

Станислав Бабак.

AstroParticule et Cosmologie, CNRS (Paris)

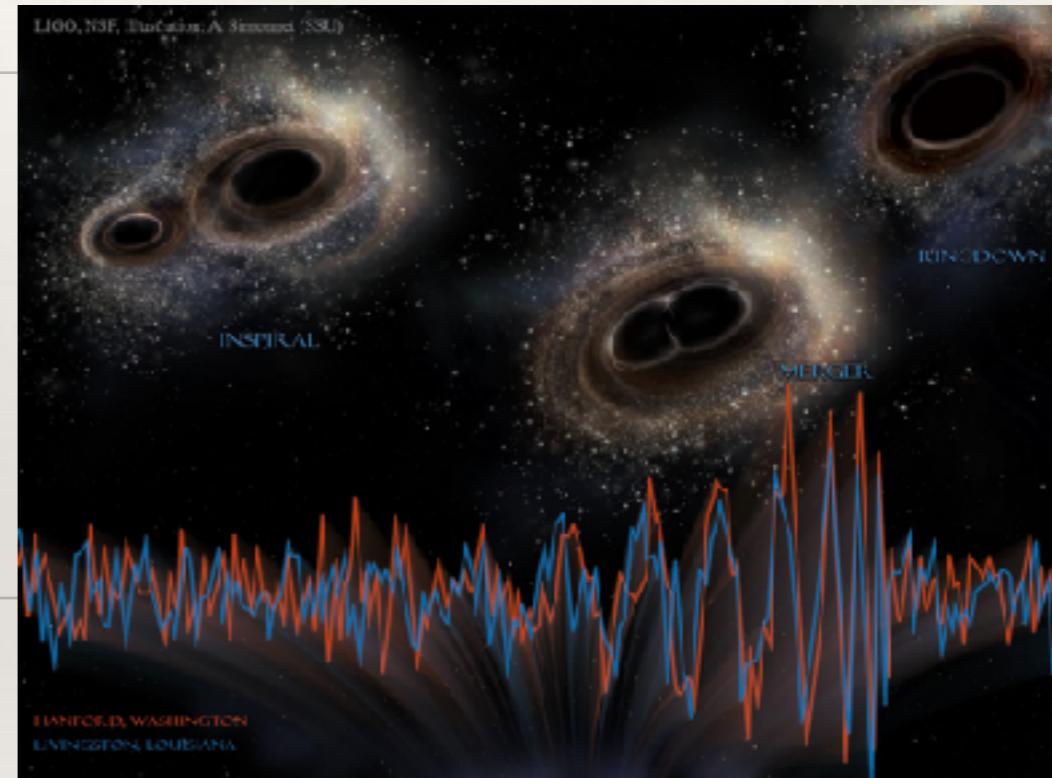
université

**PARIS
DIDEROT**

PARIS 7



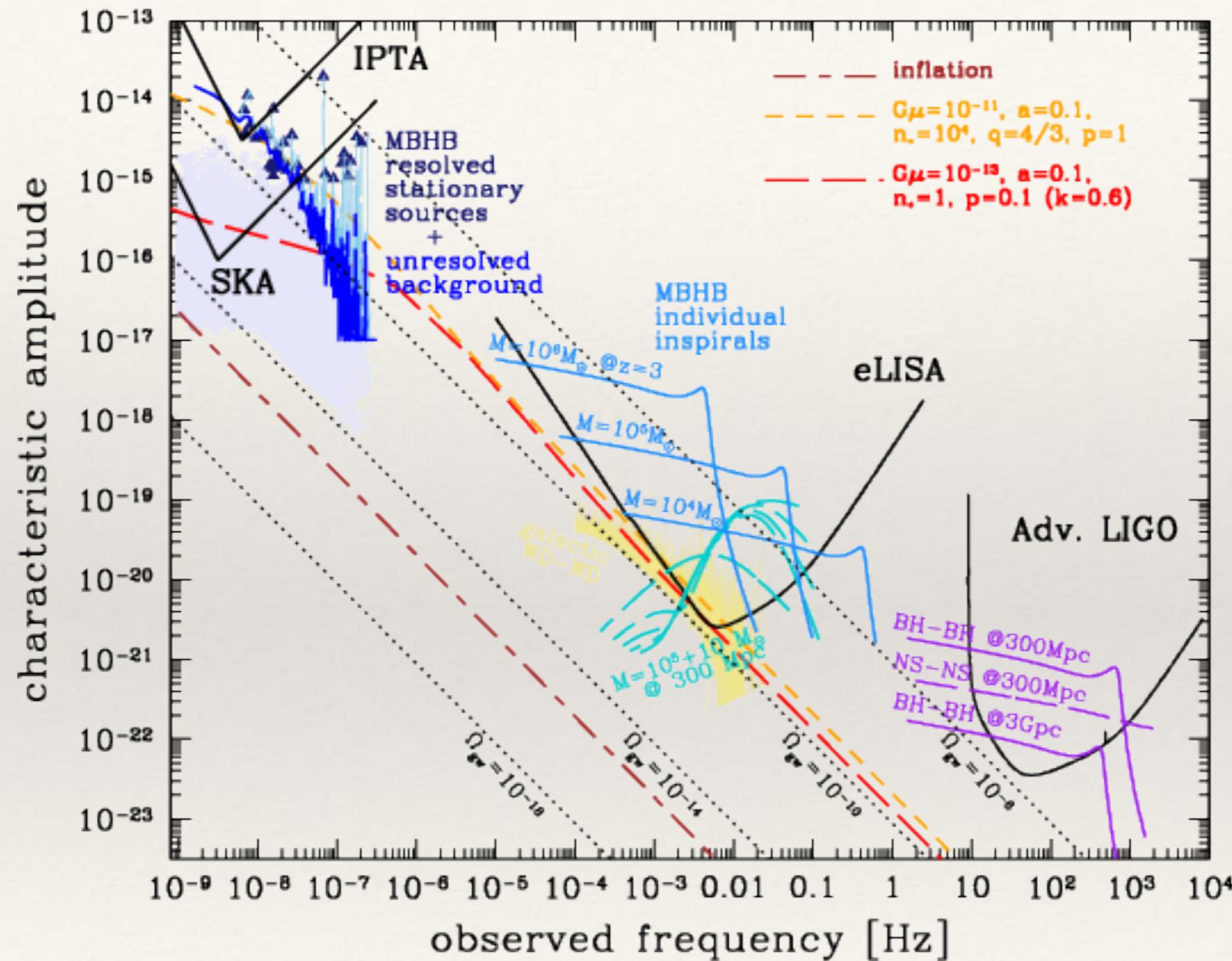
Источники гравитационных волн и их детектирование от кило-Герц до нано-Герц.



Outline

- LIGO-VIRGO
- Основные принципы детектирования ГВ и источники
- LISA: детектирование ГВ из космоса.
- РТА: пульсарный тайминг и детектирование ГВ.

Гравитационные волны на разных частотах



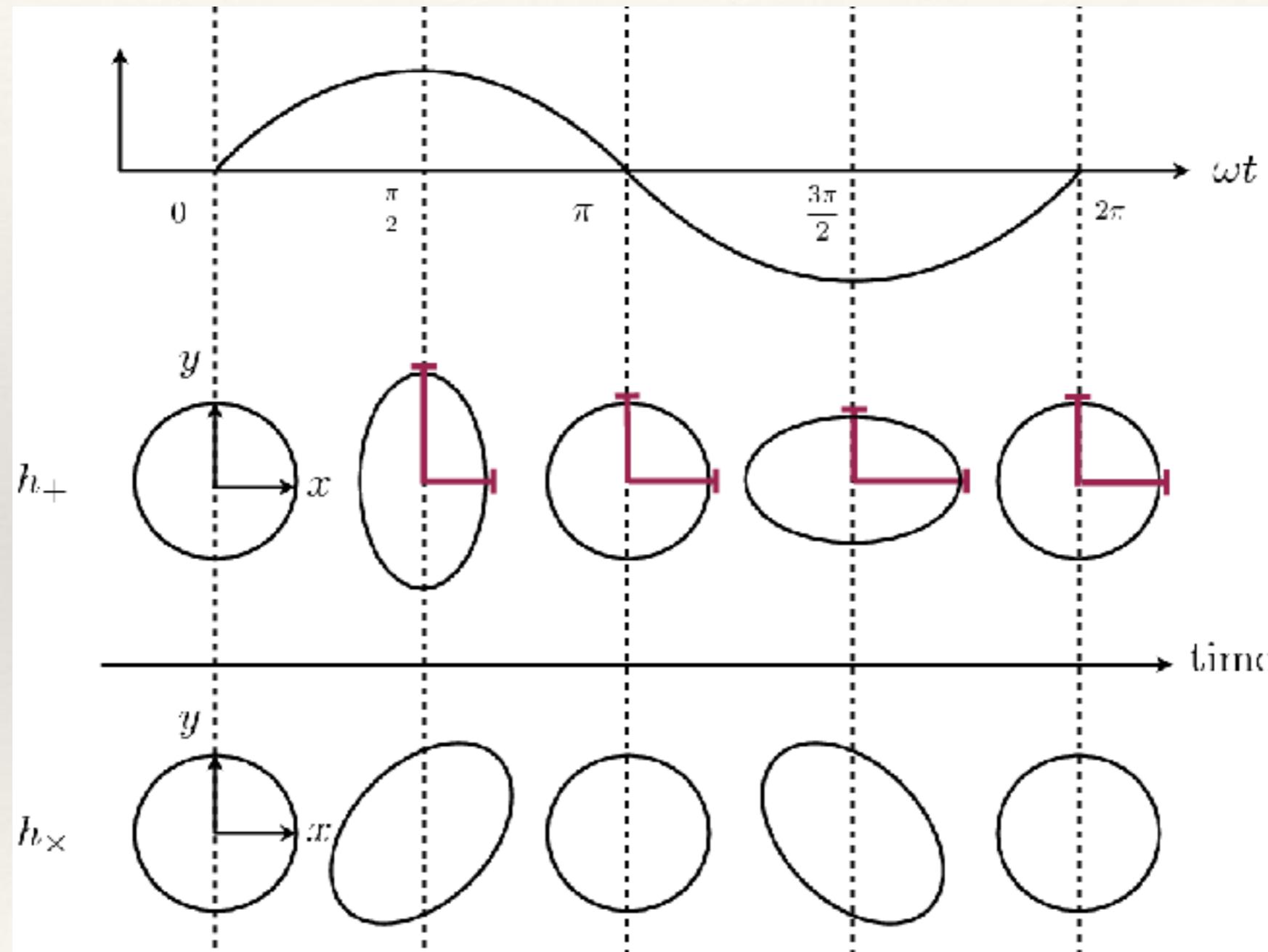
Принципы детектирования гравитационных волн

- Грав. Волны (ГВ) существуют во всех ковариантных теориях гравитации
- В ОТО:
 - ГВ распространяются со скоростью света
 - Действуют как меняющиеся во времени приливные силы
 - Имеют две состояния поляризации (в случае линейной поляризации: h_+, h_\times)
 - Слабое взаимодействие с материей ($G=6.674 \times 10^{-11}$) - не рассеиваются, не поглащаются, тяжело от детектировать



Принципы детектирования гравитационных волн

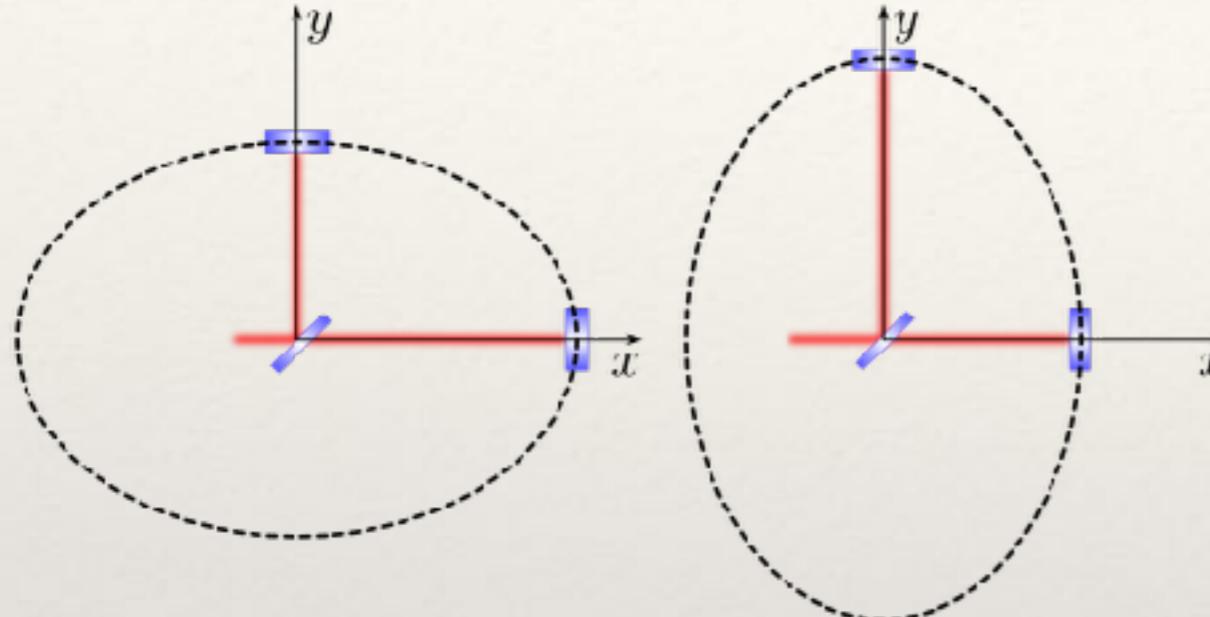
Грав. Волна распространяющаяся в направлении “z”



Принципы детектирования гравитационных волн

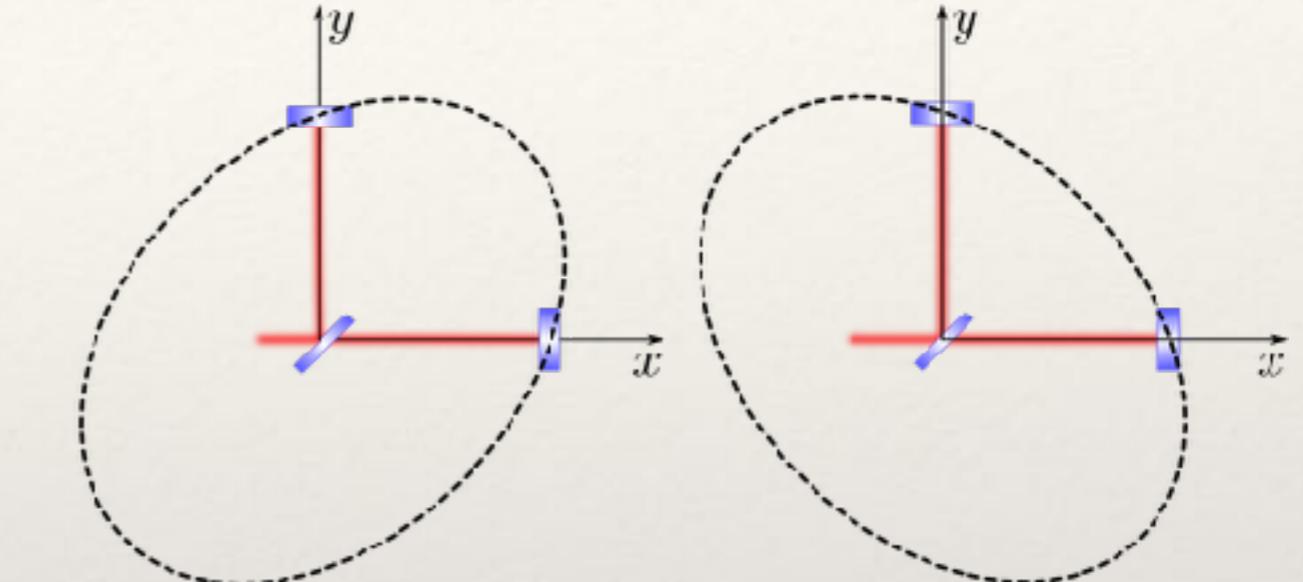
a) h_+ -polarized GW

$$h_+ > 0, t = \frac{1}{4}T_{\text{GW}}$$

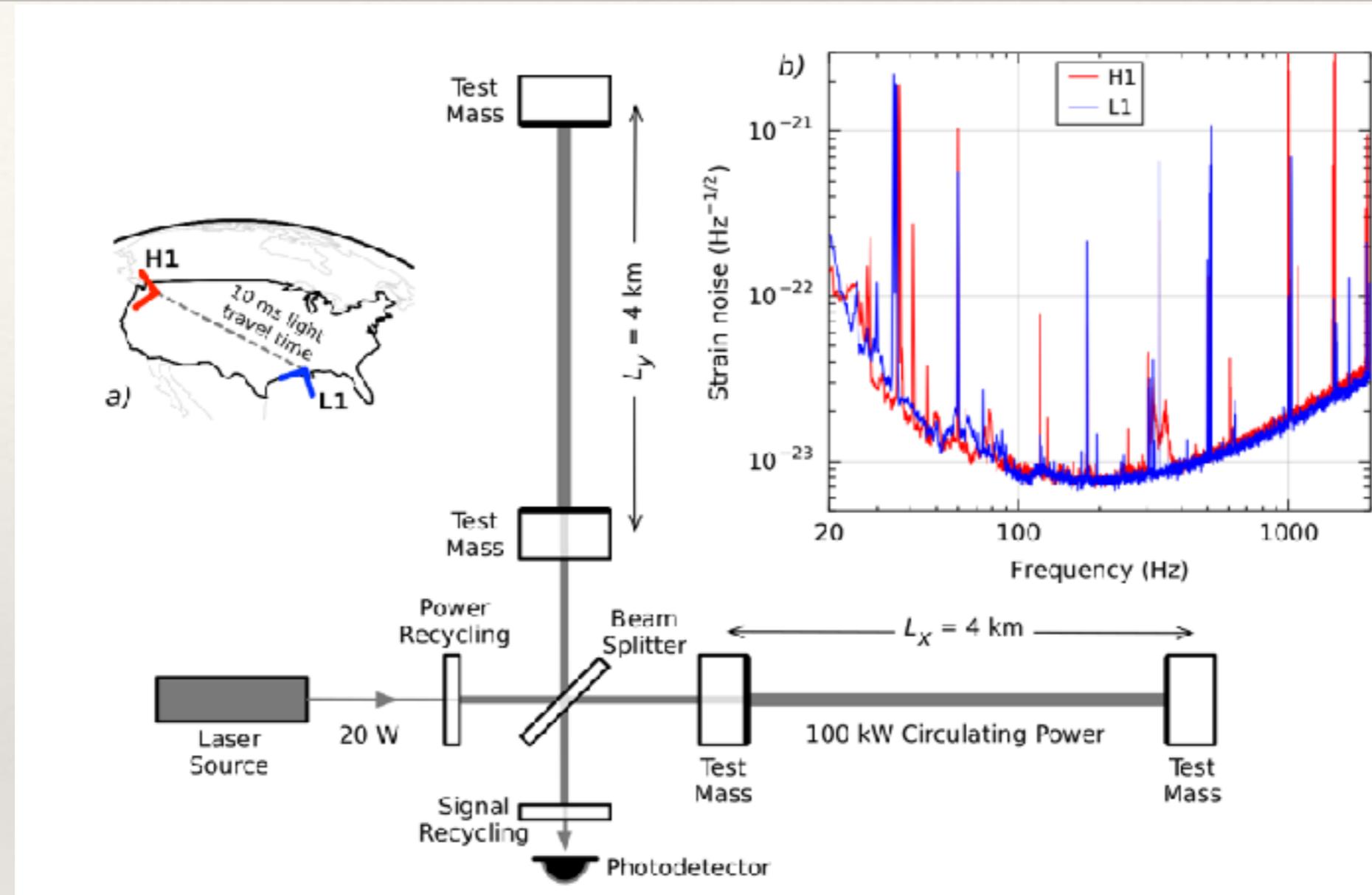


b) h_\times -polarized GW

$$h_\times > 0, t = \frac{1}{4}T_{\text{GW}}$$



Упрощенная схема детектирования ГВ.



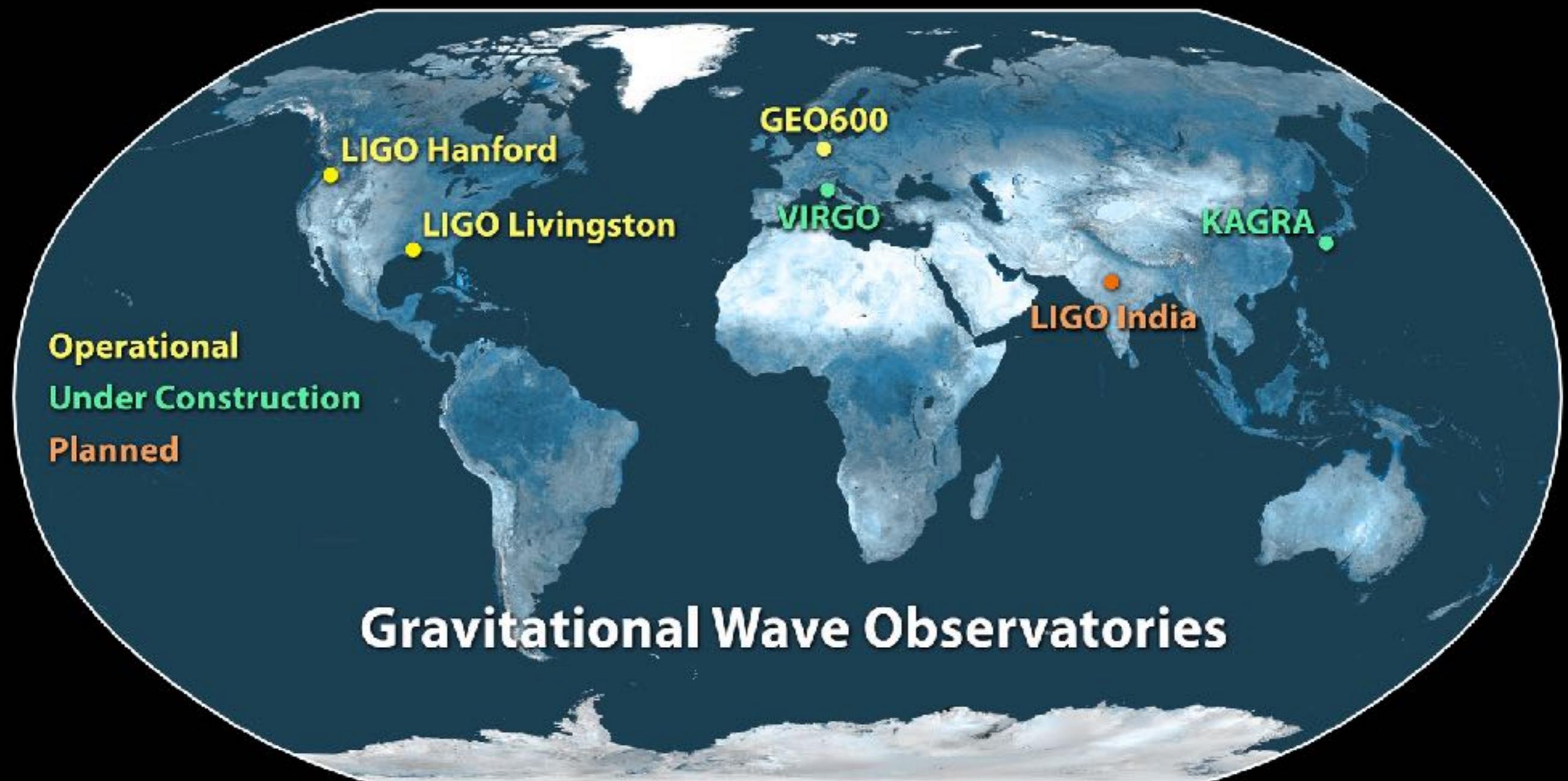
Чувствительность ГВ детекторов ограничена: Сейсмическим шумом на низких частотах,
Тепловым шумом на средних частотах и Квантовым шумом на высоких частотах

Амплитуда ГВ

$$h = \frac{\delta L_x}{L_x} - \frac{\delta L_y}{L_y}$$



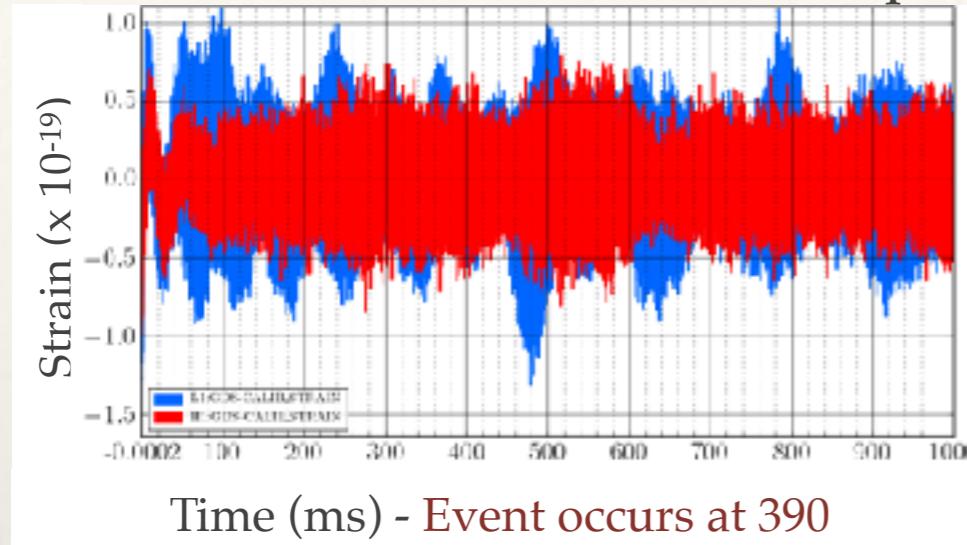
Грав. Волновые обсерватории



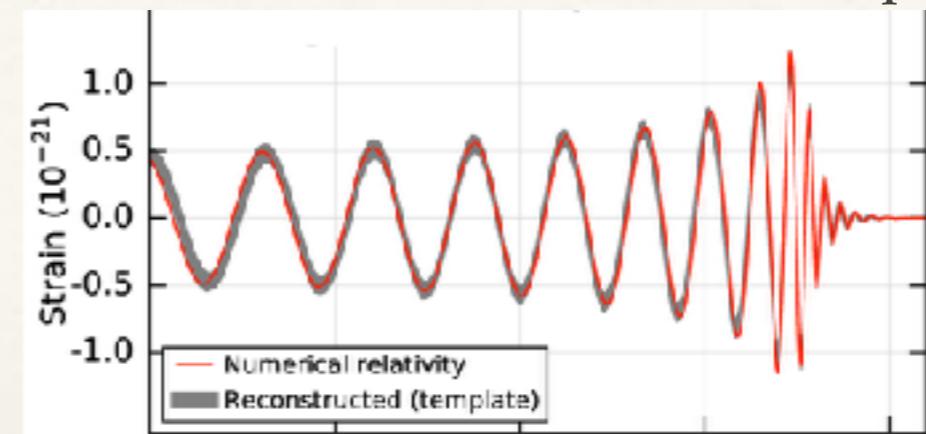
Согласованный фильтр (Matched filtering)

GW150914

Измерения



Сигнал от сливающихся черных дыр



Мы используем согласованный фильтр для поиска сигнала известной формы на фоне высокого шума.

$$\rho \sim 4\Re \int_0^\infty \frac{\tilde{d}(f)\tilde{h}^*(f)}{S(f)} df$$

Отношение сигнал / шум

$$L(d|\vec{\theta}) \propto \exp \left[-\frac{1}{2} \sum_k \langle d_k - h_k(\vec{\theta}) | d_k - h_k(\vec{\theta}) \rangle \right]$$

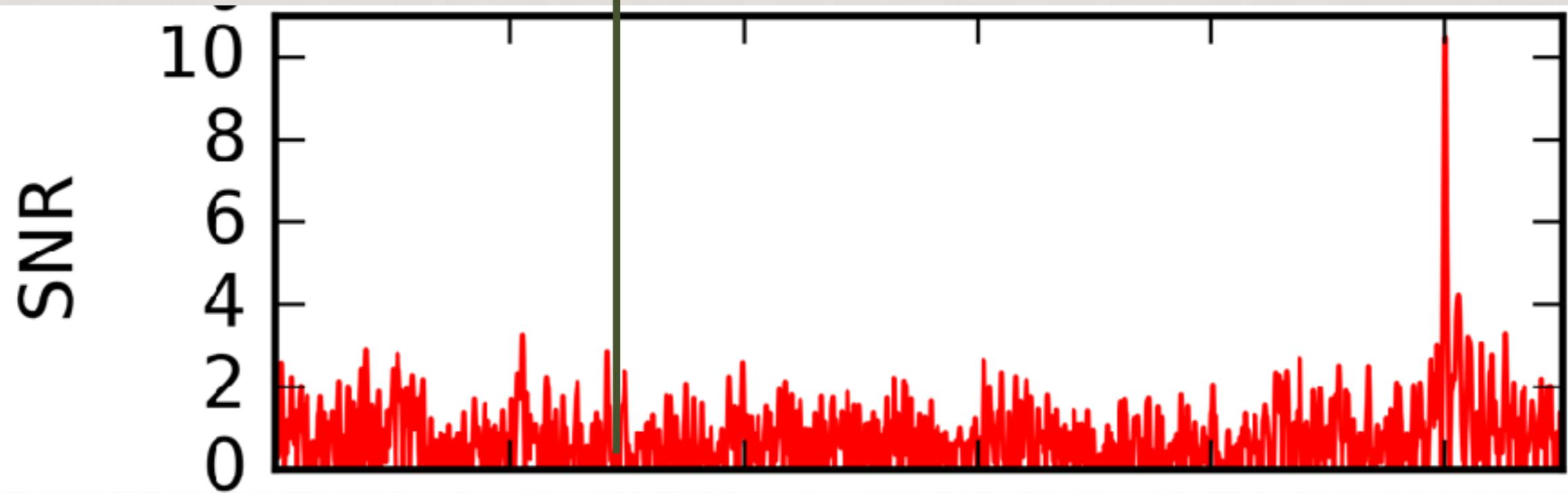
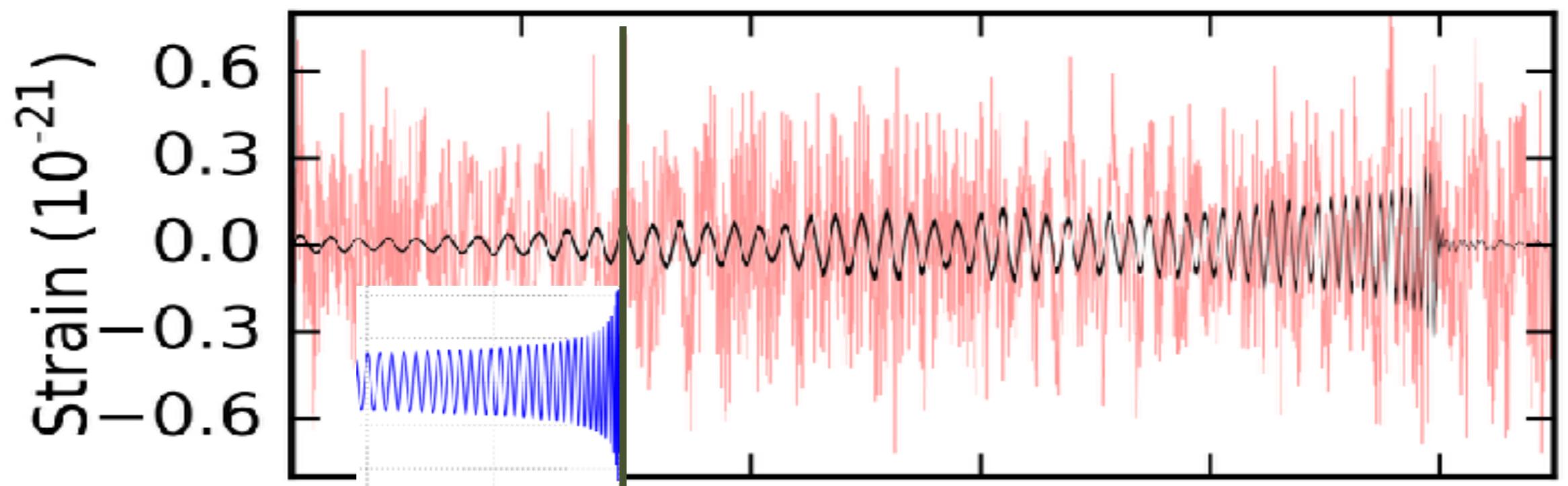
Функция правдоподобия



Matched filtering

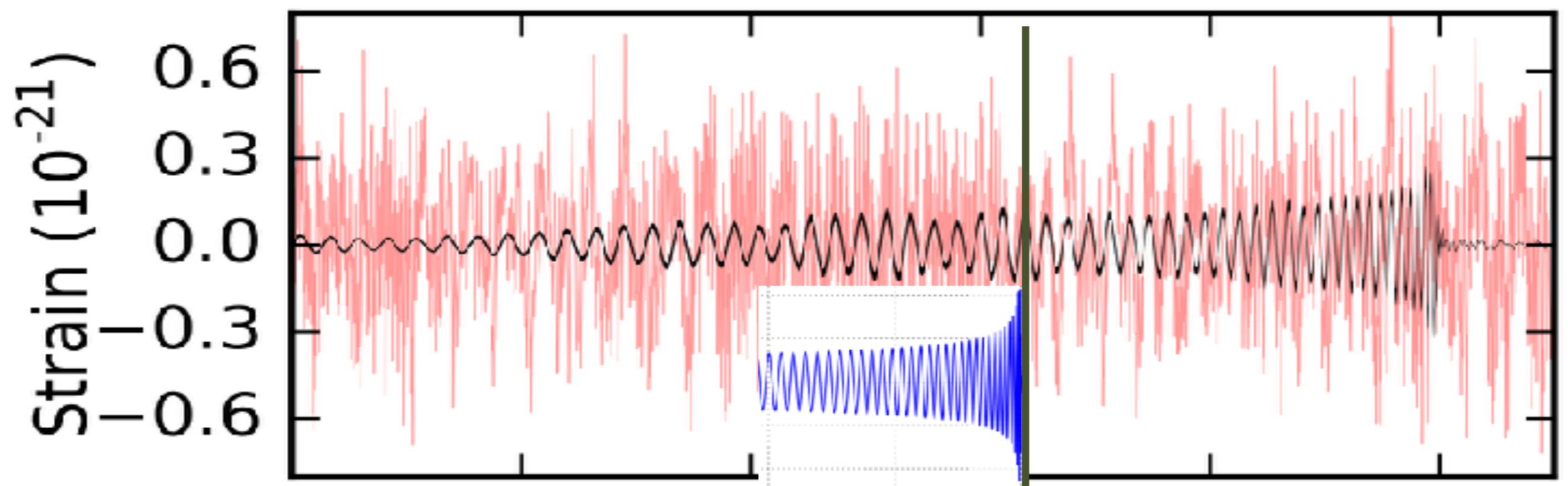
Hanford

GW151226

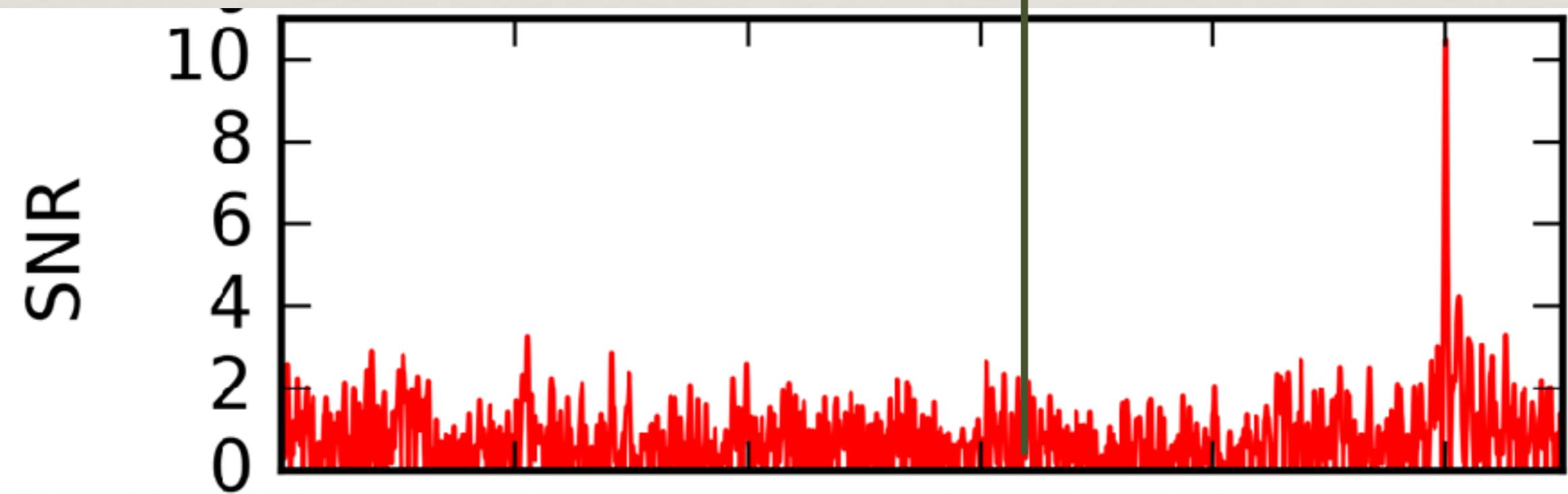


Matched filtering

Hanford



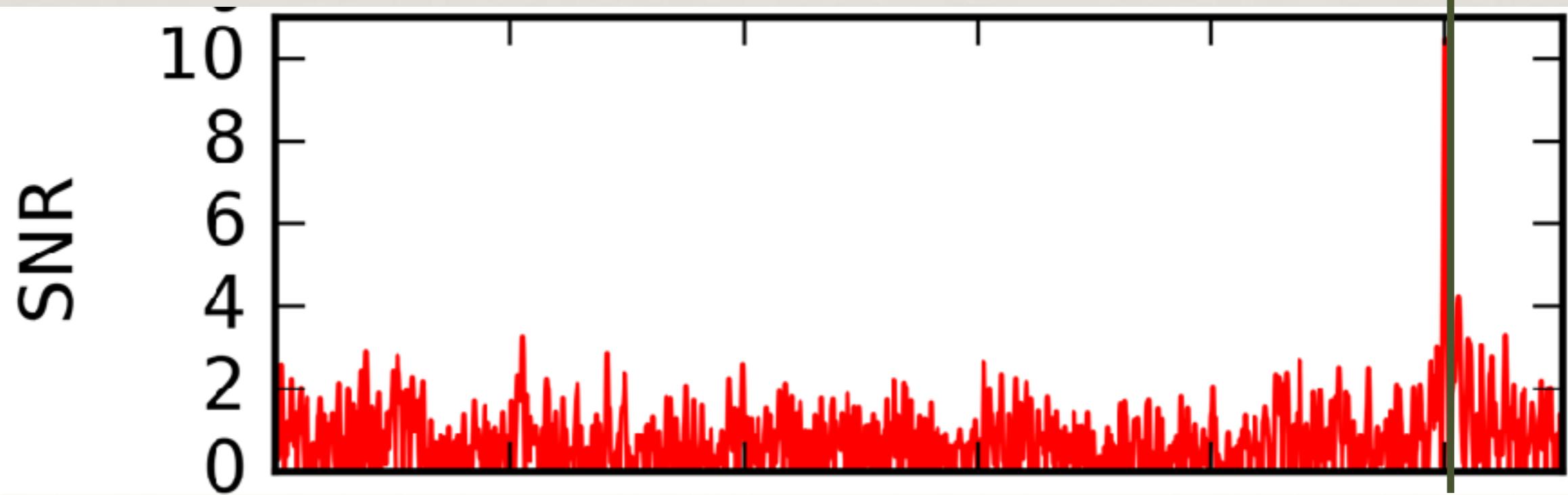
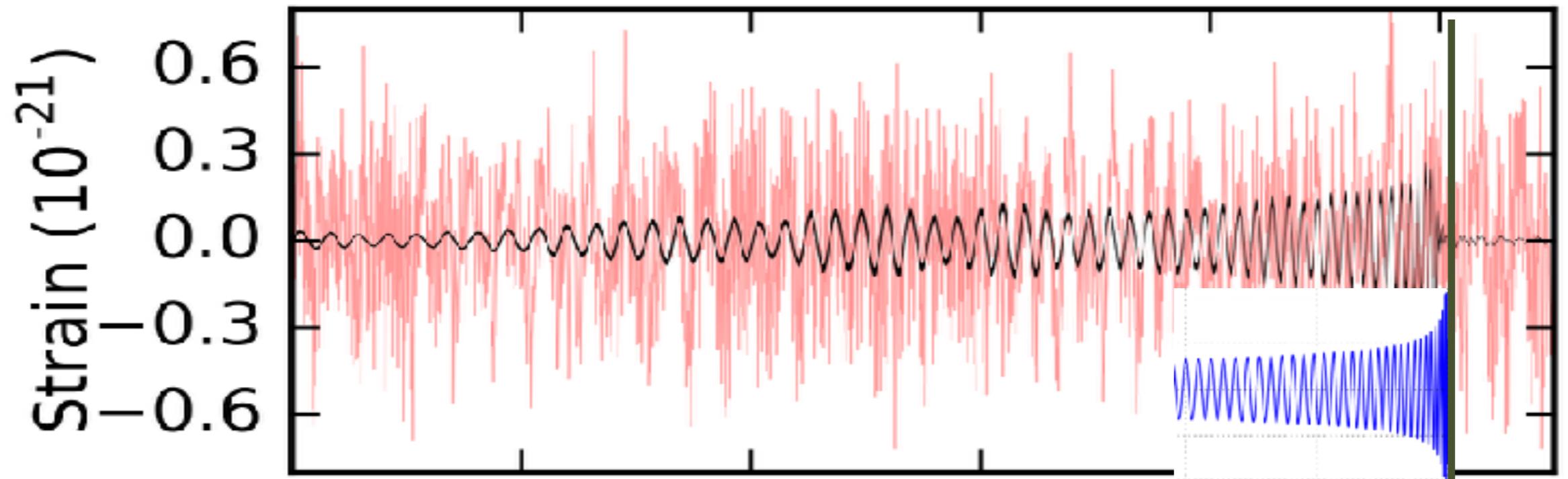
GW151226



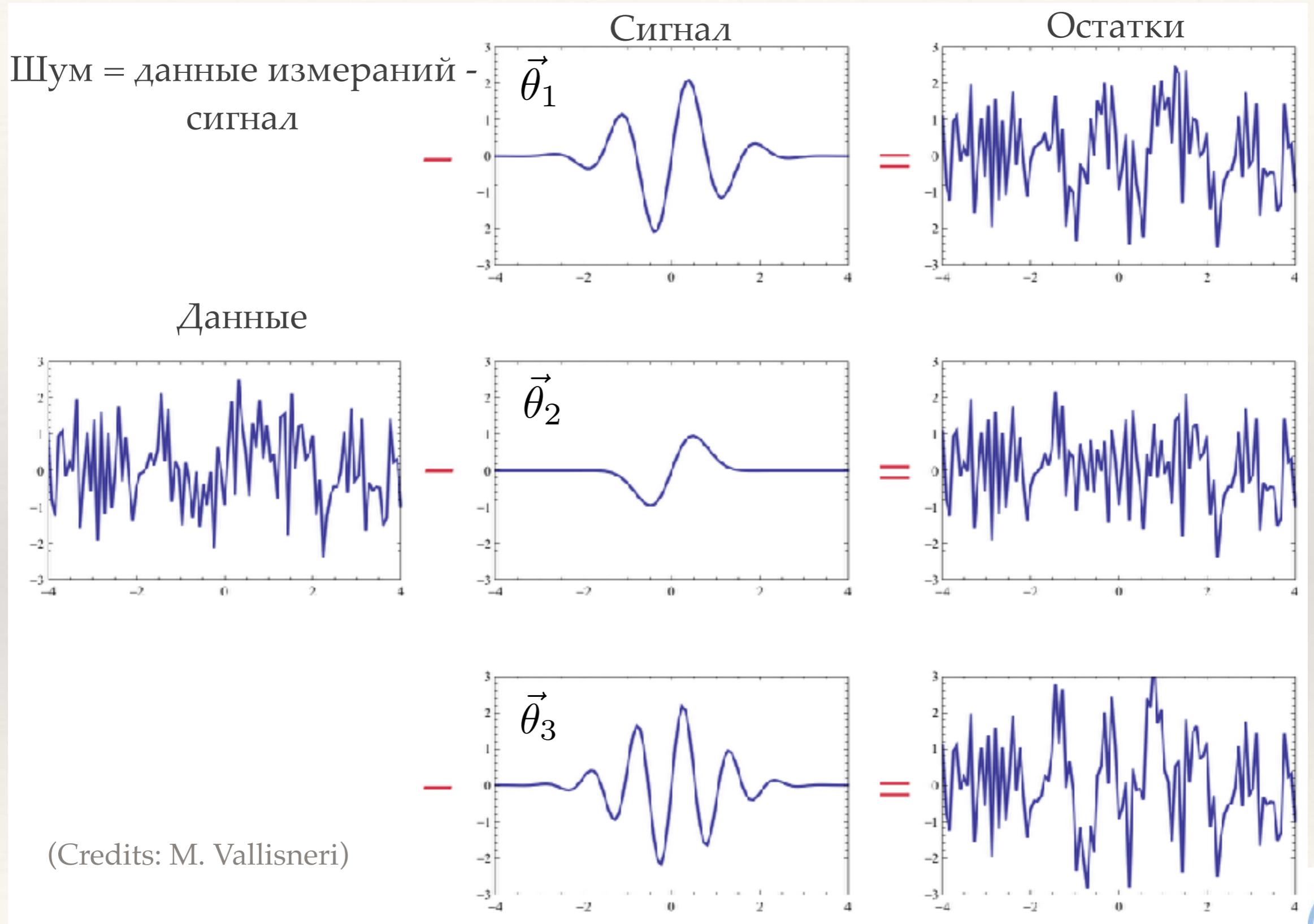
Matched filtering

Hanford

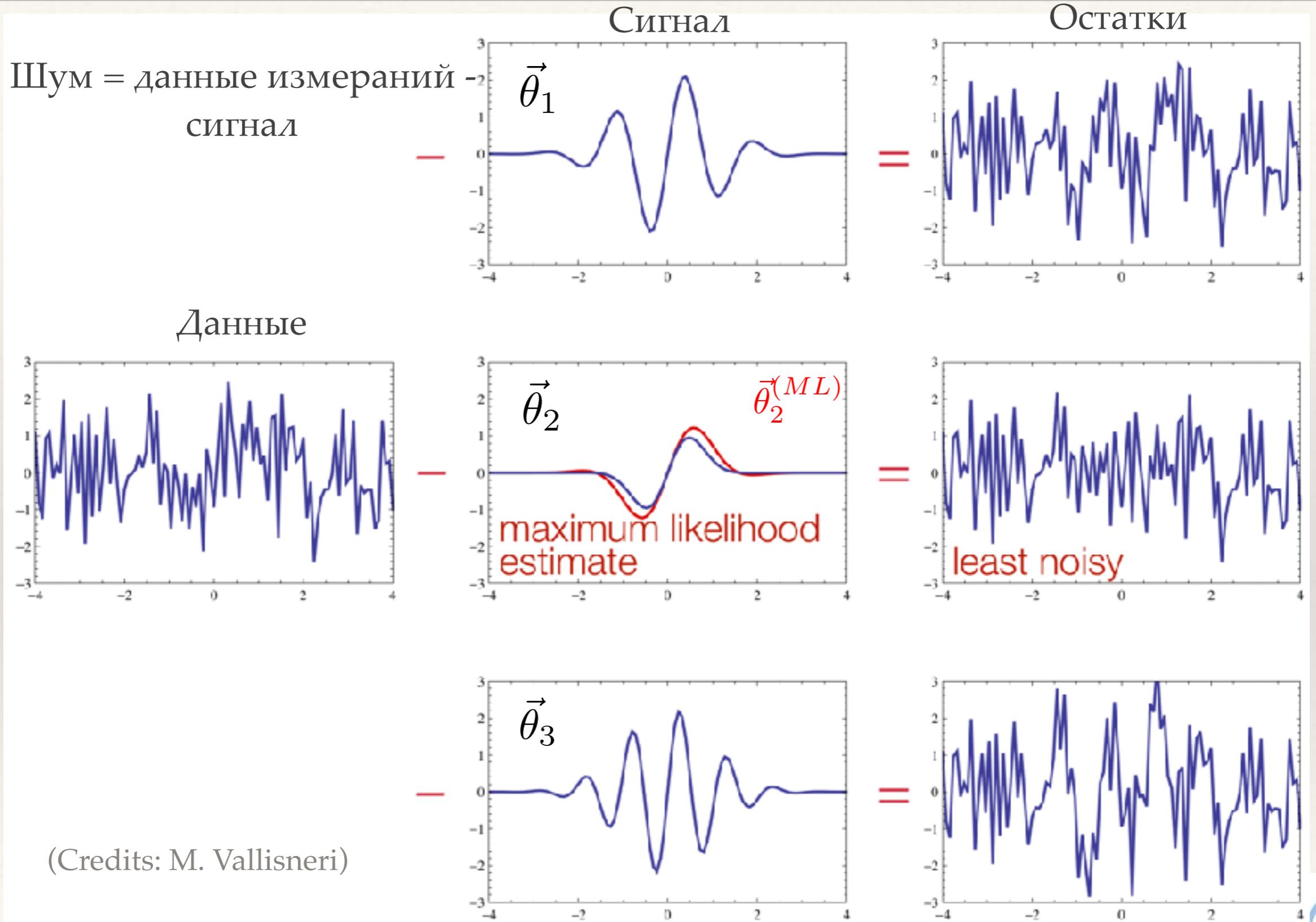
GW151226



Согласованный фильтр и оценка параметров

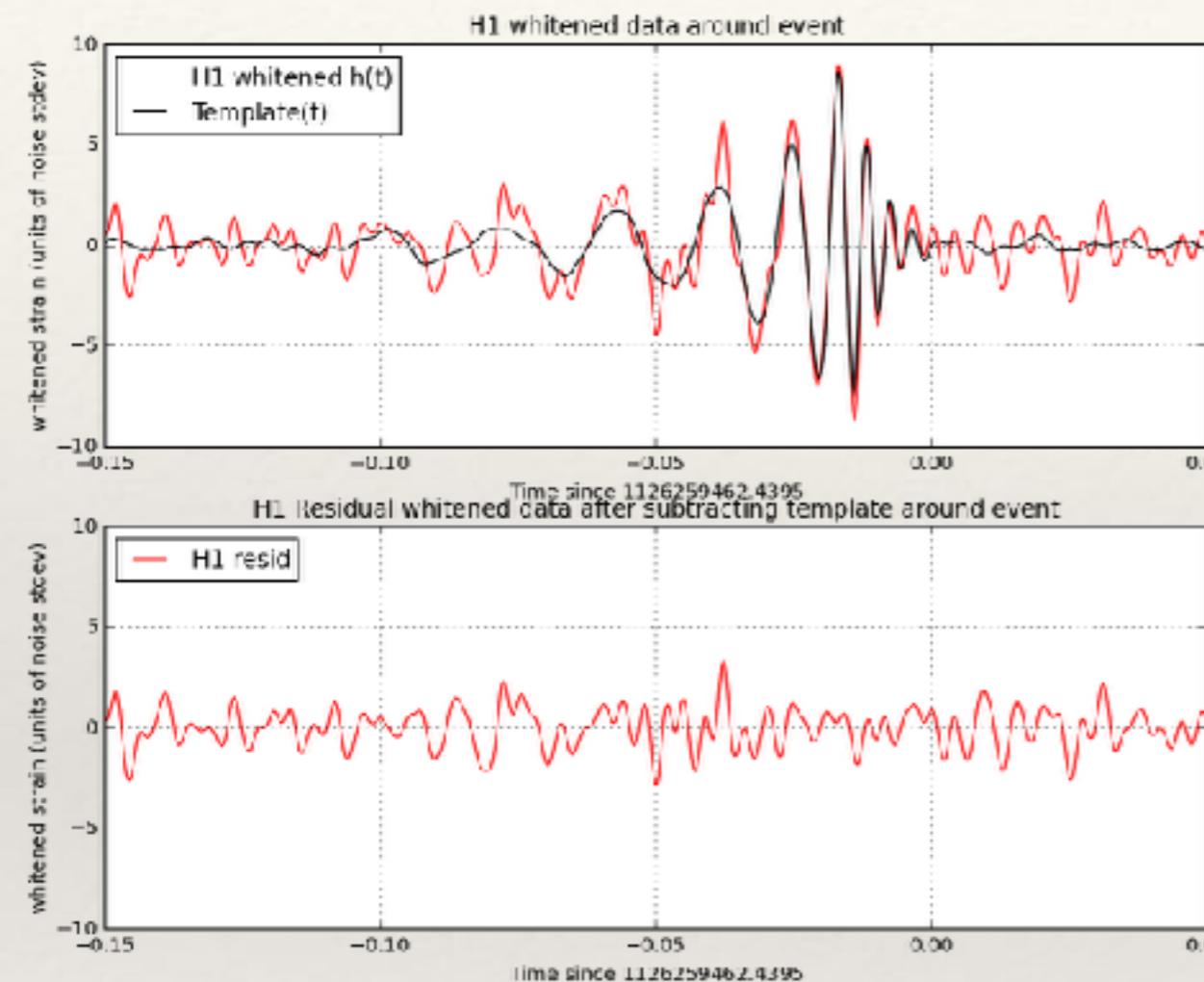


Согласованный фильтр и оценка параметров

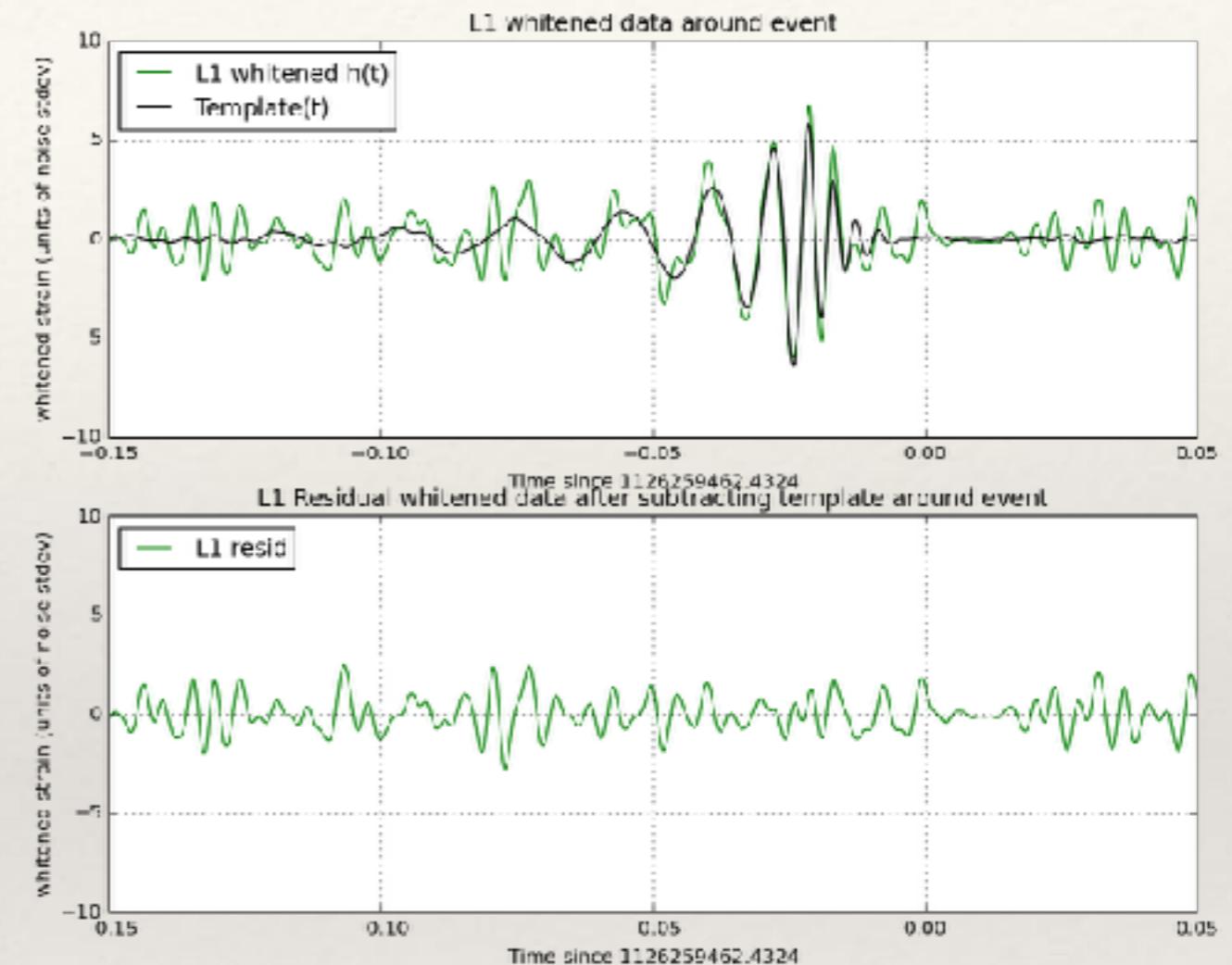


Согласованный фильтр и оценка параметров: GW150914

H1



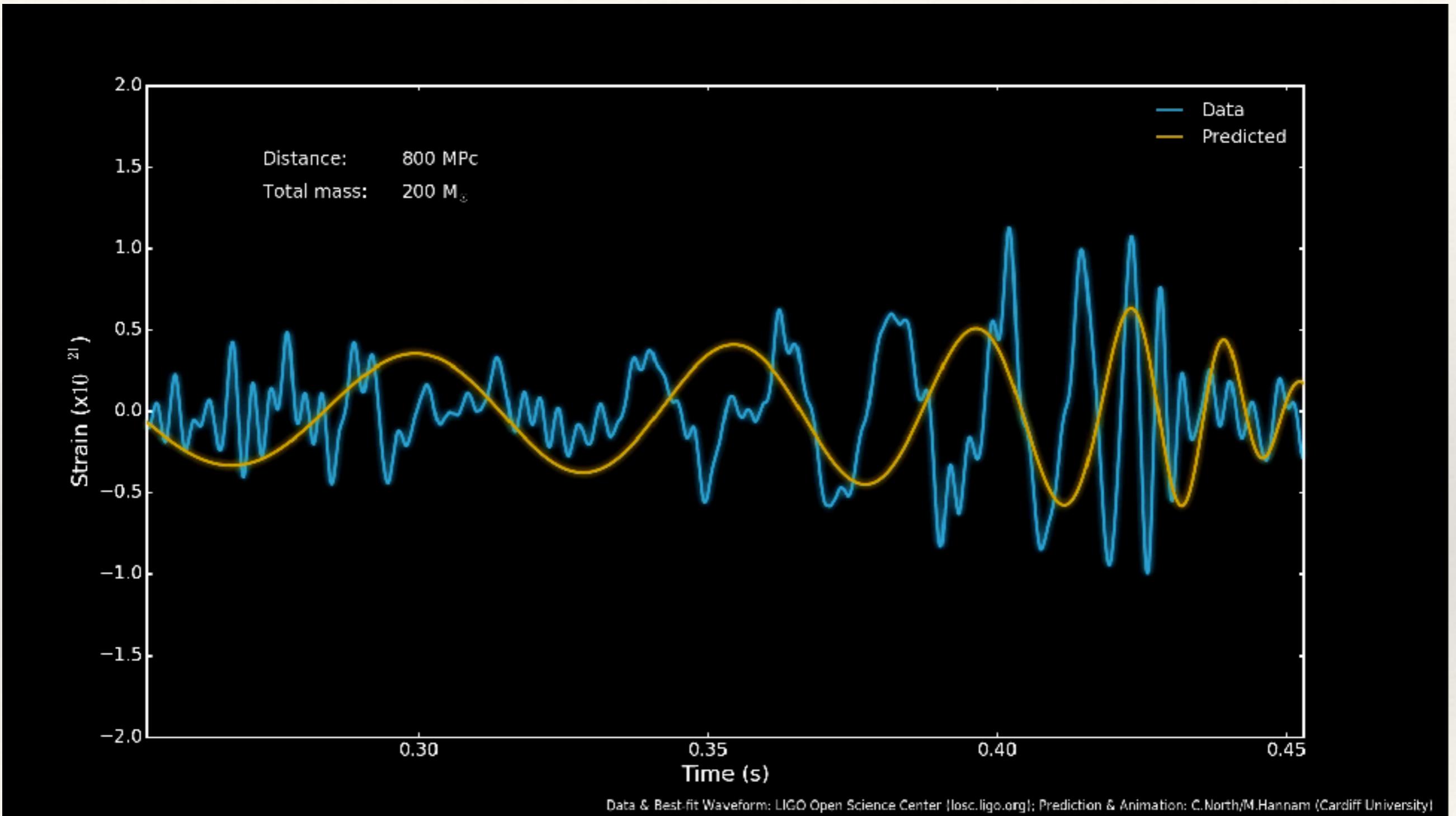
L1



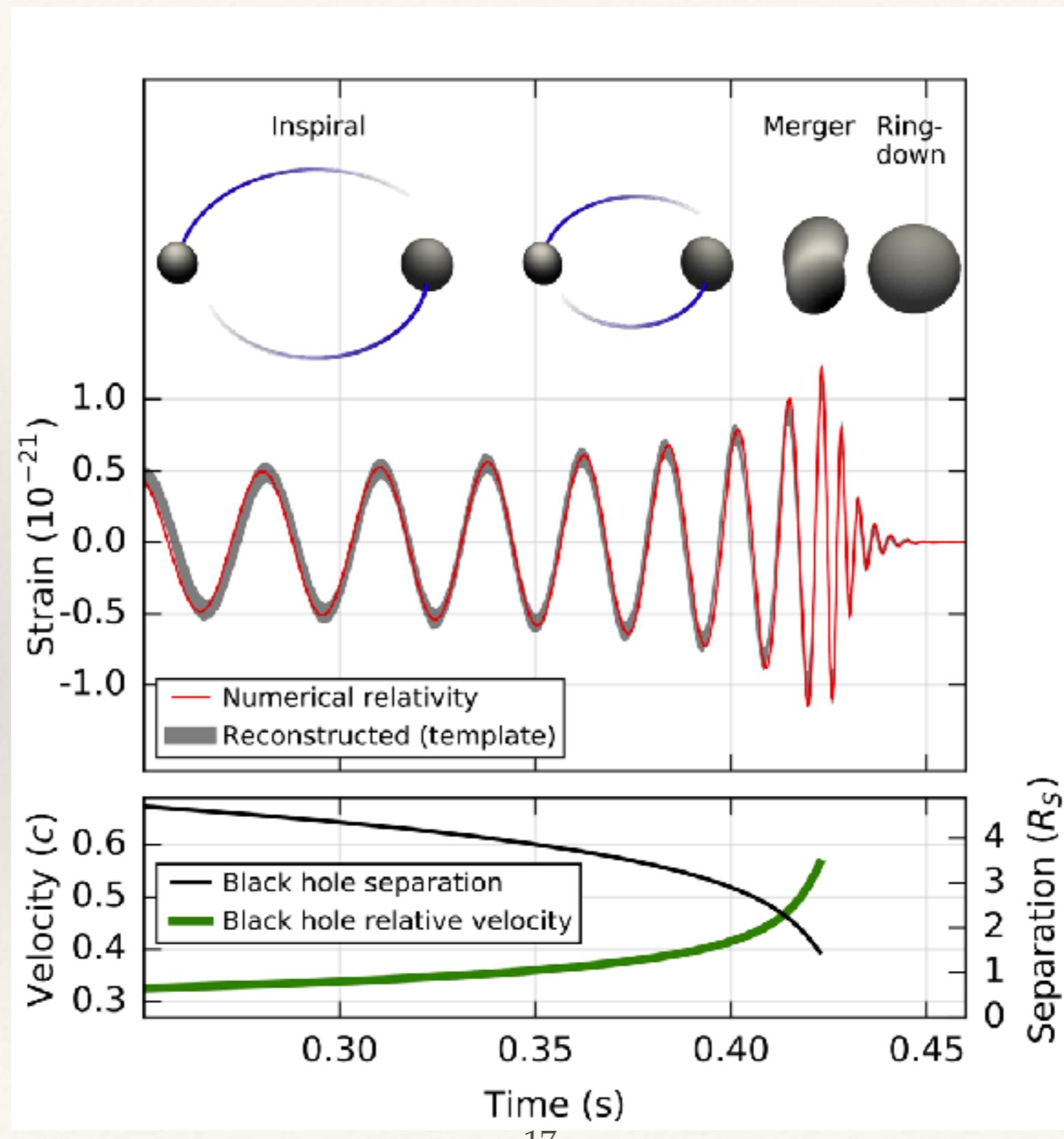
[LOSC: <https://losc.ligo.org/tutorials/>]



Оценка параметров

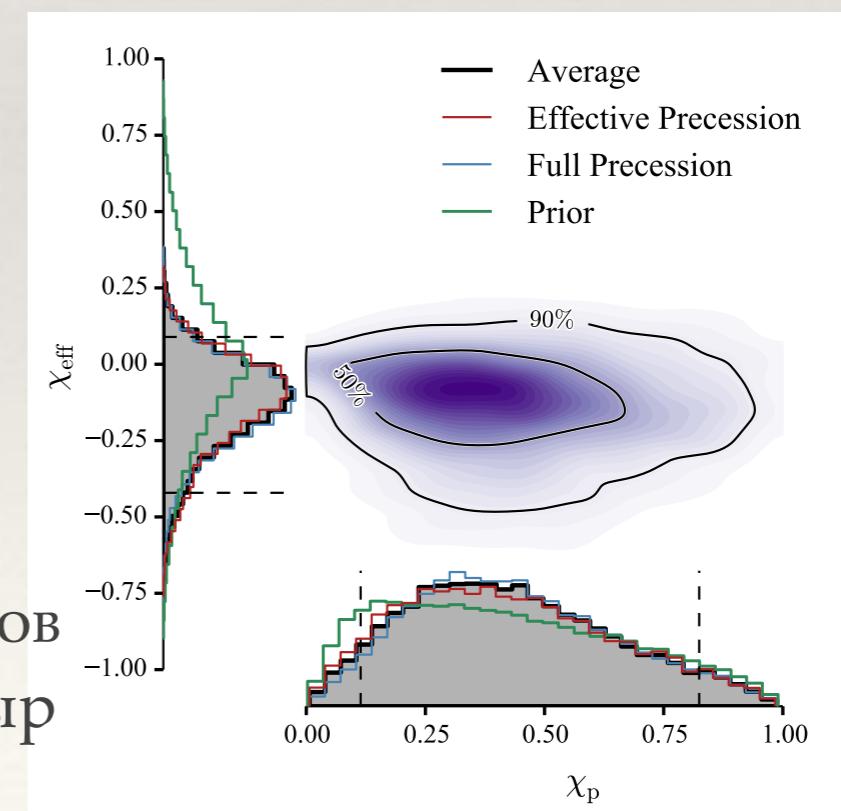
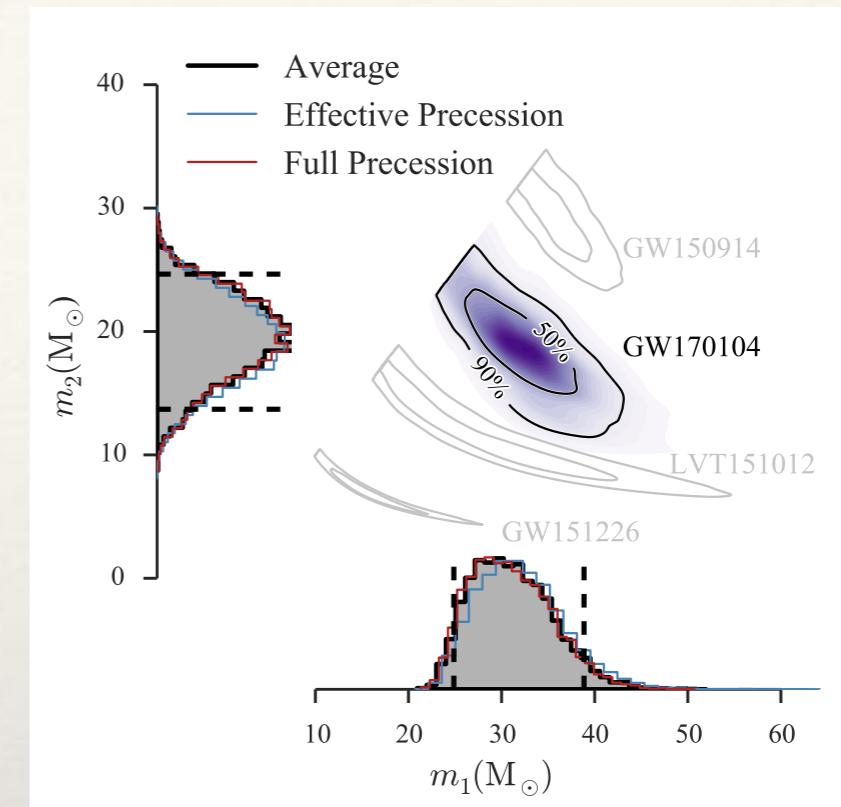
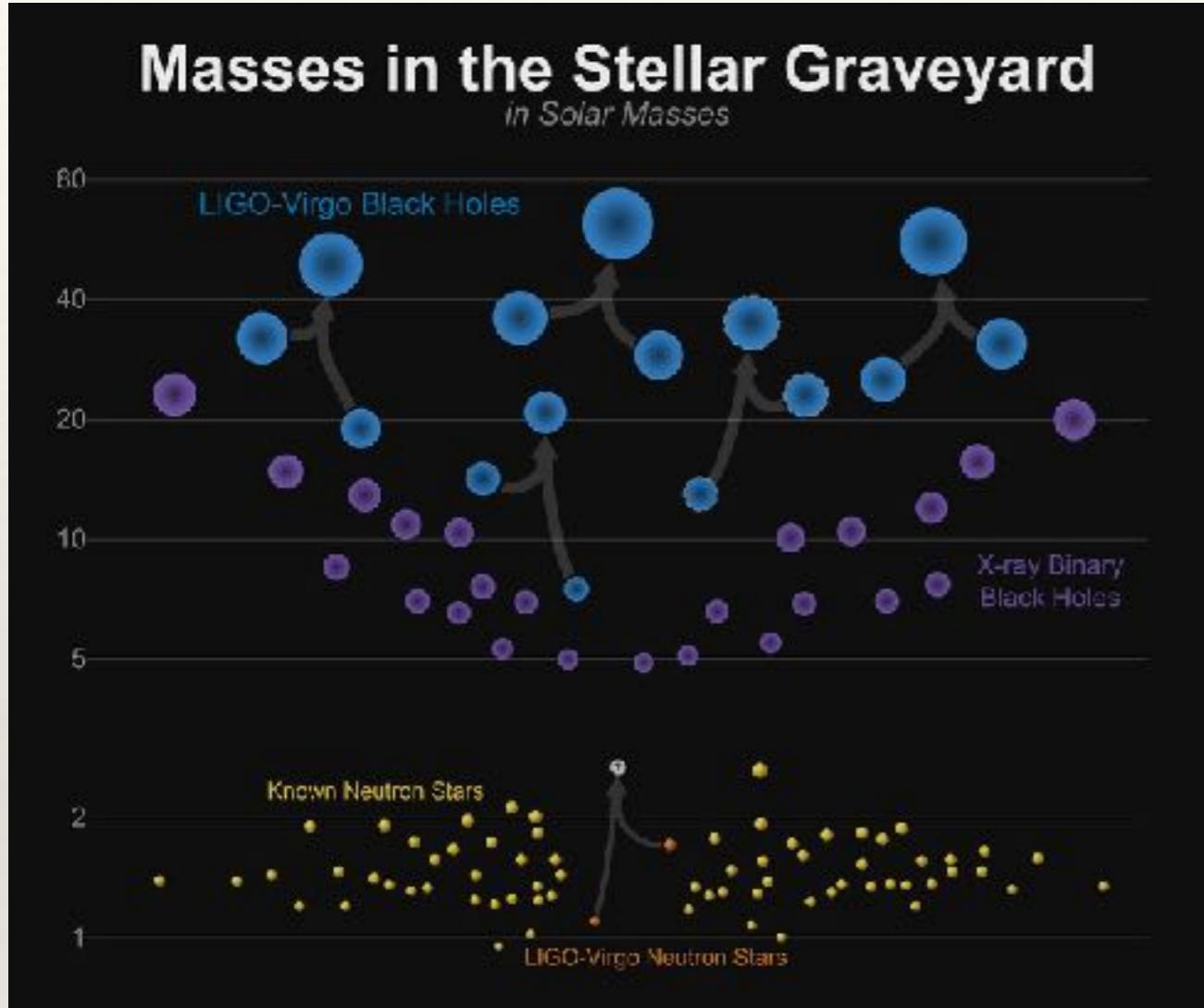


ГВ сигнал от сливающихся черных дыр



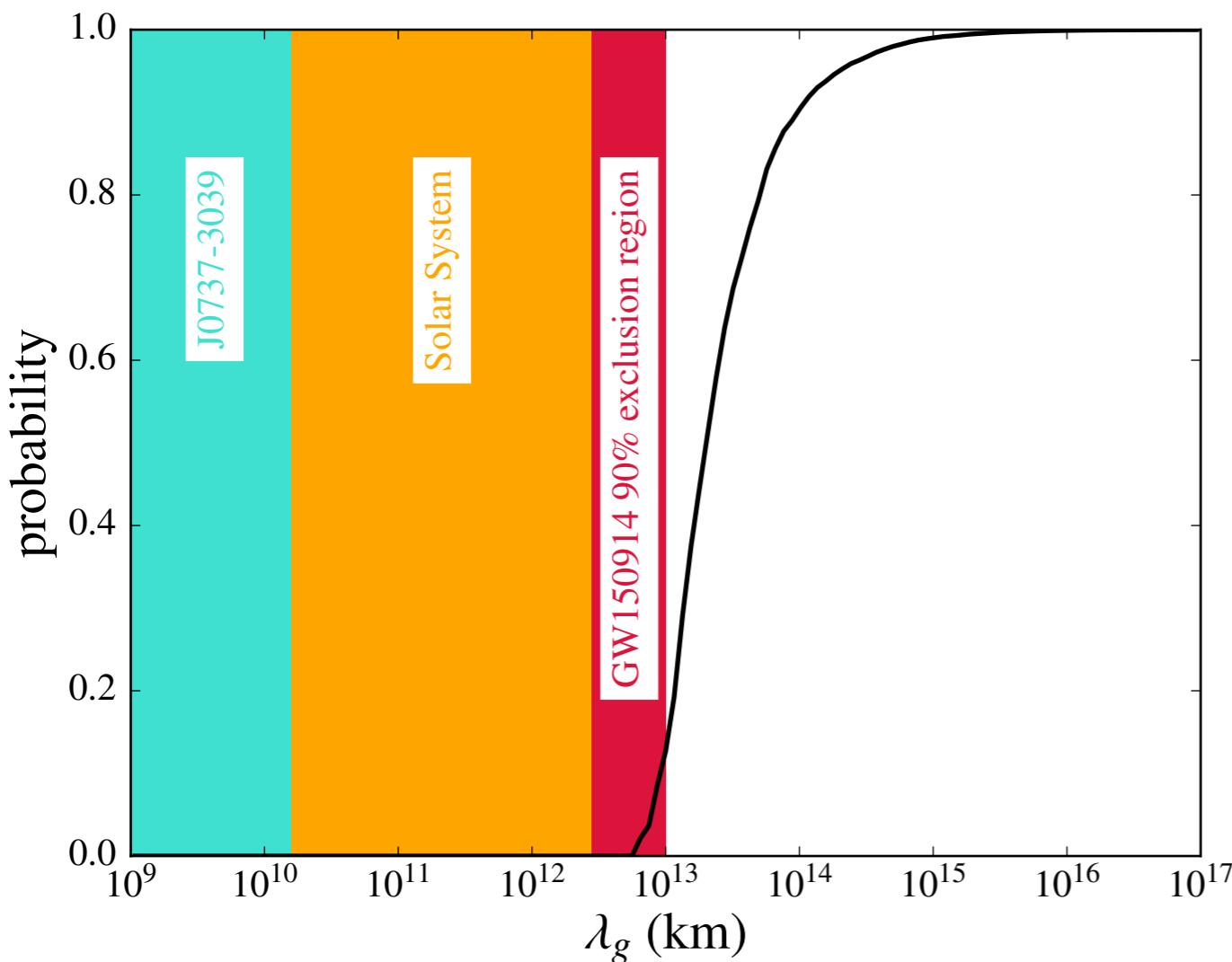
Оценка параметров

Массы найденных двойных систем



Ориентация моментов
вращения черных дыр

Проверка ОТО



- В ОТО гравитон не имеет массы: (распространяется со скоростью света)
- Если гравитон имеет массу (m_g) то мы должны наблюдать дисперсию ГВ
- Данные не противоречат ОТО: нижний предел на Комptonовскую длину волны

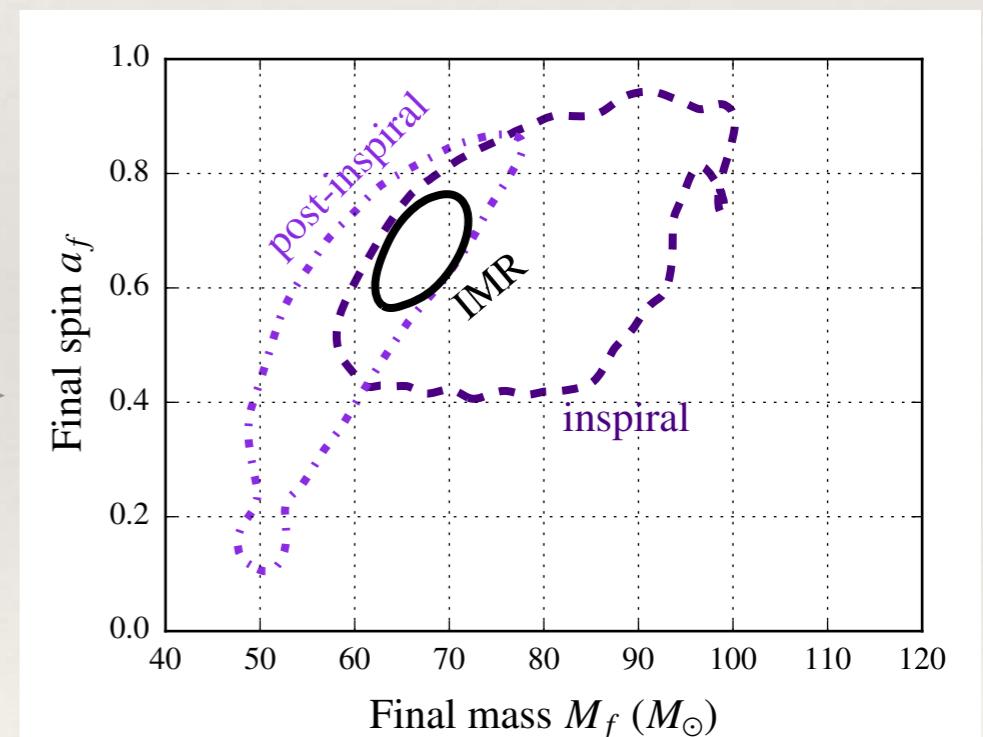
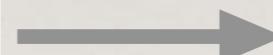
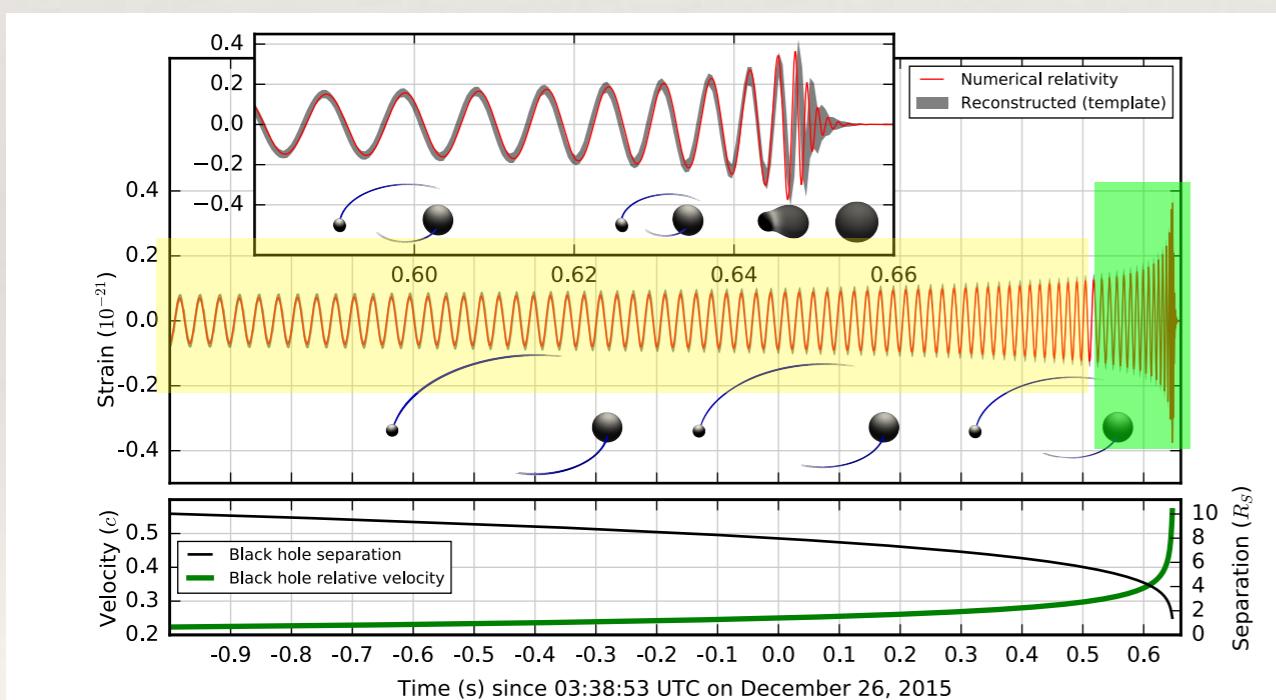
$$\lambda_g = h/(cm_g)$$

[LVC PRL (2016)]

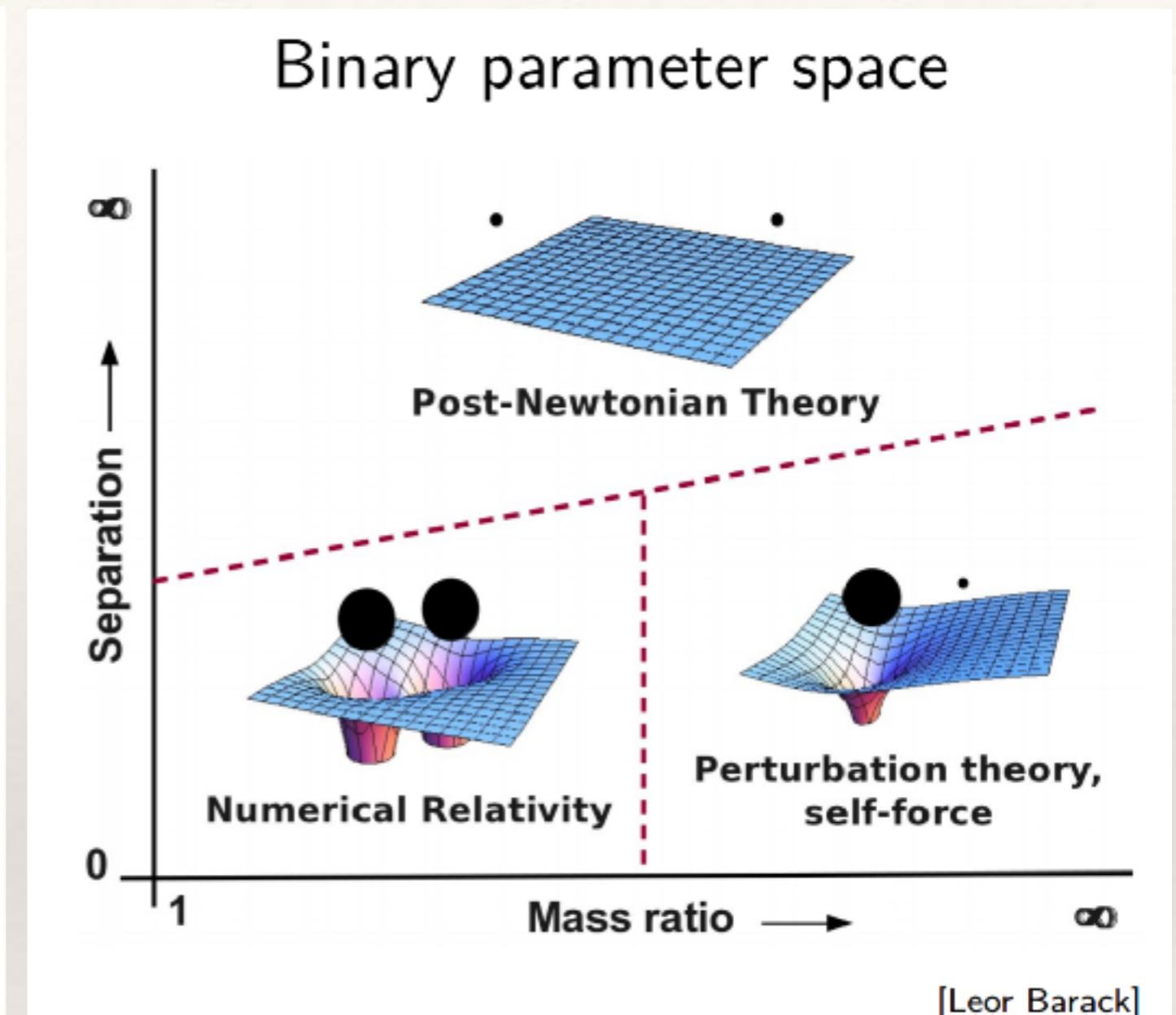
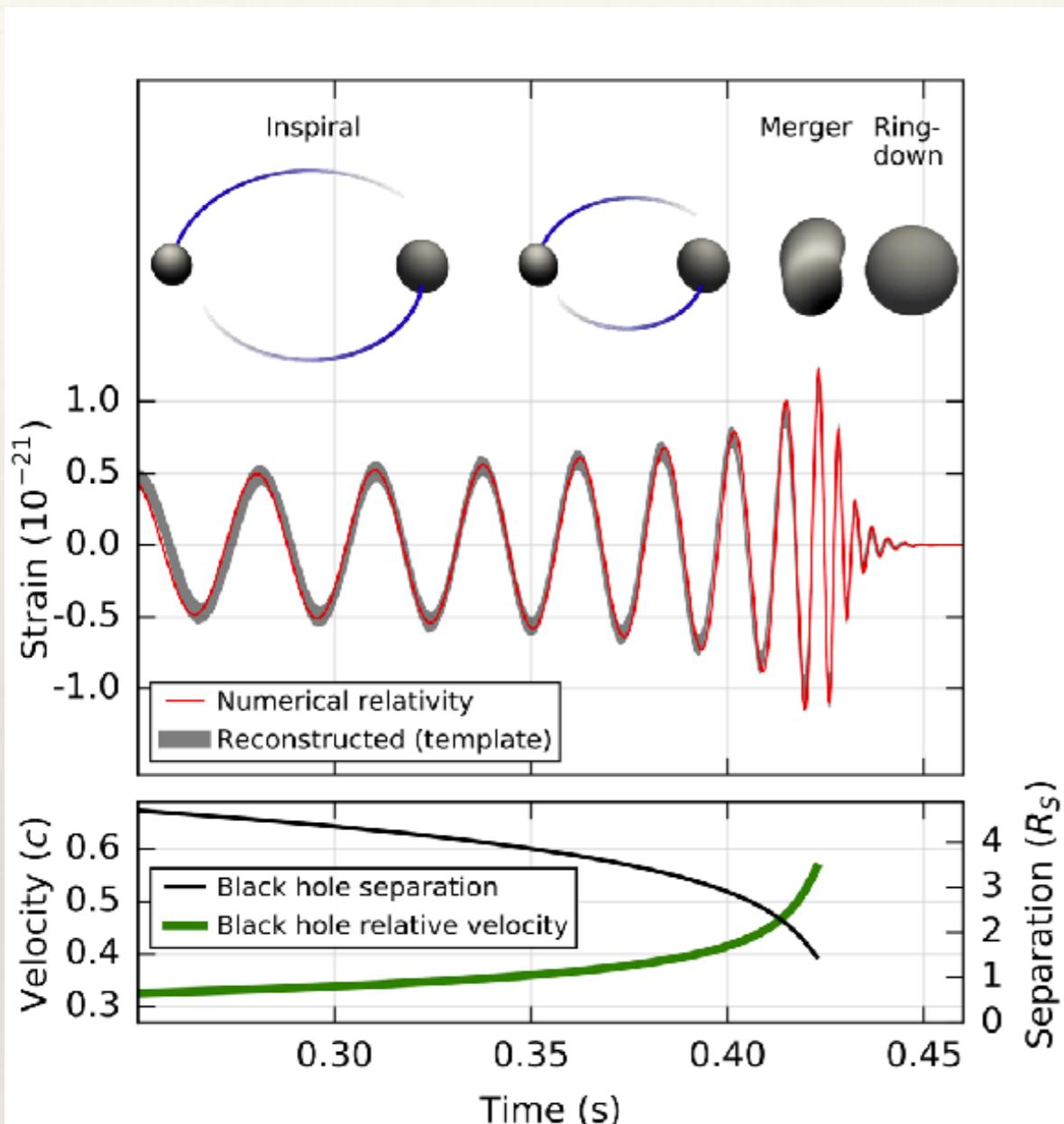


Проверка ОТО

- Мы можем проверить само согласованность сигнала (в рамках ОТО)
- Мы разбиваем сигнал на две части и оцениваем параметры независимо для каждой
- Проверяем если оценки совпадают друг с другом и оценкой полученной из полного сигнала

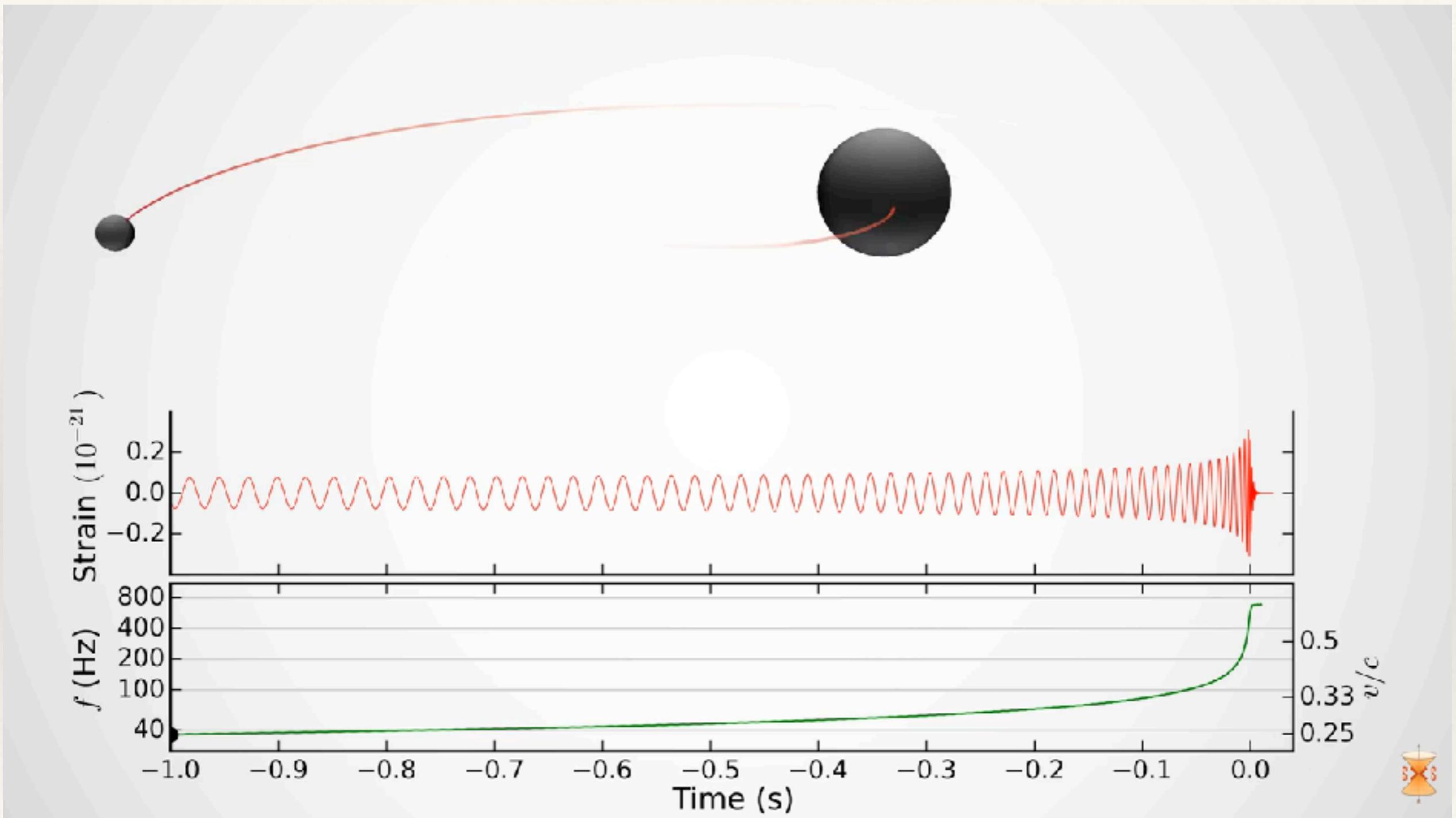


Моделирование ГВ сигнала от двойных систем



- ГВ сигнал от двойных систем можно условно разложить на 3 части: inspiral, merger, ringdown

Орбитальная эволюция и гравитационное излучение



Моделирование ГВ сигнала

- В главном порядке (слабая гравитация $GM/a \ll 1$, и медленное движение. $v/c \ll 1$), гравитационное излучение описывается квадрупольной формулой Ландау Лишитца

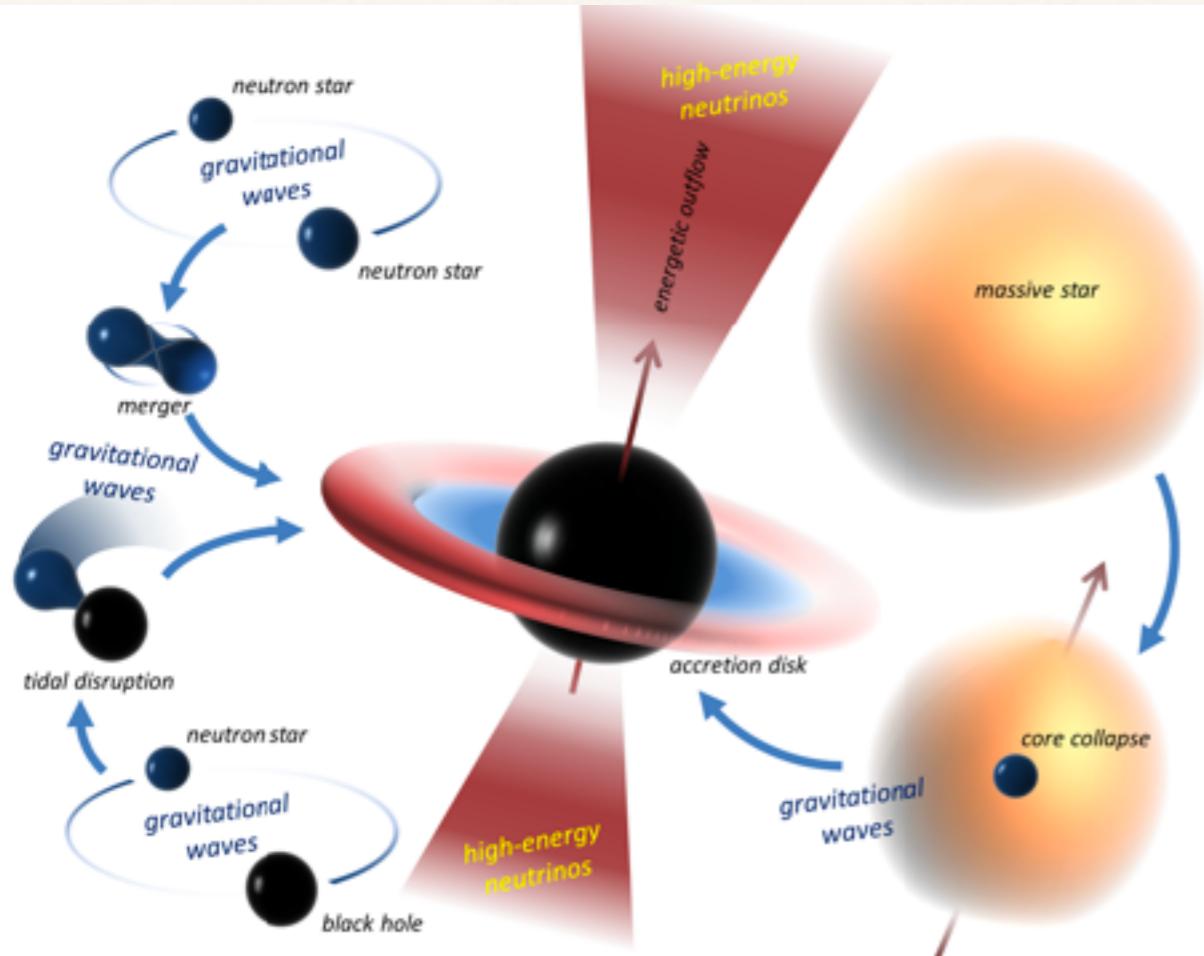
$$h_{ij} = \frac{2G}{c^4 D_L} \ddot{\mathcal{I}}_{ij}(t - r/c)$$

- Система должна обладать ненулевой 2ой производной от квадрупольного момента системы $\dot{\mathcal{I}}_{ij}$
- ГВ переносят энергию и угловой момент (из системы). Орбиты двойных систем уменьшаются и становятся круговыми

$$\mathcal{F} = -\frac{G}{5c^4} \left\langle \ddot{\mathcal{I}}_{ij} \ddot{\mathcal{I}}^{ij} \right\rangle$$



Другие источники ГВ (LIGO-VIRGO)



Credit: I. Bartos/Based on arXiv:1212.2289

- Коллапс ядра массивного красного супер гиганта
- Сливающиеся нейтронные звезды
- Двойные: черная дыра и нейтронная звезда
- Монохроматические ГВ от деформированных нейтронных звезд
- Стохастический ГВ сигнал от ранней вселенной

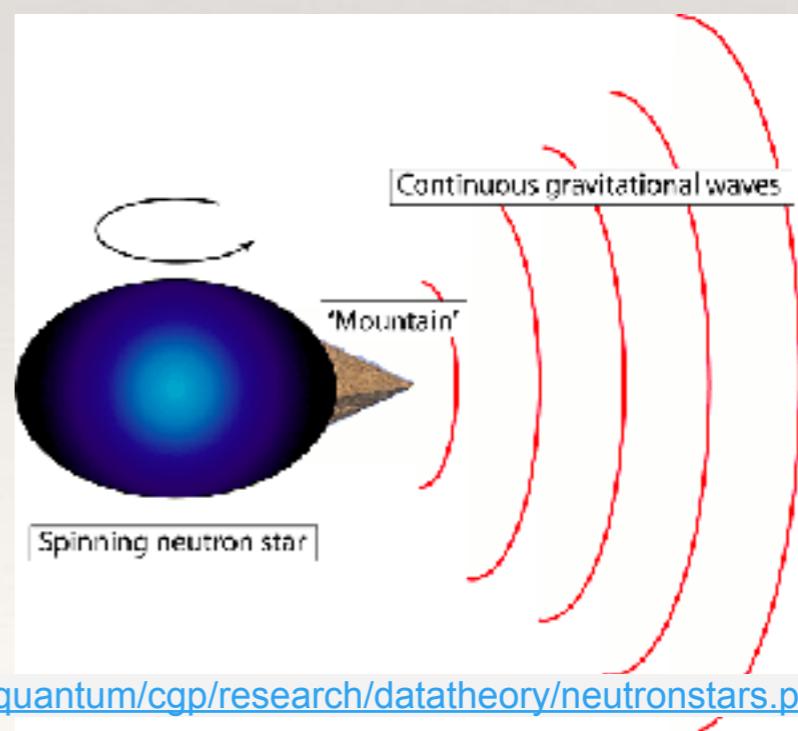
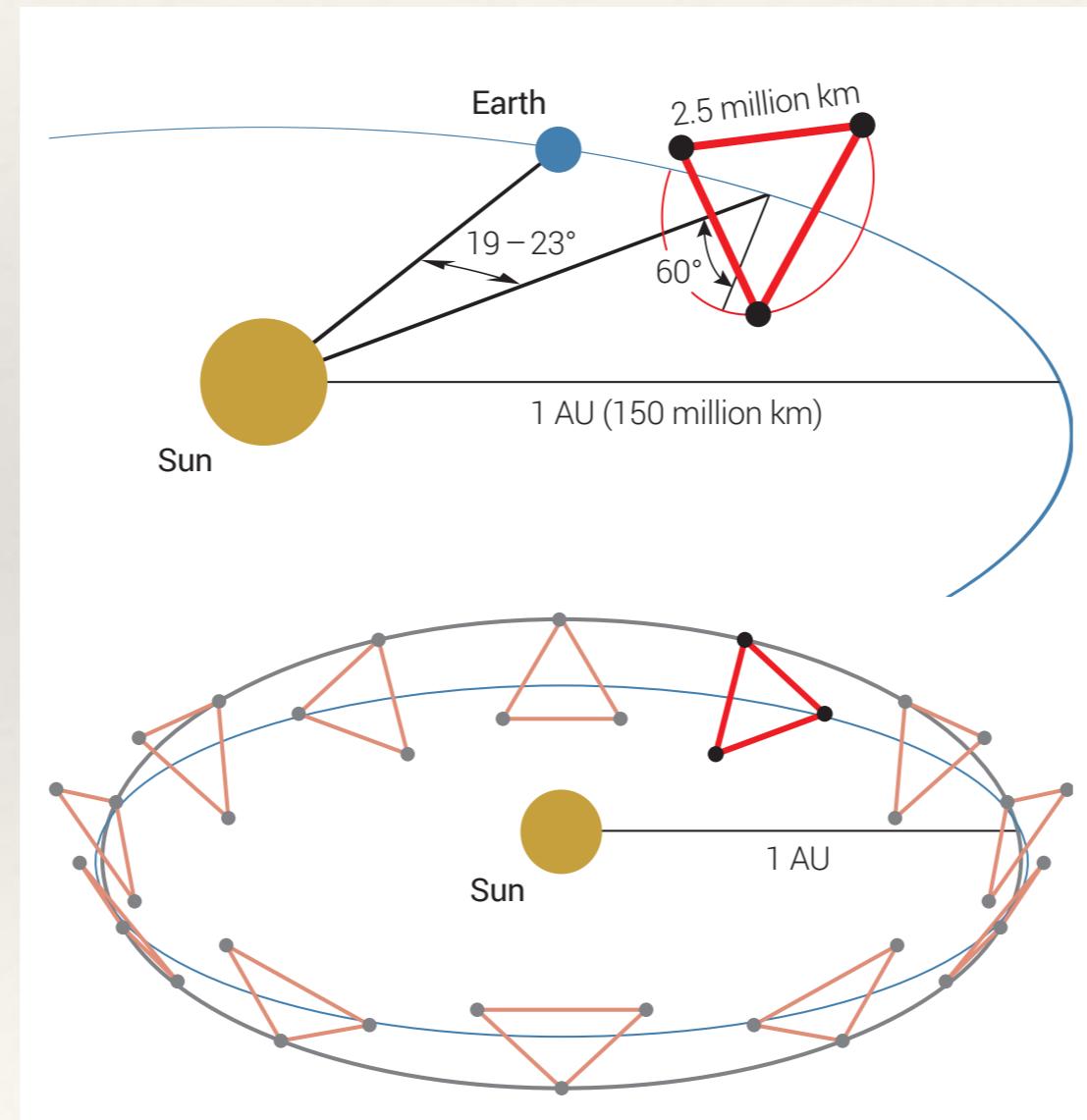


Image from <https://physics.anu.edu.au/quantum/cgp/research/datatheory/neutronstars.php>



Laser Interferometer Space Antenna (LISA)

- LISA: Грав. Волновая обсерватория в космосе. Ведущая роль: Европейское космическое агентство. Запуск 2032 - 2034.
- LISAPathfinder - Необычайно успешный космический эксперимент подтверждение технологической готовности

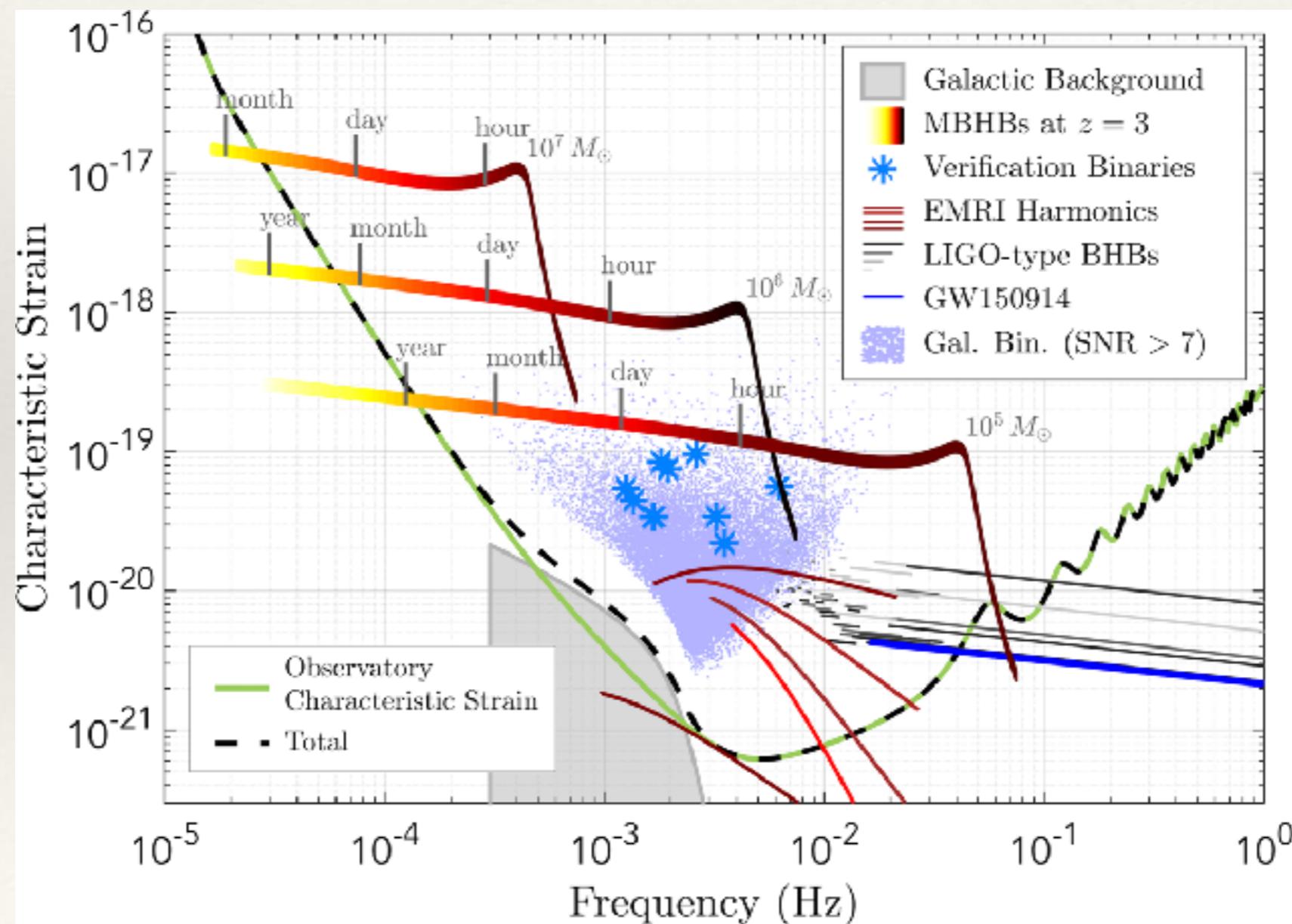


LISA (мультфильм)



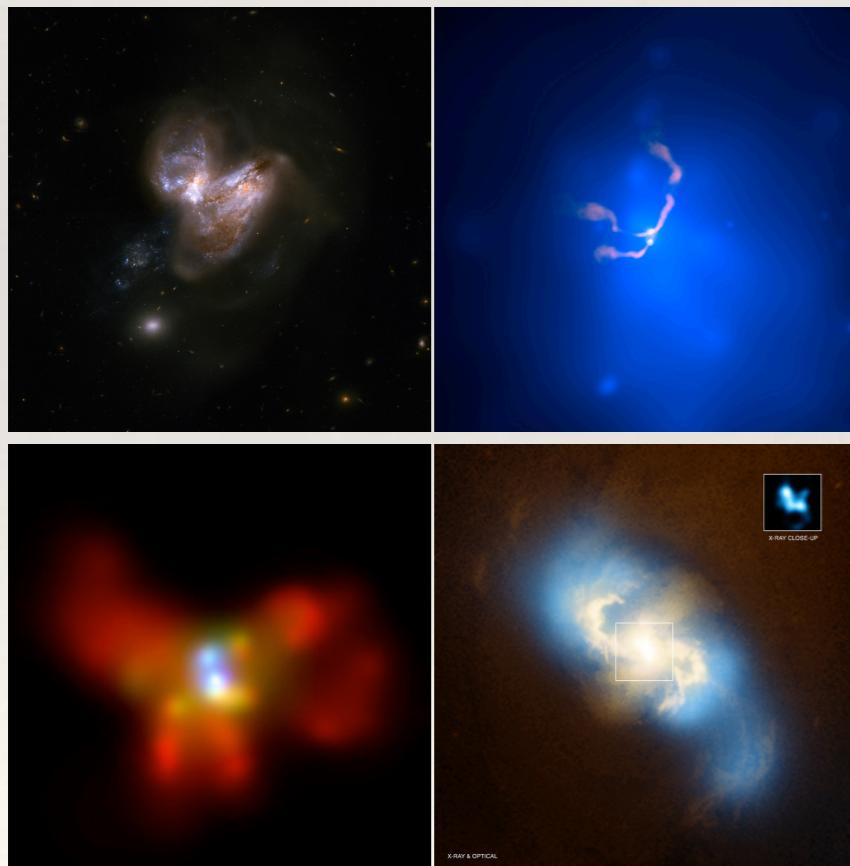
Особенности и трудности с данными LISA

- ГВ сигналы в диапазоне сильные и долго живущие .
- Данные полученные с LISA будут содержать тысячи ГВ сигналов одновременно, которые надо разделить и охарактеризовать
- Данные (шум) не стационарный



ГВ источники: массивные черные дыры

- Мы думаем что ядра всех галактик содержат *массивные черные дыры*: черная дыра с массой 4 млн. солнечных масс в центре нашей галактики
- Галактики сливаются: источник двойных систем с массивными черными дырами
- Нужны звезды и / или газ чтобы сблизить массивные черные дыры



Credits: Hassinger+, VLA, Chandra , NASA

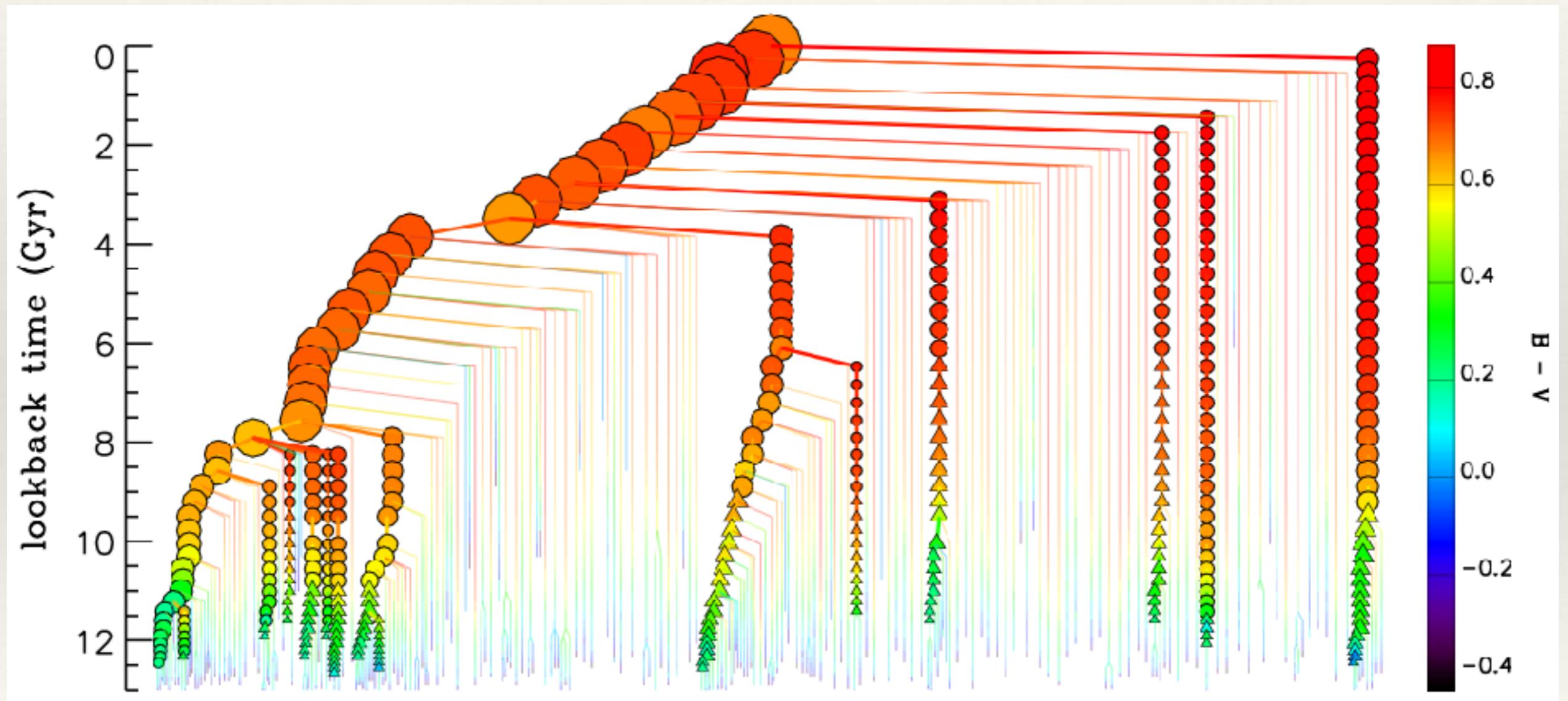


Image: Hubble telescope



ГВ источники: массивные черные дыры

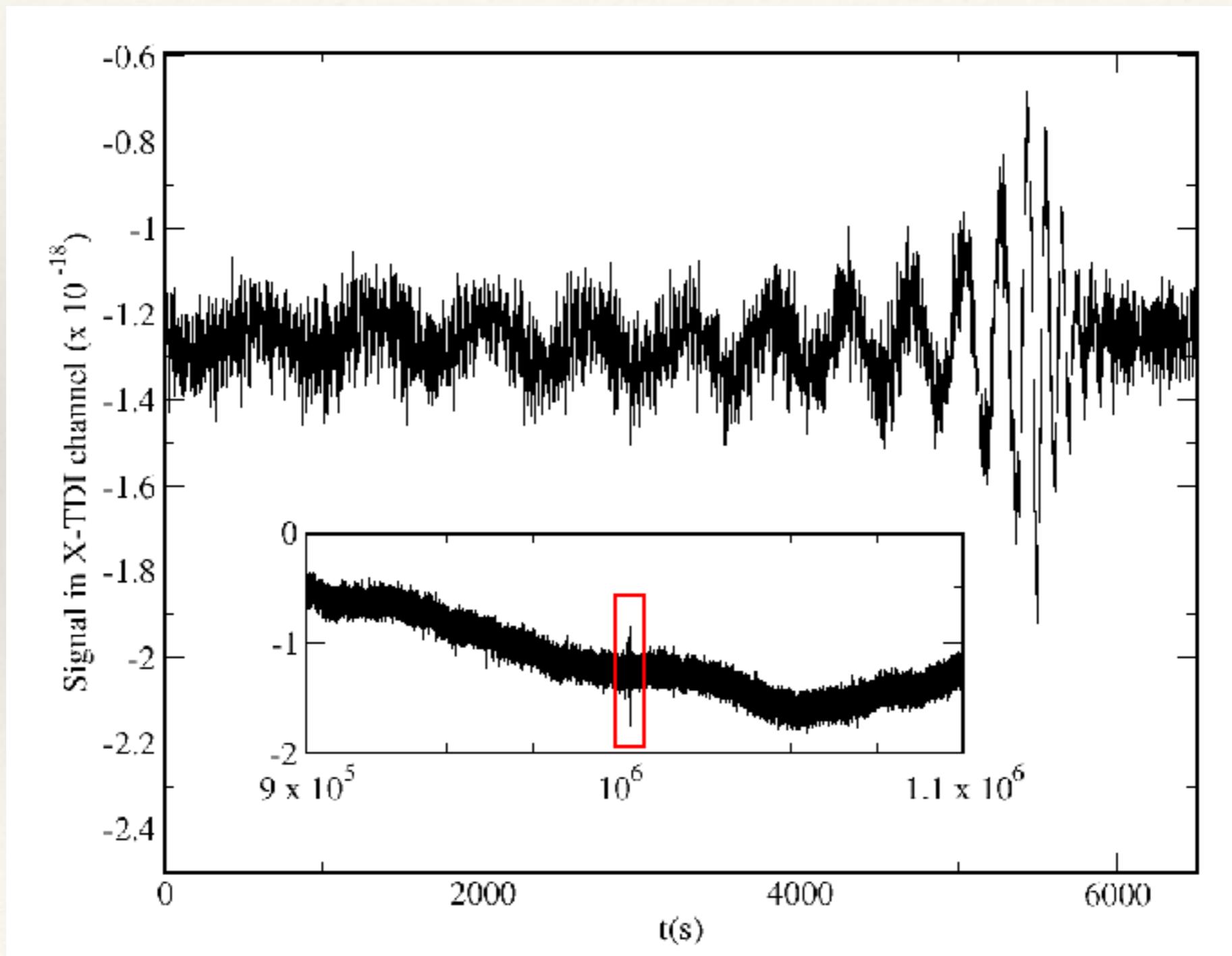
Массивные черные дыры образовались из первоначальных черных дыр (масса: пара сотен - пара десятков тысяч солнечных масс) путем акреции газа и слияния



Credits: Gabriella De Lucia

ГВ сигналы от двойных сливающихся массивных черных дыр

Моделированные LISA данные: шум и сигнал от сливающихся массивных черных дыр: Сигнал виден глазом

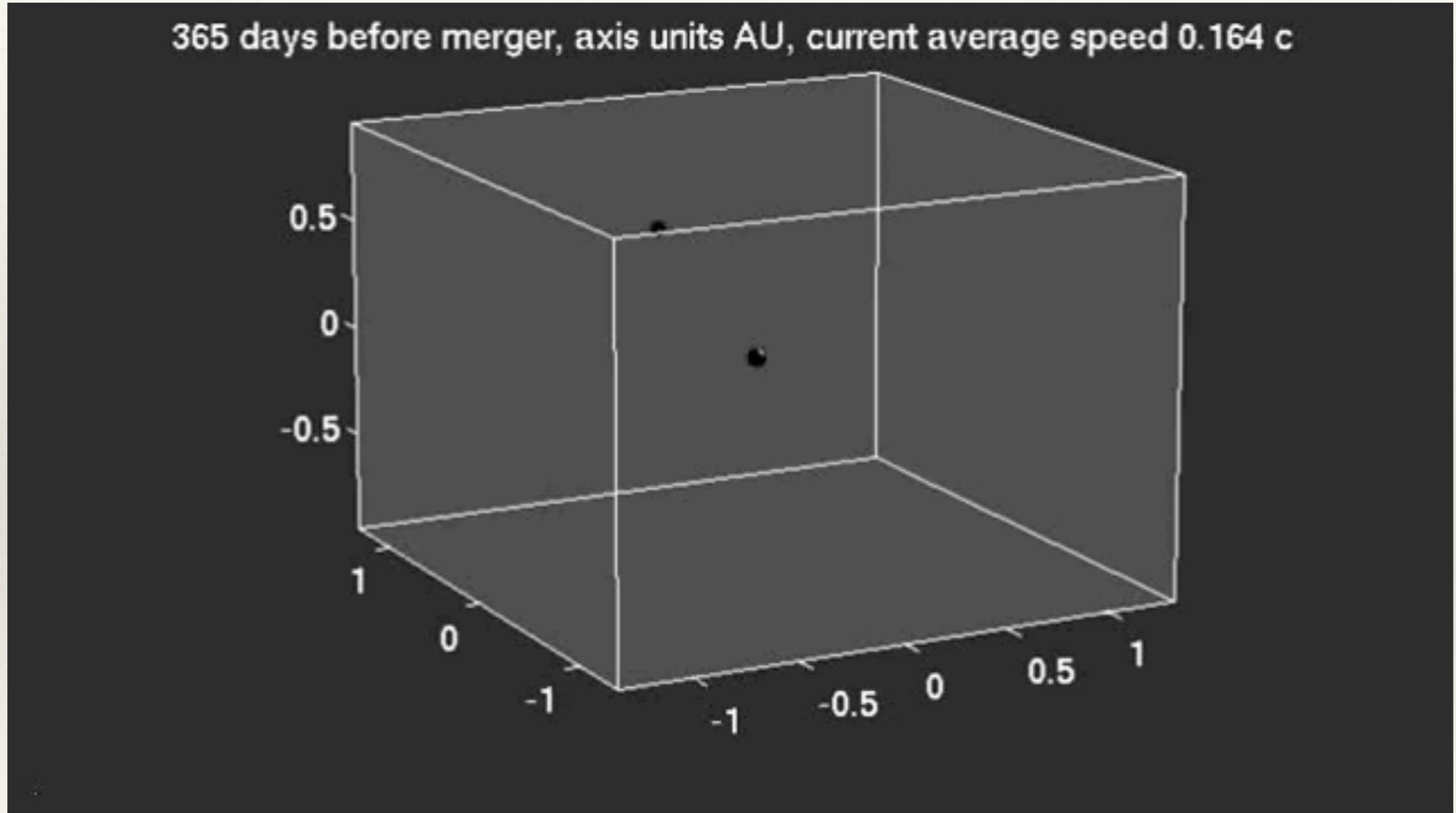


EMRIs (extreme mass ratio inspirals)

- Массивные черные дыры окружены звездами и газом с довольно высокой плотностью
- Массивная черная дыра может захватить компактный объект (черная дыра, нейтронная звезда) на очень эксцентричной орбите которая сжимается из-за гравитационного излучения
- EMRI: Двойная система с экстремальным соотношением масс: 10^{-7} - 10^{-5}
- Компактный объект совершает 10^6 орбит вблизи массивной черной дыры перед тем как упасть (нырнуть)



EMRI

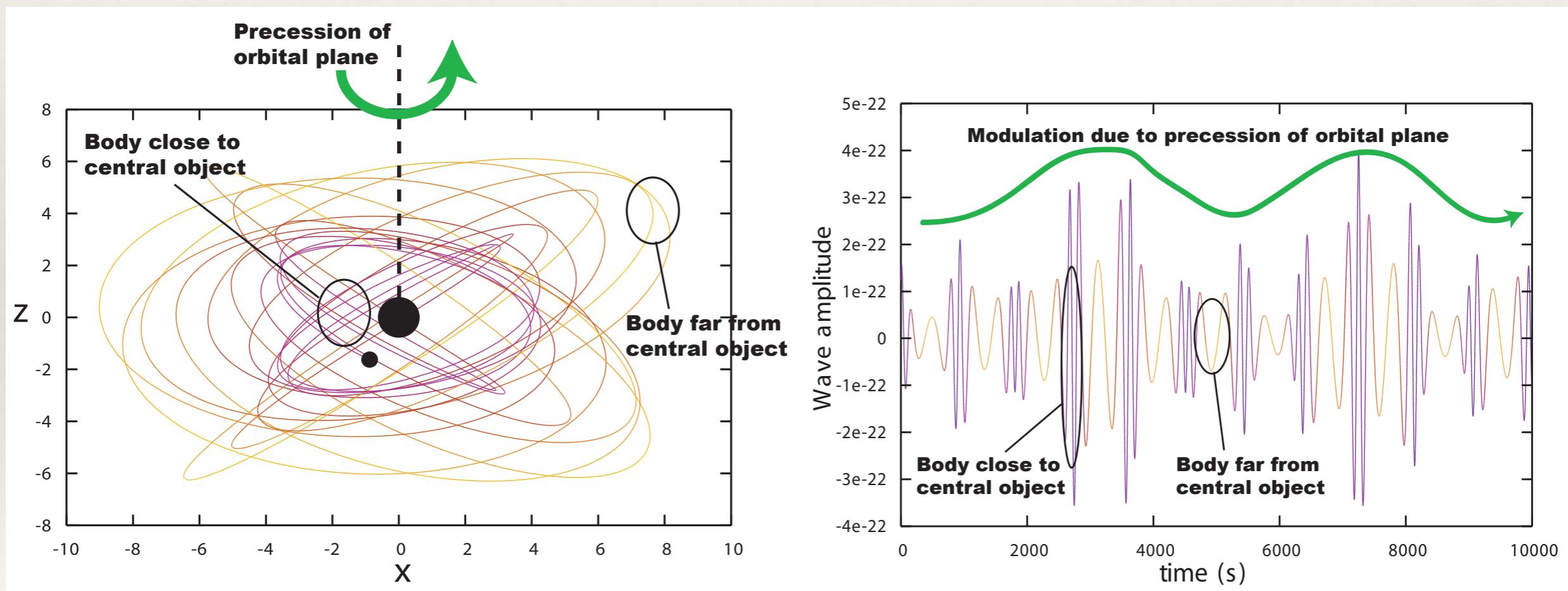


Credits: S Draco, CalTech



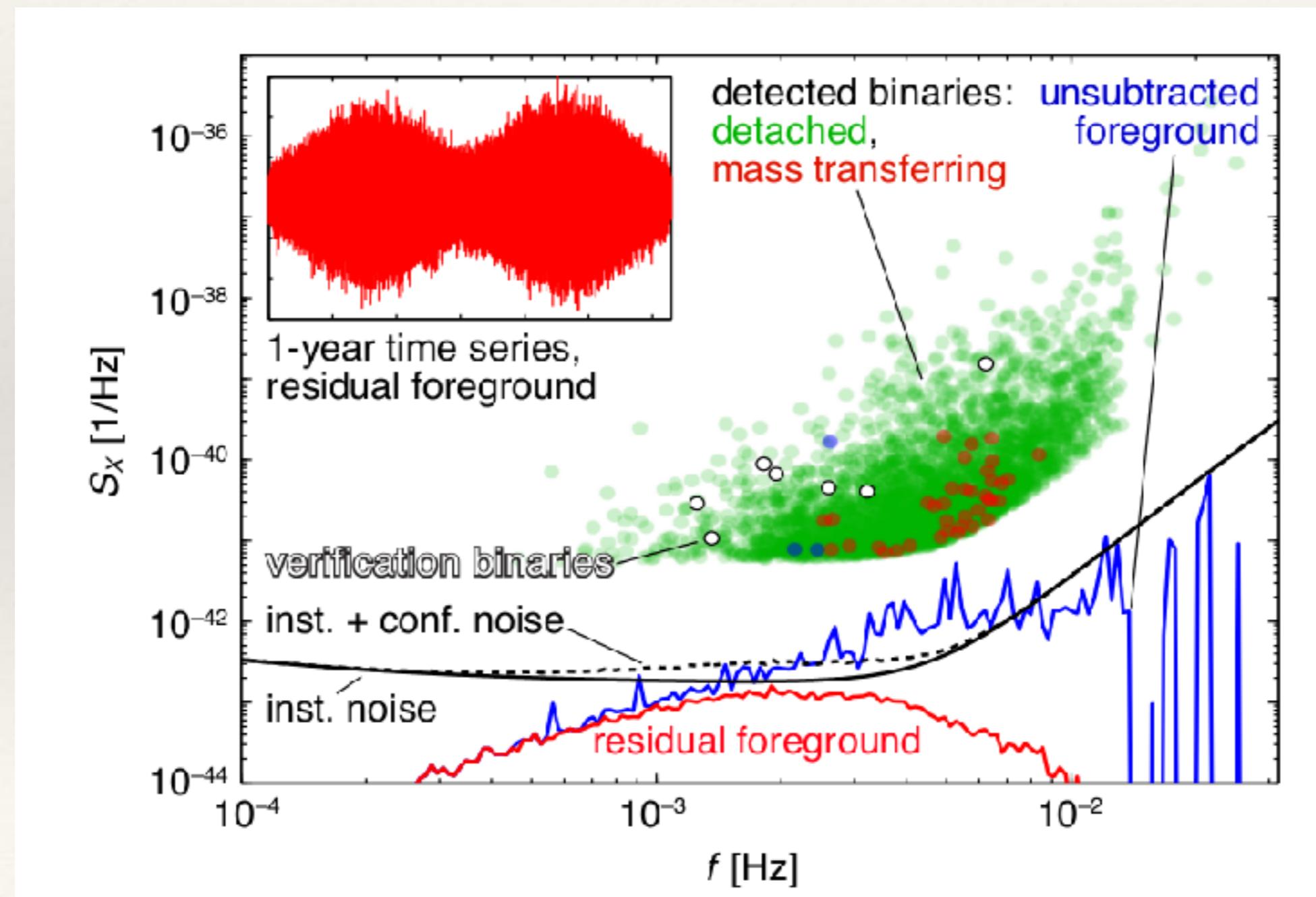
EMRI

- Орбитальное движение: (почти) эллипс с сильной прецессией периапса + прецессия орбитальной плоскости.
- Сигнал богат структурой (трудно выделить из шума)
- Очень точное определение параметров (+ holiodesy)



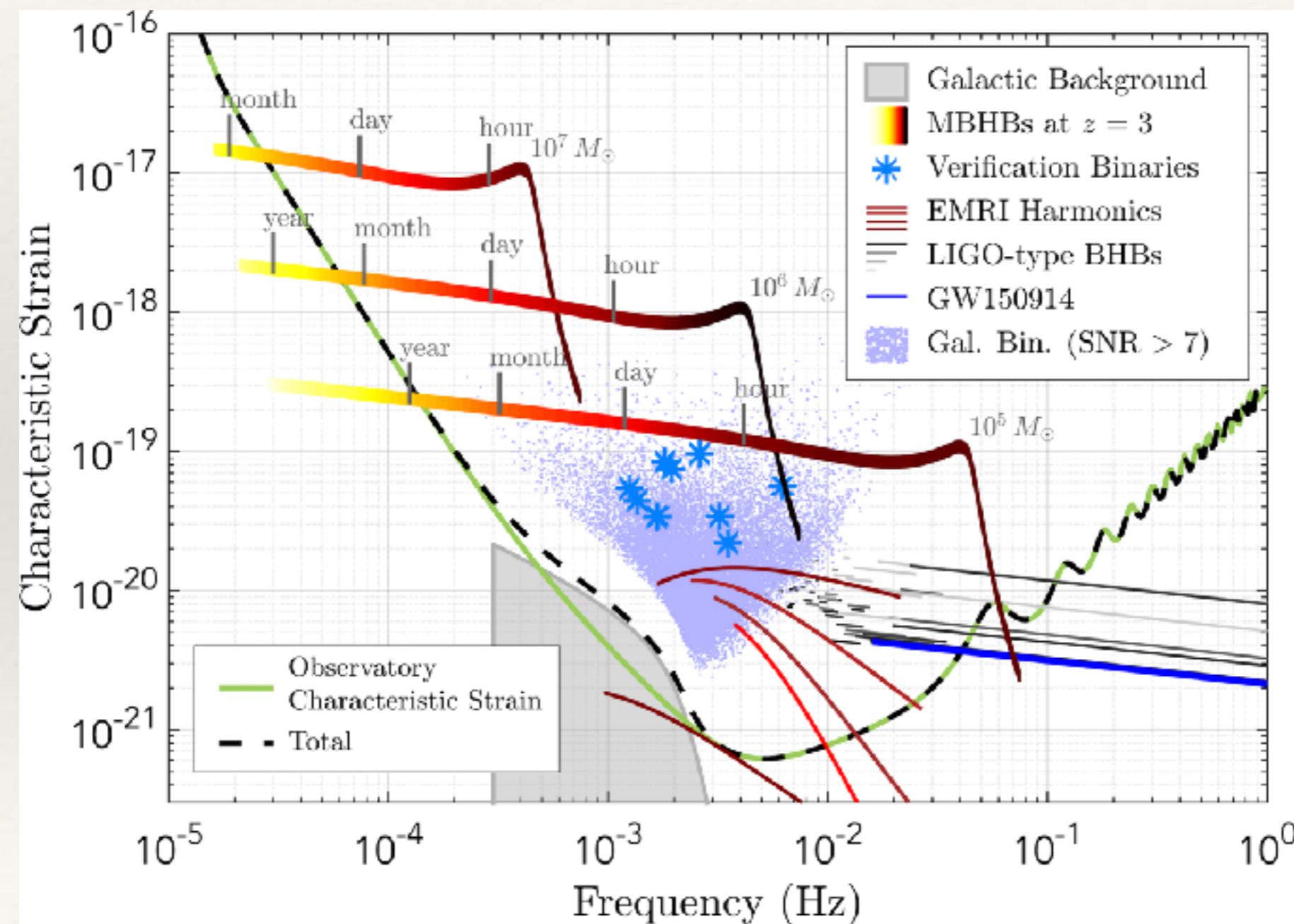
Двойные белые карлики в нашей Галактике

- От наблюдаем 10^7 двойных белых карликов, только 10^4 индивидуально различимы, остальные формируют стохастический (шум) сигнал
- ГВ сигнал почти монохроматичен
- Проверочные (verification) двойные (GAIA, LSST)



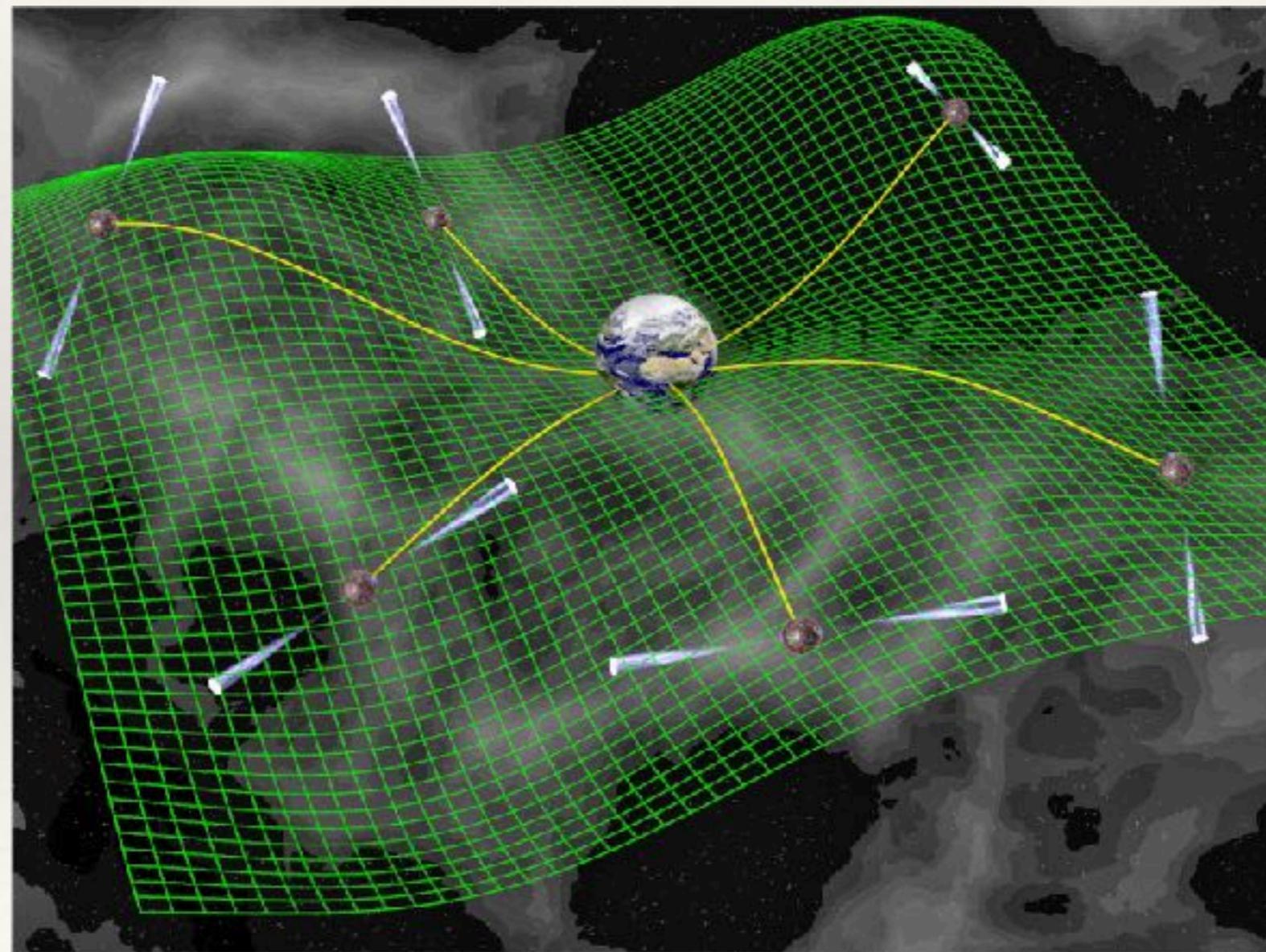
LISA данные

Мы ожидаем что анализ LISA данных очень тяжелый: LISA data challenge: <https://lisa-ldc.lal.in2p3.fr/home> моделирование ожидаемых данных, разработка методов анализа



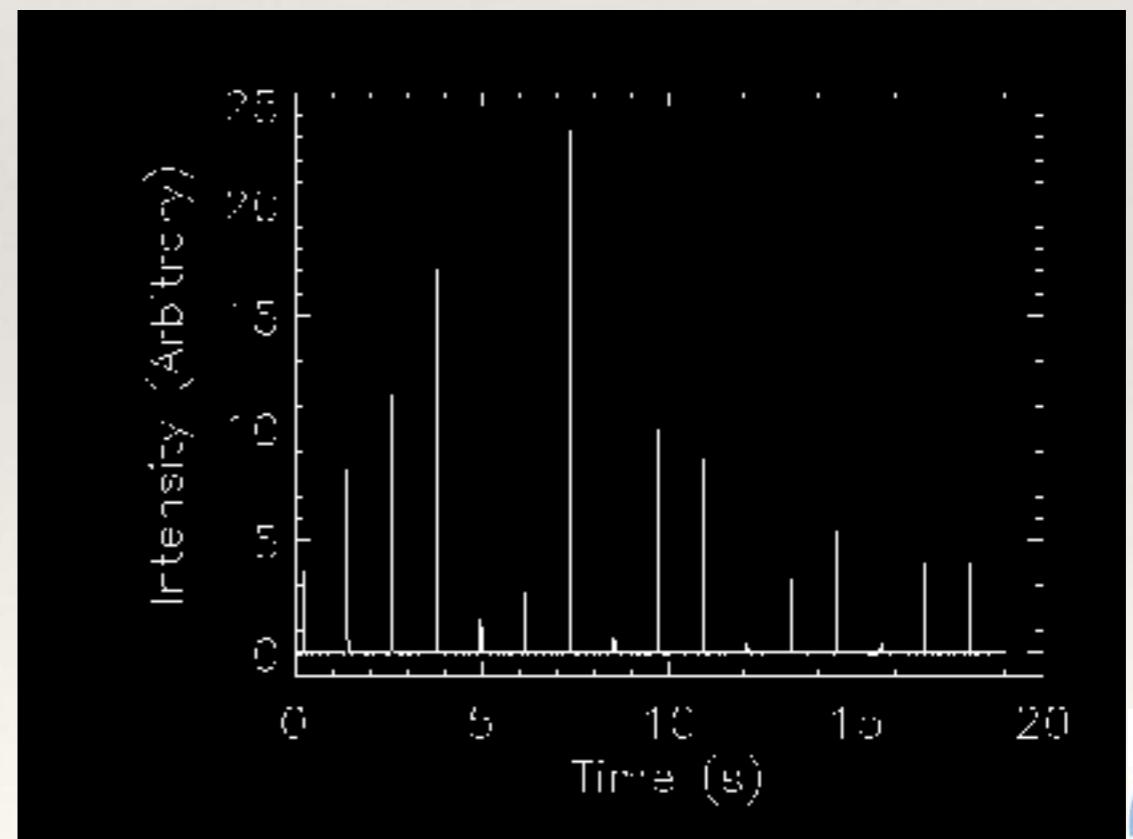
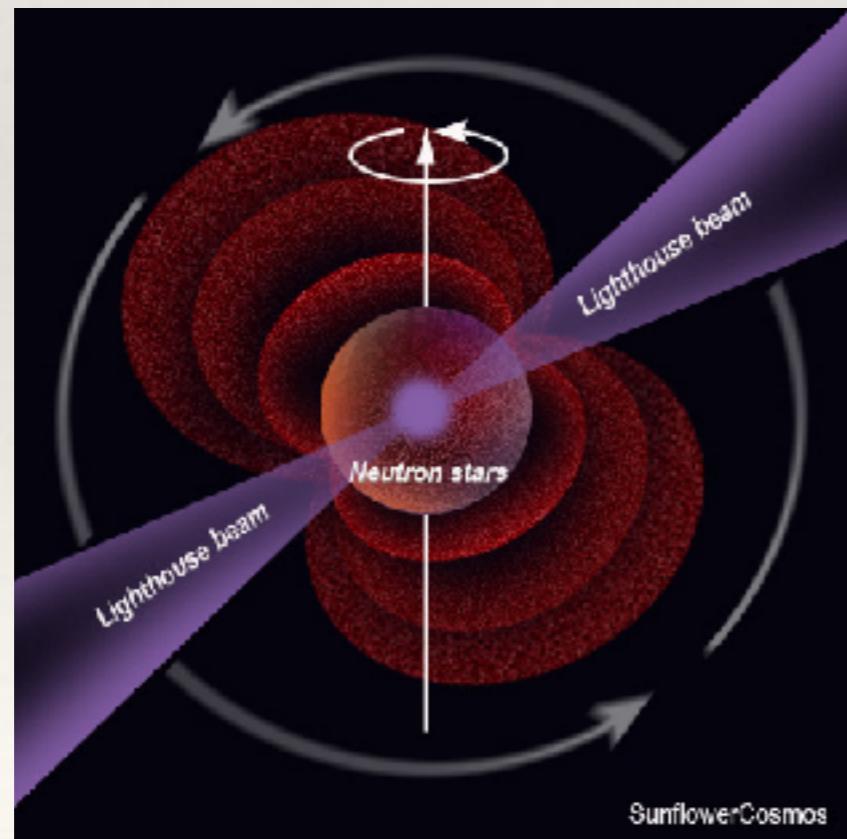
Pulsar Timing Array: PTA

Основная идея: мы используем миллисекундные пульсары как сверхточные часы (распространение “тик” и “так” в поле ГВ) для детектирование ГВ в частотном диапазоне $10^{-9} - 10^{-7}$ Hz

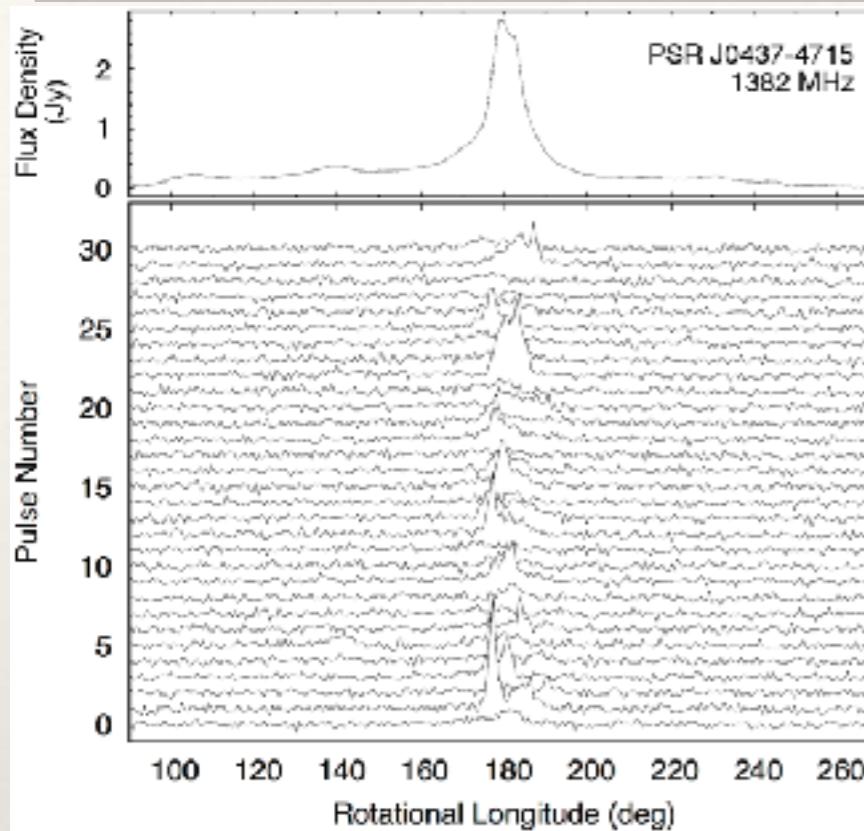


Миллисекундные пульсары

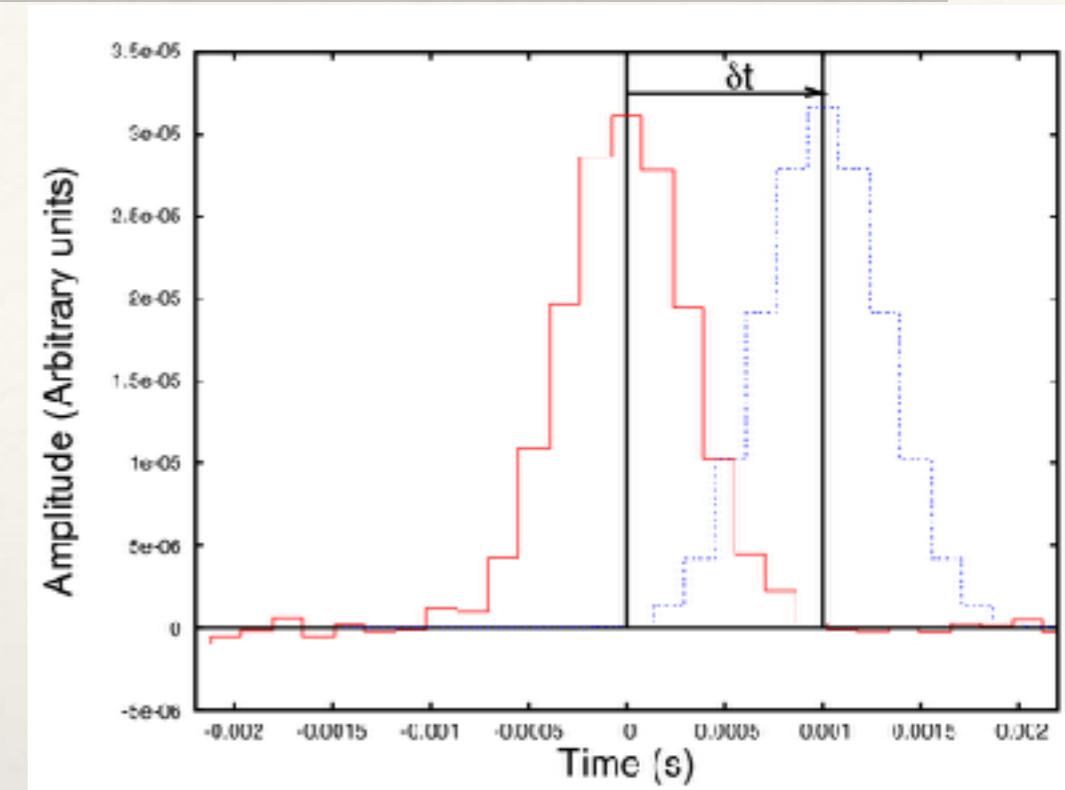
Пульсары: нейтронные звезды с быстрым вращением и сильным магнитным полем. Мы используем пульсары с миллисекундным периодом вращения (стабильные ротаторы)



Пульсарный тайминг



Figs: credits
S. Burke-Spolar & L. Lentati



- Каждый радио импульс содержит микроструктуру но стабилен после усреднения (около часа)
- Используем усредненный профиль что бы оценить время детектирования радио импульса (ТОА)
- Можем предсказать ожидаемое время прибытия импульсов и вычесть его время из измеренного времени прибытия: остаточные уклонения



Остаточные уклонения

Модель расчета времени прибытия импульса зависит от многих параметров

$$t_{toa} = t_{toa}(P, \dot{P}, \ddot{P}, \Delta_{clock}, \Delta_{DM}(L), \Delta_{\odot-\oplus}, \Delta_E, \Delta_S)$$

P, \dot{P}, \ddot{P} Период вращения и производные

Δ_{clock} Разница во времени: радиотелескоп и земной временной стандарт

$\Delta_{DM}(L)$ Задержки вызванные распространением в межзвездной среде

$\Delta_{\odot-\oplus}$ Переращет времени к барицентру солнечной системы

Δ_E Допплер и гравитационное красное смещение

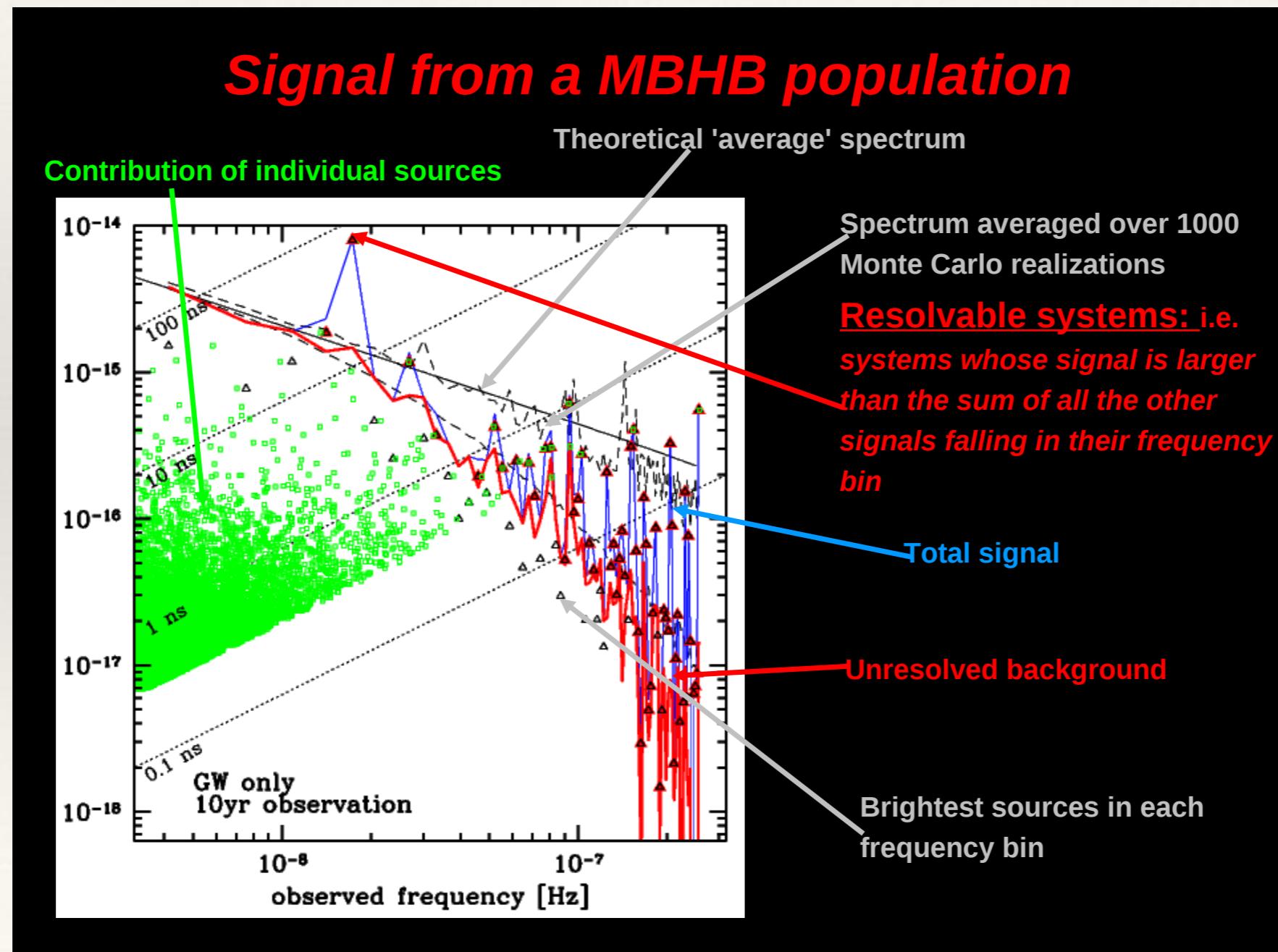
Δ_S Распространение импульса в искривленном пространстве

$$dt = t_{toa}^p - t_{toa}^o = dt_{errors} + \delta\tau_{GW} + noise$$



Супермассивные двойные черные дыры

- Основной источник ГВ в РТА: популяция двойных супермассивных (масса 10^7 – 10^{10} солн. масс) черных дыр на широких орбитах (период около года)
- Монохроматический ГВ сигнал от каждой системы: суперпозиция образует стохастический сигнал на низких частотах



Корреляция

Стохастический ГВ сигнал выглядит как шум с корреляцией определенной кривой Hellings-Downs: коэффициент корреляции зависит от углового расстояния между пульсарами

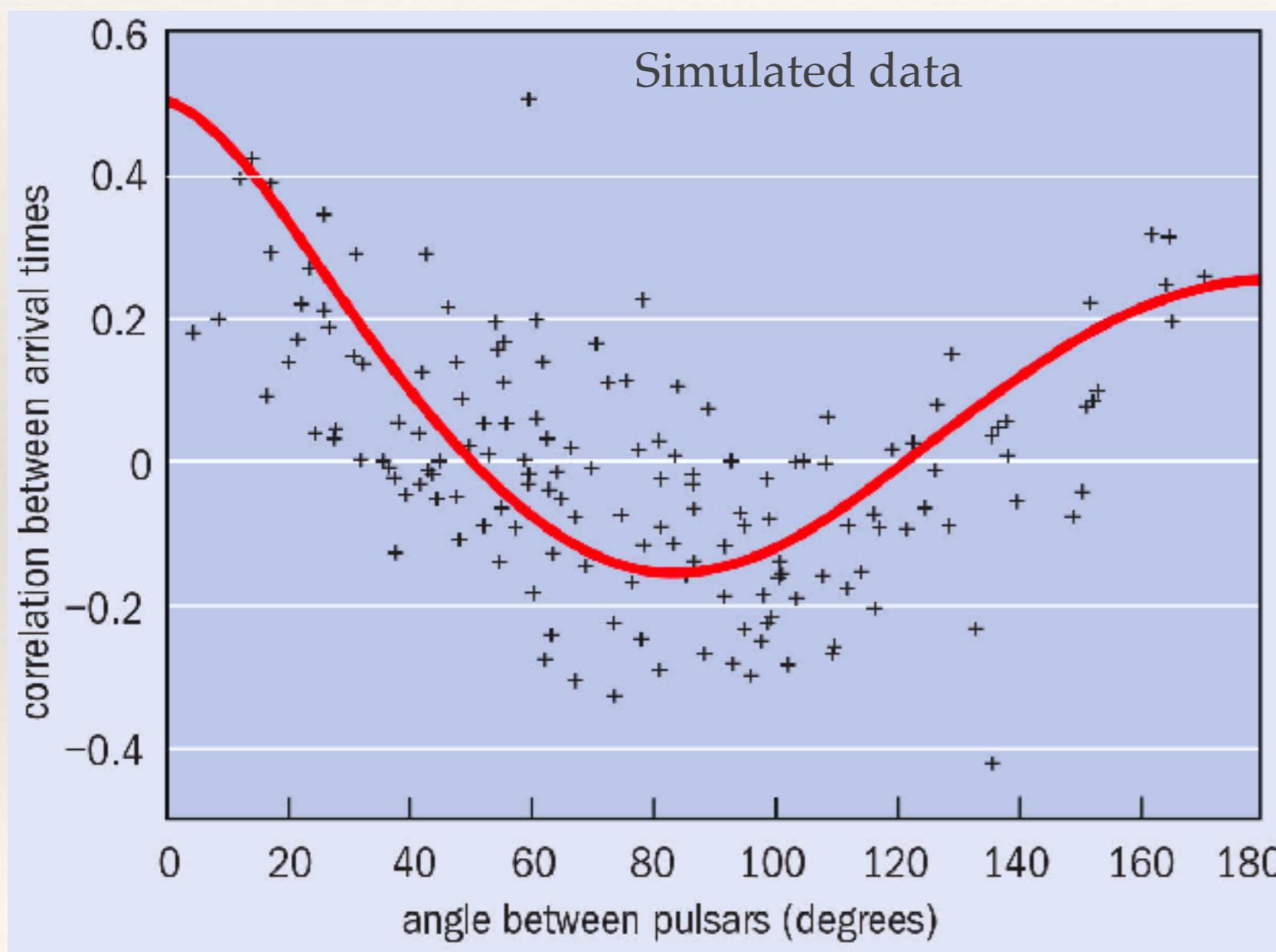
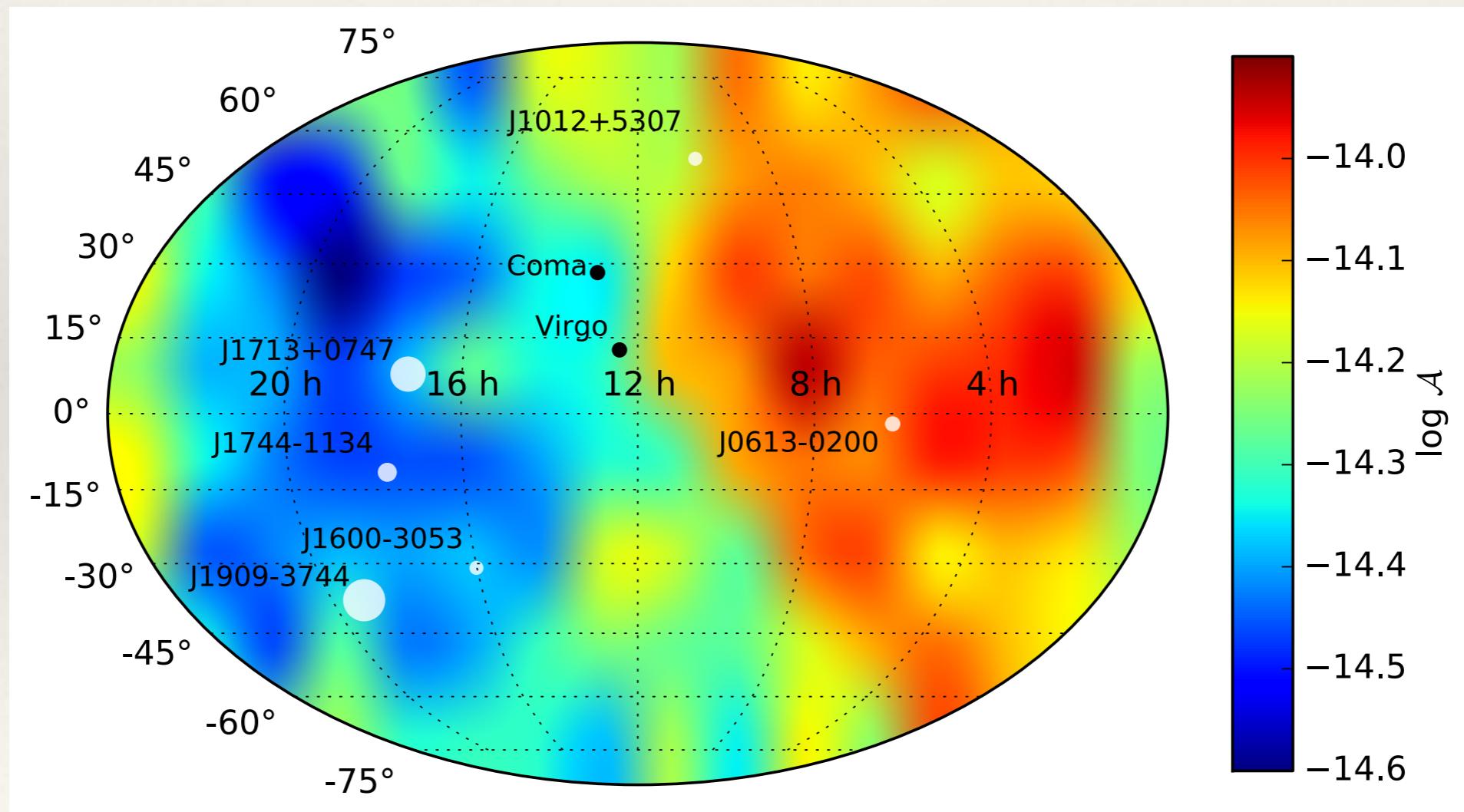


Fig. from IOP, Physics World

Верхний предел на ГВ в РТА

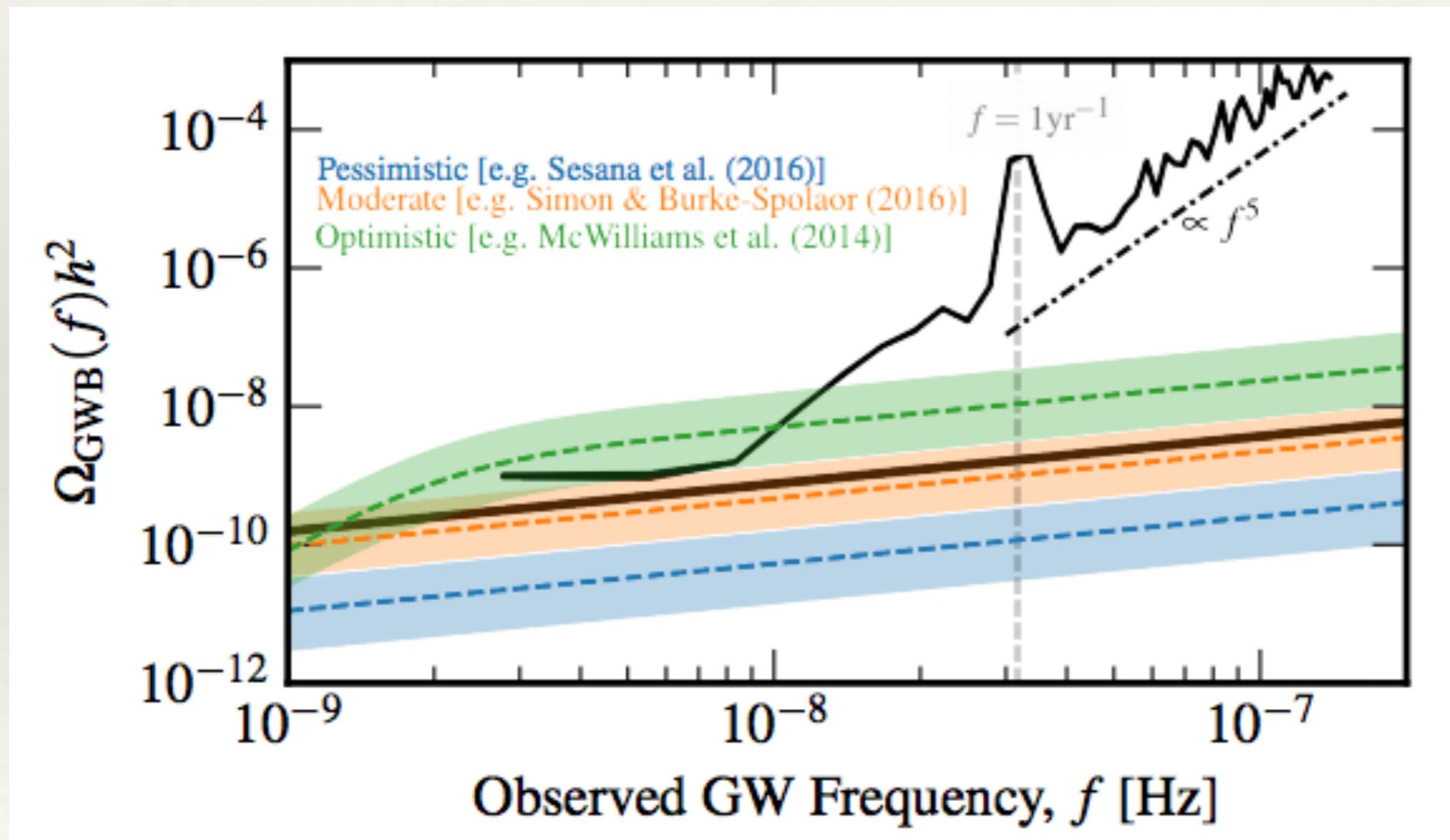
- ГВ волны в РТА еще не обнаружены: ГВ слабые и нужно долгое время наблюдений (интегрирование сигнала из шума): десятки лет. Больше “хороших” пульсаров.
- Можем установить верхний предел на величину ГВ сигналов (стохастический сигнал и сигнал от индивидуальных двойных систем



[Babak+ MNRAS (2015), EPTA]

Верхний предел на ГВ в РТА

Полученные данные уже позволяют закрыть некоторые оптимистичные астрофизические модели



Заключение

- Гравитационные волны от сливающихся черных дыр и нейтронных звезд отdetектированы LIGO & Virgo (2015-2017): Нобелевская премия Кип Торн, Рей Вайс, Барри Бариш.
- LIGO и Virgo работают над улучшением чувствительности: последующие наблюдения: формирование двойных систем, черная дыра - нейтронная звезда, проверка ОТО, другие источники (?)
- LISA входит в фазу А (сейчас), ведущая роль Европейского космического агентства в партнерстве с НАСА
- LISA позволит от наблюдать тысячи источников в мили-Герцовом диапазоне и определить параметры источников с огромной точностью.
- РТА неизбежное детектирование ГВ от популяции супер массивных двойных черных дыр (Fast, SKA) на нано-Герцовых частотах



Заключение

Я гостевой ученый лаборатории “фундаментальных и прикладных исследований релятивистских объектов Вселенной”: <https://rellab.mipt.ru/>

Помимо этой лекции я прочитаю интенсивный курс лекций:
«Введение в гравитационно-волновую астрономию».

06 апреля — в 18:30 в 521 ГК

7, 13, 14, 20, 21, 27 и 28 апреля — в 18:30 в 110 КПМ

- Краткий обзор ОТО, слабые гравитационные волны и их основные характеристики.
- Механизмы излучения гравитационных волн и основы моделирования сигнала от сливающихся двойных систем.
- Основные источники гравитационных волн и базовые методы их детектирования в трёх частотных диапазонах: LIGO-VIRGO, LISA и РТА.

Приглашаются все желающие

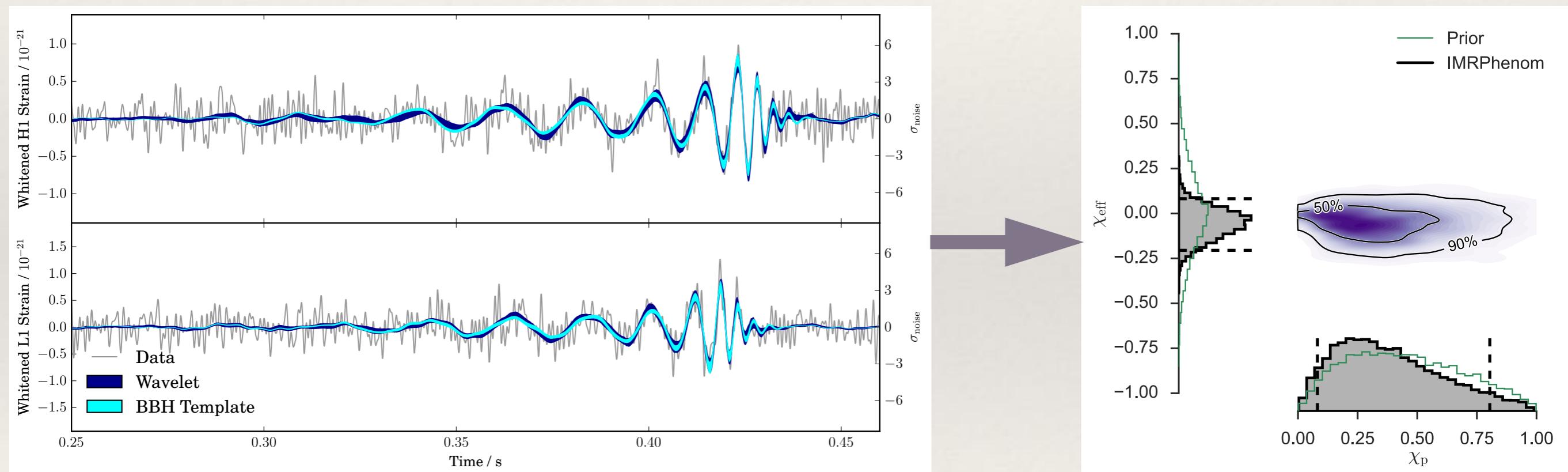


Оценка параметров (Байесовский подход)

$$p(\theta|d) = \frac{p(d|\theta)p(\theta)}{p(d)}$$

Diagram illustrating the Bayesian formula for parameter estimation:

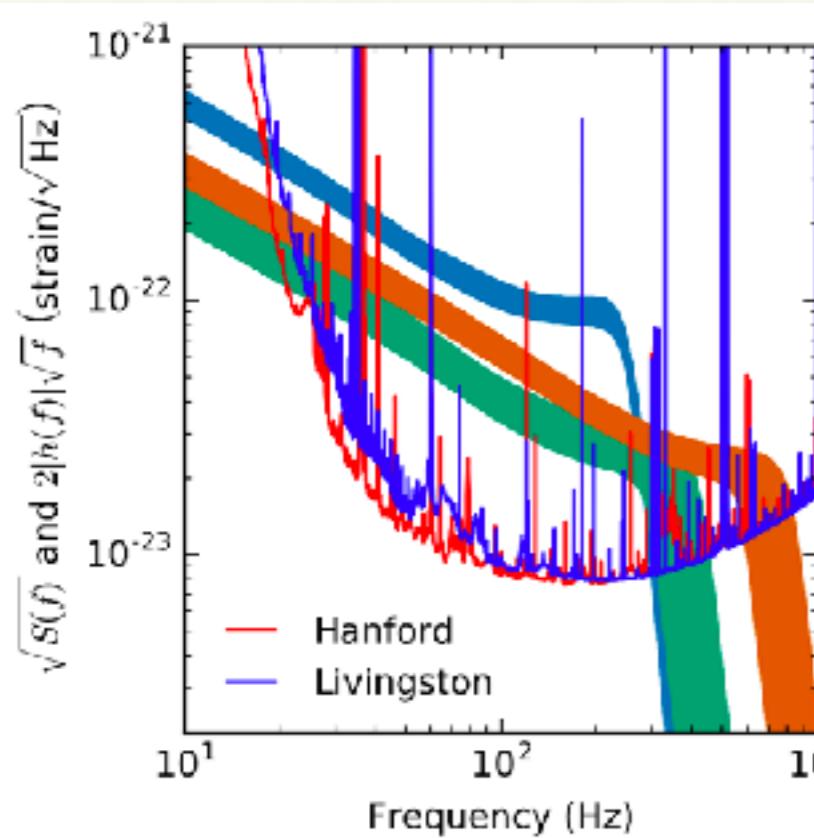
- Likelihood: $p(d|\theta)$ (circled in green)
- Prior: $p(\theta)$ (circled in blue)
- Posterior: $p(\theta|d)$ (circled in red)
- Evidence: $p(d)$ (represented by a black arrow pointing to the denominator)



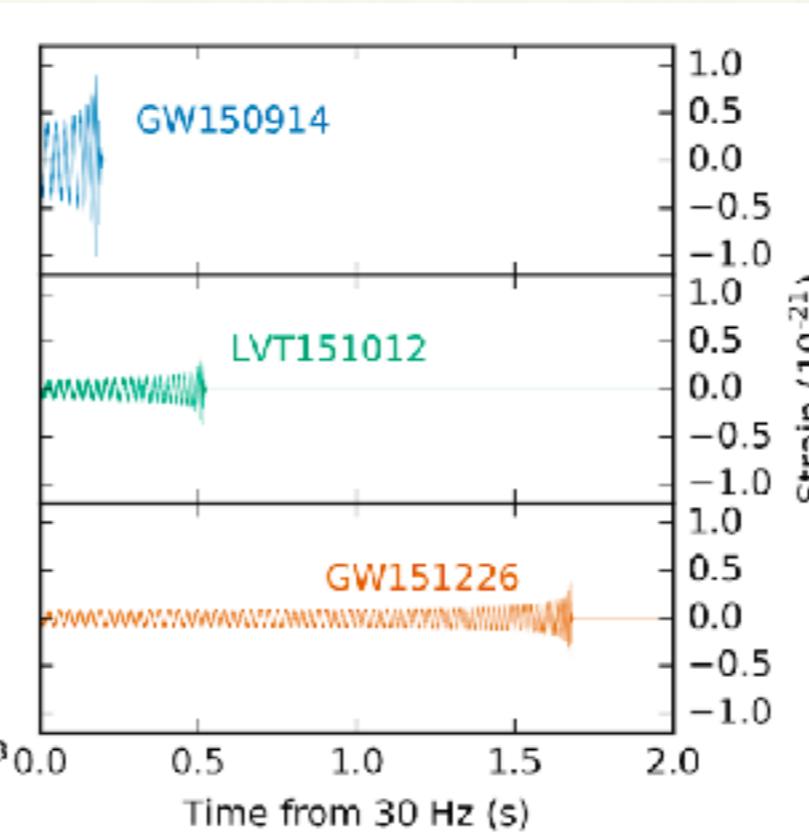
[GW150914, LSC+VIRGO PRL (2016)]



Оценка параметров: масса черных дыр



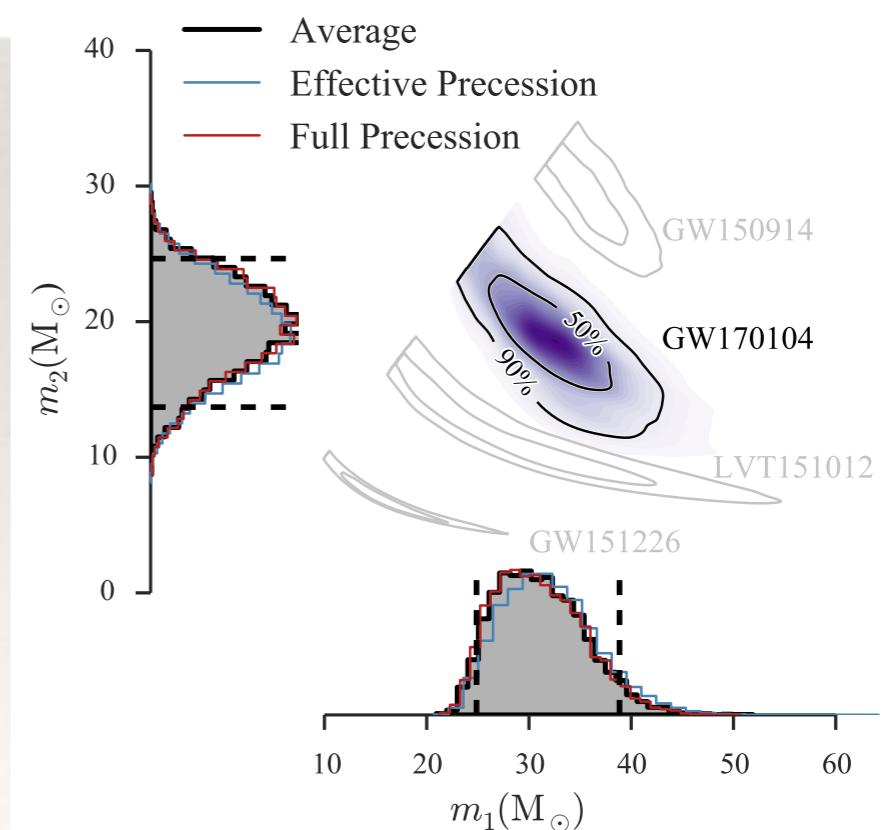
Сигнал в частотном
диапазоне

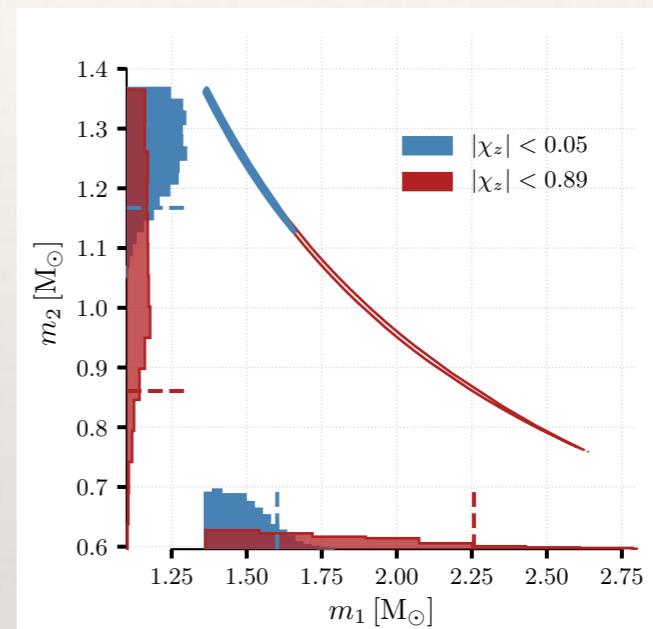
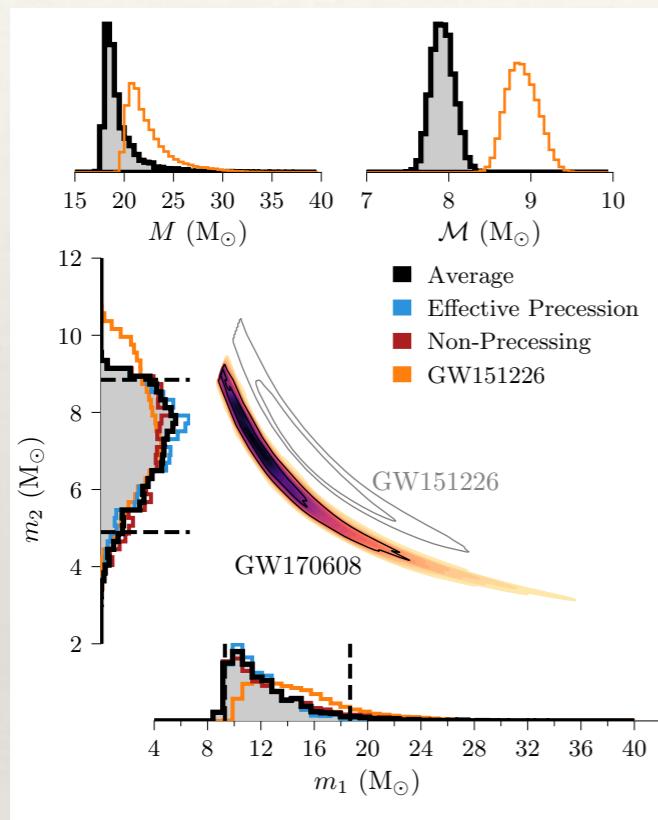


Сигнал во временном
диапазоне

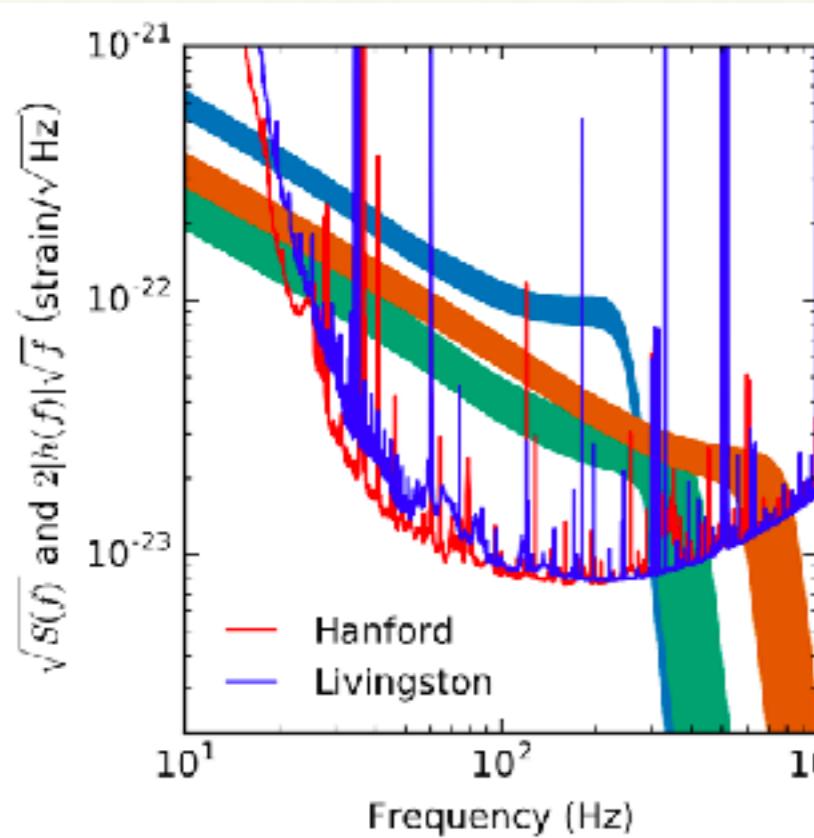
Chip mass (inspiral)

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

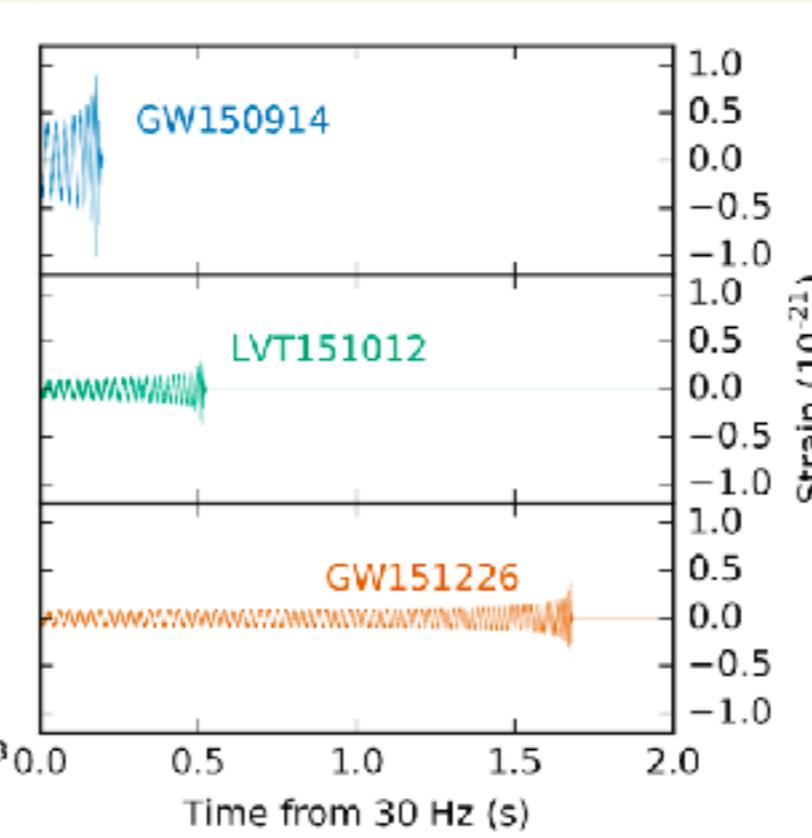




Оценка параметров: масса черных дыр



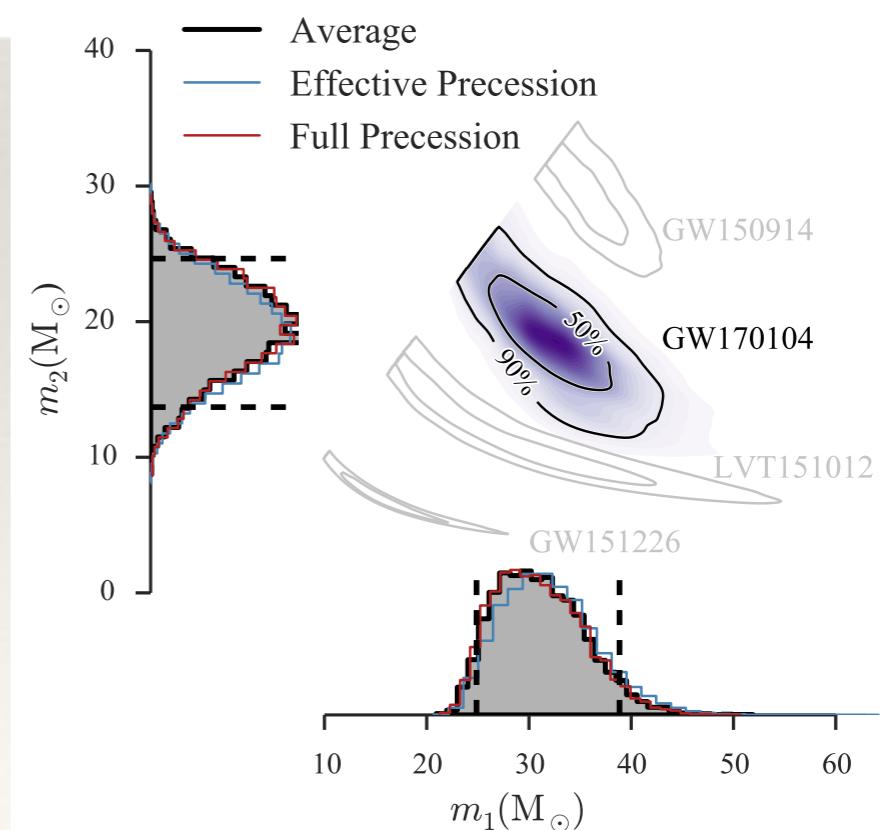
Сигнал в частотном
диапазоне



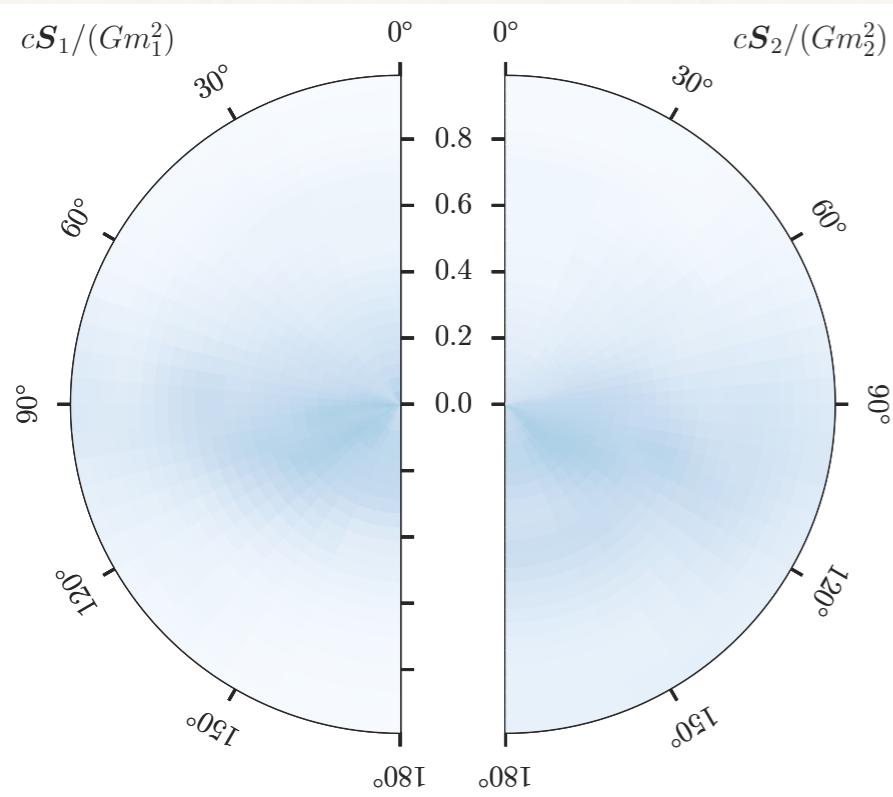
Сигнал во временном
диапазоне

Chip mass (inspiral)

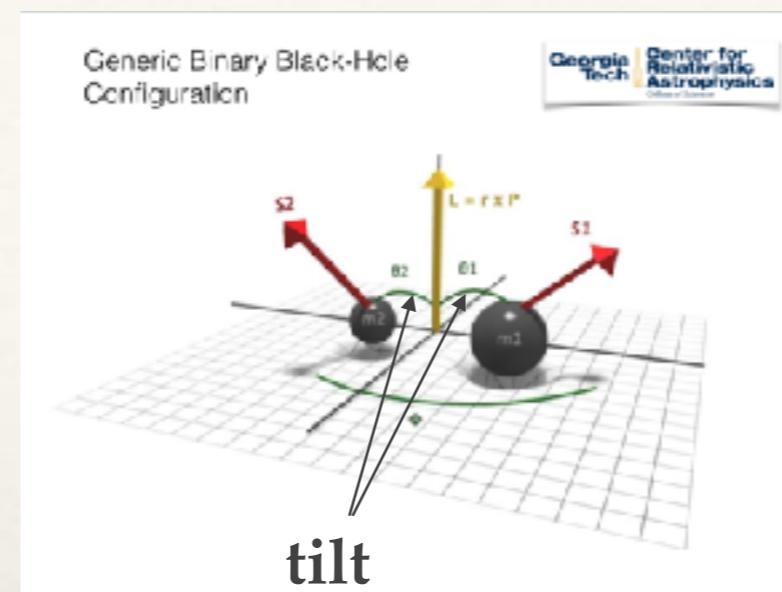
$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$



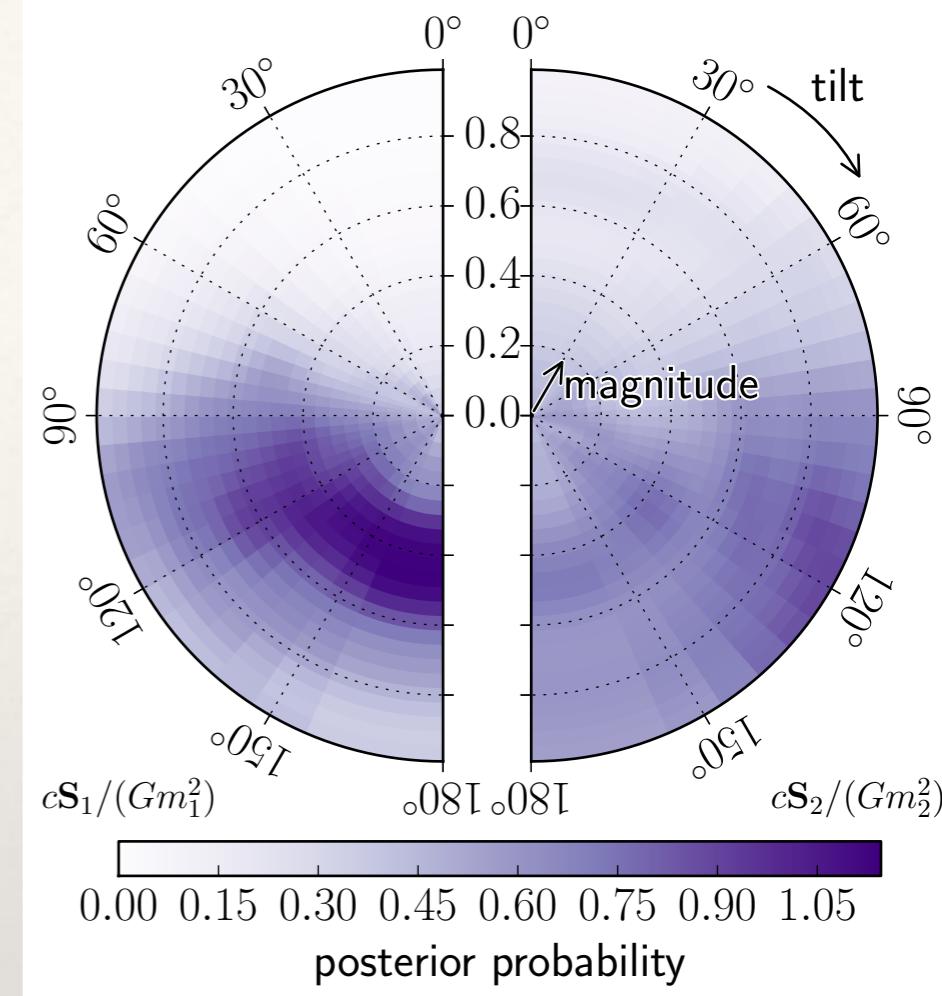
Вращение черных дыр (spins)



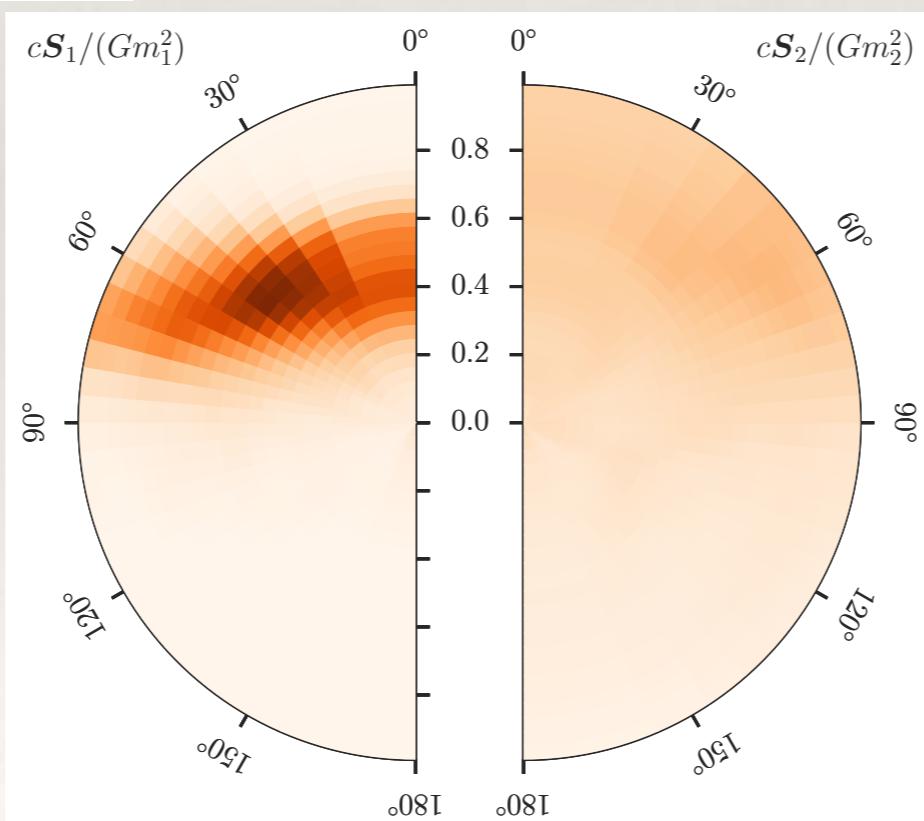
GW150914



GW151226

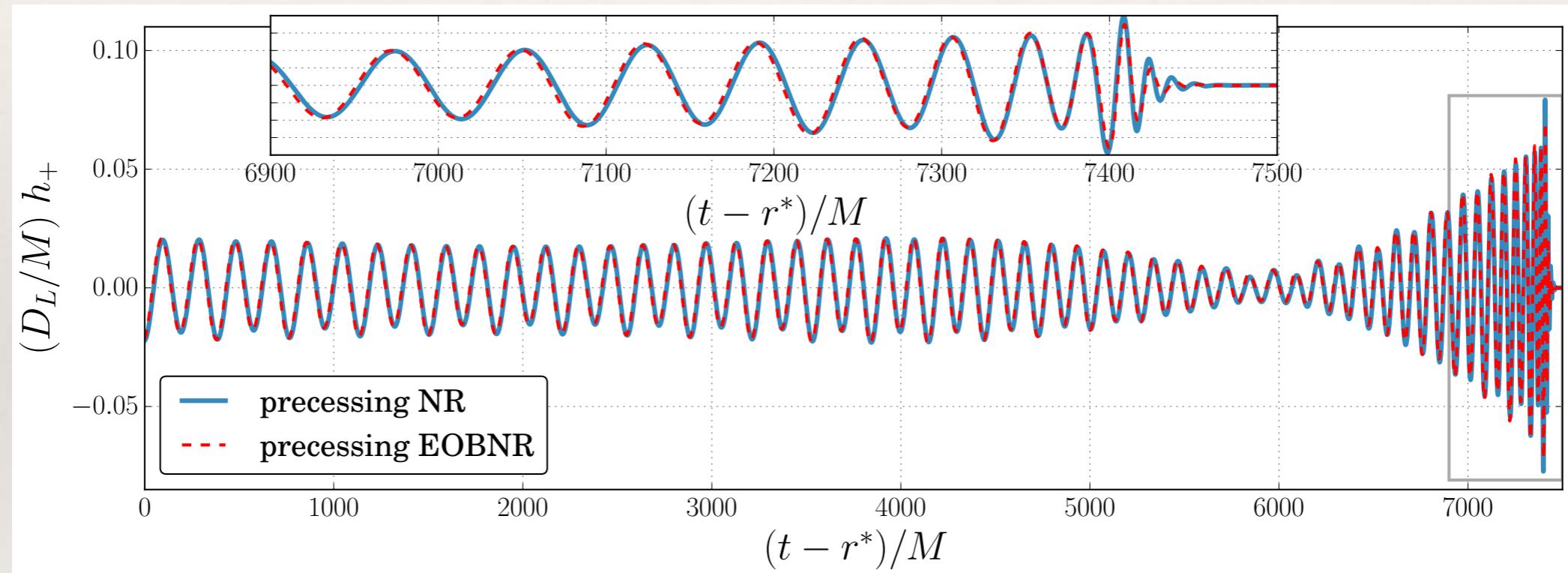


GW170104



Моделирование ГВ сигнала

- Описание слияния (merger) требует численных расчетов, которые могут быть использованы для продолжения / расширения (полу) аналитических методов



[Babak+ PRD (2016)]



Ожидаемое количество сигналов в данных LISA

- Двойные массивные черные дыры: оценочно несколько — несколько сотен в год
- EMRIs: несколько сигналов — несколько тысяч сигналов в год
- ГВ сигнал от двойных черных дыр (с около-солнечной массой): несколько десятков сигналов которые увидят в LIGO+ через 5-10 лет.
- Возможно детектирование ГВ от ранней вселенной: стохастический ГВ сигнал.

