1/3}}{R} = \frac{GNm_p^2}{R}$$

$$N_{\max} \sim \left(\frac{\eta c}{Gm_p^2} \right)^{3/2} \sim 2 \cdot 10^{57}$$

$$M_{\max} \sim N_{\max} m_p \sim 1.5 M_{\text{Sun}}$$

$$M = 1,457 \left(\frac{2}{\mu_e} \right)^2 M_{\odot}$$

**Предельные массы БК и НЗ примерно одинаковы,
но радиусы сильно отличаются**

- Из теории политроп, для белых карликов

$$R_{wd} \propto \frac{K}{M^{1/3}}$$

$$R_{wd} = 0.89 \times 10^4 \text{ km} \left(\frac{M}{M_{\text{sun}}} \right)^{-1/3} \left(\frac{\mu_e}{2} \right)^{-5/3}$$

- Здесь...

$$P_c = K \rho_c^{5/3}$$

$$K = \frac{1}{5} \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{2/3} \frac{h^2}{m_e m_p^{5/3} \mu_e^{5/3}}$$

*Масса частицы
производящей давление
вырожденного газа*

*Число нуклонов на
вырожденную частицу*

- По аналогии, для нейтронной звезды (в грубом приближении)...

$$R_{ns} \propto \frac{K_n}{M^{1/3}}$$

$$P_n = K_n \rho^{5/3}$$

$$K_n = \frac{1}{5} \left(\frac{3}{8\pi} \right)^{2/3} \frac{h^2}{m_n^{8/3}}$$

здесь вырожденные частицы имеют массу m_n , и $\mu=1$

- Мы можем оценить радиус нейтронной звезды, принимая во внимание что мы знаем радиус белого карлика

$$\frac{R_{ns}}{R_{wd}} \approx \frac{m_e}{m_n} 2^{5/3} \left(\frac{M_{wd}}{M_{ns}} \right)^{1/3}$$

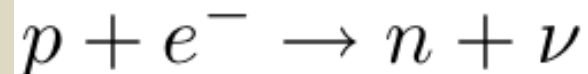
— для БК

$$R_{wd} \gg 10^4 \text{ km}$$

— получаем для НЗ

$$R_{ns} \gg 15 \text{ km}$$

- Если масса вырожденного ядра превышает $1.4M_{\odot}$, давление вырожденных электронов не может сдержать дальнейшее сжатие
- Ядро звезды начинает коллапсировать...
 - $\rho \approx 10^6 \text{ g/cm}^3$ – плотность ядра, когда ядро начинает коллапсировать (влияние релятивистских эффектов на движение электронов)
 - $\rho \approx 10^7 \text{ g/cm}^3$ – энергия Ферми превышает разницу масс между протонами и нейтронами ($\approx 1.3 \text{ MeV}$)...
 - Обратный бета распад становится возможным и энергетически выгодным перед прямым распадом



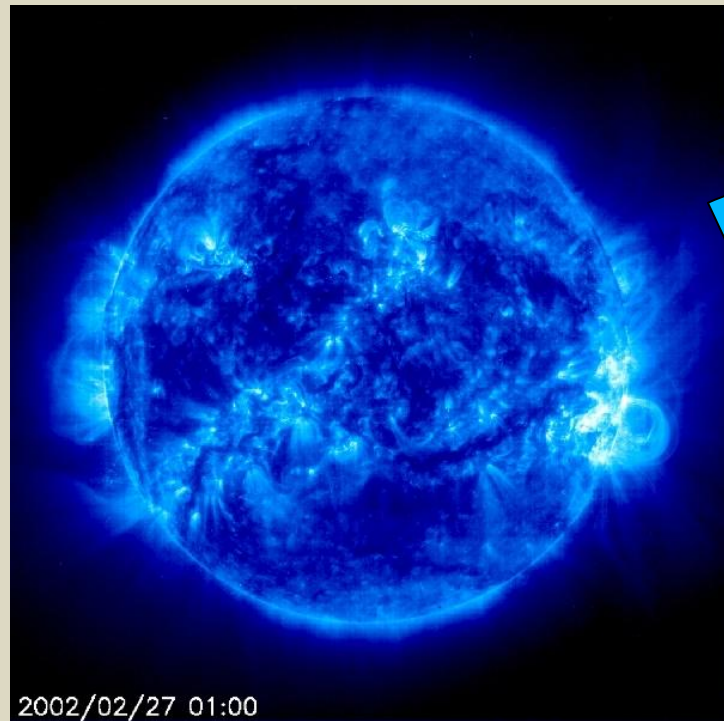
- Ядра начинают обогащаться нейтронами ...
нейтронизация

- $\rho \approx 10^8 \text{ g/cm}^3$ – ядра настолько обогащаются нейтронами, что начинают разваливаться
 - Оставшиеся ядра окружены «морем» свободных нейтронов
- $\rho \approx 10^{10} \text{ g/cm}^3$ – Давление вырожденных нейтронов становится существенным
- $\rho \approx 10^{12} \text{ g/cm}^3$ – давление вырожденных нейтронов окончательно останавливает коллапс, масса остатка $M < 2-3M_{\odot}$
- Образование нейтронной звезды... типичная масса $1.4M_{\odot}$ и радиус около 10-15 км

Магнитные поля и периоды вращения

1 Гс, 700 тыс. км, 27 дн

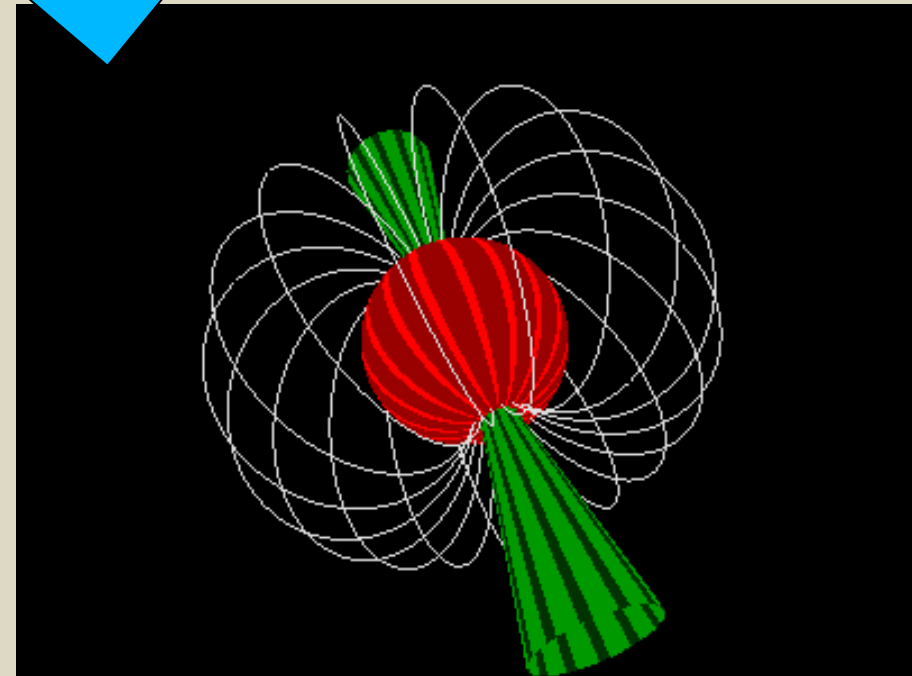
$$\iint B dS \approx \text{const}$$



10^{11-12} Гс,

10 км

сек-миллисек



Нейтронная звезда

- Радиус: 10-15 km.
- Массы: $1.2-2.0M_{\odot}$ (точно измеряются для пульсаров в двойных системах)
- Плотно упакованные нейтроны, «гигантское ядро» с $N \sim 10^{57}$
- Магнитное поле 10^8-10^{15} Гс
- Периоды вращения 1.4 мс - 1000 с.



$$U \sim GM^2 / R \sim 5 \times 10^{53} \text{ erg} \sim 0.2 Mc^2$$

$$g \sim GM / R^2 \sim 2 \times 10^{14} \text{ cm/s}^2$$

$$\bar{\rho} \approx 3M / (4\pi R^3) \approx 7 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3 \sim (2-3) \rho_0$$

$$\rho_0 = 2.8 \times 10^{14} \text{ g/cm}^3 \quad \text{ядерная плотность}$$

Основные уравнения

$$c^2 d\tau^2 = \left(1 - \frac{r_s}{r}\right) c^2 dt^2 - \frac{dr^2}{1 - \frac{r_s}{r}} - r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\varphi^2)$$

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \quad \text{радиус Шварцшильда (= 2.95 км на } 1M_{\odot}\text{)}$$

горизонт событий черной дыры

простой (но неверный!) вывод: «вторая космическая скорость = скорости света»

$$\frac{GM}{R} = \frac{mc^2}{2}$$

Гравитационный сдвиг энергии

$$\frac{E}{E_0} = \sqrt{1 - \frac{r_s}{r}}$$

Для Земли (отн. бесконечности)

Для БК

$$r_s = 9\text{мм}, \frac{\Delta E}{E_0} \sim 7 \times 10^{-10}$$

$$\frac{\Delta E}{E_0} \sim 7 \times 10^{-6} \sim 20 - 80 \text{ км/сек}$$

Основные уравнения

Уравнение Оппенгеймера-Волкова

$$\frac{dP}{dr} = - \frac{GM_r \rho}{r^2} \left(1 + \frac{P}{\rho c^2} \right) \left(1 + \frac{4\pi r^2 P}{M_r c^2} \right) \left(1 - \frac{2GM_r}{rc^2} \right)^{-1}$$

Полная масса звезды

$$M_r = \int_0^r 4\pi r^2 \rho(r) dr$$

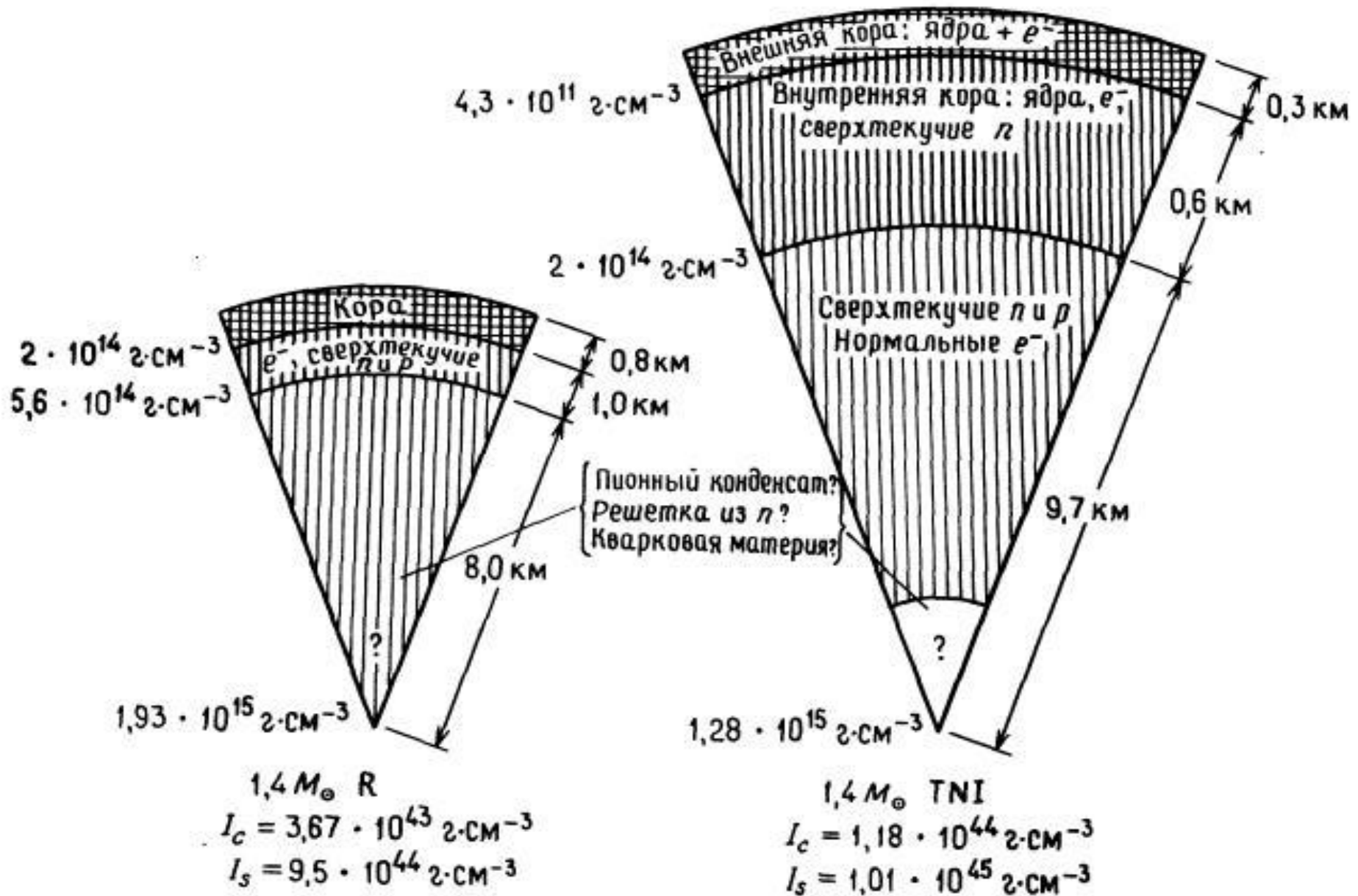
Уравнение состояния

$$P = P(\rho)$$

Основная проблема

Внутренняя структура НЗ, максимальная масса НЗ

Строение нейтронной звезды



Соотношение масса-радиус

- М-Р зависит от внутреннего состава НЗ и уравнения состояния (неизвестно для очень высоких плотностей)
- Определение М и R, может помочь определить состав и уравнение состояния НЗ
- Массы определяются для двойных систем, точное измерение радиусов очень сложно

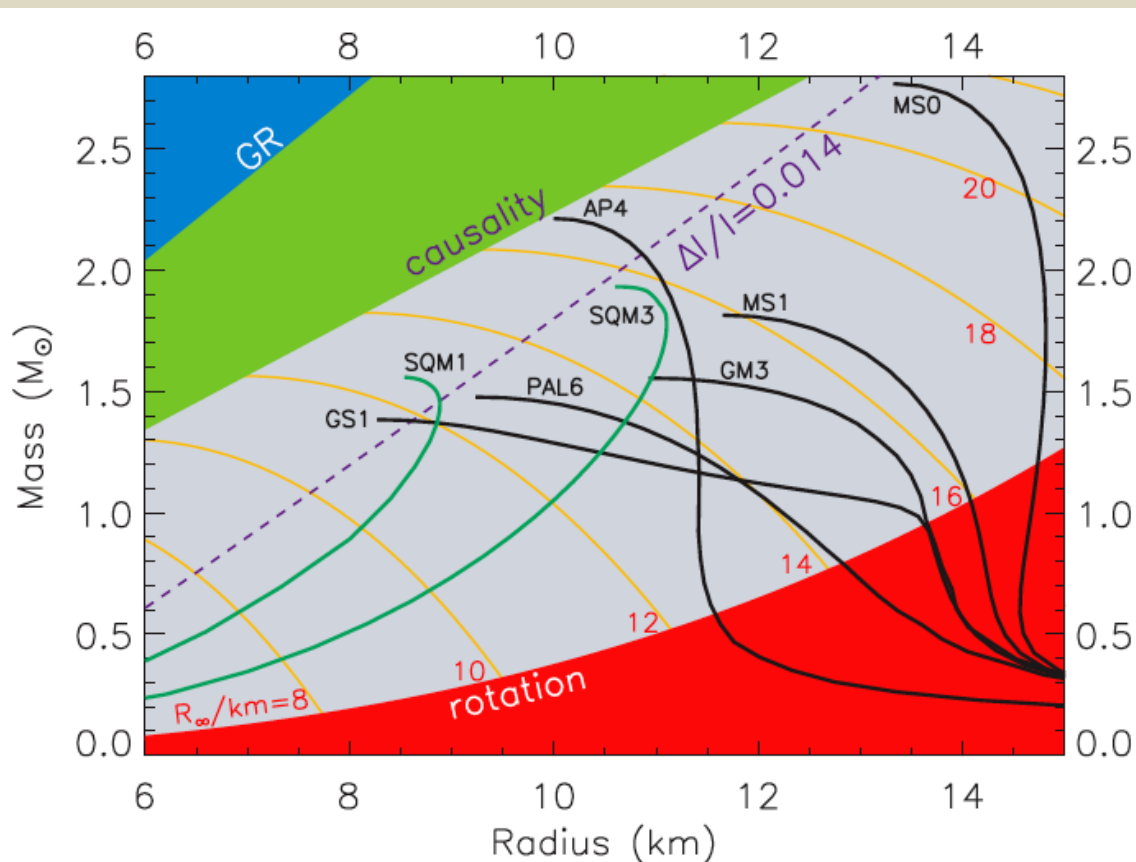
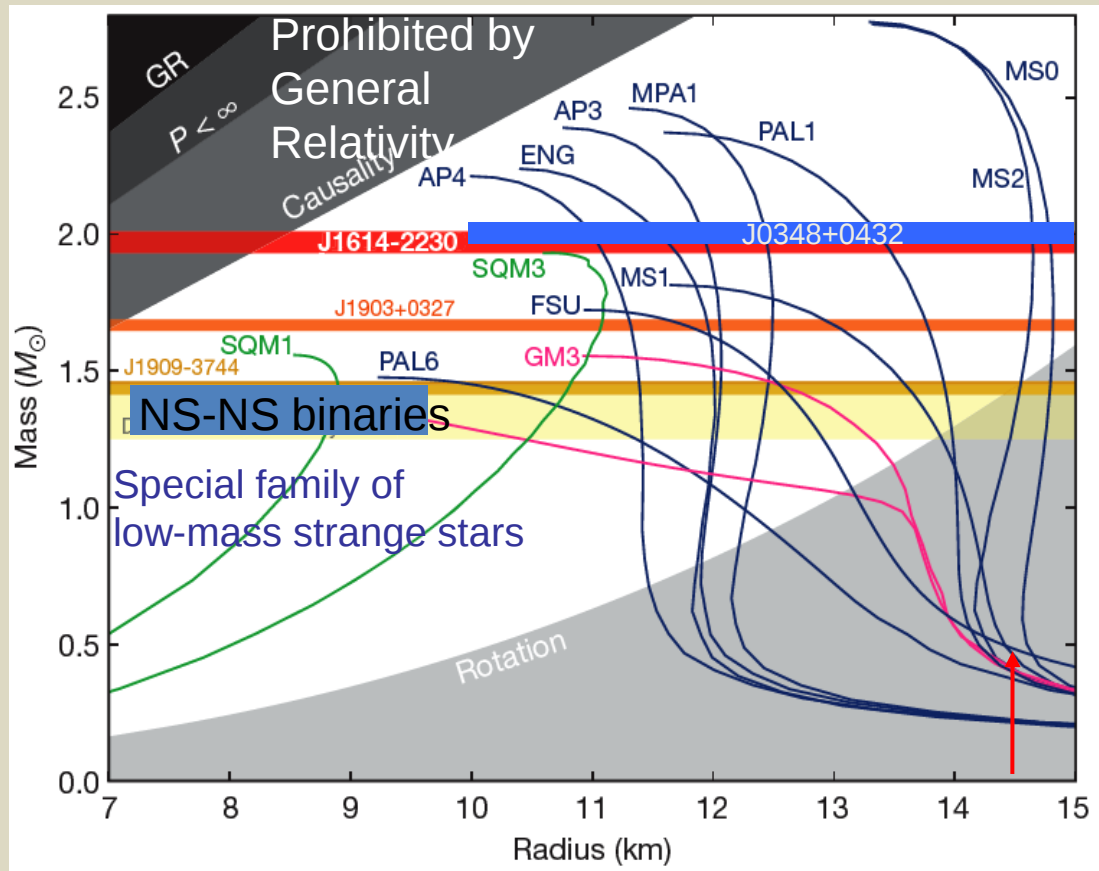


Fig. 2. Mass-radius diagram for neutron stars. Black (green) curves are for normal matter (SQM) equations of state [for definitions of the labels, see (27)]. Regions excluded by general relativity (GR), causality, and rotation constraints are indicated. Contours of radiation radii R_{∞} are given by the orange curves. The dashed line labeled $\Delta/I = 0.014$ is a radius limit estimated from Vela pulsar glitches (27).

Массы некоторых пульсаров

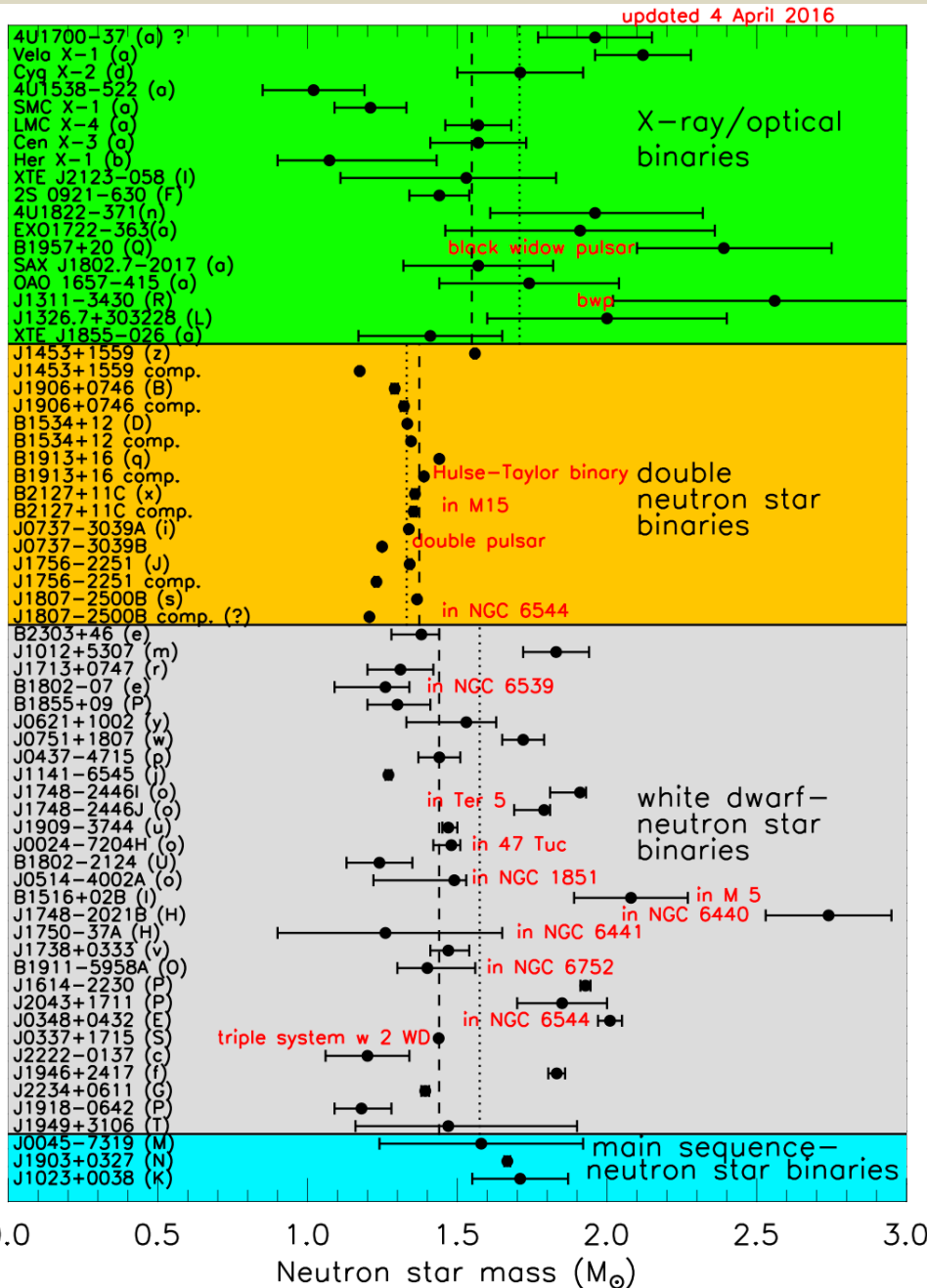


Наибольшие
измеренные массы
нейтронных звезд —
пульсаров

для J1614-2230
 $M = (1.97 \pm 0.04) M_{\odot}$

для J0348+0432
 $M = (2.01 \pm 0.04) M_{\odot}$

Массы нейтронных звезд



Измерения:

- 1) Скорее всего, мягкие уравнения состояний можно отбросить (оставляем жесткие и средние)
- 2) Свидетельствуют о полностью нуклонном составе плотной материи

Определение радиусов проблематично

Наблюдаемые характеристики излучения (???)

Как светят нейтронные звезды?

Остывание поверхности

Энергия вращения

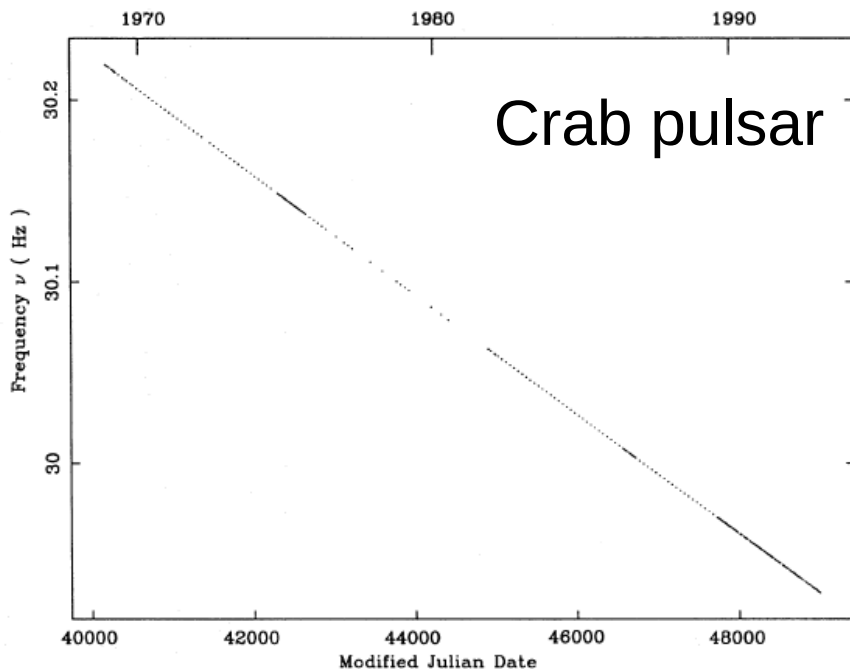
Аккреция в двойной системе

Энергетика одиночных пульсаров

Пульсары замедляются => потеря энергии вращения – можно ли объяснить наблюдаемое излучение?

$$E = \frac{1}{2} I \Omega^2 = \frac{I}{2} \left(\frac{4\pi^2}{P^2} \right) = \frac{2\pi^2 I}{P^2}$$

$$\frac{dE}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{2\pi^2 I}{P^2} \right) = -\frac{4\pi^2 I}{P^3} \frac{dP}{dt}$$



$$M=1.4M_{\odot}; P=0.033 \text{ s}; R=10^6 \text{ cm}$$

$$\frac{1}{P} \frac{dP}{dt} \sim 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

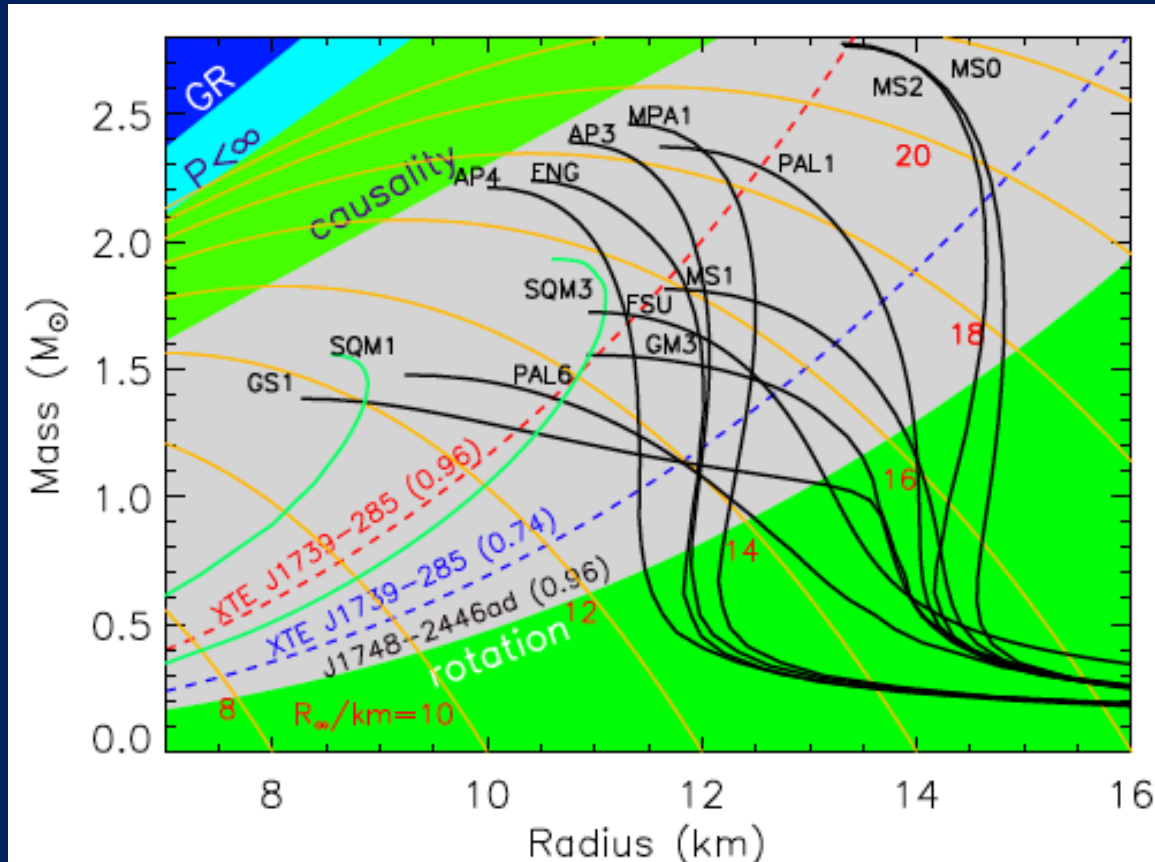
$$dE/dt \approx L \sim 10^{37-38} \text{ эрг/с}$$

$$L \sim 10^{4-5} L_{\odot}$$

Ограничения на массу-радиус НЗ из быстрого вращения

Существование пульсара J1748-2446ad, который вращается с частотой 716 Гц, не позволяет НЗ иметь слишком большой радиус для данной массы.

Предел на массу (Haensel et al. 2009)



$$f \leq 1.04 \left(M_{\text{sph}} / M_{\text{sun}} \right)^{1/2} \left(R_{\text{sph}} / 10 \text{ km} \right)^{-3/2} \text{ kHz}$$

Основной механизм выделения энергии – аккреция на компактный объект



Здесь потенциальная энергия гравитационного поля
переводится в кинетическую энергию воды

Акреция на релятивистские компактные объекты (НЗ, ЧД)

- Аккреция – падение вещества под действием гравитационного притяжения объекта
- Черные дыры можно обнаружить лишь по их влиянию на окружающие тела
- Откуда берется вещество?
 - межзвездное
 - с соседней звезды в двойной системе
- Самые яркие объекты в Галактике связаны с аккрецией на НЗ и ЧД в двойных системах

Акреция на релятивистские компактные объекты (НЗ, ЧД)

$$L \sim \frac{GM_c \dot{M}}{R_c} \sim \left(\frac{2R_c}{R_s} \right)^{-1} \times \dot{M} c^2 = \eta \times \dot{M} c^2$$

Светимость
Эффективность

$$\eta = \left(\frac{2R_c}{R_s} \right)^{-1}$$

$$\left. \begin{array}{l} \dot{M} \sim 10^{-8} M_{\text{sun}}/\text{yr} \\ L_x \sim 10^{38} \text{ erg/s} \end{array} \right\} \Rightarrow \eta \sim 0.1, R_c \sim 5R_s \text{ } (\sim 15 \text{ km for } 1 M_{\text{sun}})$$

$$R \sim 5R_s \sim 15 \frac{M}{M_{\text{Sun}}} \text{ км}$$

$S = 4\pi R^2$ — излучающая поверхность

$L = \sigma_{\text{SB}} T^4 S$ — закон Стефана — Больцмана

$$T = 1.6 \cdot 10^7 \text{ К} \left(\frac{M}{M_{\text{Sun}}} \right)^{-1/2}$$

Рентгеновский
диапазон

Саяно-Шушенская ГЭС — **скорость падения воды <70 м/с**
(23.5 млрд кВтч в год $\sim 8.5 \times 10^{16}$ Дж в год)

Белый карлик (БК) (~масса
Солнца, размер ~ 10 тыс. км.) - **скорость
падения ~ 1000 км/сек!**

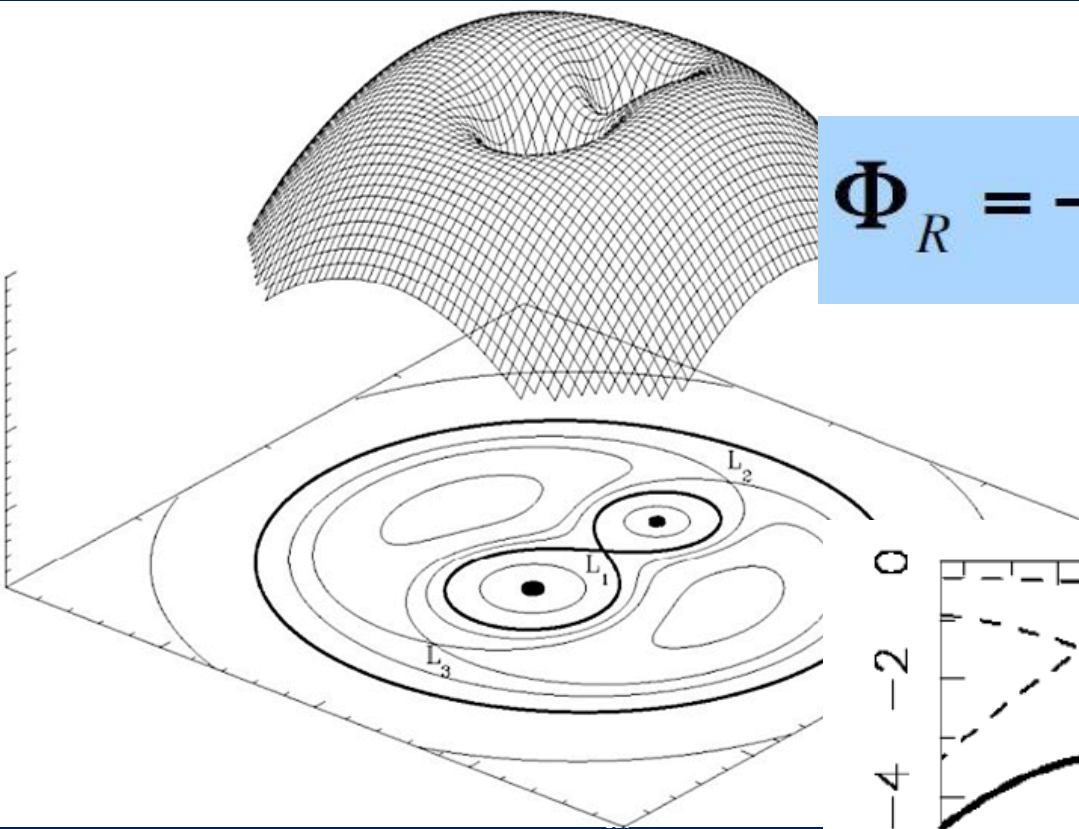
Нейтронная звезда (НЗ) (~масса
Солнца, размер ~ 10 км) - **скорость
падения $\sim 150\,000$ км/сек!**

Черная дыра (ЧД) – несколько масс Солнца
скорость падения $\sim 300\,000$ км/сек!

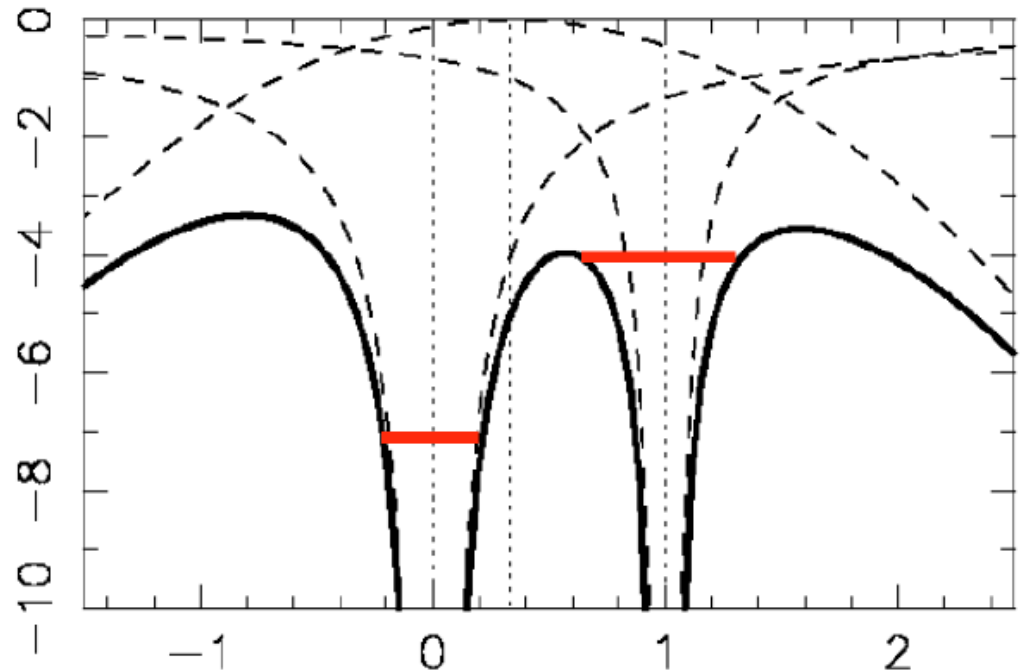
Энерговыведение за счет аккреции на НЗ и ЧД в сотни
раз больше чем в термоядерных реакциях!

**400 кг вещества при аккреции на НЗ даст энергии
достаточной для всей России на год!**
(1 триллион кВтч)

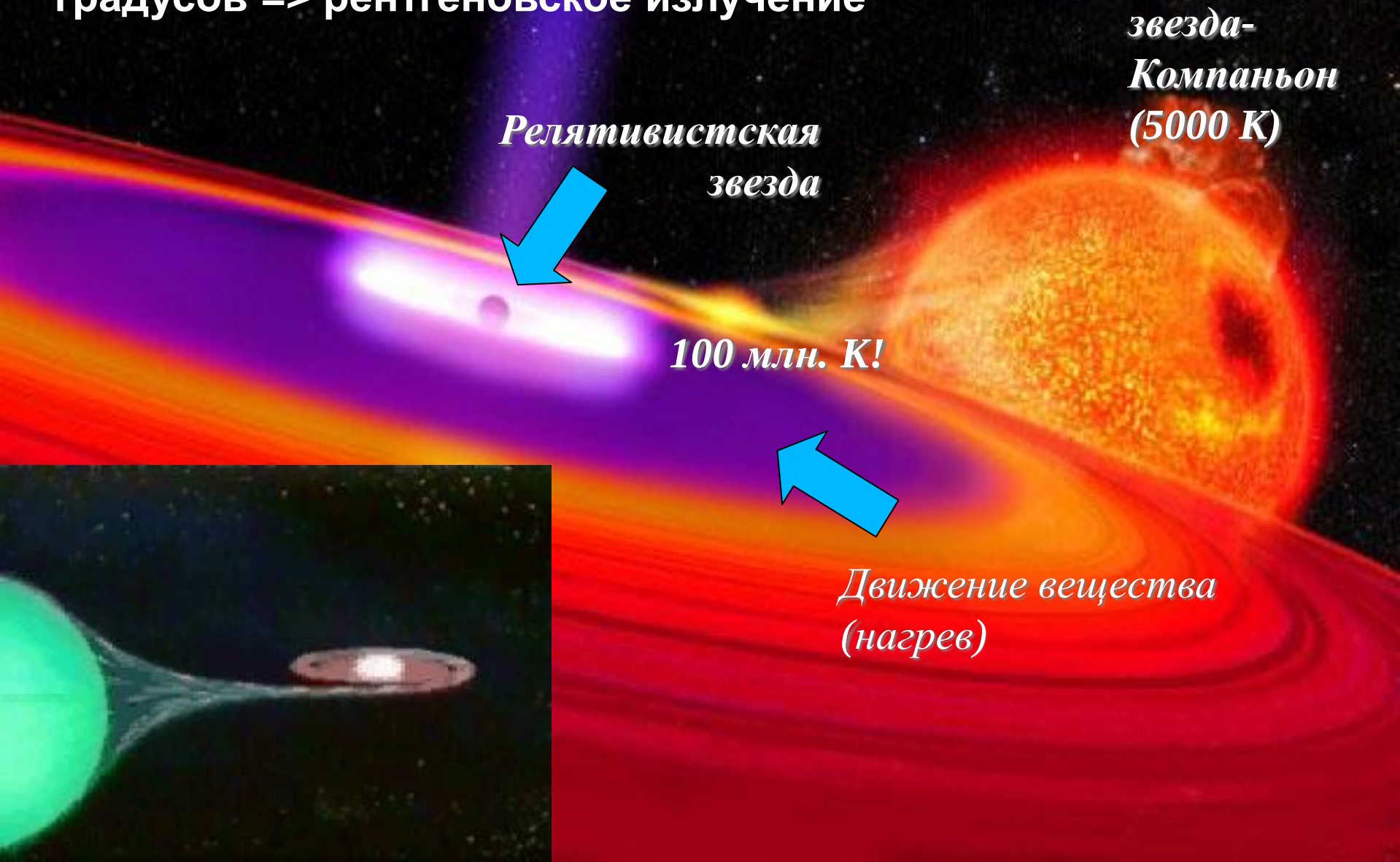
Двойные системы. Полость Роша



$$\Phi_R = -\frac{GM_1}{|\vec{r}-\vec{r}_1|} - \frac{GM_2}{|\vec{r}-\vec{r}_2|} - \frac{1}{2}(\vec{\Omega} \times \vec{r})^2$$



**Вещество в аккреционном диске
нагревается до нескольких миллионов
градусов => рентгеновское излучение**



Атмосфера H3

При типичной аккреции $\dot{M} \sim 10^{-9} M_{\text{sun}}/\text{год}$

Темп накопления

$$\Sigma > \frac{10^{-9} Ms / year}{4\pi R^2} > 5 \times 10^3 \text{ г} / \text{см}^2 / \text{сек}$$

Высота однородной атмосферы H3

$$\frac{dP}{dz} = \rho g$$

$$P = \frac{\rho k T}{m_p}$$

$$P = P_0 \exp \left[-\frac{m_p g h}{k T} \right]$$

$$g = \frac{GM_{ns}}{R^2} \sim 2 \times 10^{14}$$

$$h_{ns} \sim 5 \text{ см}$$

$$kT \sim 1 \text{ кэВ}$$

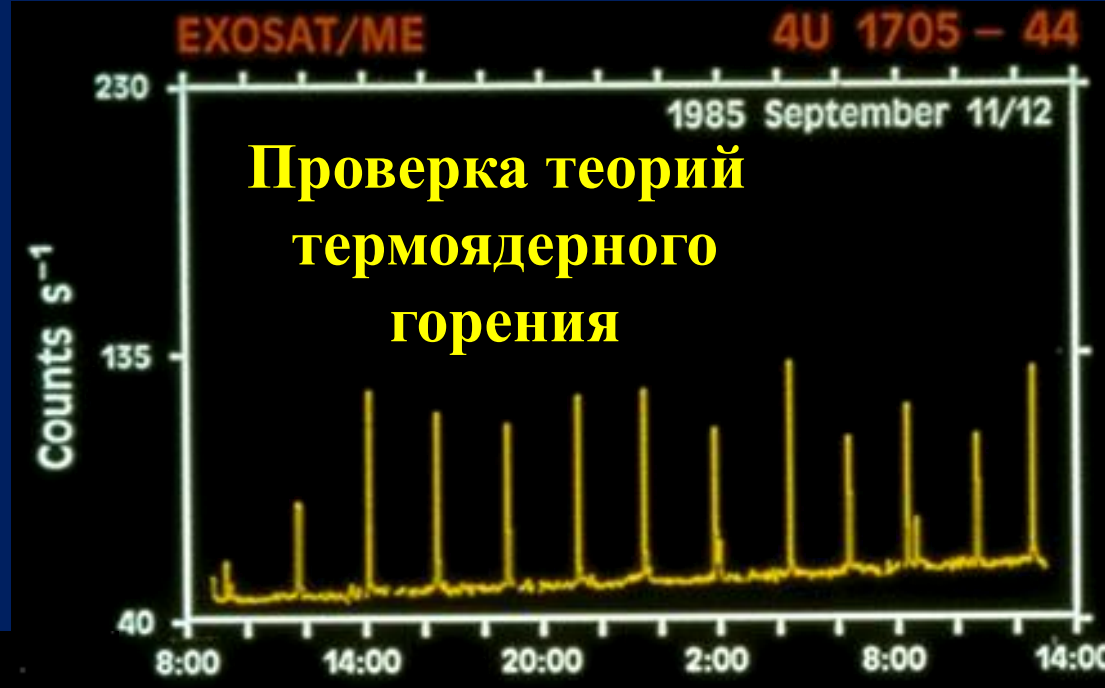
На глубине порядка 10 см за сутки
копится плотность $> 10^7 \text{ г/см}^3$

Термоядерные взрывы

Если магнитное поле H3 слабое, $10^8\text{--}10^9$ Гс

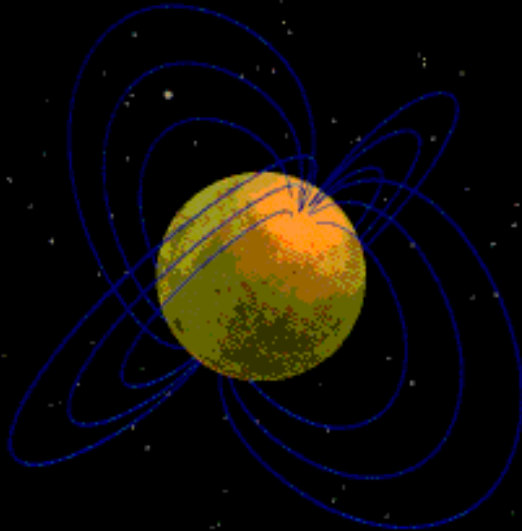
200-300 терабомб (10^{12})
по 10 Мтонн TNT
в секунду!

За взрыв сгорает
около массы Луны

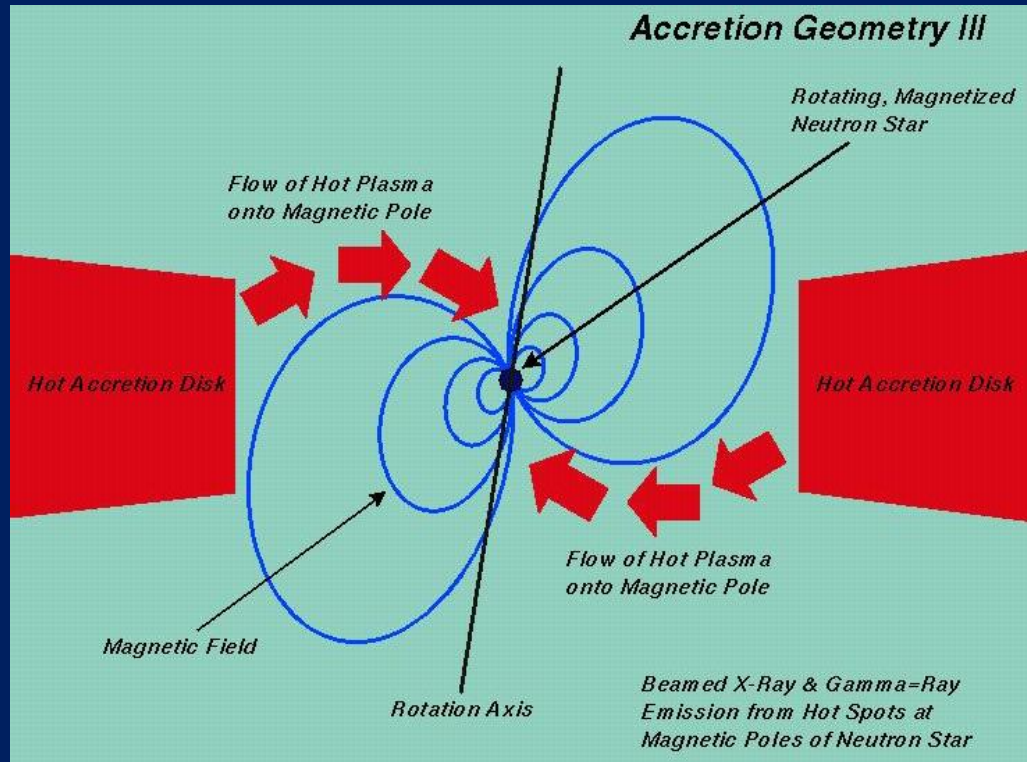


Барстер

В Галактике известны
системы в которых такие
взрывы происходят
каждые 3-4 часа!



Если магнитное поле НЗ более сильное, то



$$\frac{(B^2(r_A))}{8\pi} \approx \frac{1}{2} \rho(r_A) v^2(r_A)$$

$$v(r) \approx v_{\text{ff}} = \left(\frac{2GM}{r} \right)^{1/2},$$

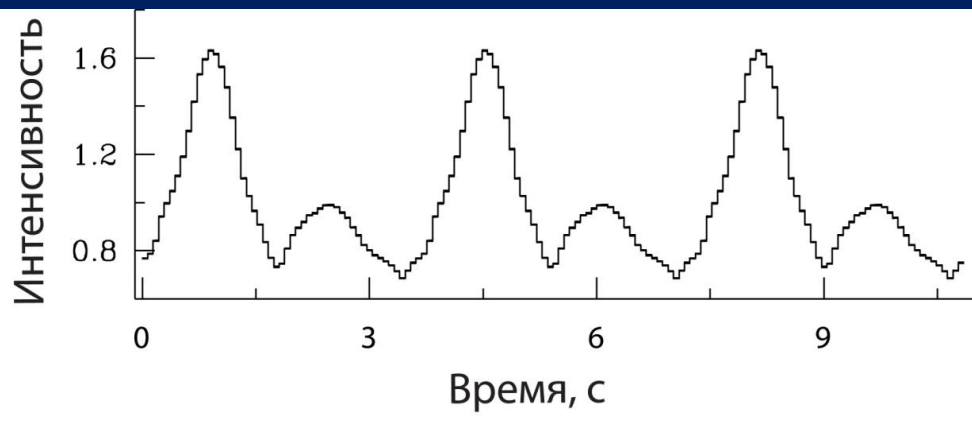
$$\rho(r) \approx \rho_{\text{ff}} = \frac{\dot{M}}{4\pi v_{\text{ff}} r^2}.$$

$$B \approx \frac{\mu}{r^3}$$

$$r_A = \left(\frac{\mu^4}{2GM\dot{M}^2} \right)^{1/7} = 3,2 \times 10^8 \dot{M}_{17}^{-2/7} \mu_{30}^{4/7} \left(\frac{M}{M_{\odot}} \right)^{-1/7} \text{ cm}$$

аккрецирующий рентгеновский пульсар

Пульсирующее излучение



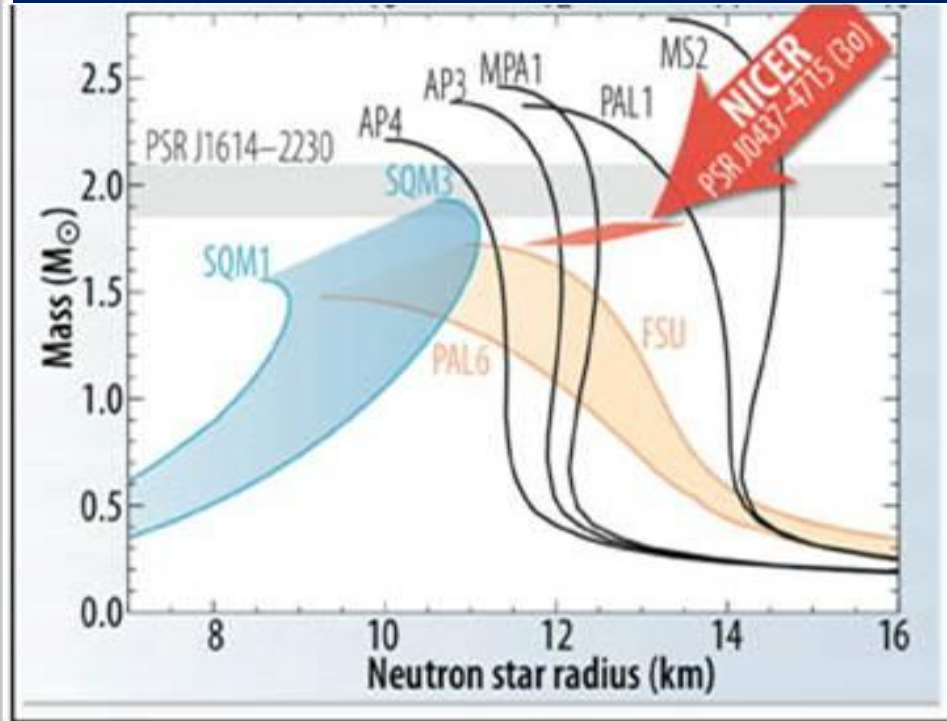
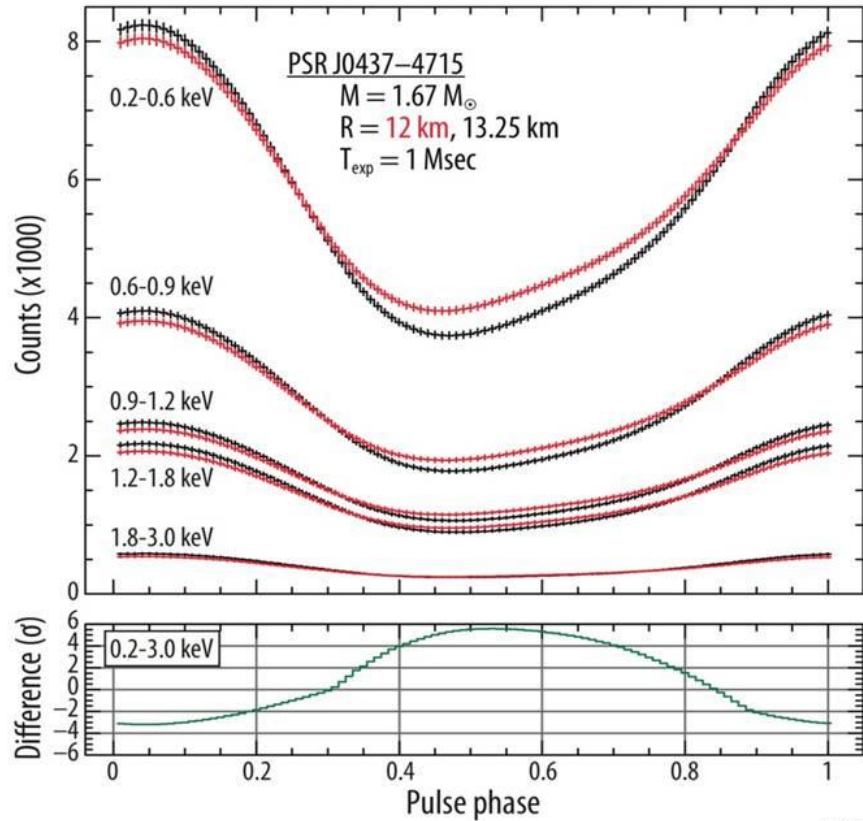
Высокая стабильность
периода, повторяемость и
уникальность формы
импульса

На что это похоже?

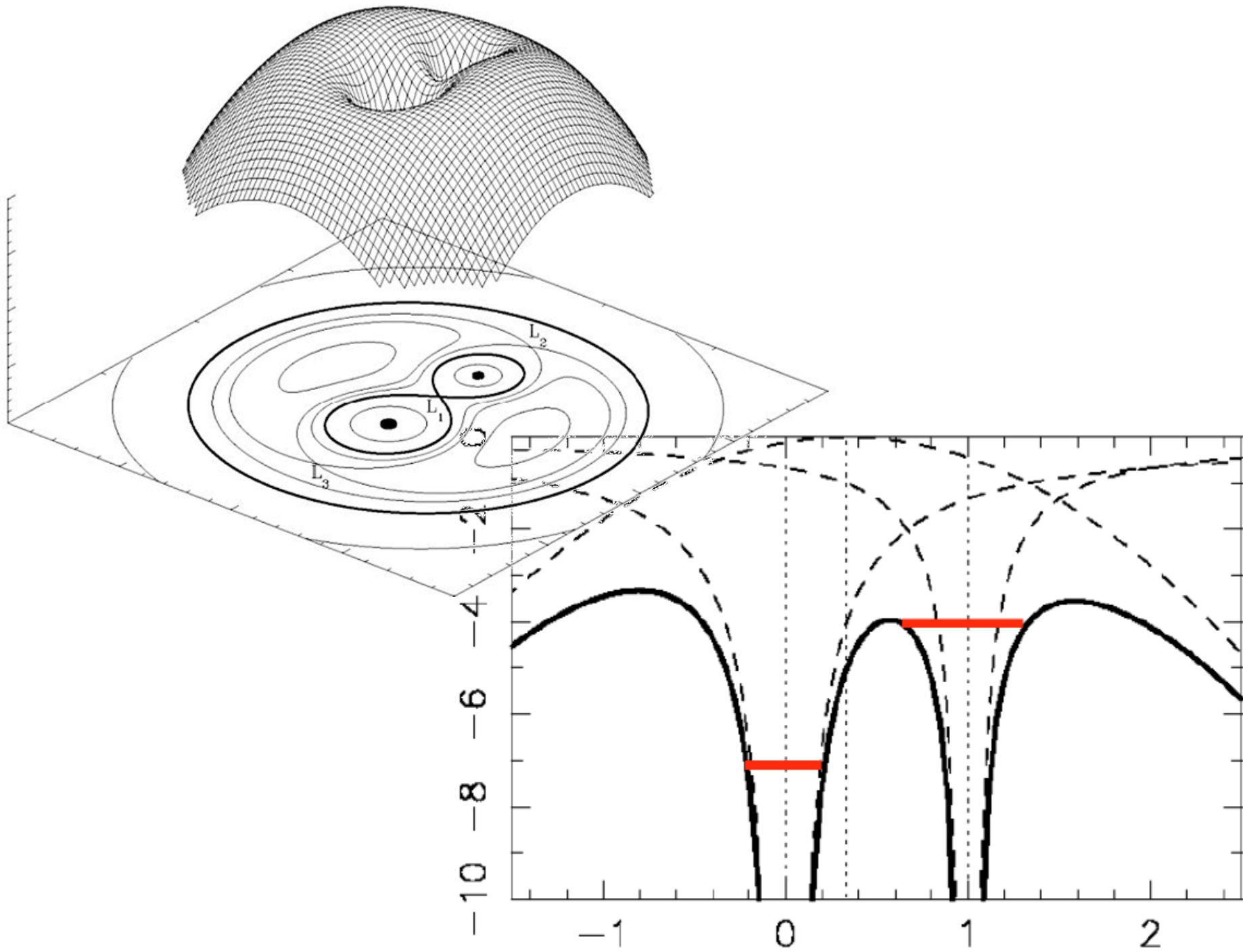


Кардиограмма человека!

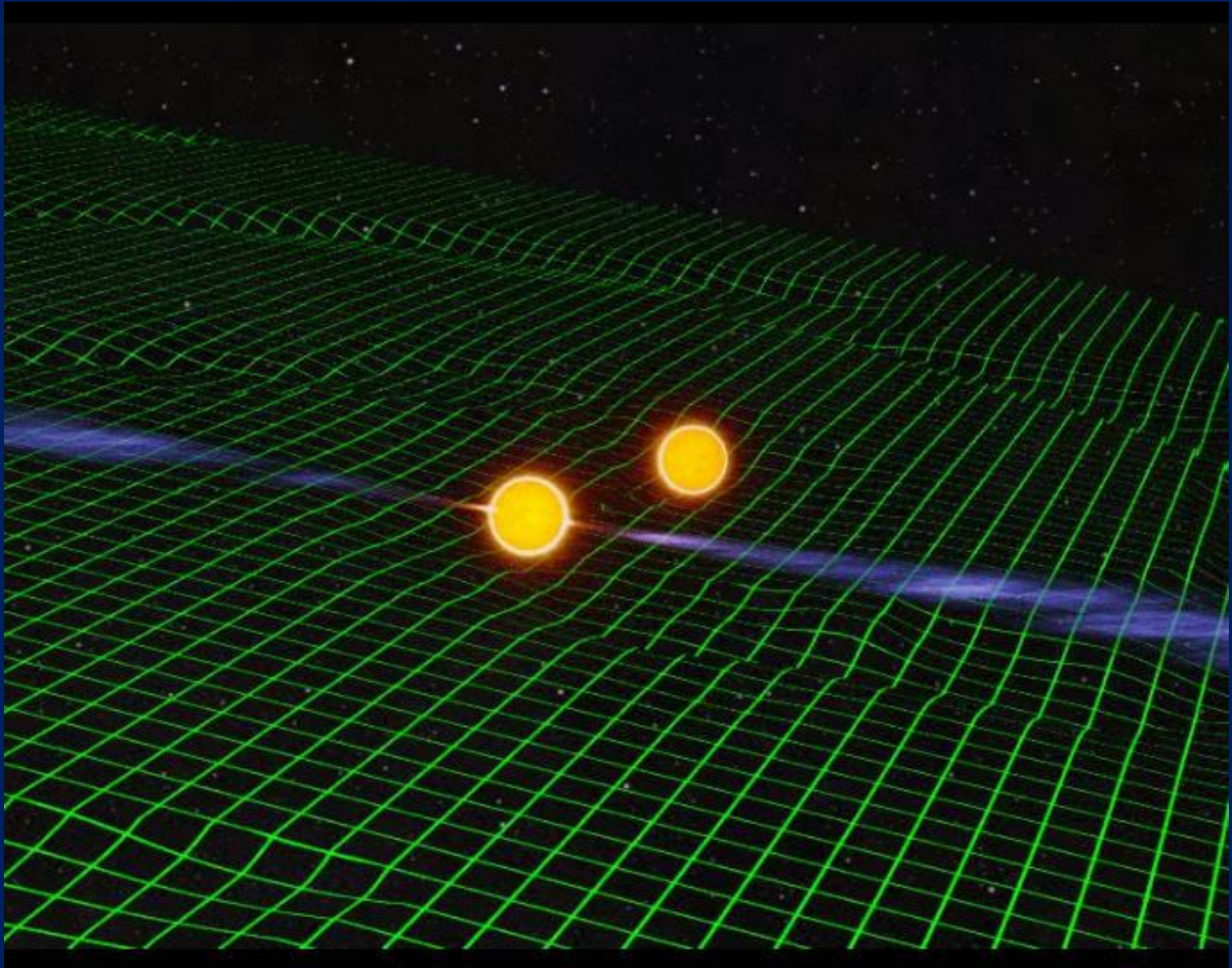
Ограничение на уравнение состояния при сверхвысоких плотностях



**Жизнь нейтронных звезд
долгая, но что в конце?**



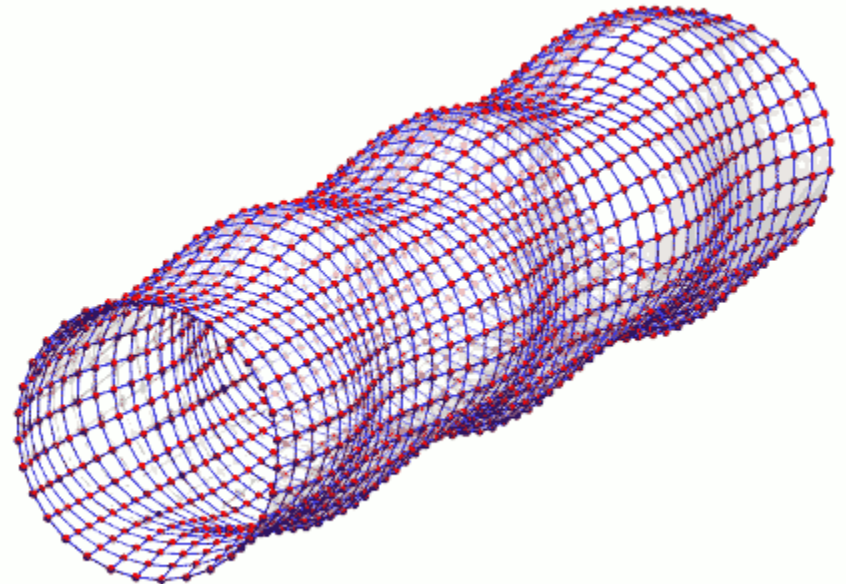
Двойные нейтронные звезды



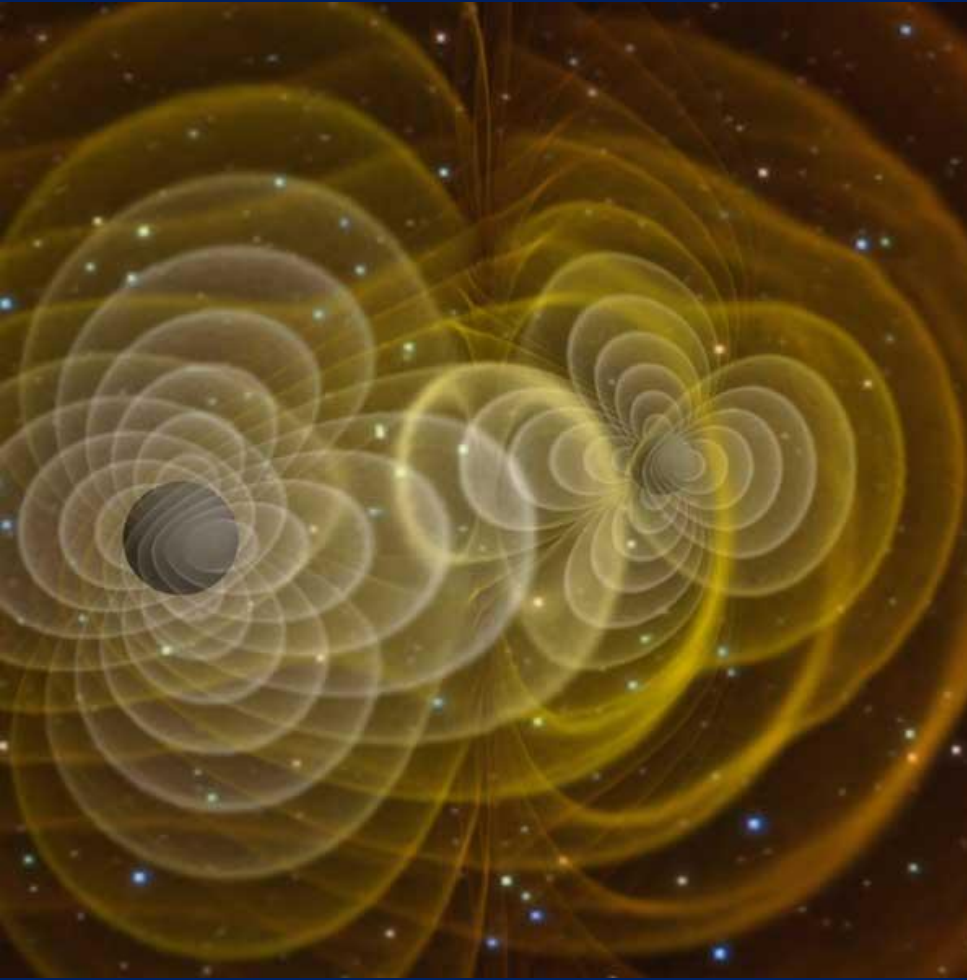
Гравитационные волны

- Следуют из Общей теории относительности - волновое решение уравнений Эйнштейна.
- Представляют собой периодическое изменение метрики пространства-времени – изменяют относительное расстояние между точками пространства.
- Образуются при движении массивных тел с изменяющимся ускорением.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu},$$



Гравитационные волны



$$\frac{dE_{orb}}{dt} = -\frac{32G^4}{5c^5} \frac{\mu^2 M^3}{a^5}$$

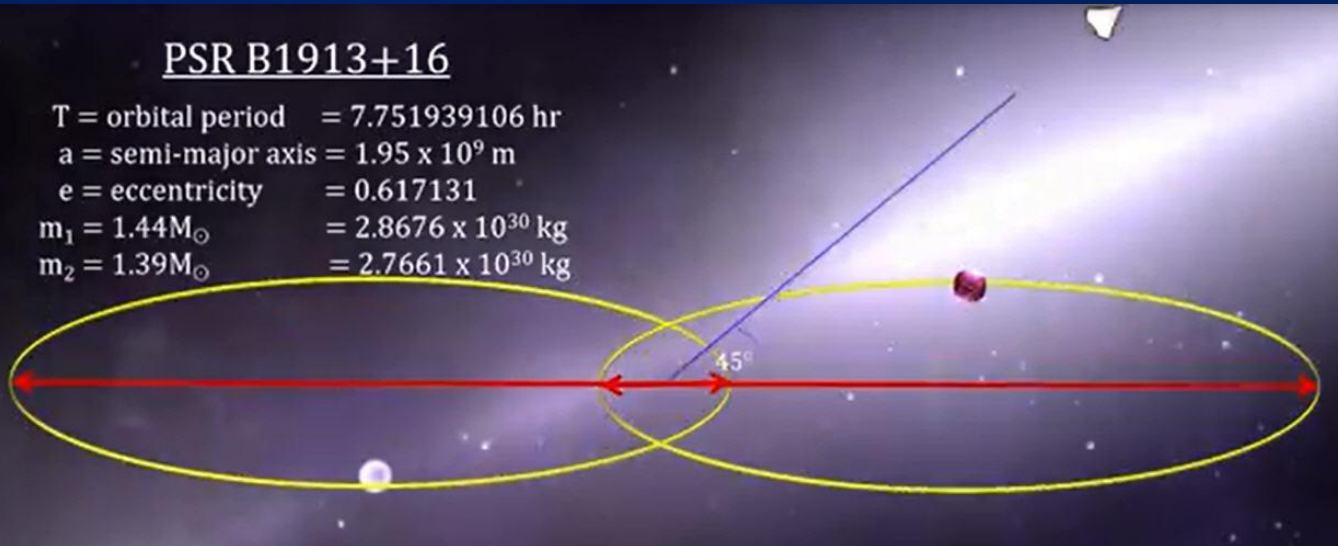
$$\frac{dJ_{orb}}{dt} = -\frac{32G^{7/2}}{5c^5} \frac{\mu^2 M^{5/2}}{a^{7/2}}$$

$$\tau(GW) = \left(\frac{d \ln L_{orb}}{dt} \right)^{-1} = 1.2 \times 10^9 \left(\frac{M_1}{M_\odot} \right)^{-1} \left(\frac{M}{M_\odot} \right)^{-1} \left(\frac{M_2}{M_\odot} \right)^{-1} \left(\frac{a}{R_\odot} \right)^4$$

Пульсар Халсе-Тейлора PSR B1913+16

PSR B1913+16

T = orbital period = 7.751939106 hr
 a = semi-major axis = 1.95×10^9 m
 e = eccentricity = 0.617131
 $m_1 = 1.44M_{\odot} = 2.8676 \times 10^{30}$ kg
 $m_2 = 1.39M_{\odot} = 2.7661 \times 10^{30}$ kg



Periastron = 0.746×10^6 km
 Apastron = 3.153×10^6 km
 Inclination = 45°

Gravitational Radiation

$$P = \frac{dE}{dt} = -\frac{32G^4}{5c^5} \frac{(m_1 m_2)^2 (m_1 + m_2)}{a^5 (1 - e^2)^{7/2}} \left(1 + \frac{73e^2}{24} + \frac{37e^4}{96}\right)$$

$$= 7.35 \times 10^{24} \text{ watts}$$

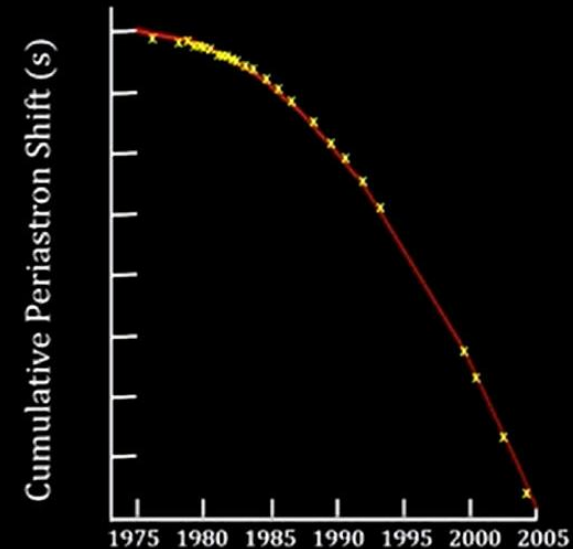
Orbital Shrinkage

$$\frac{da}{dt} = -\frac{64G^3}{5c^5} \frac{(m_1 m_2)(m_1 + m_2)}{a^3 (1 - e^2)^{7/2}} \left(1 + \frac{73e^2}{24} + \frac{37e^4}{96}\right)$$

$$= 3.5 \text{ m/year}$$

$$\frac{dT}{dt} = 76.5 \text{ milliseconds per year}$$

Time till merge = 300 million years



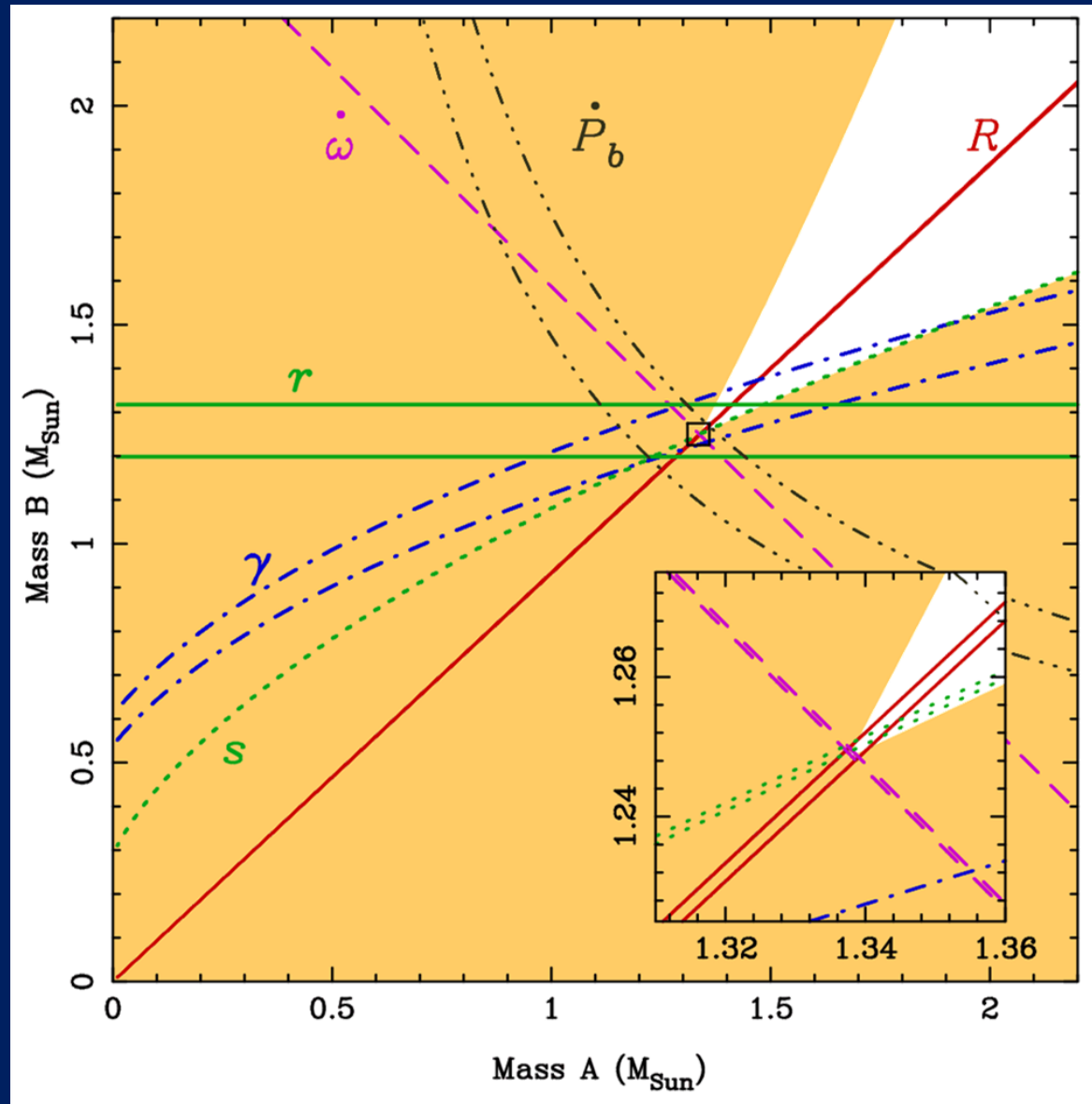
Лучший случай - PSR J0737-3039

R-отношение масс
(орбиты)

W-прецессия орбиты

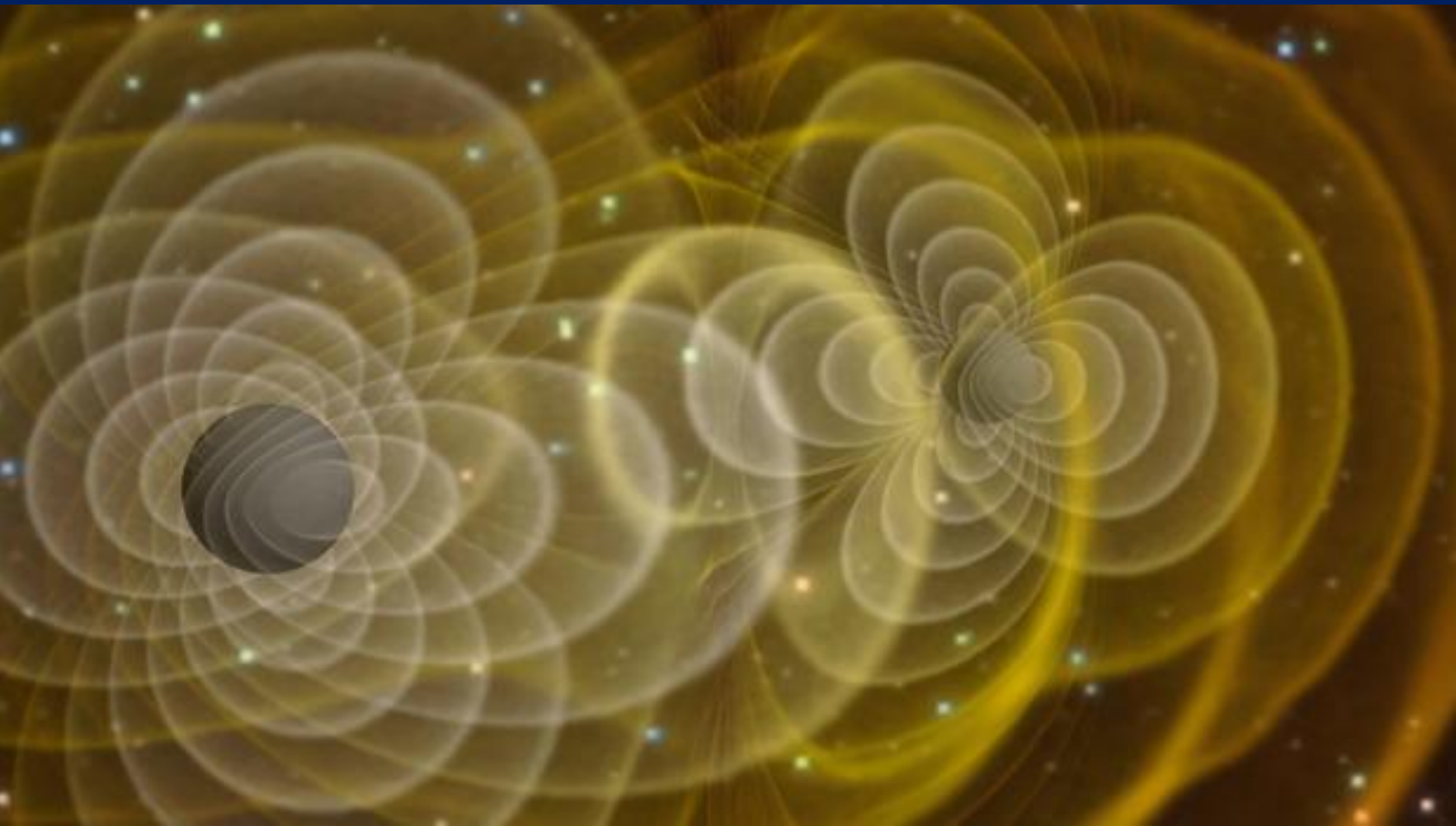
Pb-торможение за
счет ГВ

r, s — замедление
времени вблизи
одной НЗ



Timing parameter	PSR J0737–3039A	PSR J0737–3039B
Right Ascension α	07 ^h 37 ^m 51 ^s .24927(3)	—
Declination δ	–30°39′40″.7195(5)	—
Proper motion in the RA direction (mas yr ^{–1})	–3.3(4)	—
Proper motion in Declination (mas yr ^{–1})	2.6(5)	—
Parallax, π (mas)	3(2)	—
Spin frequency ν (Hz)	44.054069392744(2)	0.36056035506(1)
Spin frequency derivative $\dot{\nu}$ (s ^{–2})	$-3.4156(1) \times 10^{-15}$	$-0.116(1) \times 10^{-15}$
Timing Epoch (MJD)	53156.0	53156.0
Dispersion measure DM (cm ^{–3} pc)	48.920(5)	—
Orbital period P_b (day)	0.10225156248(5)	—
Eccentricity e	0.0877775(9)	—
Projected semi-major axis $x = (a/c) \sin i$ (s)	1.415032(1)	1.5161(16)
Longitude of periastron ω (deg)	87.0331(8)	87.0331 + 180.0
Epoch of periastron T_0 (MJD)	53155.9074280(2)	—
Advance of periastron $\dot{\omega}$ (deg/yr)	16.89947(68)	[16.96(5)]
Gravitational redshift parameter γ (ms)	0.3856(26)	—
Shapiro delay parameter s	0.99974(–39, +16)	—
Shapiro delay parameter r (μ s)	6.21(33)	—
Orbital period derivative $\dot{P}_b$	$-1.252(17) \times 10^{-12}$	—
Timing data span (MJD)	52760 – 53736	52760 – 53736
Number of time offsets fitted	10	12
RMS timing residual σ (μ sec)	54	2169
Total proper motion (mas yr ^{–1})	4.2(4)	—
Distance $d(\text{DM})$ (pc)	~ 500	—
Distance $d(\pi)$ (pc)	200 – 1000	—
Transverse velocity ($d = 500$ pc) (km s ^{–1})	10(1)	—
Orbital inclination angle (deg)	88.69(–76, +50)	—
Mass function ($M_\odot$)	0.29096571(87)	0.3579(11)
Mass ratio, R	1.0714(11)	—
Total system mass ($M_\odot$)	2.58708(16)	—
Neutron star mass ($m_\odot$)	1.3381(7)	1.2489(7)

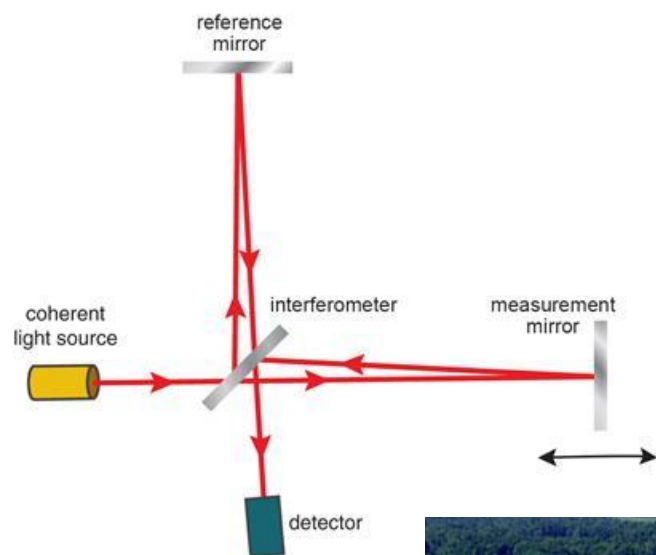
Источники гравитационных волн –
неравномерно движущиеся массивные
объекты: чёрные дыры, нейтронные звёзды.



Детектор гравитационных волн – интерферометр Майкельсона

Гравитационная волна должна изменять относительное расстояние между зеркалами интерферометра, изменяя картину, создаваемую лазерным лучом.

Идея - Владислав Пустановит и Михаил Герценштейн (1962)



Одна из важных задач – найти источники гравитационных волн и отождествить их с объектами привычного э/м диапазона.

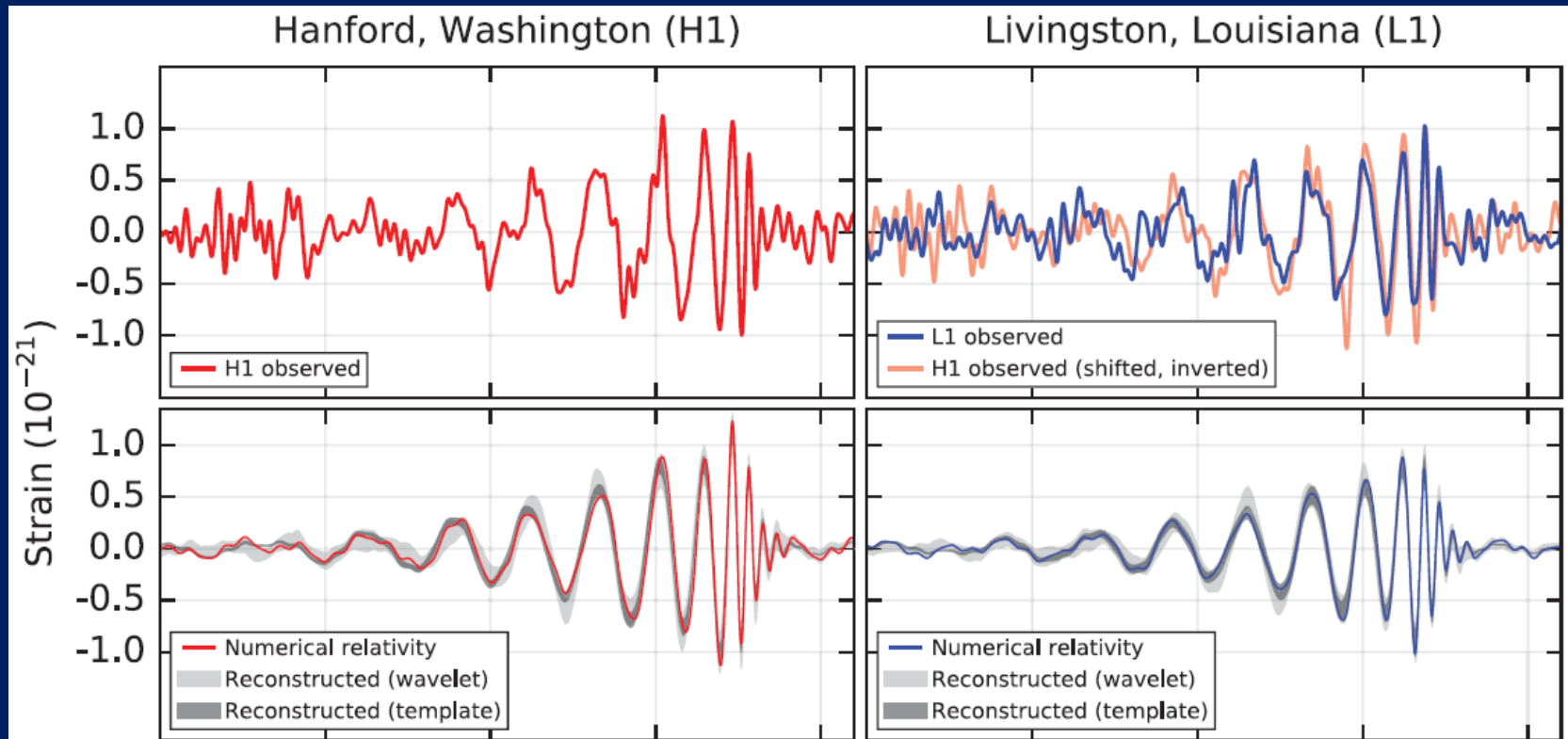
Earth

Space

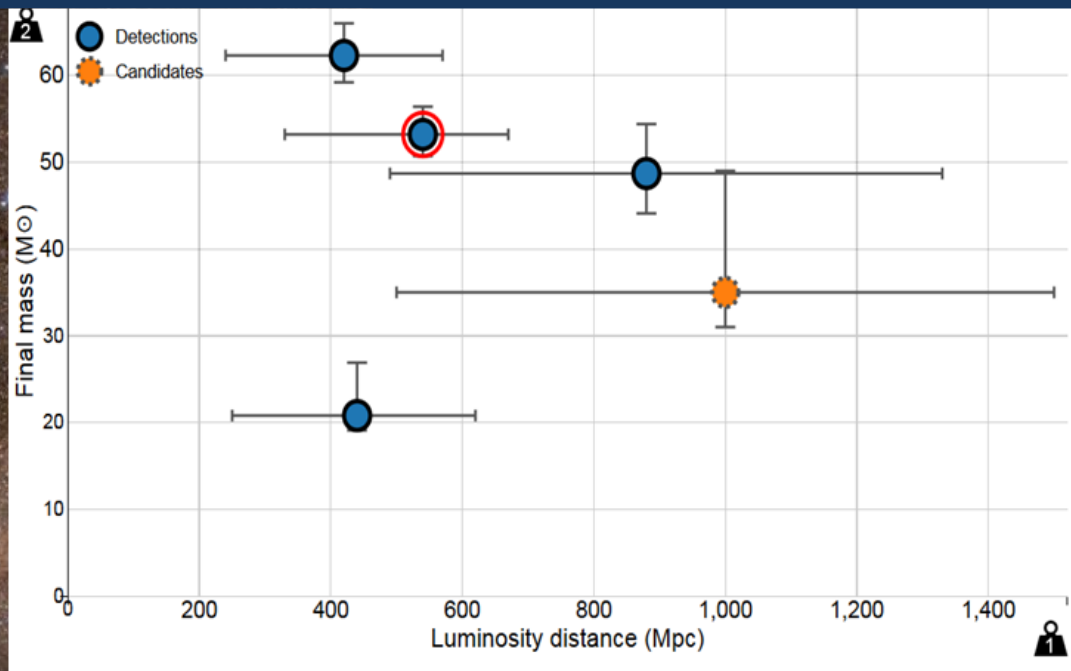


Что же там столкнулось?

Теория эволюции звёзд позволяет рассчитать численно, как будут вести себя различные системы при различных наборах параметров. Наибольшее сходство модели с наблюдениями помогает выбрать тот или иной набор параметров с определённой вероятностью.



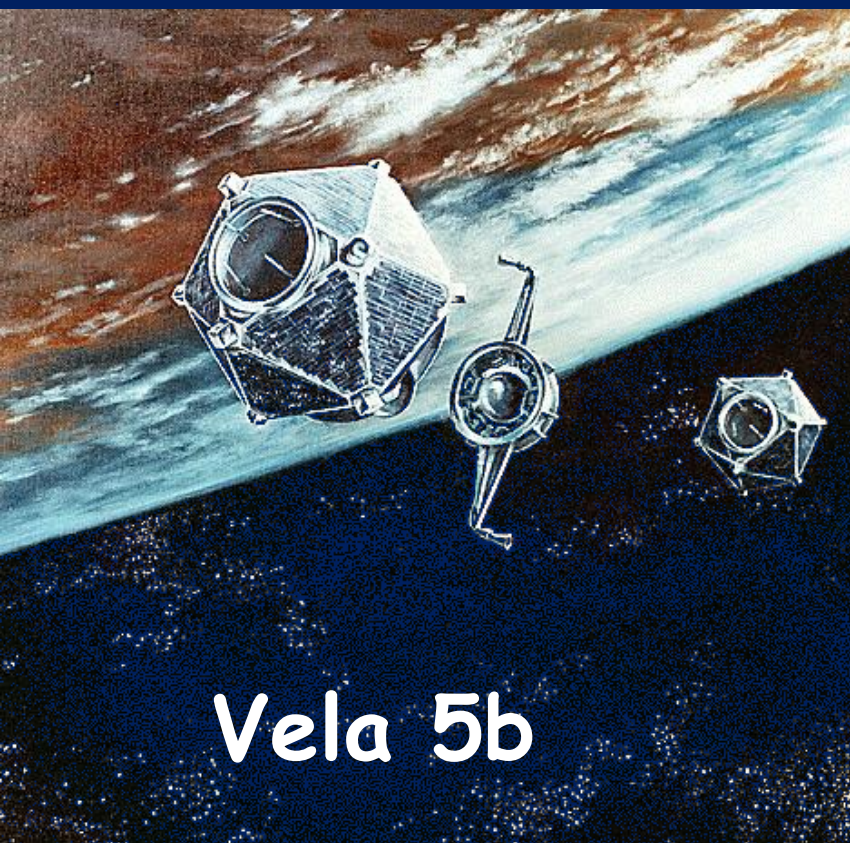
Гравитационно-волновые события и поиск электромагнитного излучения



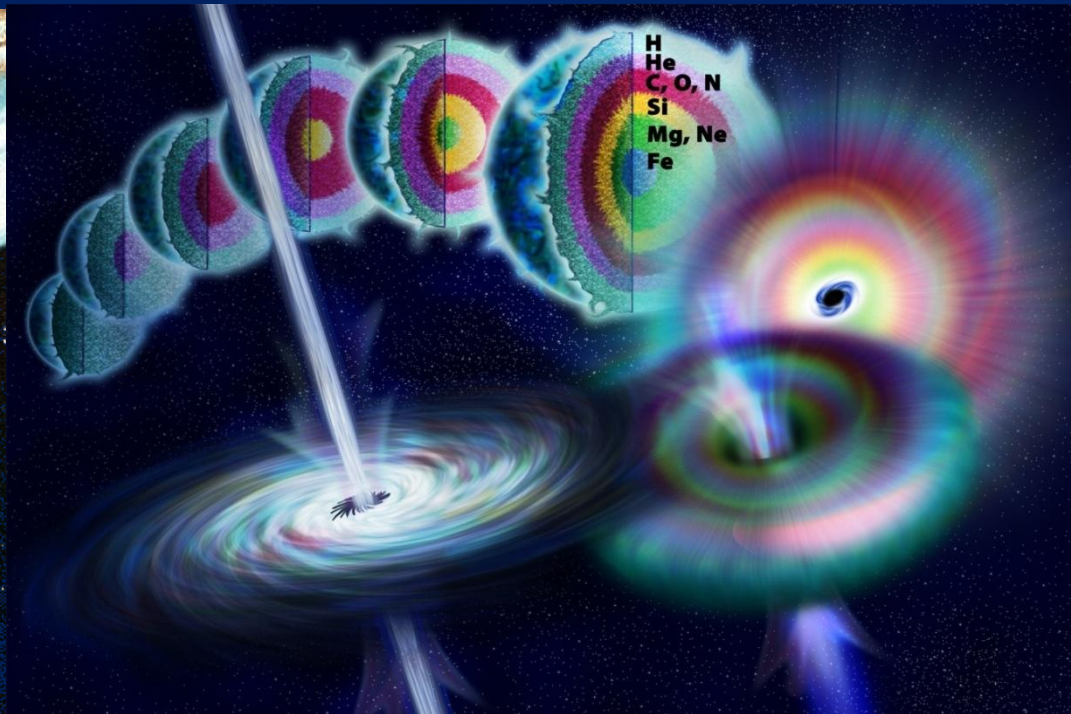
GW150914, GW151226, GW170104, GW170814, **LVT151012**
Слияния черных дыр, в гамма-лучах только верхние пределы

Сверхмощные взрывы - гамма всплески

Открытие - побочный эффект договора об Ограничении ядерных вооружений – открытие гамма всплесков (1969 г). Загадка астрофизики высоких энергий XX века



Vela 5b

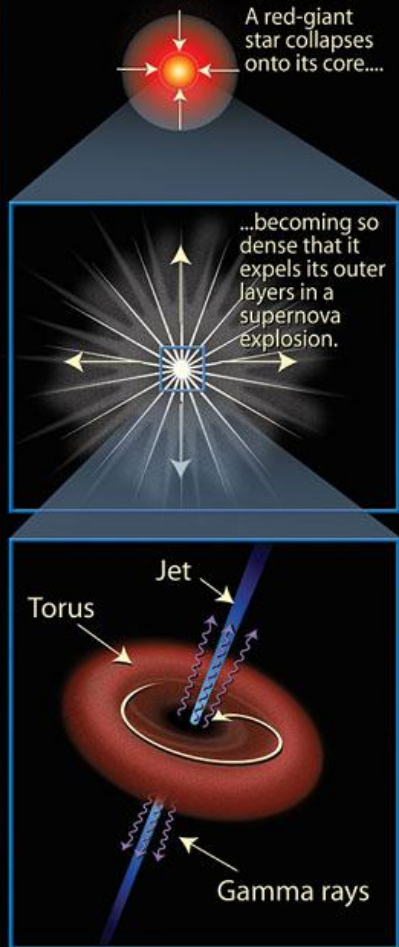


Взрывы звезд в далеких галактиках

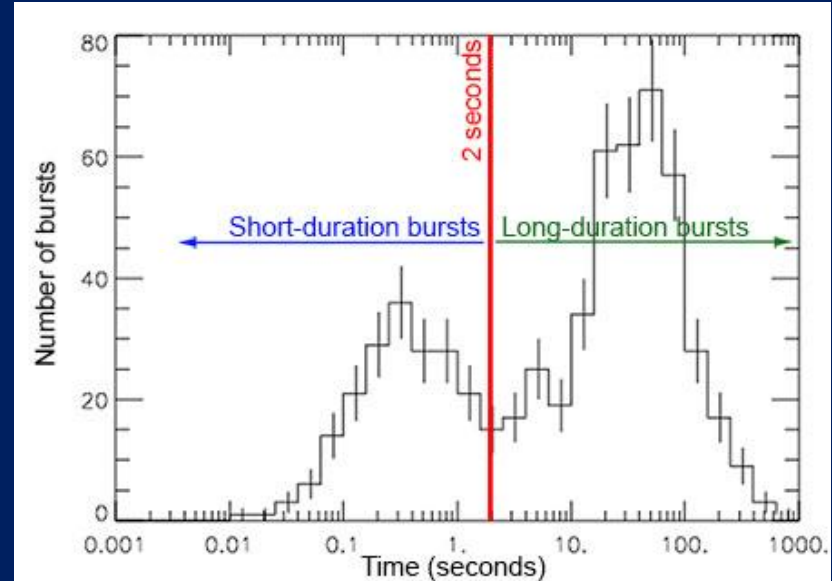
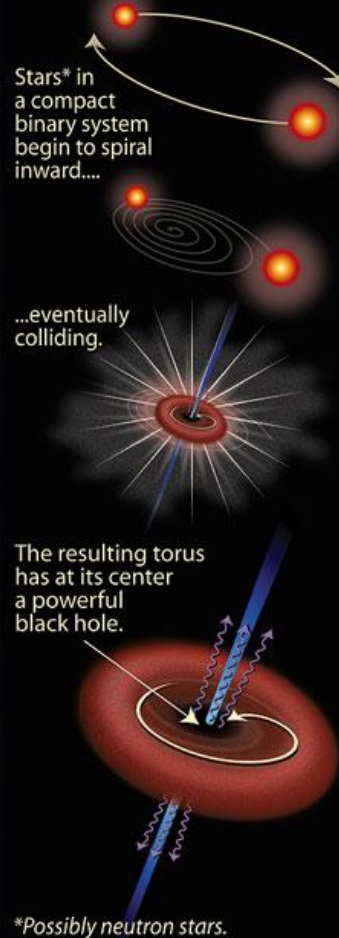
Короткие и длинные гамма-всплески

Gamma-Ray Bursts (GRBs): The Long and Short of It

Long gamma-ray burst (>2 seconds' duration)



Short gamma-ray burst (<2 seconds' duration)



При слиянии двух компактных объектов должен наблюдаться **короткий гамма-всплеск**.

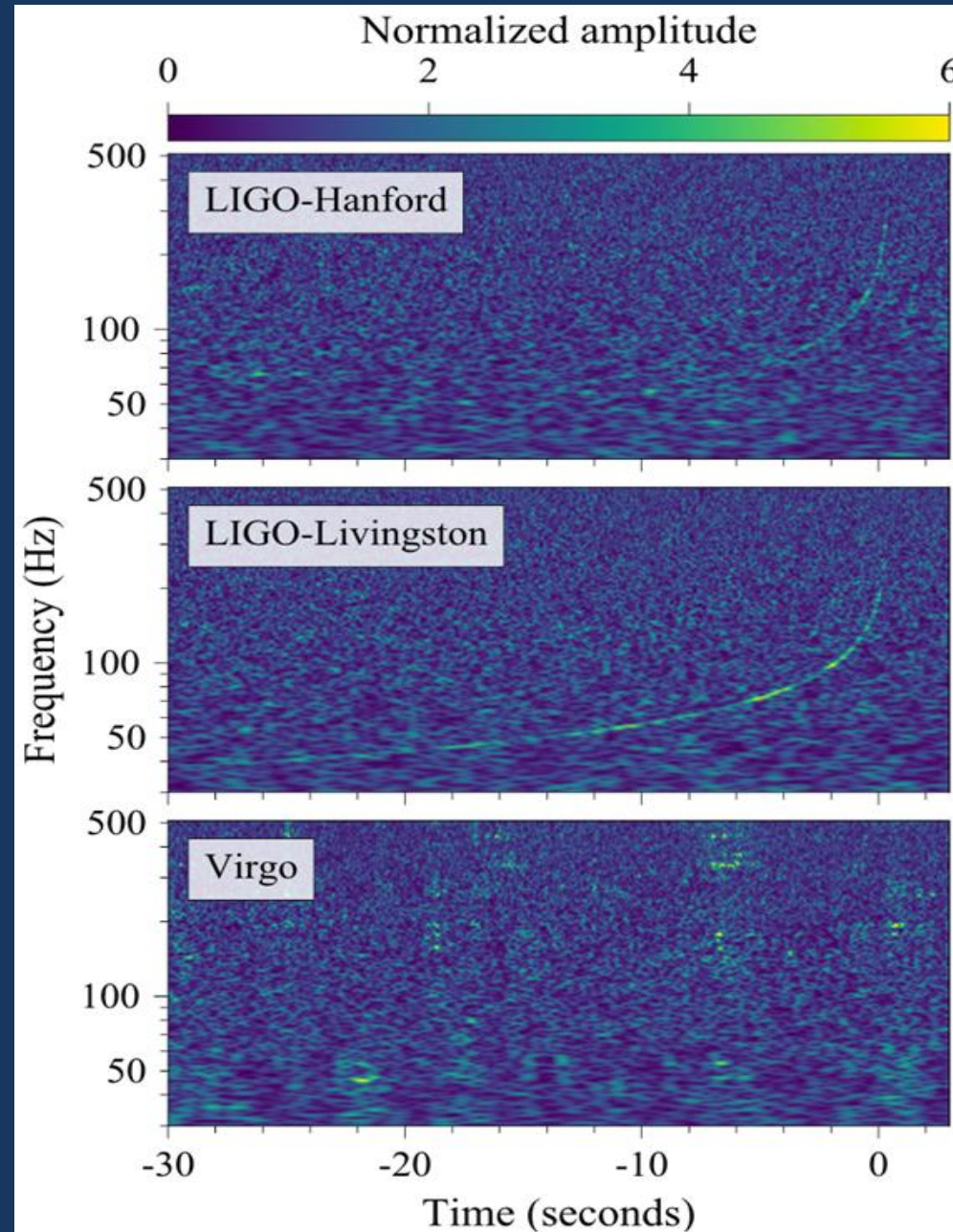
При слиянии двух компактных объектов должны наблюдаться **гравитационные волны**.

Спектрограммы GW170817 в детекторах LIGO и Virgo

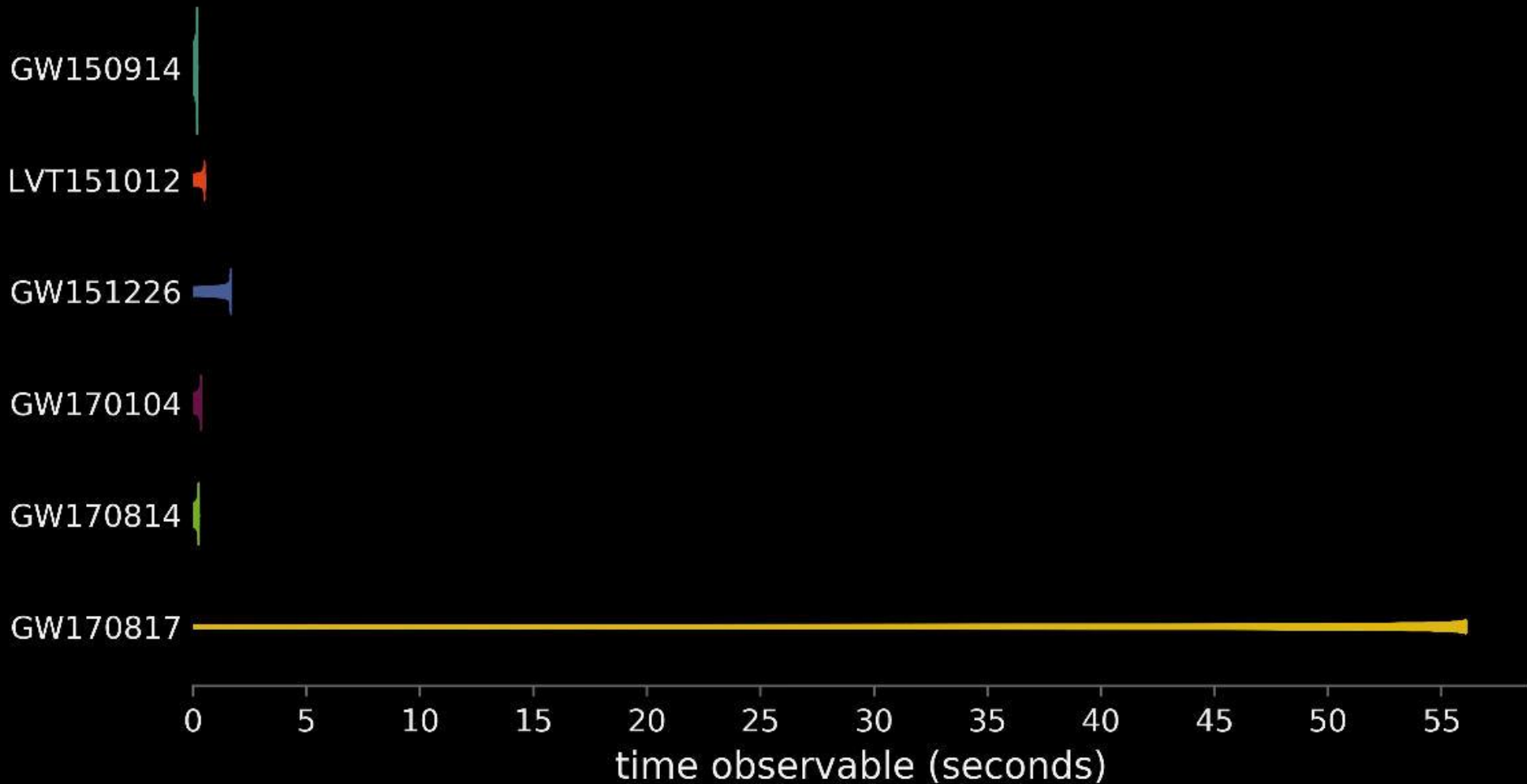
17 августа 2017 12:41:04 UTC

3 мс

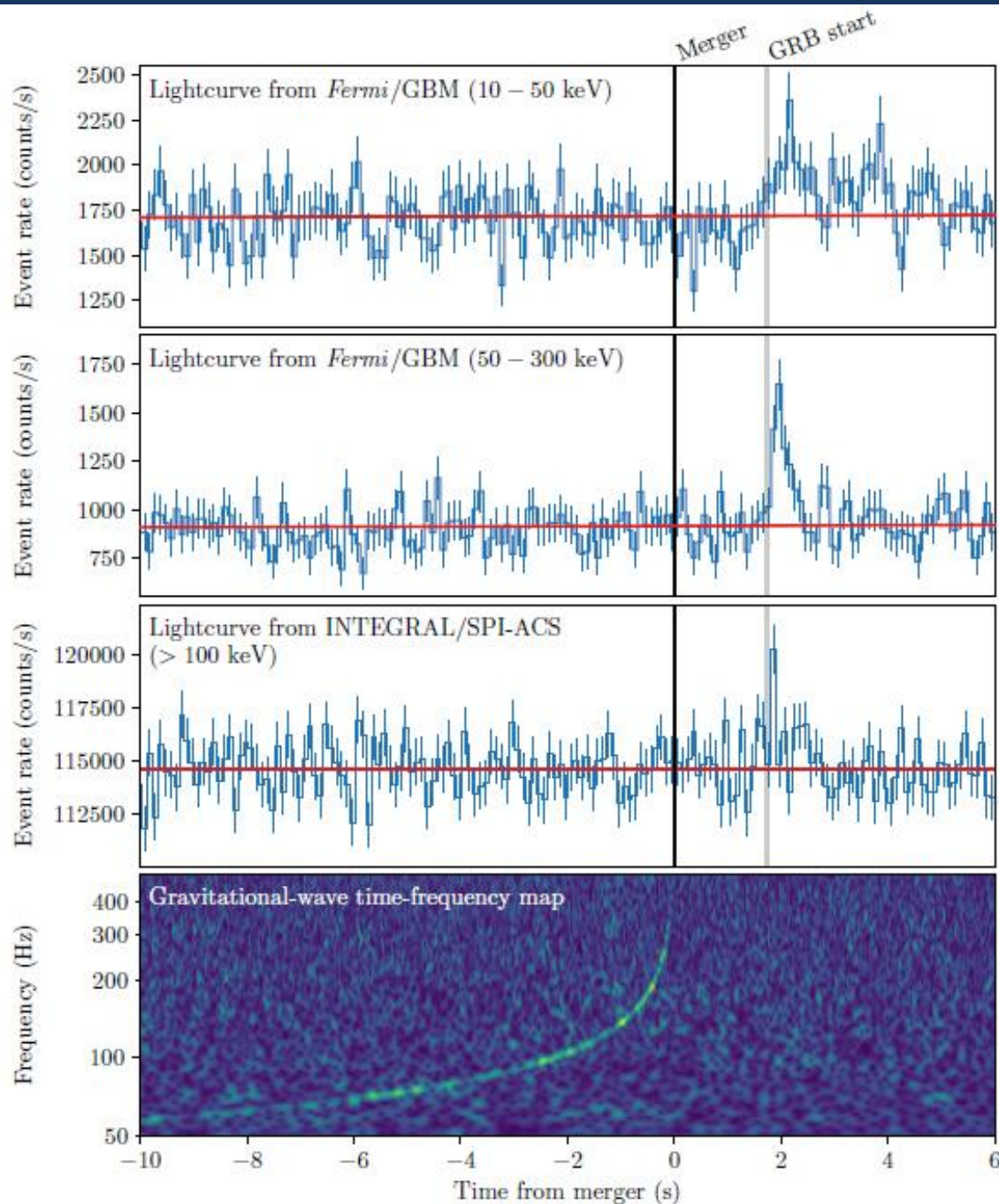
22 мс



ГВ-сигналы от слияний ЧД и НЗ



GW170817



Abbot et al. 2017
(*LIGO/Virgo*)

Goldstein et al. 2017
(*Fermi*/GBM)

Savchenko et al. 2017a
(*ИНТЕГРАЛ*)

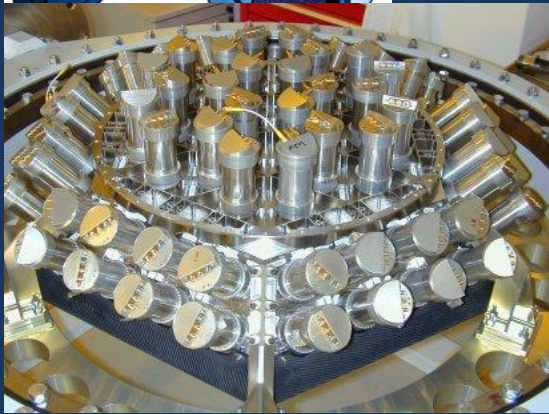
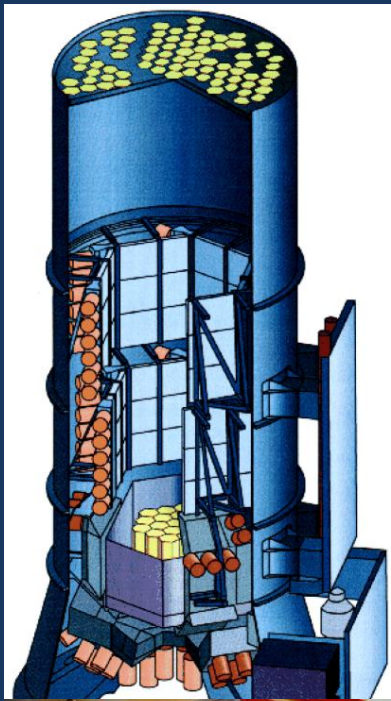
LVC+Fermi+ИНТЕГРАЛ
(*ApJL* 848, L13, 2017)

Fermi/GBM



12 (NaI) детекторов
Покрывают все небо
Диапазон 8-1000 кэВ

ИНТЕГРАЛ



Защита – 91 (BGO)
кристаллов, вес 512 кг
Диапазон 75-2000 кэВ



ИНТЕГРАЛ – проект ЕКА с
участием России и НАСА.
Вклад России – ПРОТОН+ДМ,
запуск **17 октября 2002**
Российские ученые получили
право на 25% данных
**Национальная Обсерватория,
Центр Данных в ИКИ РАН**

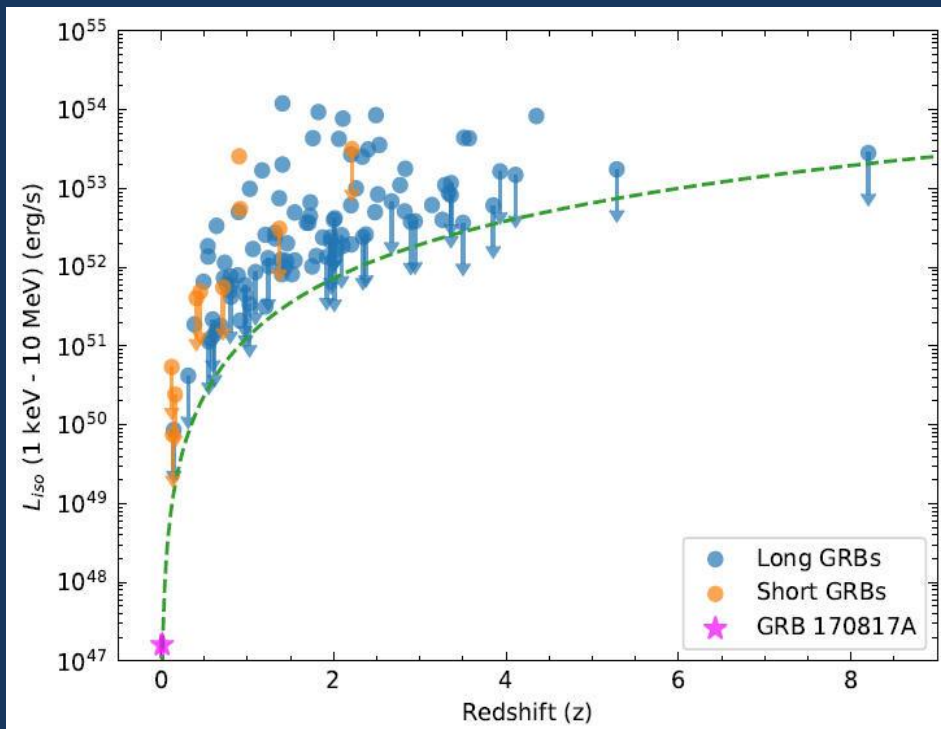
Свойства GW170817 в гамма-лучах

Малая длительность (~ 2 сек), короткий жесткий первый импульс – признаки подкласса коротких гамма-всплесков (sGRB)

Запаздывание между ГВ и гамма-излучением ~ 1.7 сек

Модели, объяснения sGRB – слияние НЗ, НЗ+ЧД

Но: самый близкий GRB $\rightarrow$ низкая светимость

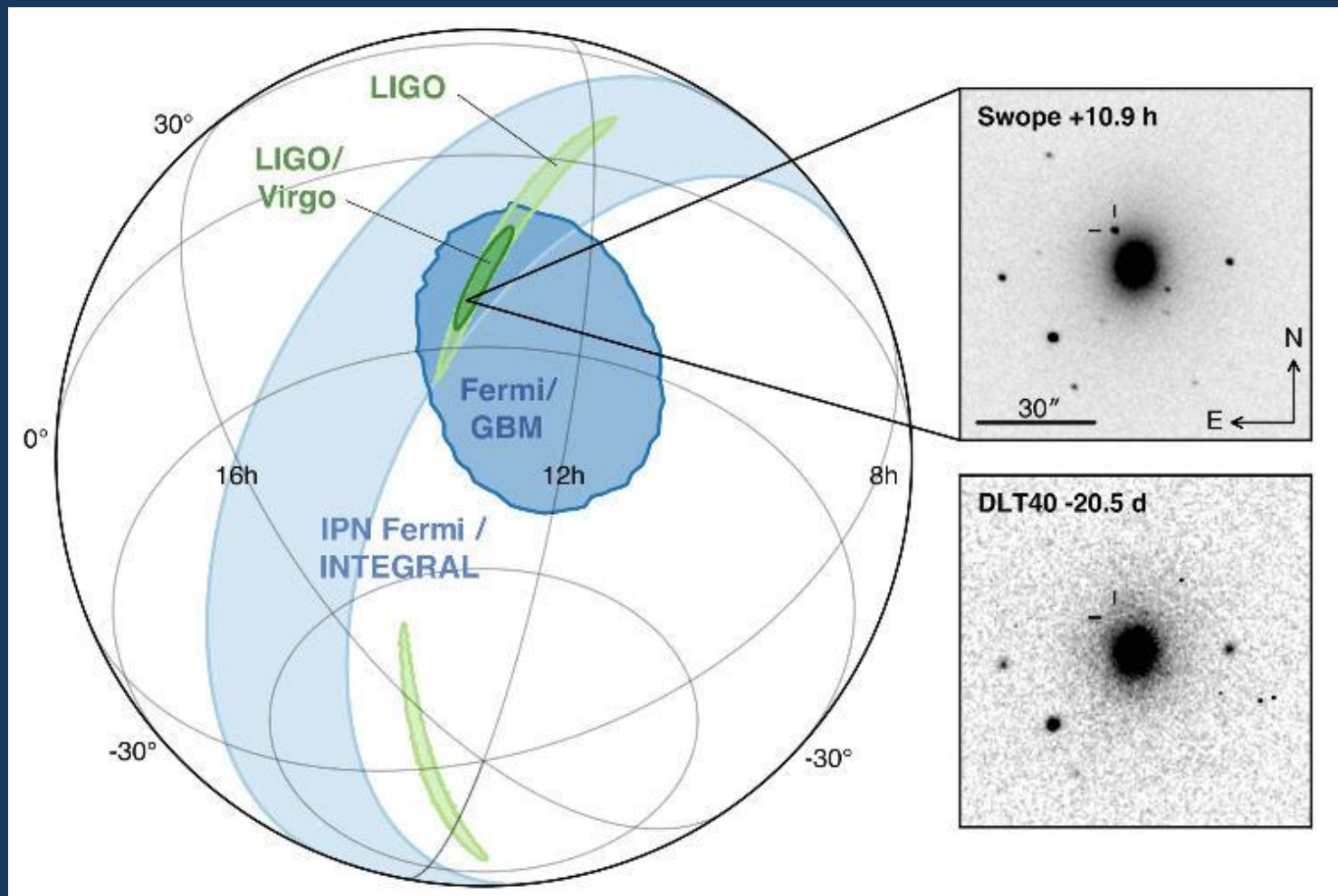


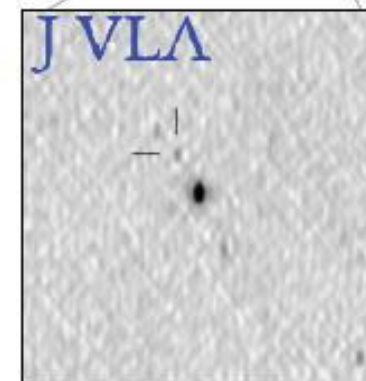
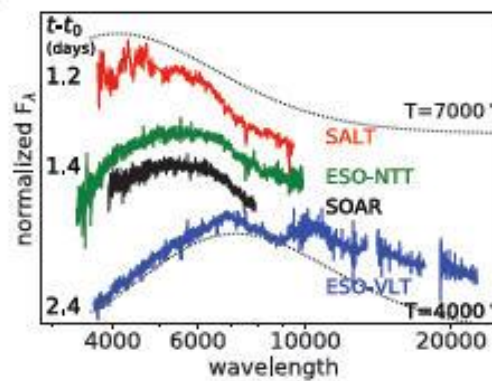
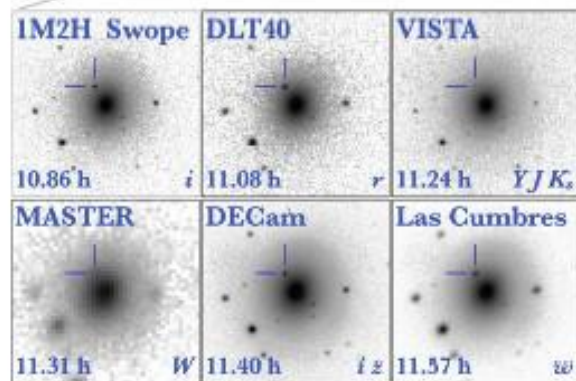
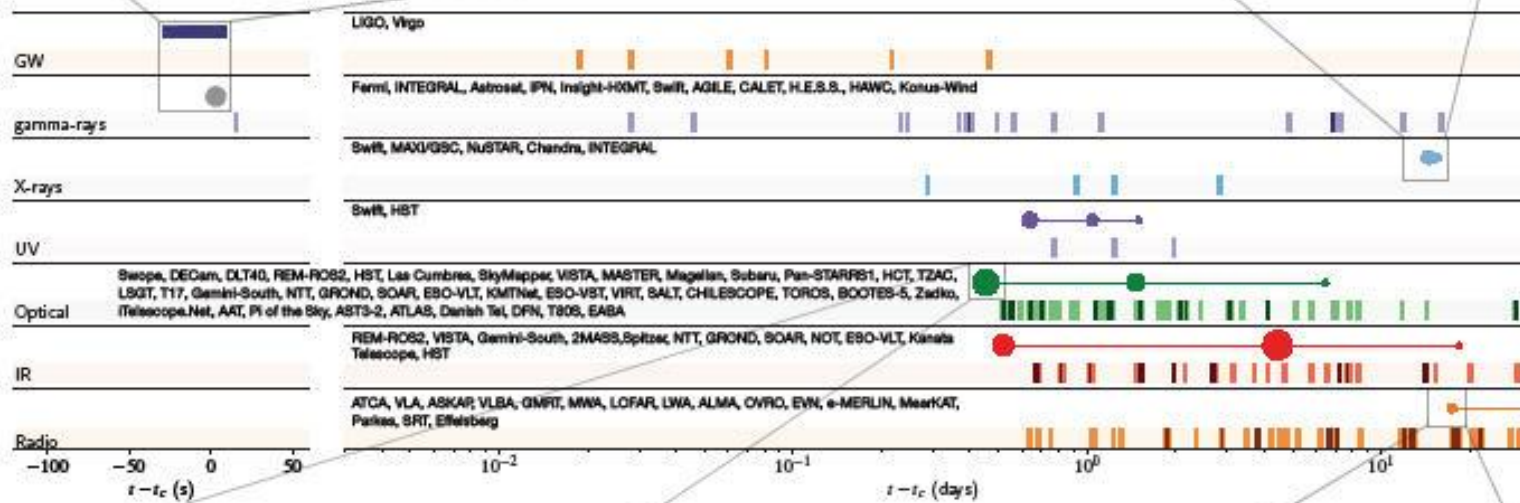
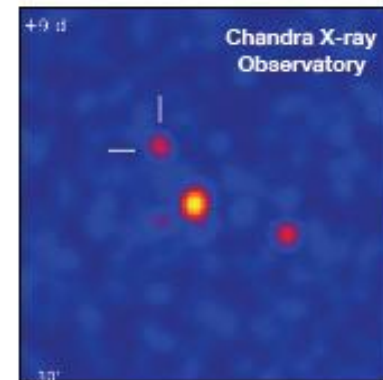
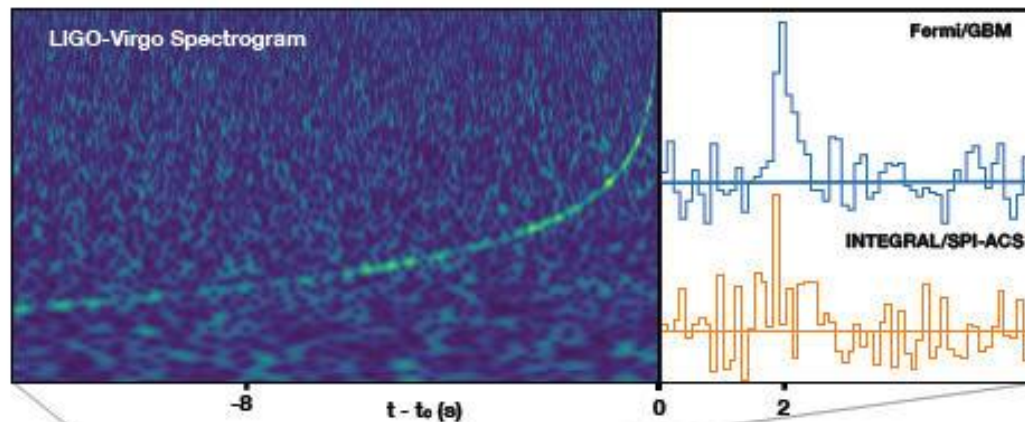
Объяснение:

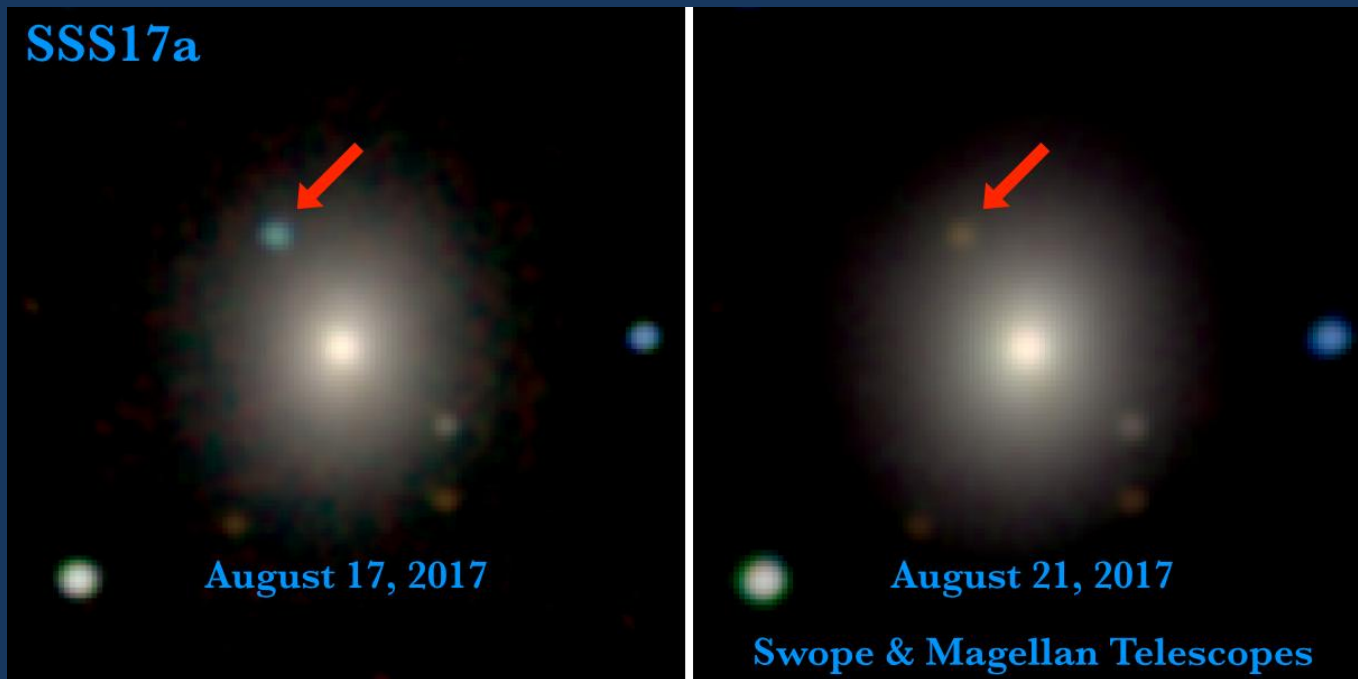
Релятивистская струя (джет) отвернута от нас (20-60 град) или имеет сложную структуру

*LVC+Fermi+ИНТЕГРАЛ
(ApJL 848, L13, 2017)*

Локализация источника GW170817 на небесной сфере







Оптика – 10.87 ч (Swope)

IR – 11.24 ч (VISTA)

UV – 15.3 ч (Swift/UVOT)

Быстрое падение интенсивности и «покраснение»

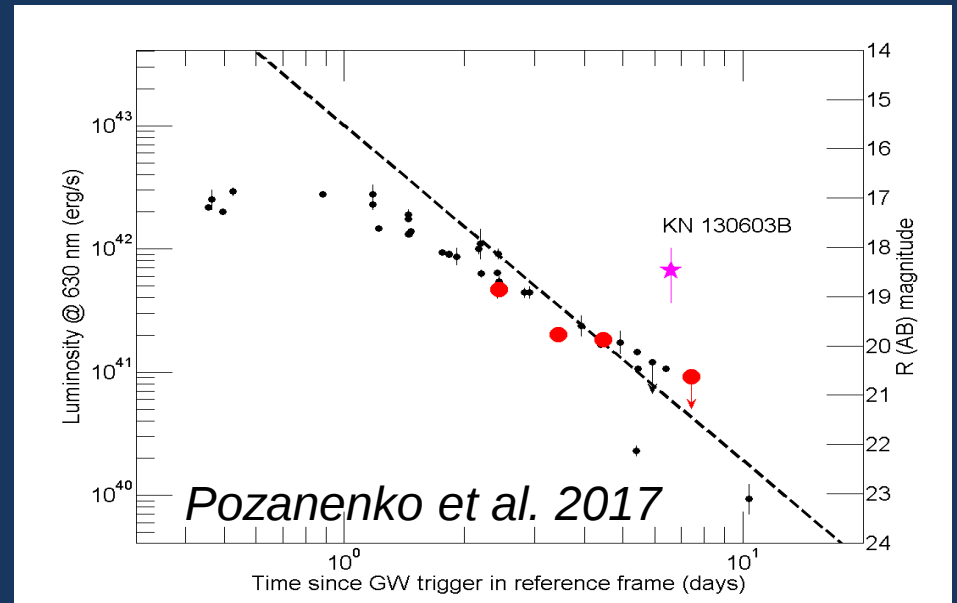
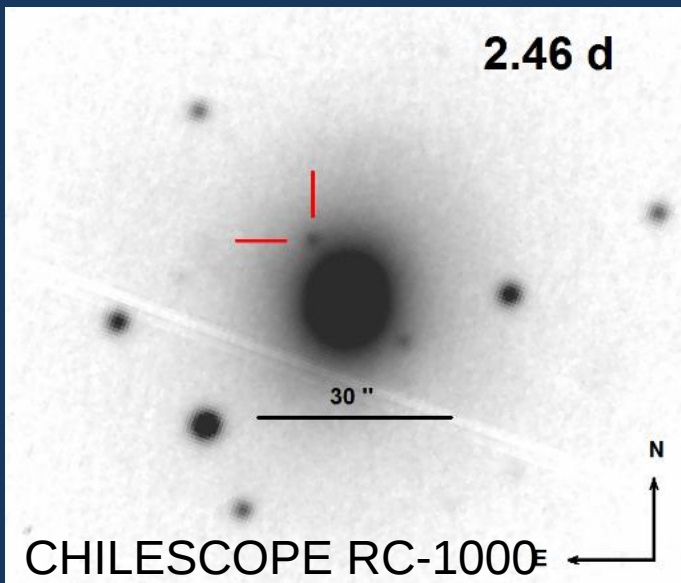
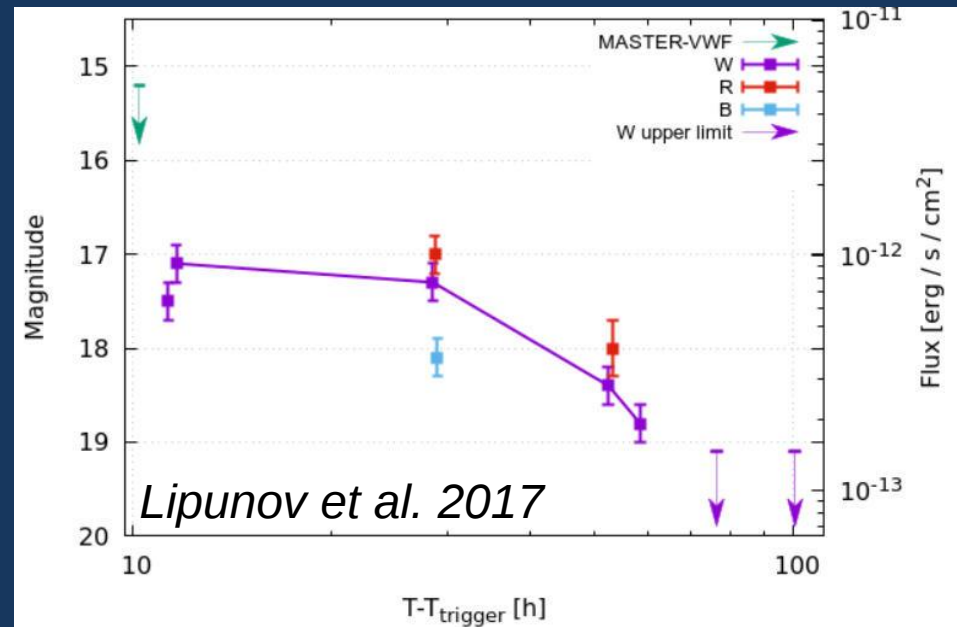
Спектр без особенностей, быстрая эволюция (не молодая SN)

X-ray – 9 день

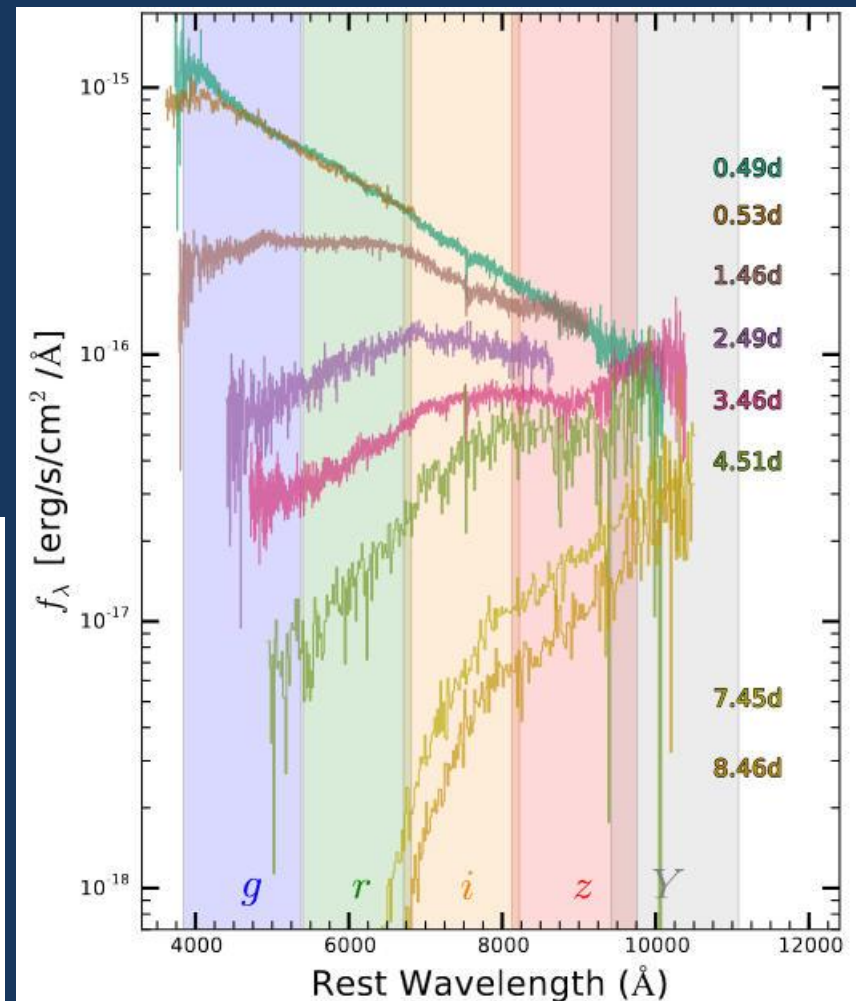
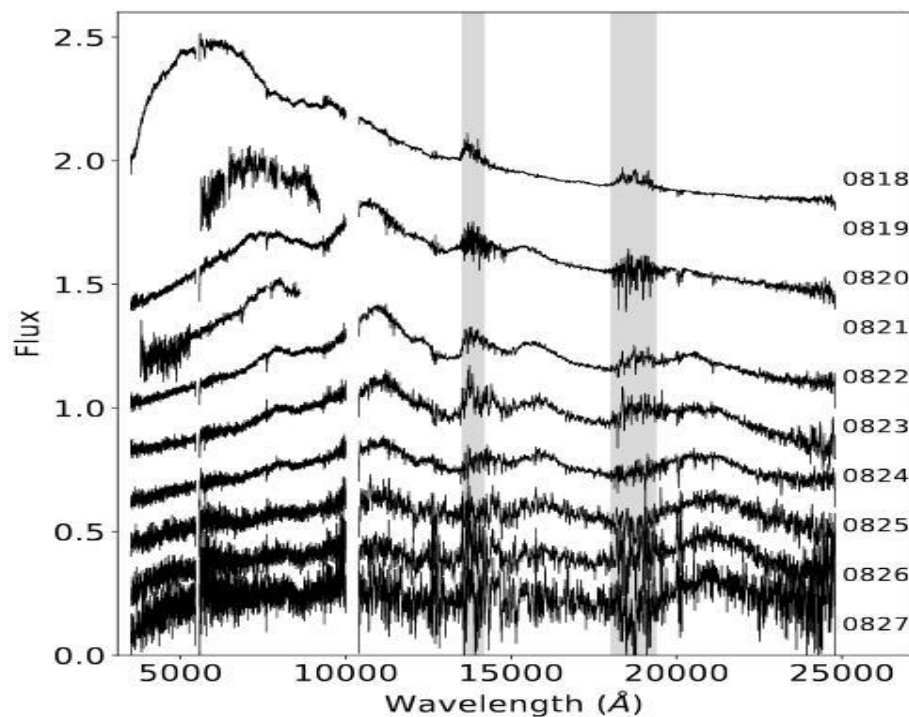
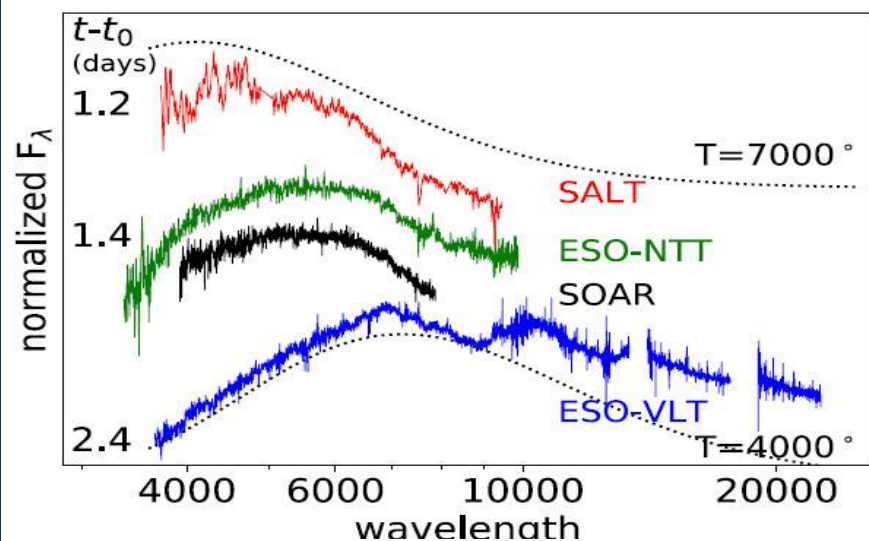
Радио – 16 дней

Совпадает с теоретическими предсказаниями для килоновой

Оптика: фотометрия



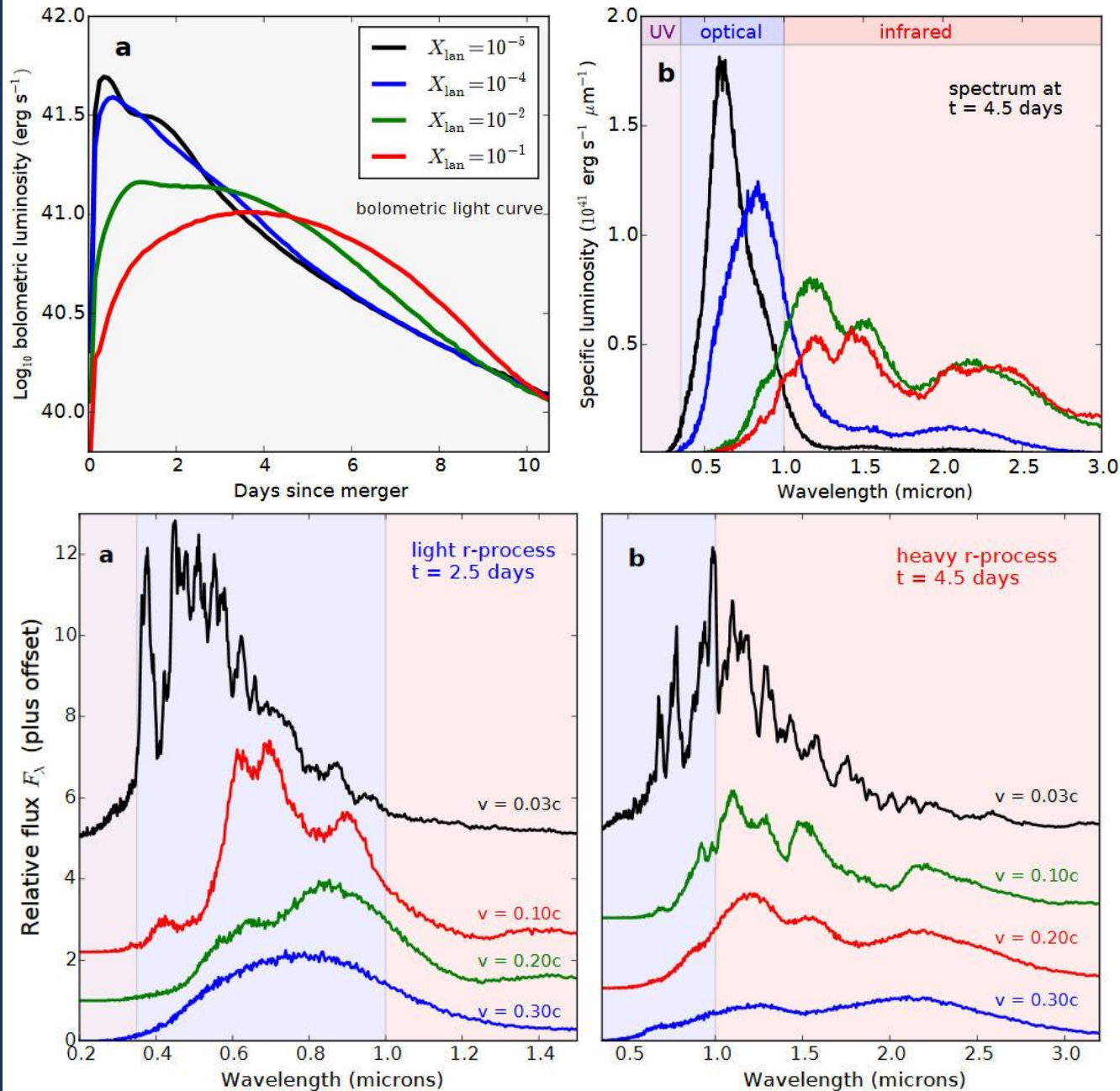
Оптика: спектроскопия



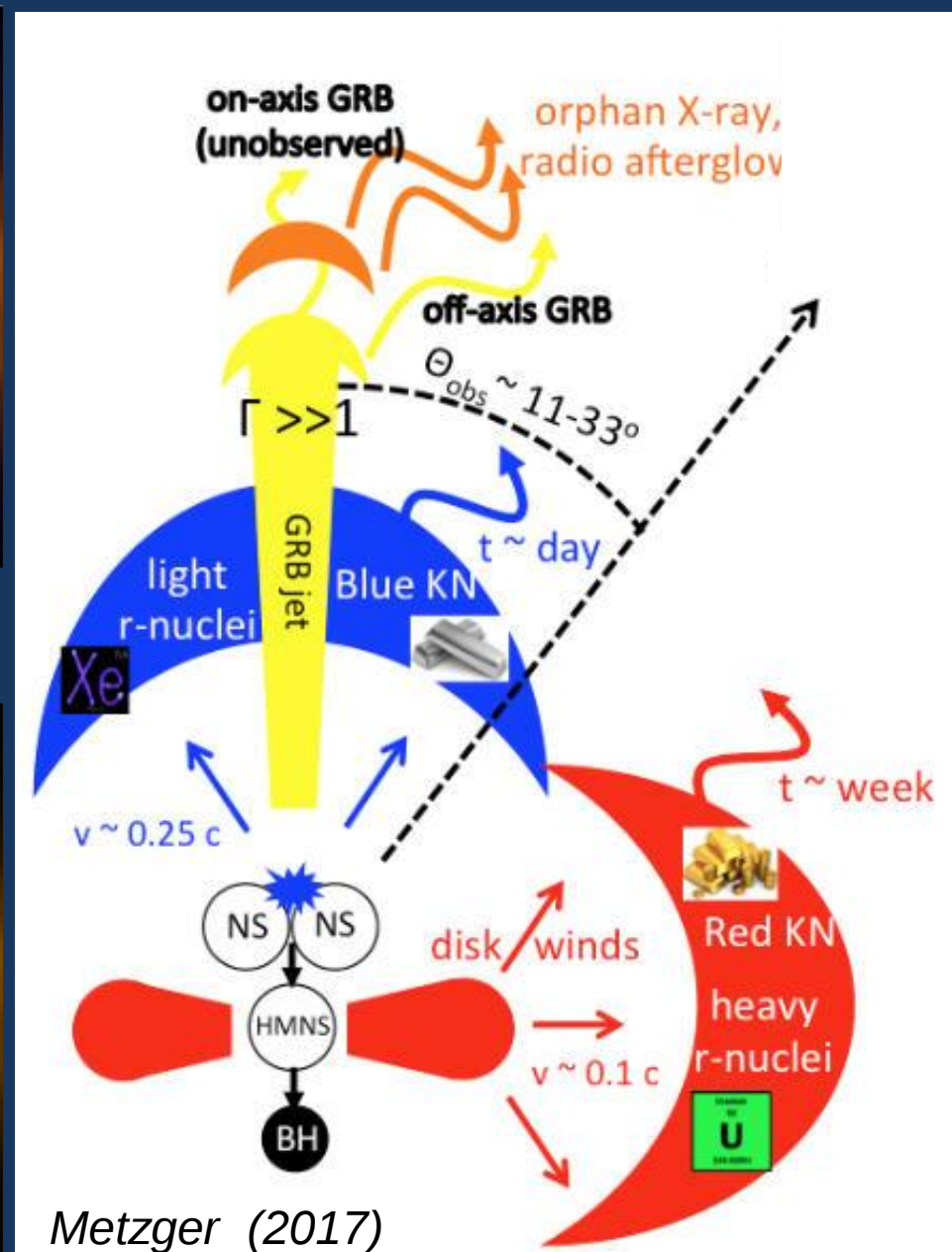
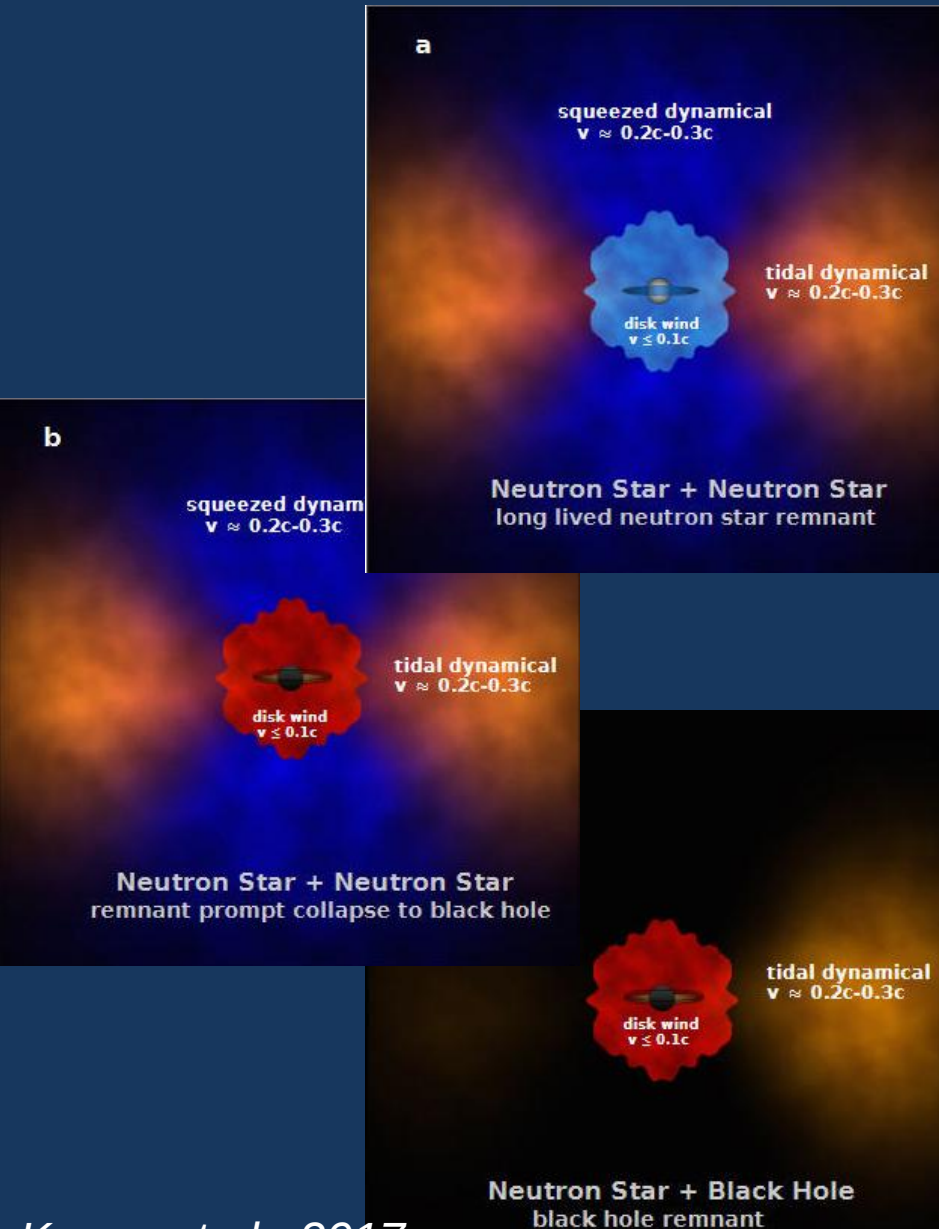
Shappee et al. 2017

Pian et al. 2017

Модели кривых блеска и спектров килоновой



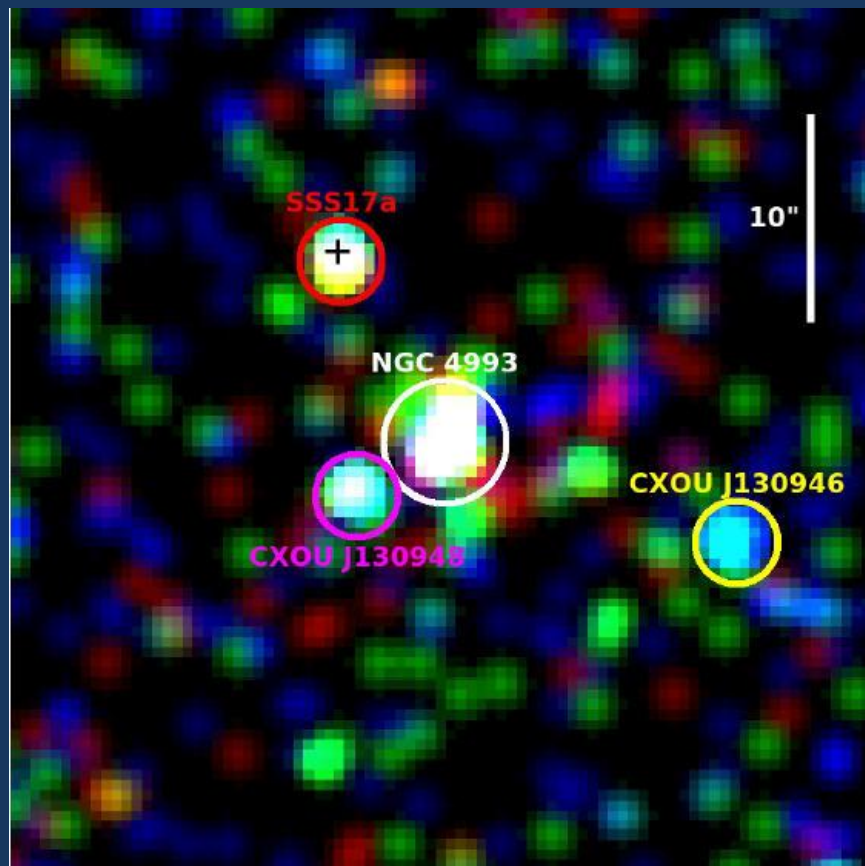
Компоненты выброса вещества: НЗ-НЗ и НЗ-ЧД



Metzger (2017)

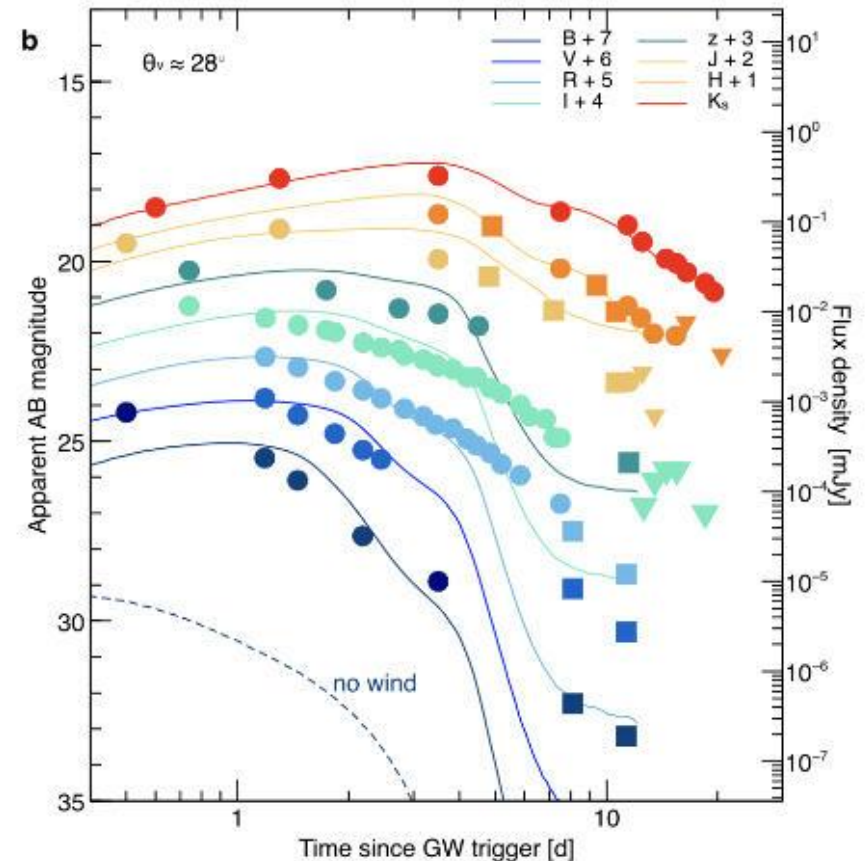
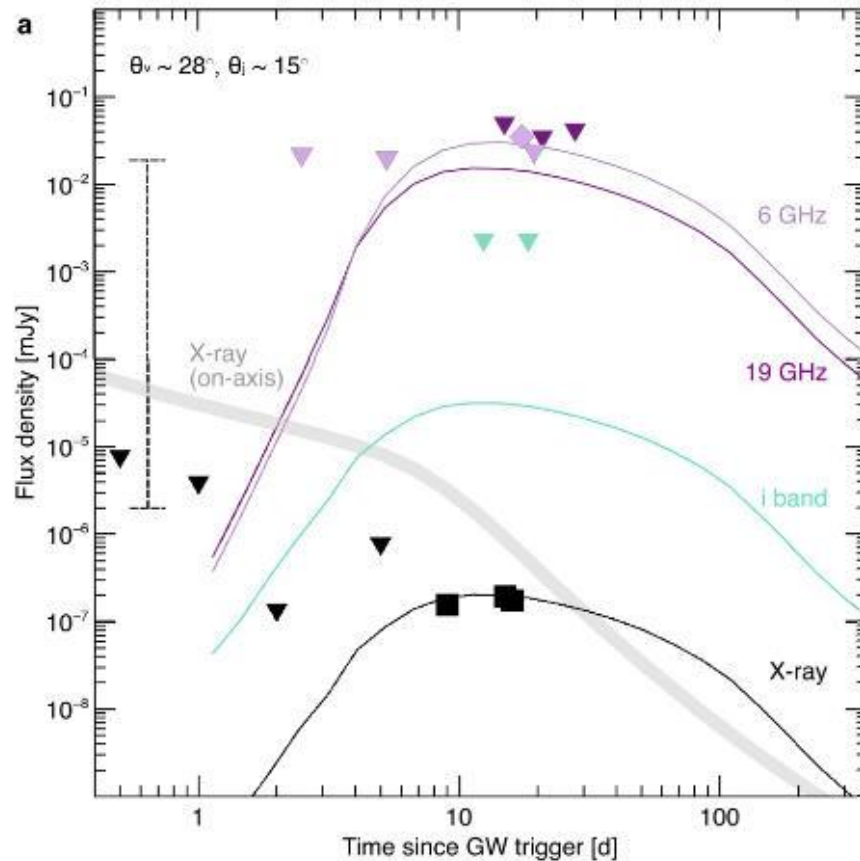
Kasen et al., 2017

Регистрация рентгеновского излучения



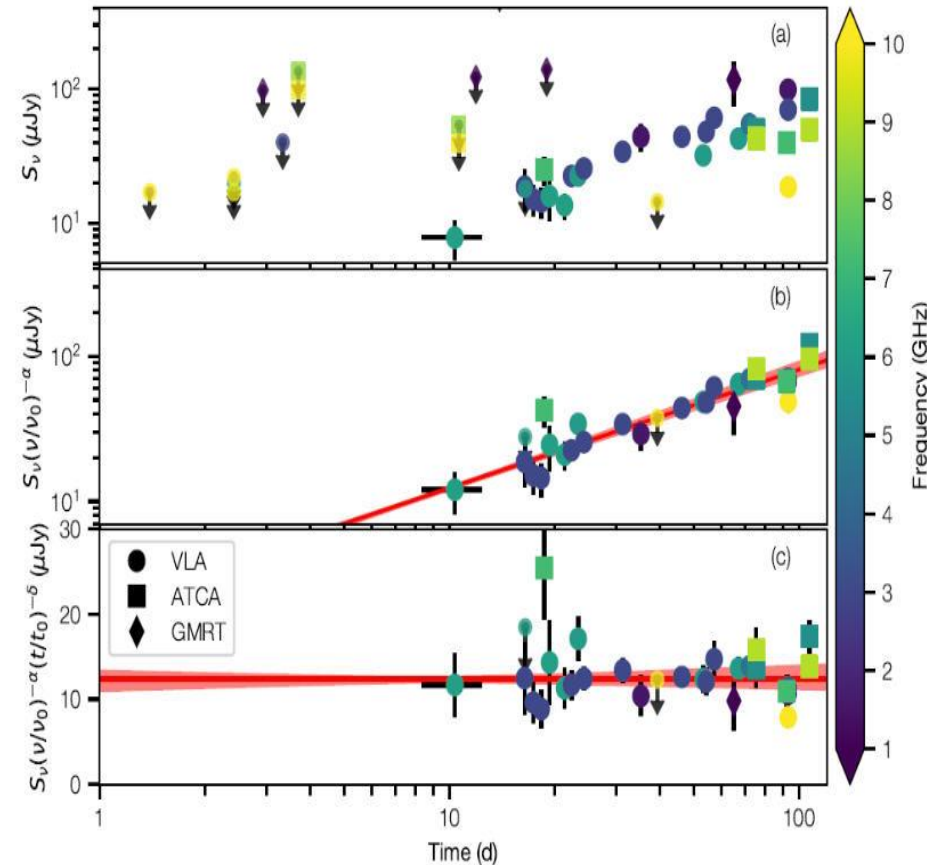
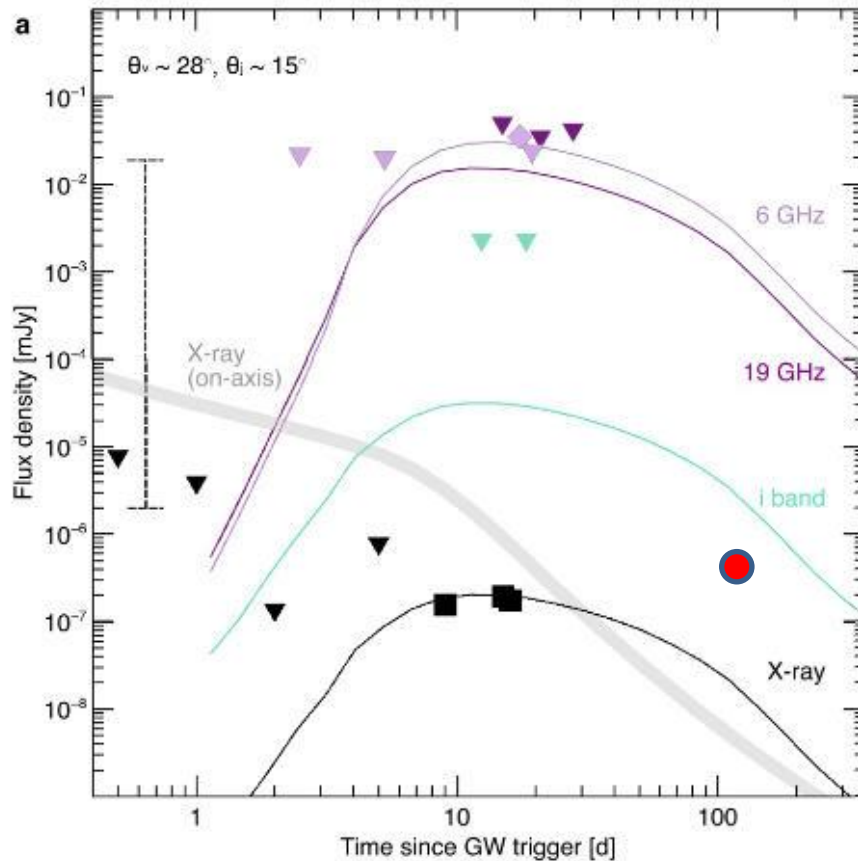
Chandra: 2 дня – нет рентгена, 9 дней – первая регистрация, 15-16 дни – источник интенсивность не меняет, согласуется с моделями послесвечения sGRB, джет не на луче зрения

Кривые блеска GW170817 от радио до рентгена

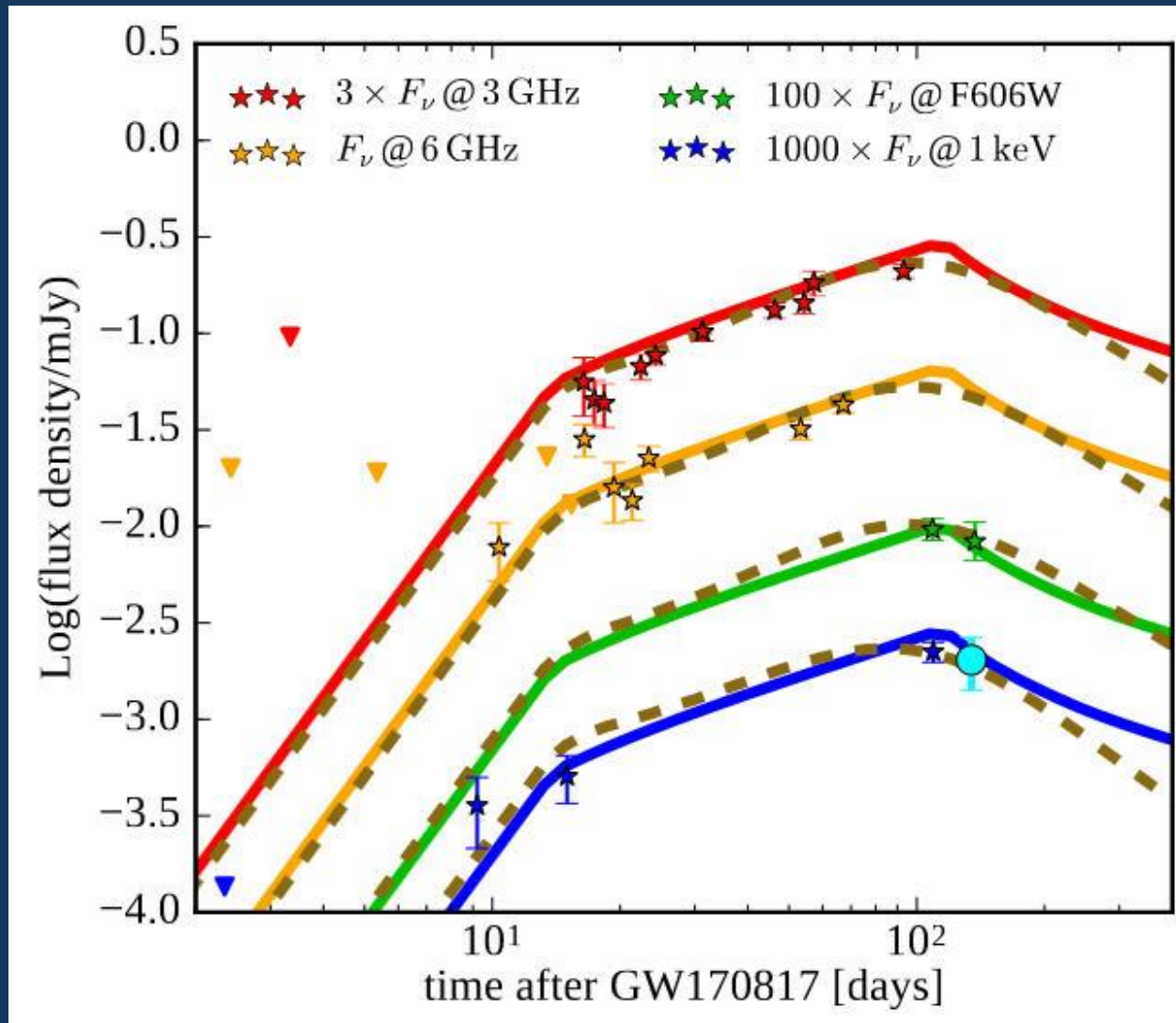


Низкая светимость – джет отвернут от нас на $\sim 28^\circ$

Кривые блеска GW170817 от радио до рентгена

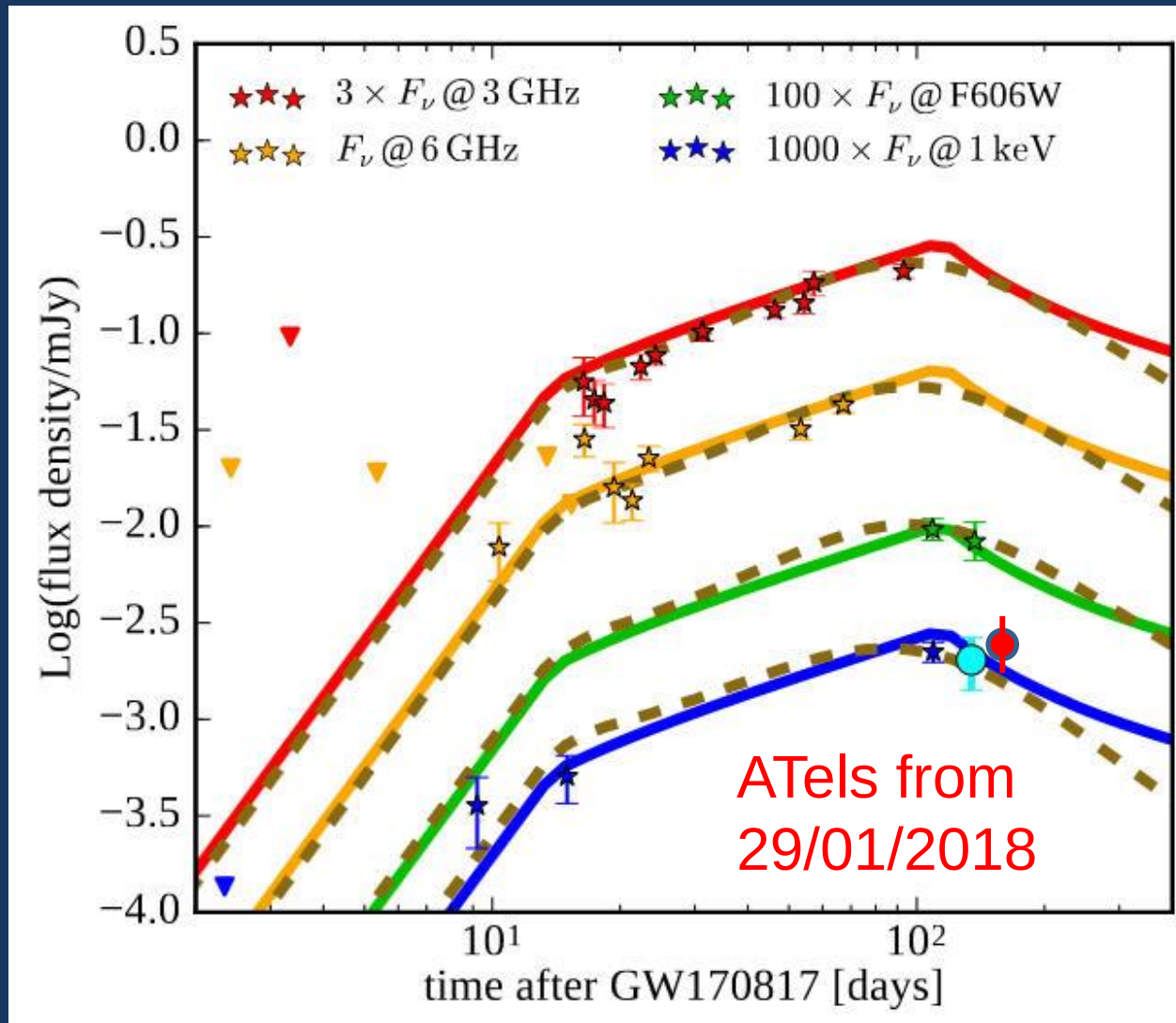


Кривые блеска GW170817 от радио до рентгена

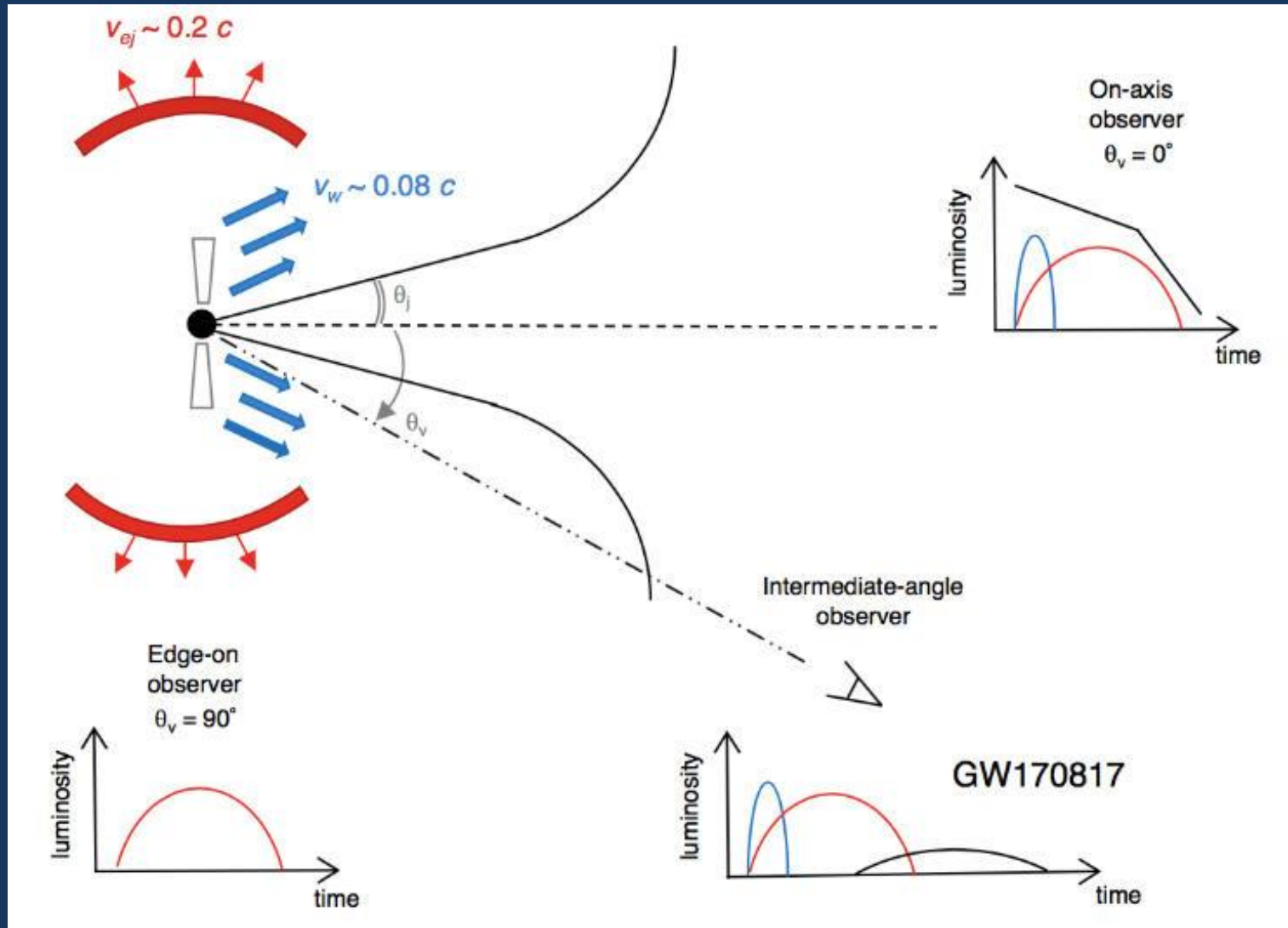


D'Avanzo et al. 2018

Кривые блеска GW170817 от радио до рентгена



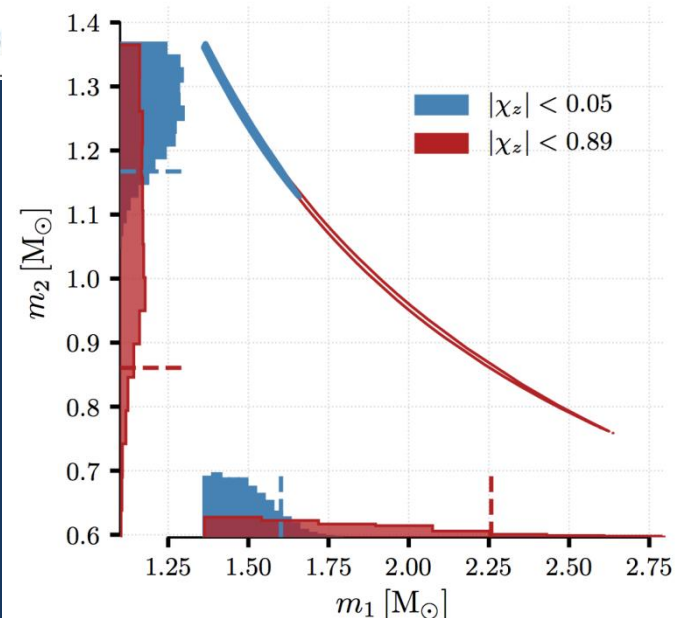
Наблюдательные проявления событий слияния НЗ



Результаты

Table 1: Key Properties of GW170817

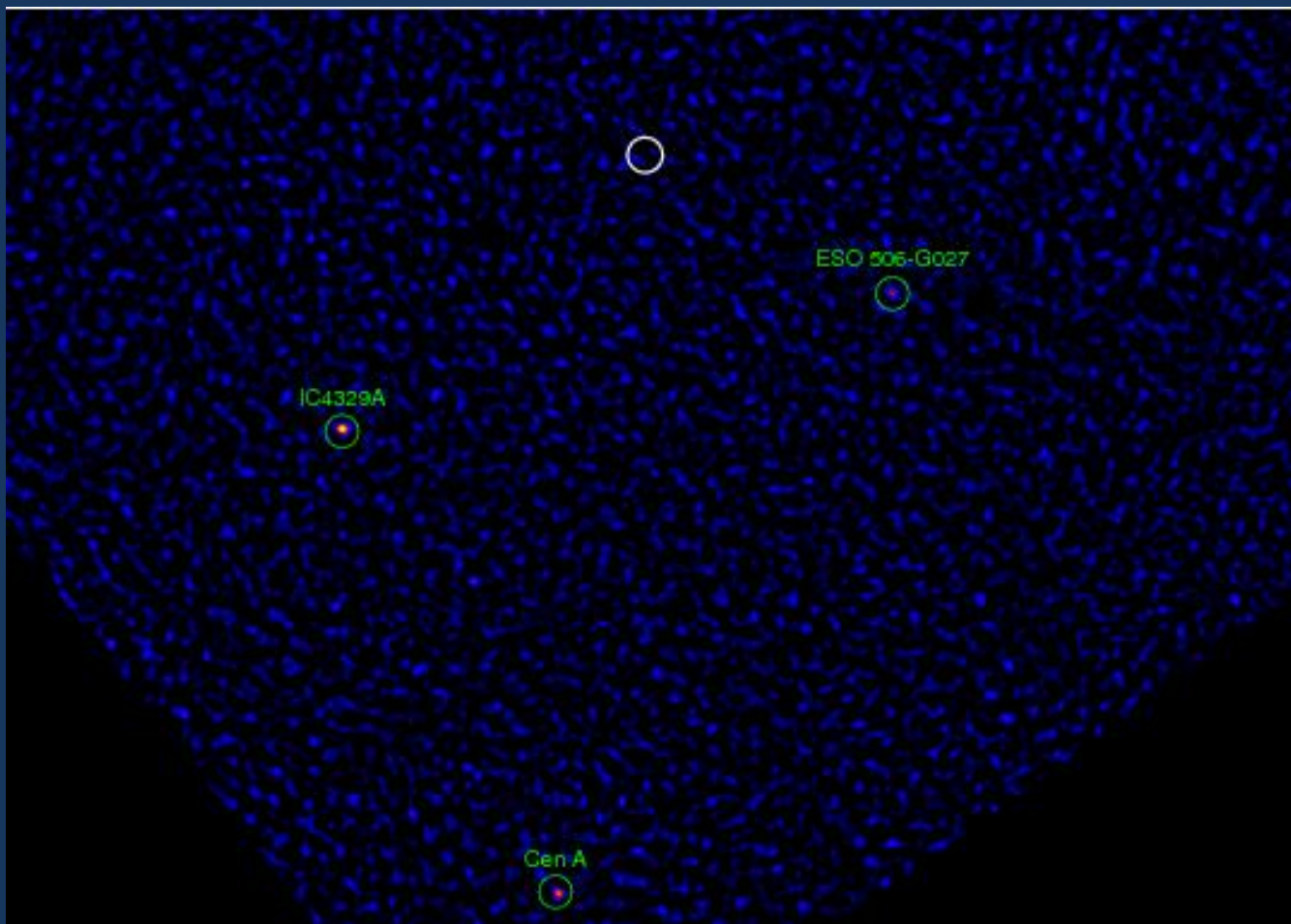
Property	Value
Chirp mass, $\mathcal{M}$ (rest frame)	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_{\odot}$
First NS mass, M_1	$1.36 - 1.60 M_{\odot}$ (90%, low spin prior)
Second NS mass, M_2	$1.17 - 1.36 M_{\odot}$ (90%, low spin prior)
Total binary mass, $M_{\text{tot}} = M_1 + M_2$	$\approx 2.74^{+0.04}_{-0.01} M_{\odot}$
Observer angle relative to binary axis, θ_{obs}	$11 - 33^{\circ}$ (68.3%)
Blue KN ejecta ($A_{\text{max}} \lesssim 140$)	$\approx 0.01 - 0.02 M_{\odot}$
Red KN ejecta ($A_{\text{max}} \gtrsim 140$)	$\approx 0.04 M_{\odot}$
Light r -process yield ($A \lesssim 140$)	$\approx 0.05 - 0.06 M_{\odot}$
Heavy r -process yield ($A \gtrsim 140$)	$\approx 0.01 M_{\odot}$
Gold yield	$\sim 100 - 200 M_{\oplus}$
Uranium yield	$\sim 30 - 60 M_{\oplus}$
Kinetic energy of off-axis GRB jet	$10^{49} - 10^{50}$ erg
ISM density	$10^{-4} - 10^{-2} \text{ cm}^{-3}$



Metzger arXiv:1710.05931

Abbott et al. 2017

Наблюдения обсерватории ИНТЕГРАЛ



Время: 24 часа – 4.7 дня после GW

Нет продолжающейся активности в гамма-лучах ->
ограничение на сценарий: нет магнетара в остатке (?)

Savchenko et al. (2017a)

Результаты

➤ Возможность проверки ОТО:

1) скорость гравитации (задержка ЭМ и ГВ сигналов)

$$-3 \times 10^{-15} \leq \frac{\Delta v}{v_{\text{EM}}} \leq +7 \times 10^{-16} .$$

2) Принцип эквивалентности (по эффекту Шапиро)

$$-2.6 \times 10^{-7} \leq \gamma_{\text{GW}} - \gamma_{\text{EM}} \leq 1.2 \times 10^{-6}$$

➤ Астрофизические приложения:

Результат слияния: ЧД, **массивный остаток -> ЧД**, магнетар

Физика гамма-всплесков

Ограничения на уравнения состояния нейтронных звезд

Спасибо за внимание!

GW170817

