

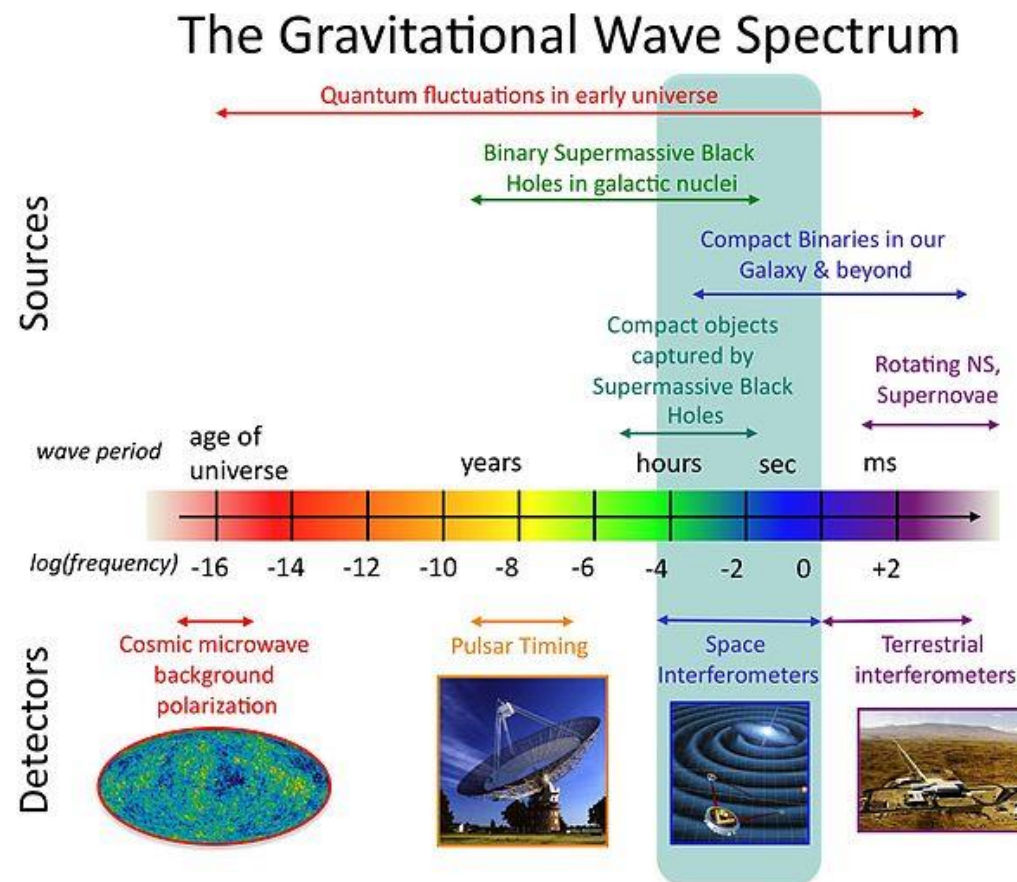
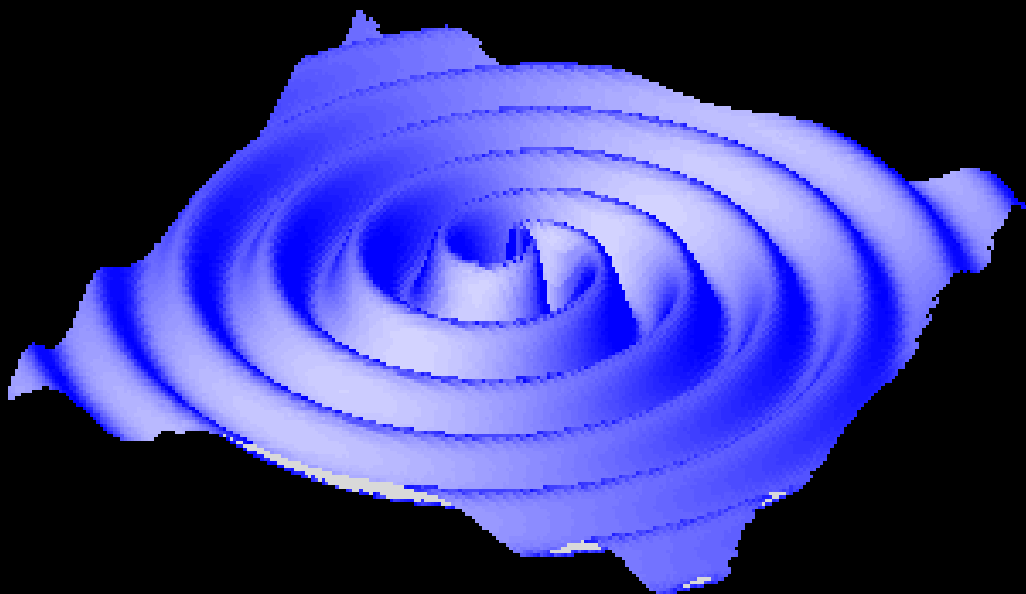
# Регистрация гравитационных волн

# История изучения гравволн

- Ранние работы (до ОТО). Хевисайд (1893), Лоренц (1900), Пуанкаре (1905, 1908), Абрахам (1912).
- ОТО. Эйнштейн (1916). Квадрупольная формула. Критика. Ответ (1918).
- Эйнштейн, Розен (1936-37). Неопределенность с излучением волн двойными системами.
- Пирани, Фейнман, Бонди (1956-57). Гравволны могут переносить энергию.
- Вебер (1965). Первые детекторы.
- Пустовойт, Герценштейн (1962), Вайсс (1972). Идея детекторов на основе лазерных интерферометров.
- Начало финансирования LIGO (1988). До этого – прототип (40 метров).
- Начало строительства первого крупного детектора GEO600 (1995). VIRGO (1996).
- Начало наблюдений на LIGO (2002).

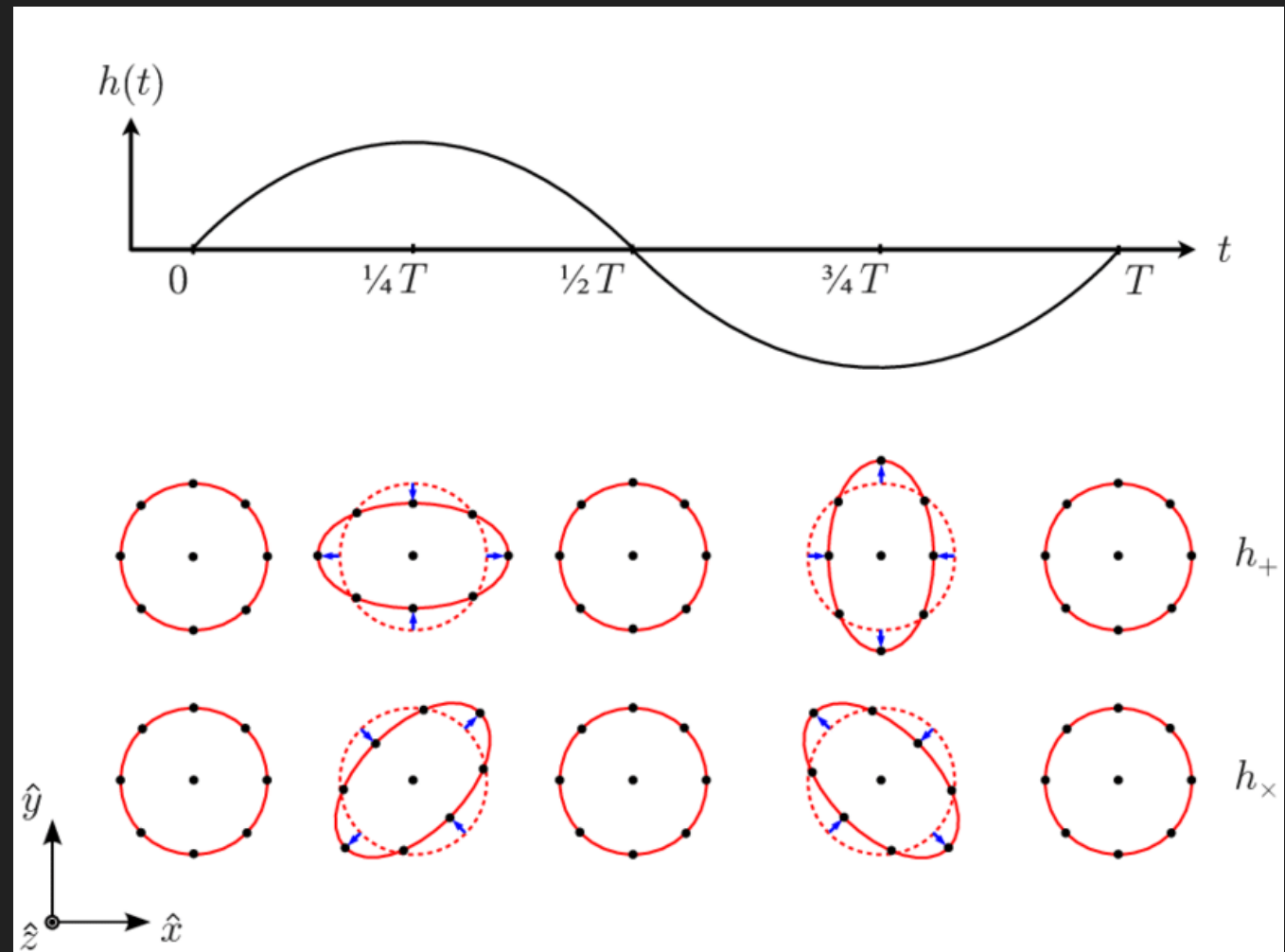
# Спектр гравитационных волн

- Космология
- Пары сверхмассивных черных дыр
- Пары черных дыр звездных масс и нейтронные звезды
- Сверхновые, вращающиеся НЗ, etc.



# Влияние гравитационной волны

Действие гравитационной волны  
аналогично эффекту приливов.



# Методы регистрации



## Прямые методы:

- Твердотельные (бар) детекторы
- Наземные лазерные интерферометры
- Космические лазерные интерферометры

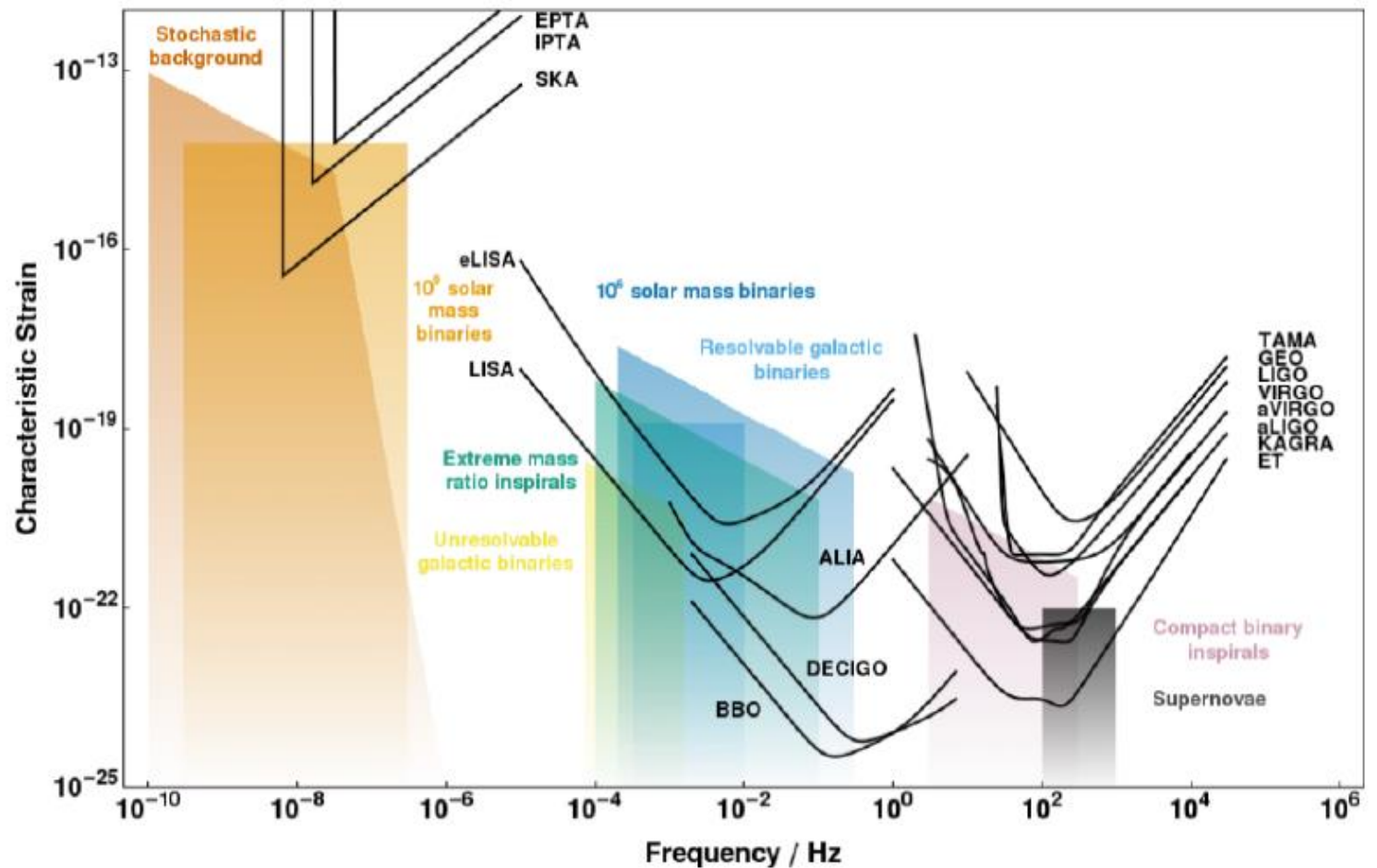


## Косвенные (астрономические) методы:

- Тайминг радиопульсаров
- Астрометрические наблюдения смещения положений звезд
- Наблюдения влияния гравитации на различные объекты
- Наблюдения поляризации реликта

# Разные методы в разных диапазонах

- Первичные гравволны – наблюдения поляризации реликтового излучения
- Длинные волны – пульсарные проекты
- Промежуточные длины – космические интерферометры
- Слияния двойных – наземные интерферометры





# Твердотельные (бар) детекторы

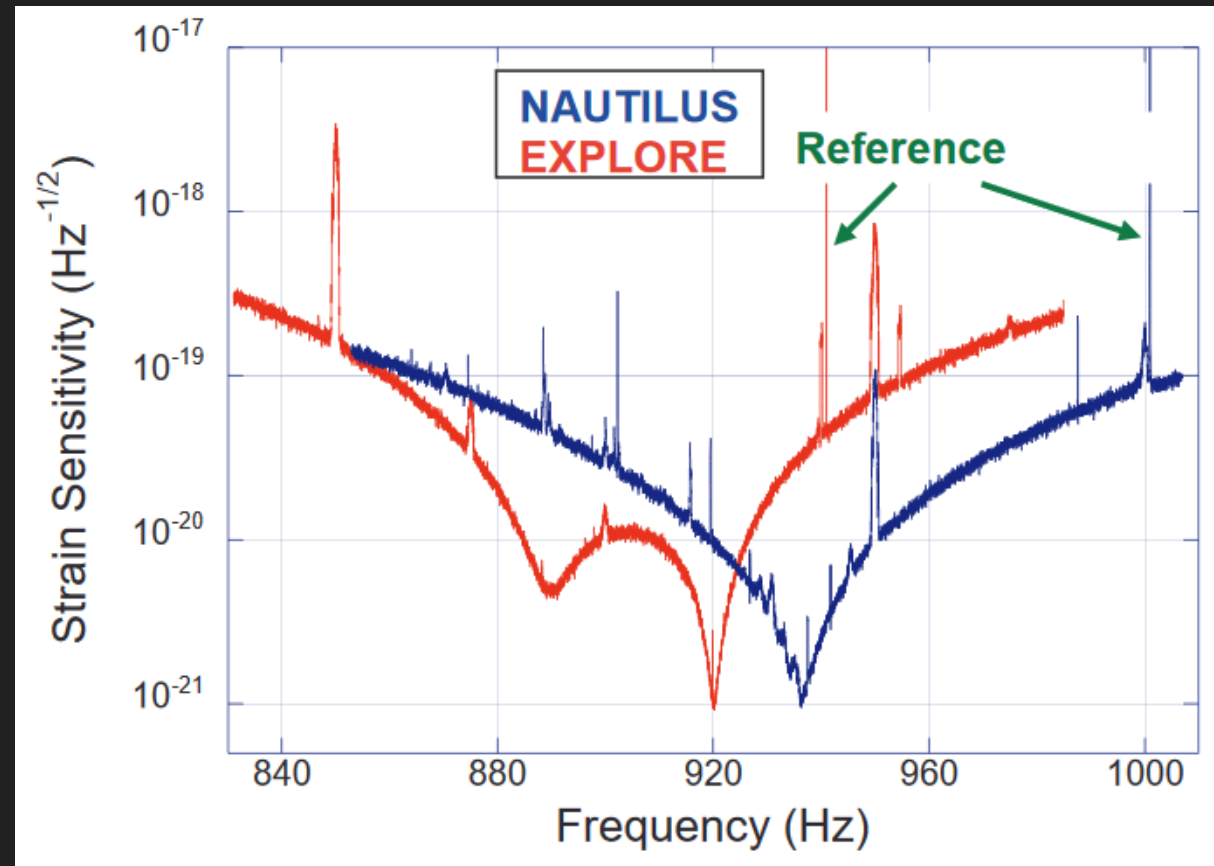
1009.1138

Вторая половина 60х – вторая половина 90х гг.  
От простых моделей до  
сети больших криогенных установок.

ALLEGRO (1991), AURIGA (1997), EXPLORER (1990),  
NAUTILUS (1995), NIOBE (1993)



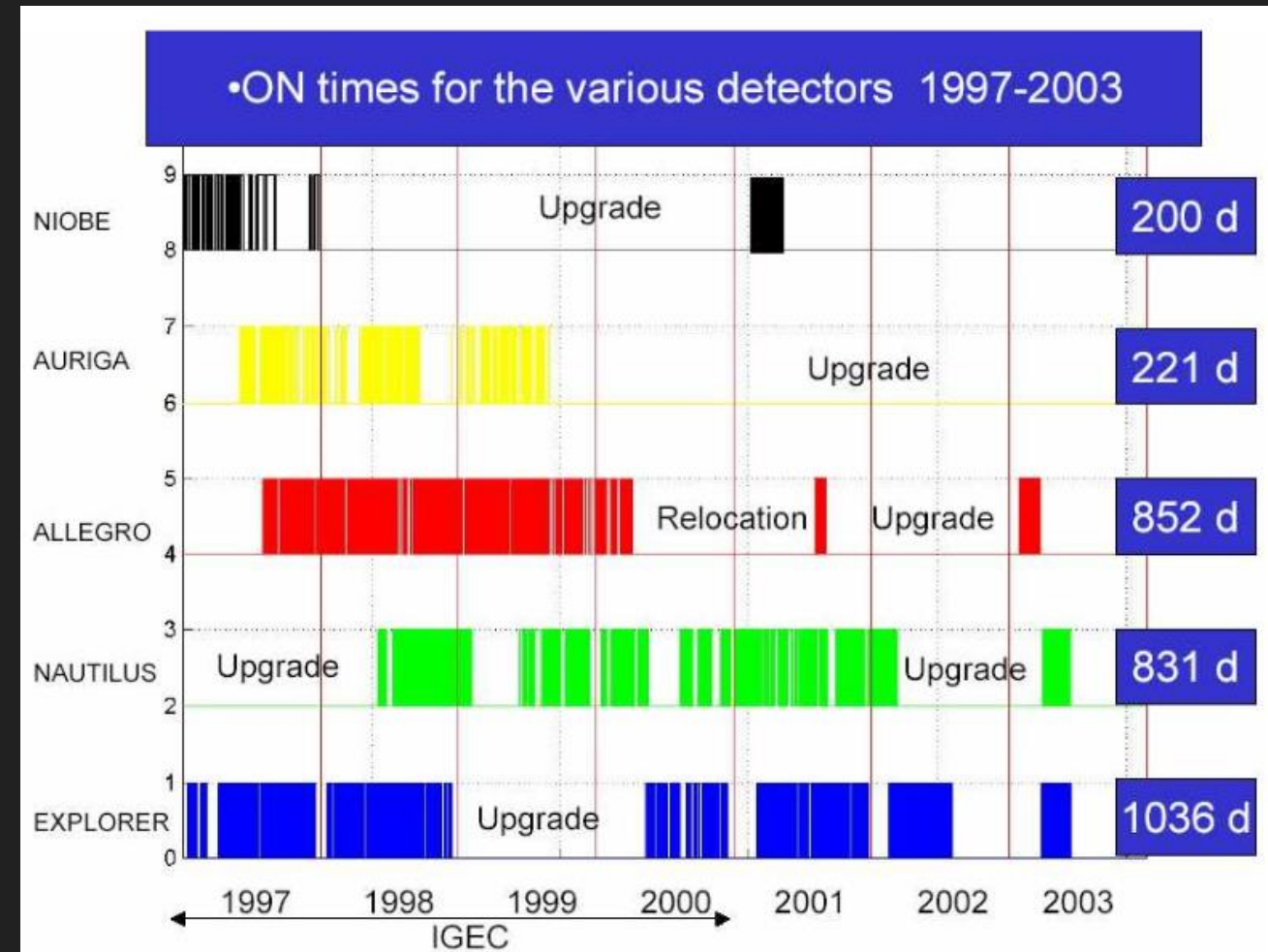
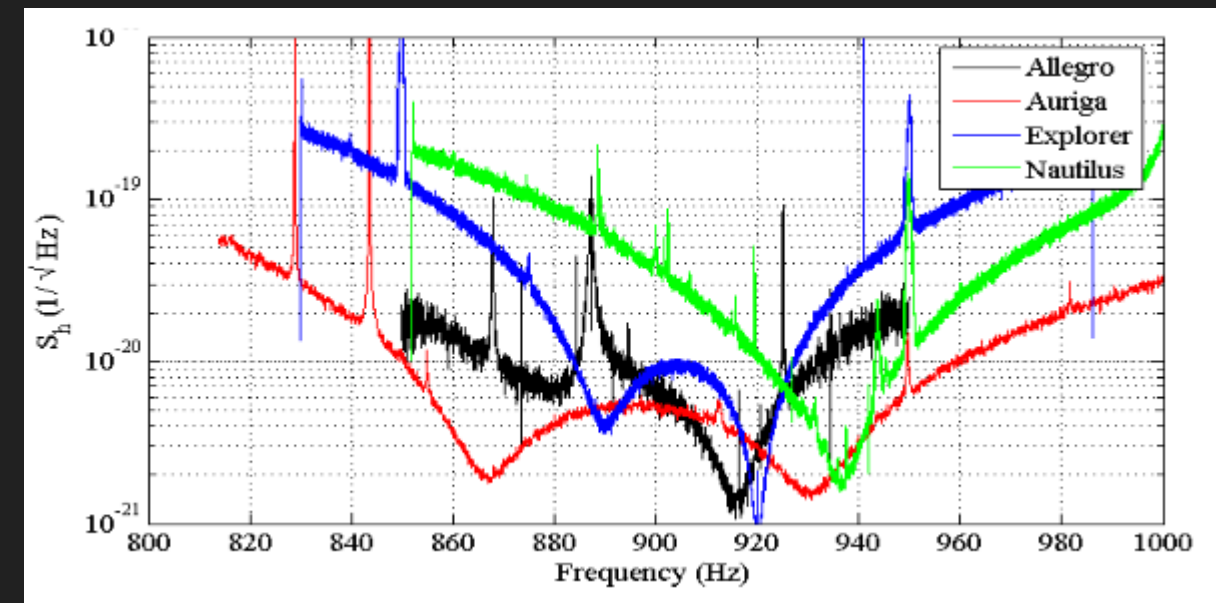
Чувствительность в узком  
высокочастотном диапазоне.



# Детекторы предпоследнего поколения

1009.1138

Охлаждение до температуры жидкого гелия, сложные системы подвесов и новая электроника для считывания сигнала.

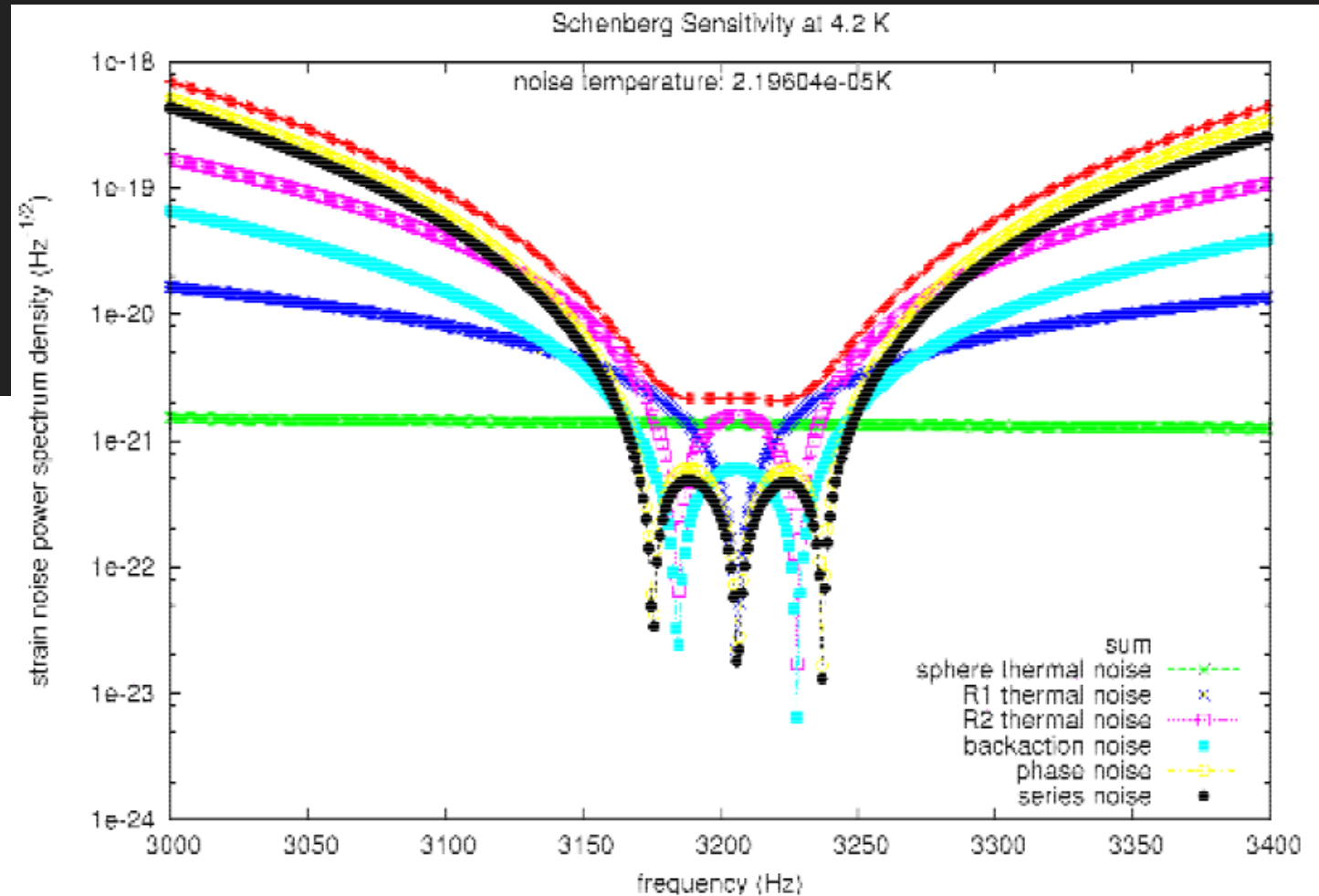
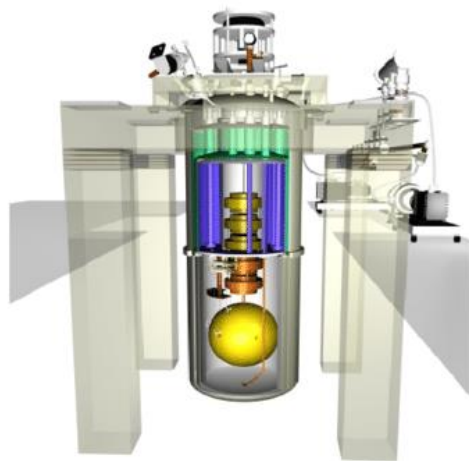




# Сферические детекторы – последняя попытка

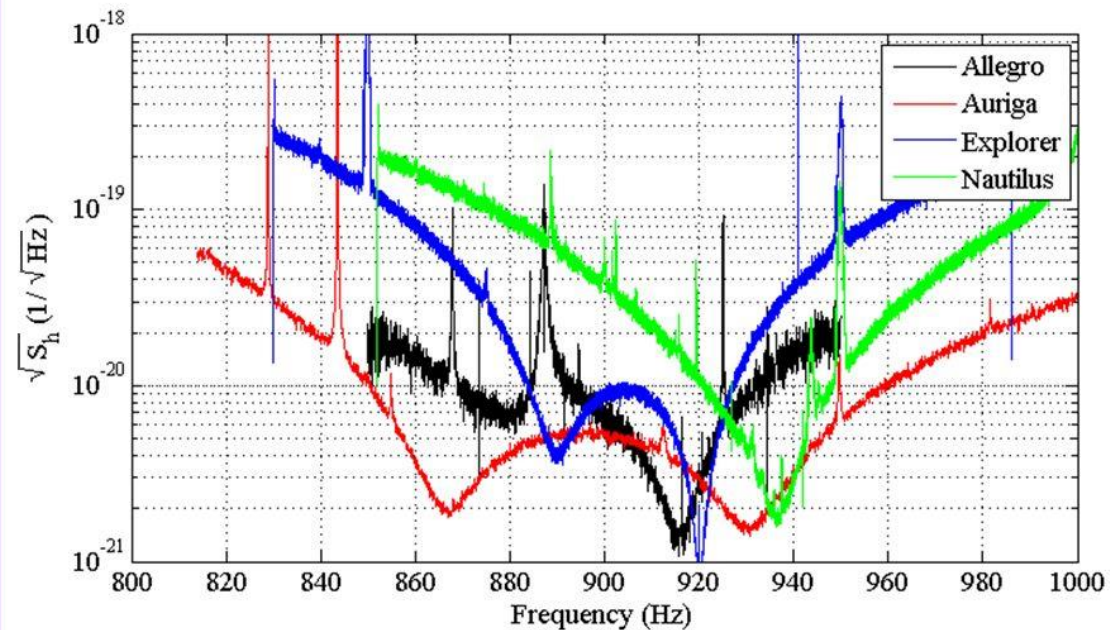
Чувствительность по всем направлениям  
и более эффективная трансформация  
ГВ сигнала в фононы.

- Mass 1,15 ton
- Diameter 65 cm
- Alloy 94%Cu-6%Al
- Transducers:  
 $\mu$ wave parametrics

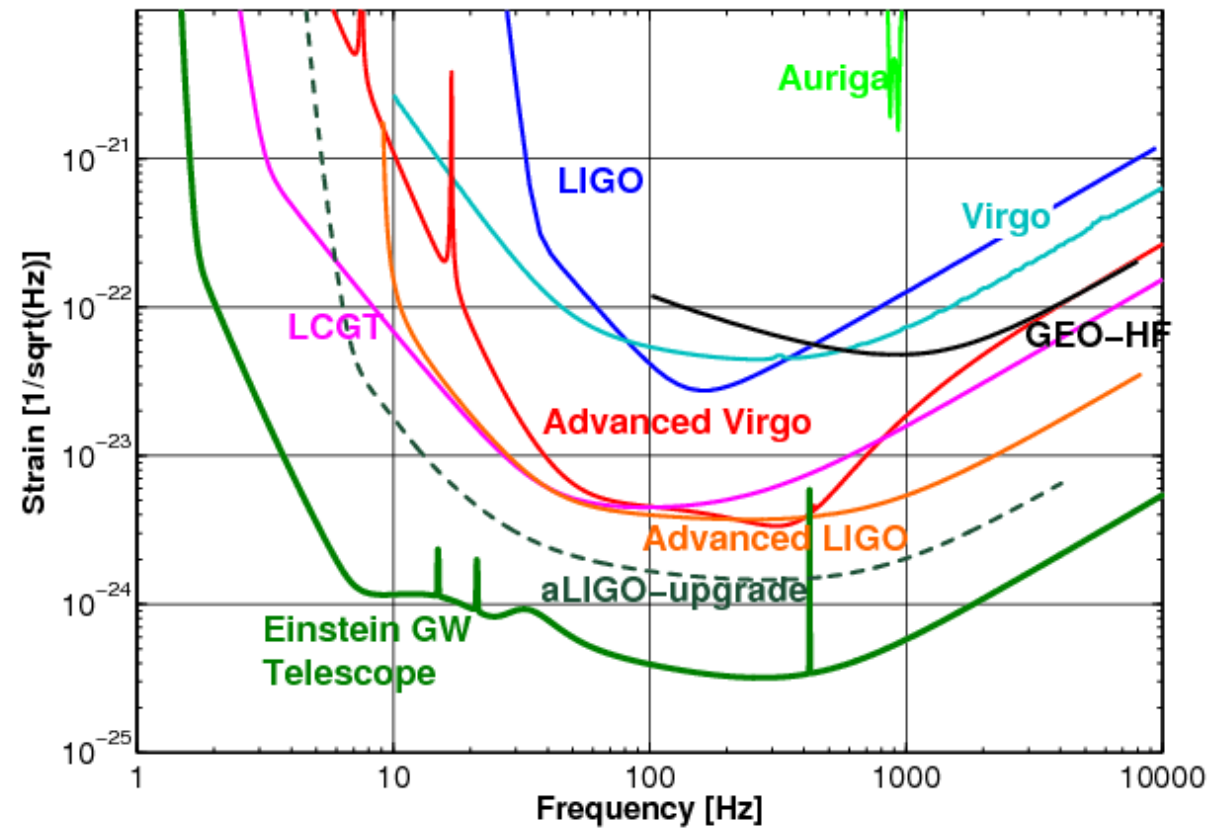


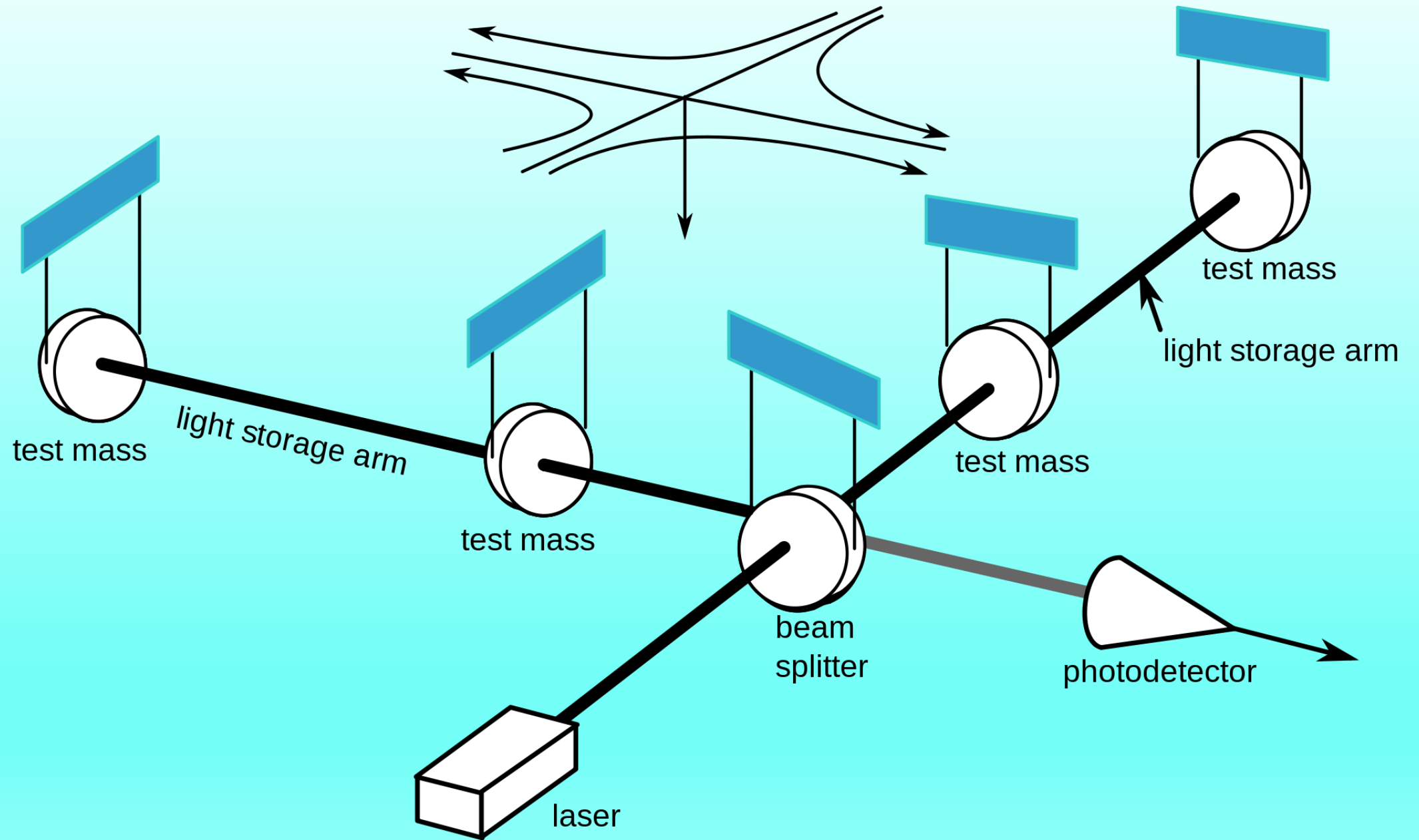
# Бары против интерферометров

## SENSITIVITY OF PRESENT DETECTORS



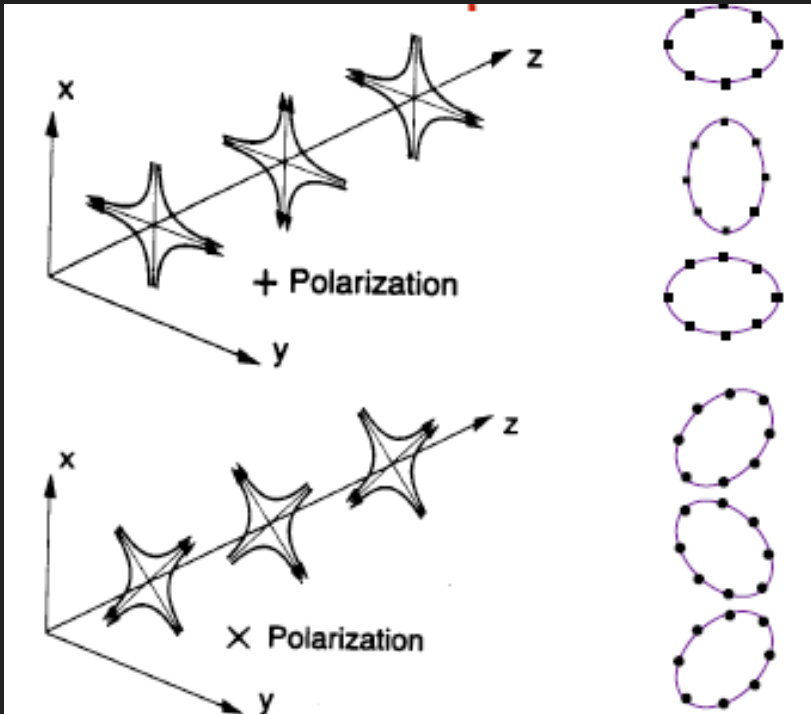
ILLAS WP1 – Cascina 13.11.2006



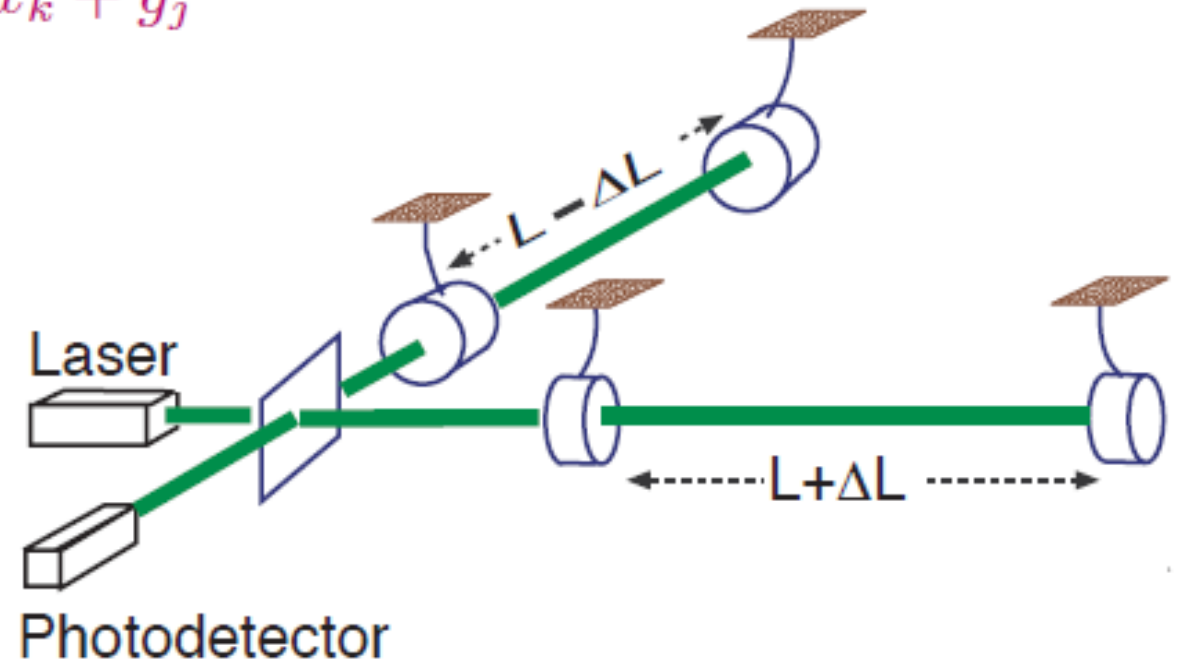


# Изменение длины плеч

Прохождение гравволны вызывает приливные силы. Меняется длина плеч интерферометра.



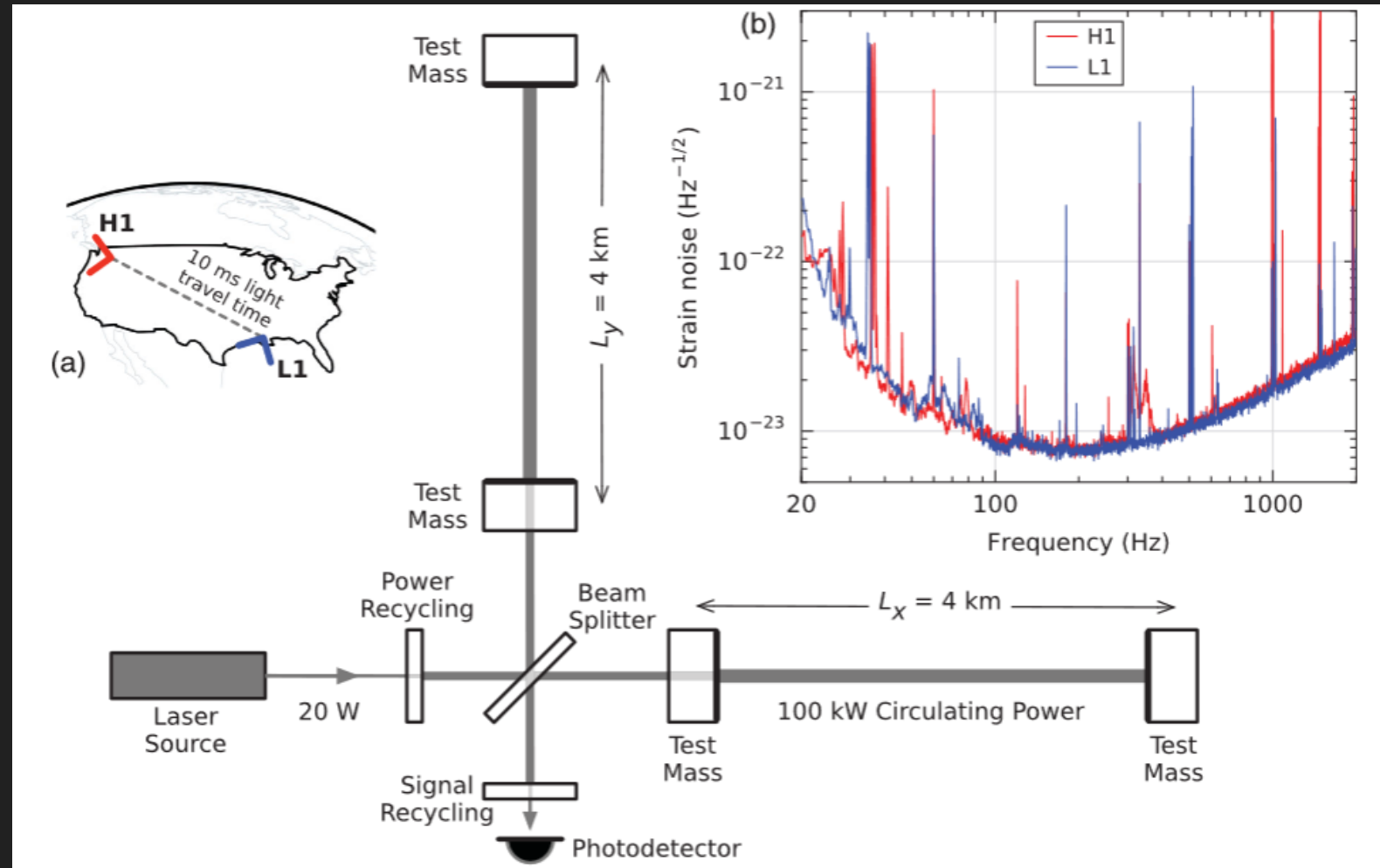
$$\ddot{x}_j = \frac{1}{2} \ddot{h}_{jk}^{\text{GW}} x_k + g_j$$



Относительное изменение длины плеч пропорционально амплитуде гравитационной волны. Измерение происходит довольно сложным способом.

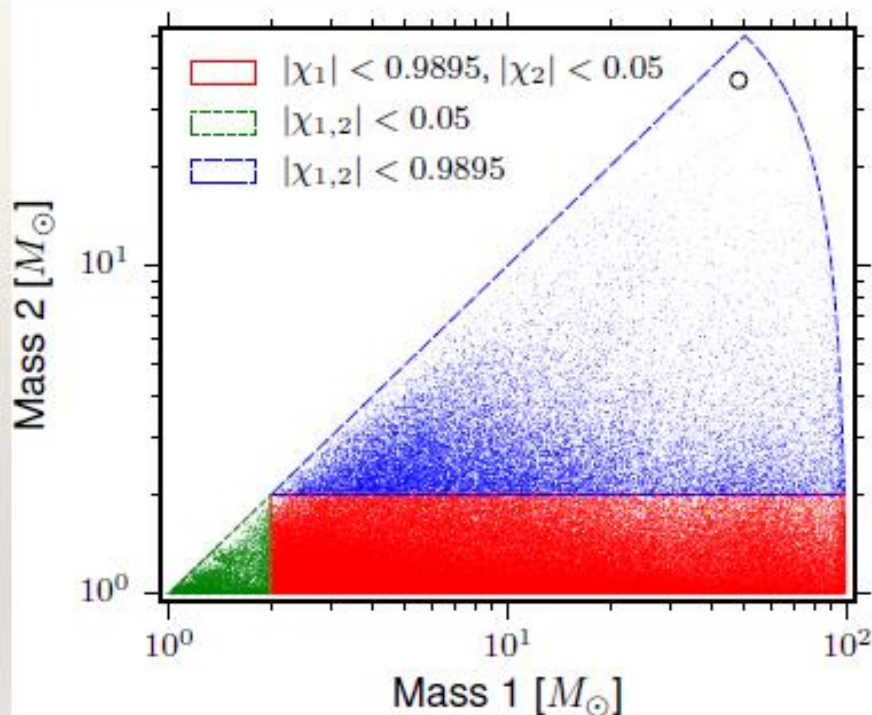
# Детекторы LIGO и их чувствительность

Для регистрации существенно, что сигнал имеет заранее примерно известную форму и его частота изменяется по известному закону.





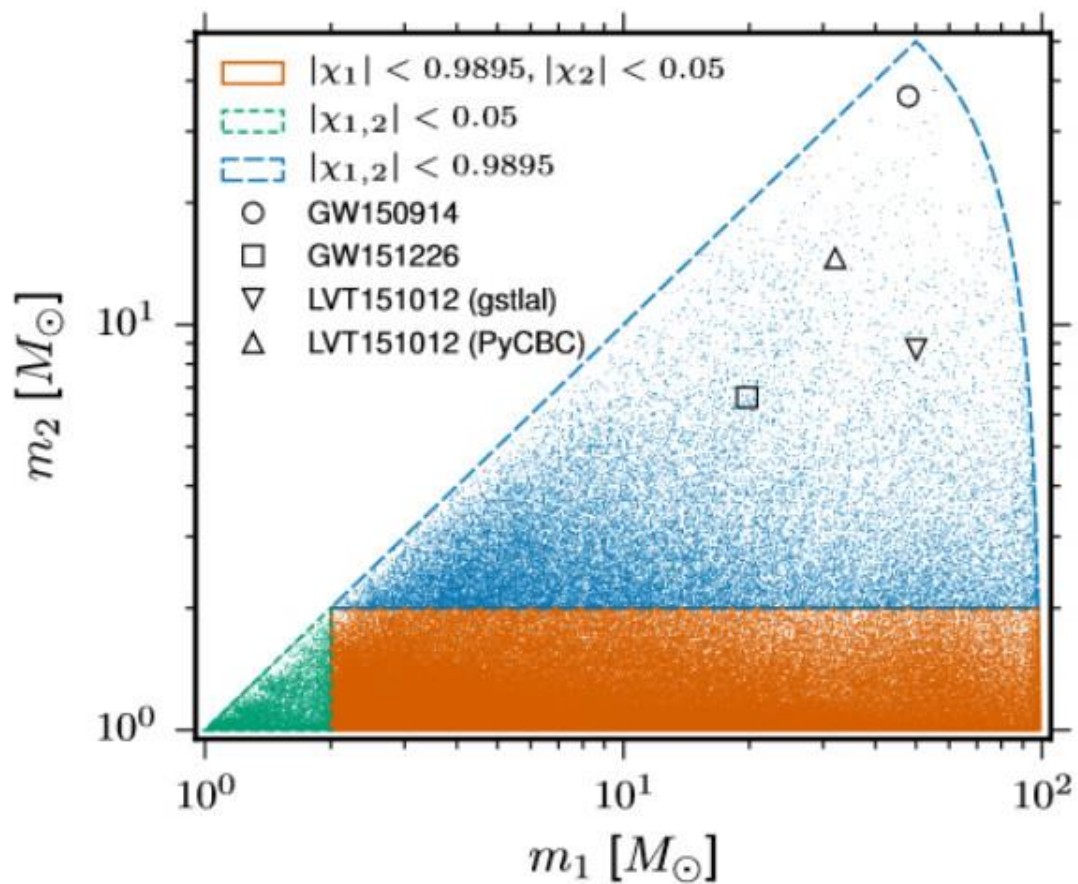
# Template bank



- We don't know apriori parameters of the system
- We construct the bank of templates: we populate the parameter space: uniform taking into accounts the correlation between templates ("volume of each template")
- We filter the data through each template to see which fits the best
- We have used SEOBNR (non-precessing templates)
- Total number of templates used ~250,000

LVC: arXiv:1602.03839

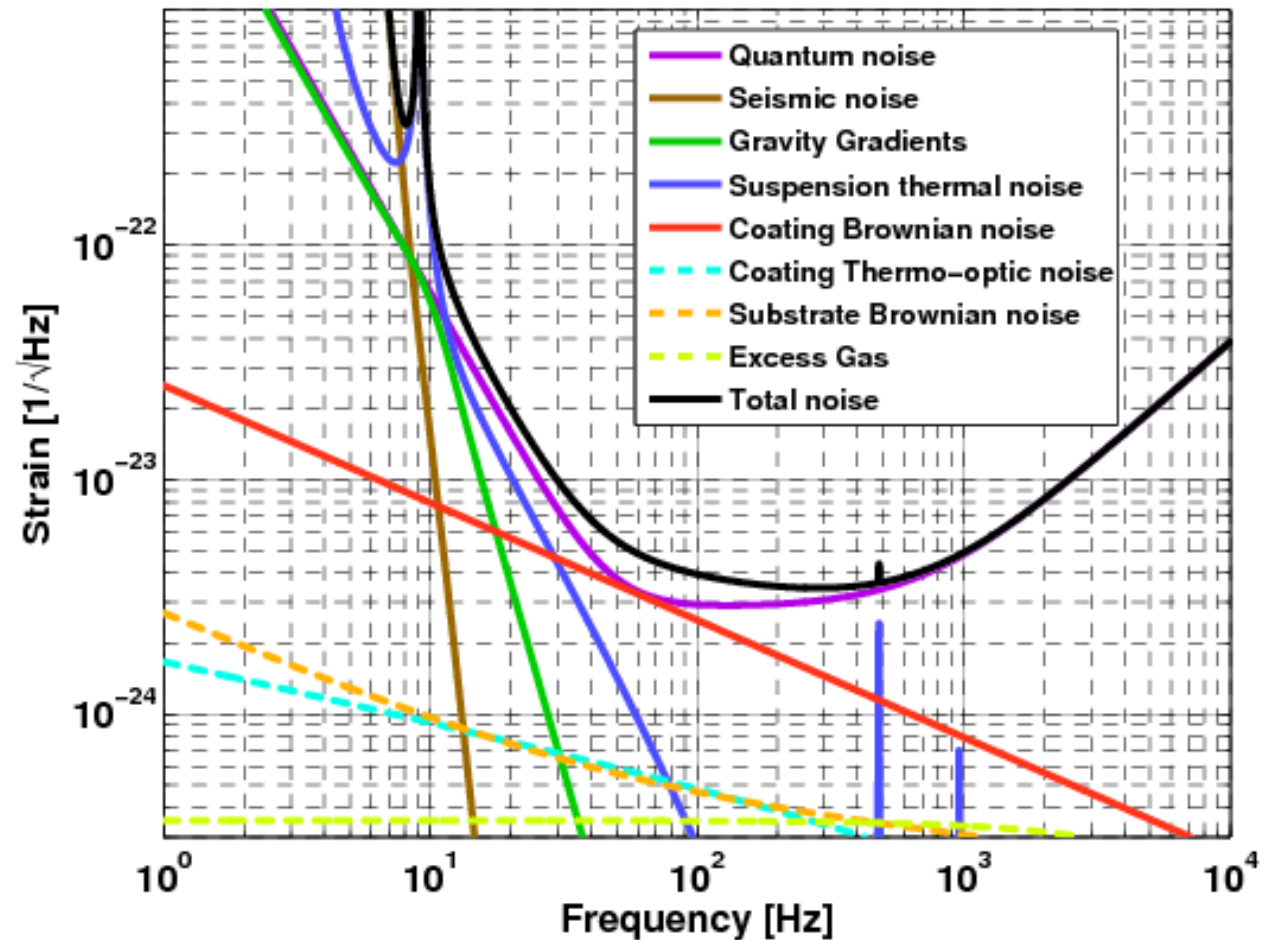
# Моделирование и реальность



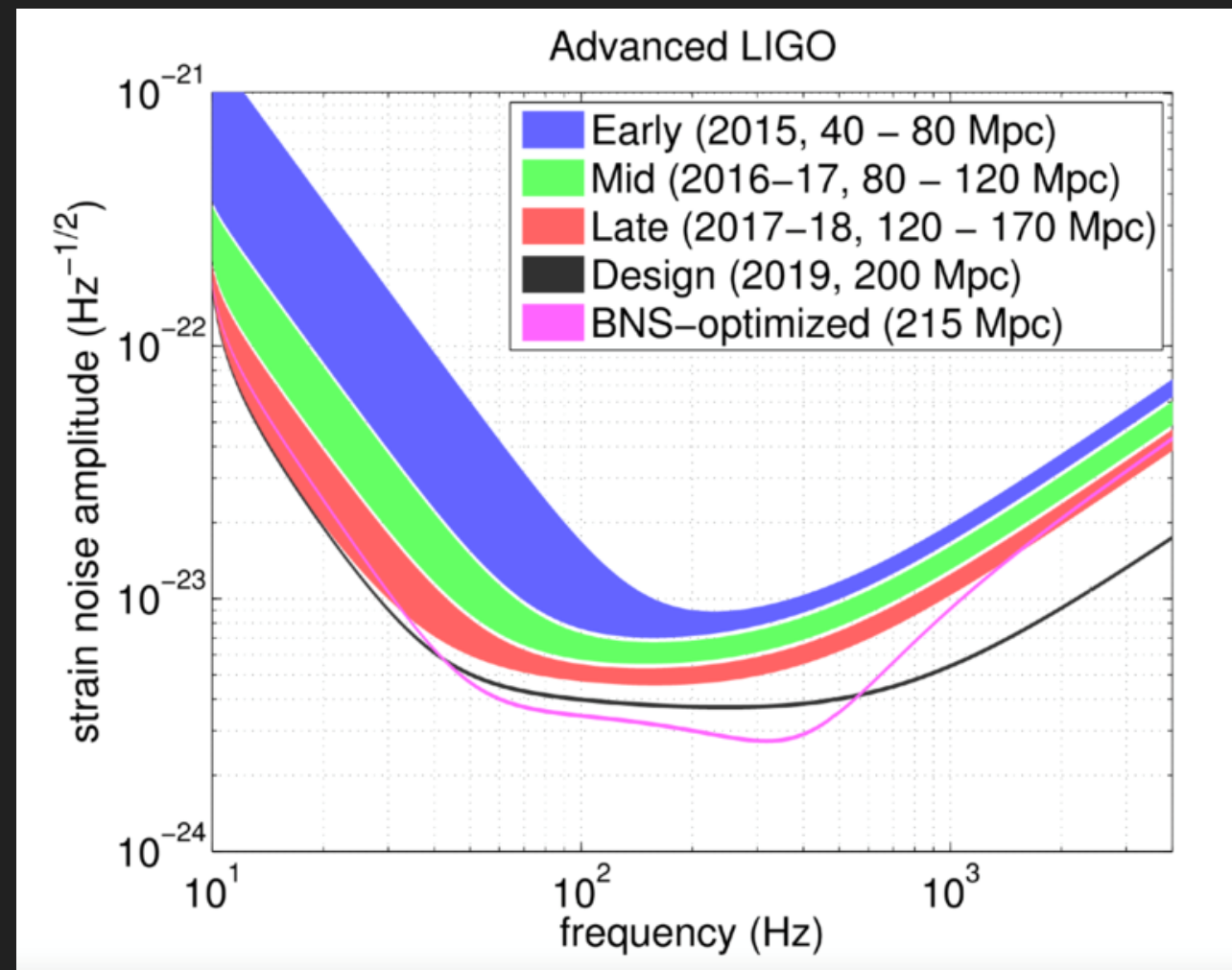
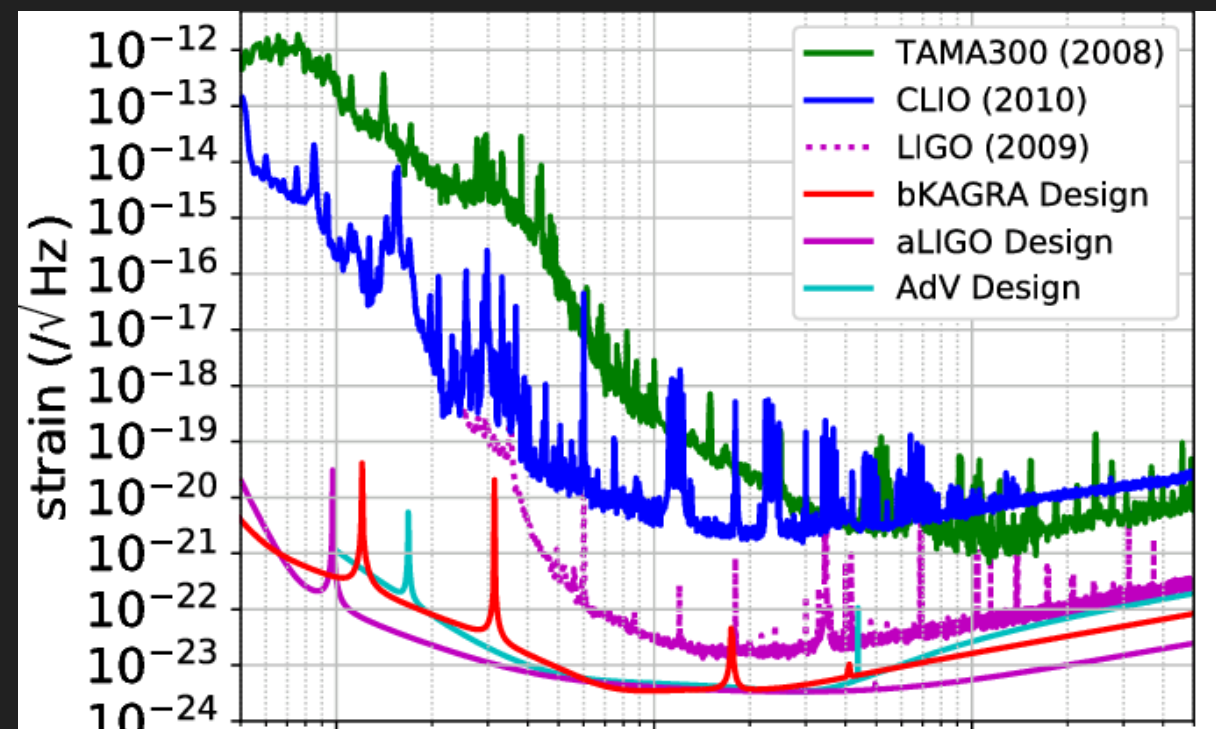
# Разнообразные шумы

Влияют как внешние шумы, так и шумы самого детектора.

Совершенствование инструментов в первую очередь связано с борьбой с шумами.

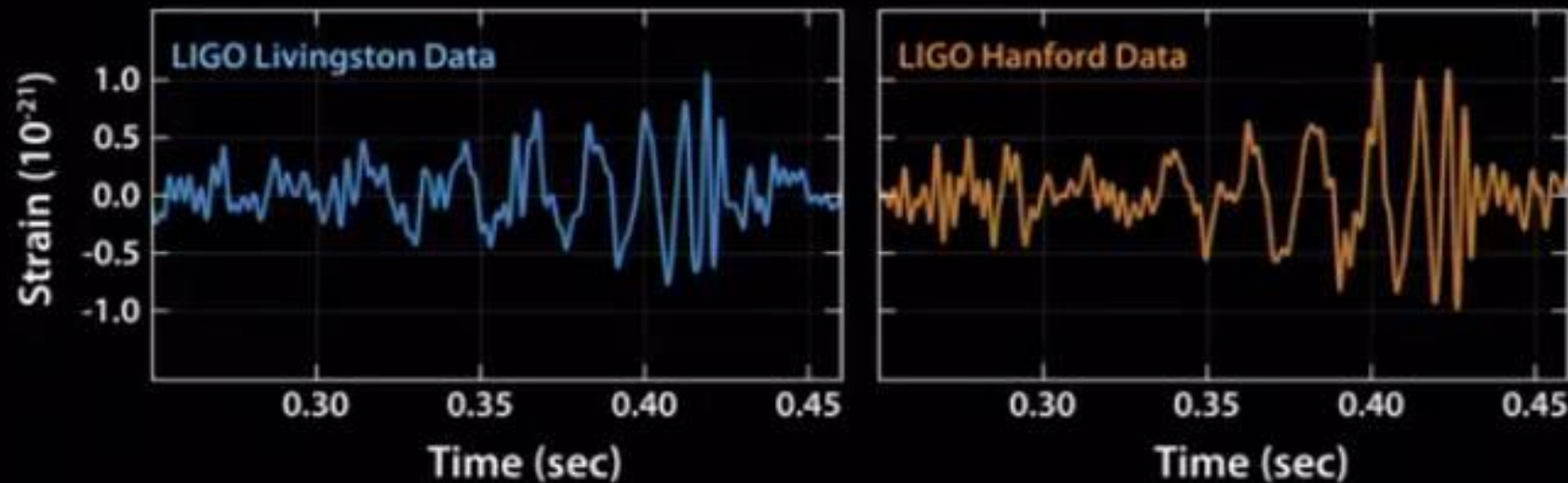


# Рост чувствительности





# GW150914 13-50 по Московскому времени



Официальное объявление  
11 февраля 2016 года.  
За 16 дней совместных  
наблюдений двух детекторов  
надежно обнаружено  
одно событий –  
слияние двух черных дыр  
в  $>400$  Мпк от нас.



# Параметры пары черных дыр

Primary black hole mass	$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$
Secondary black hole mass	$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole mass	$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$
Final black hole spin	$0.67^{+0.05}_{-0.07}$
Luminosity distance	$410^{+160}_{-180} \text{ Mpc}$
Source redshift $z$	$0.09^{+0.03}_{-0.04}$

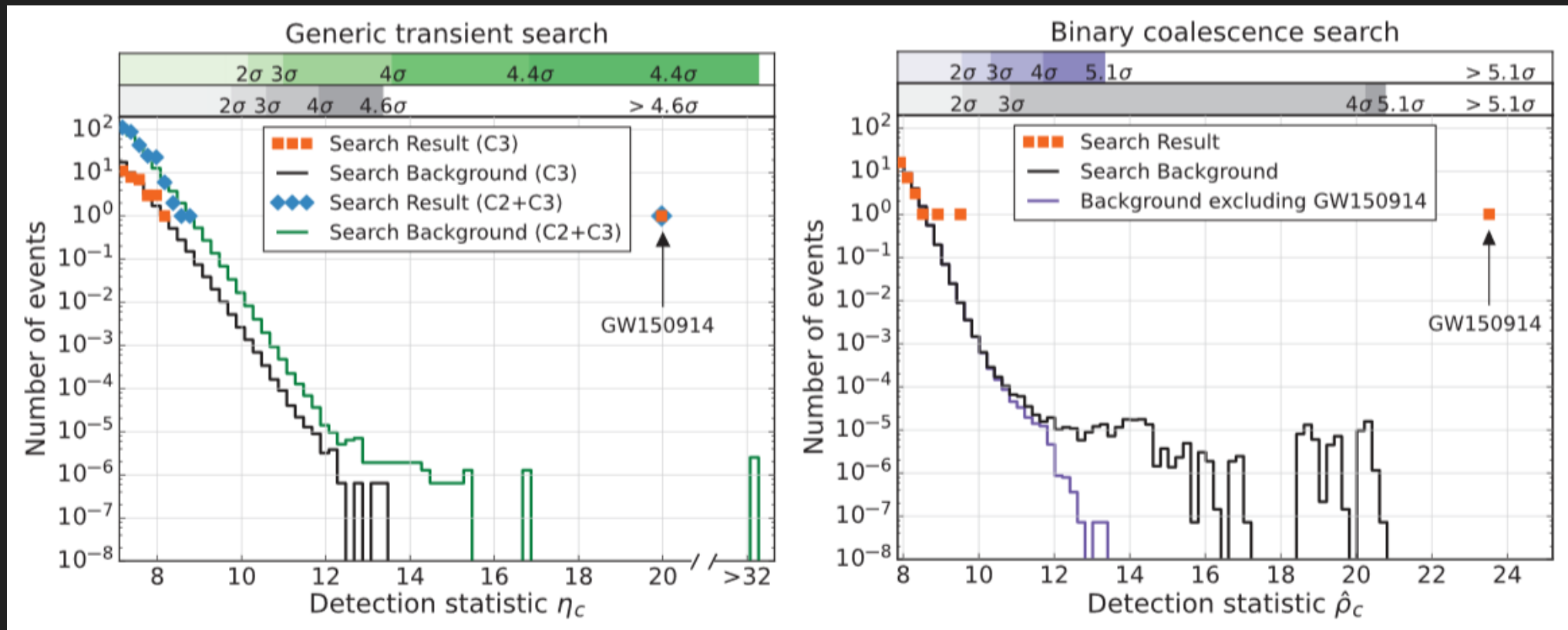
По частоте и форме сигнала можно достаточно точно определить многие параметры.

Высокая масса однозначно говорит о том, что это не могут быть нейтронные звезды.

Отношение сигнал/шум = 24

Достоверность детектирования  $>5.1$  сигма.

# Достоверность результатов

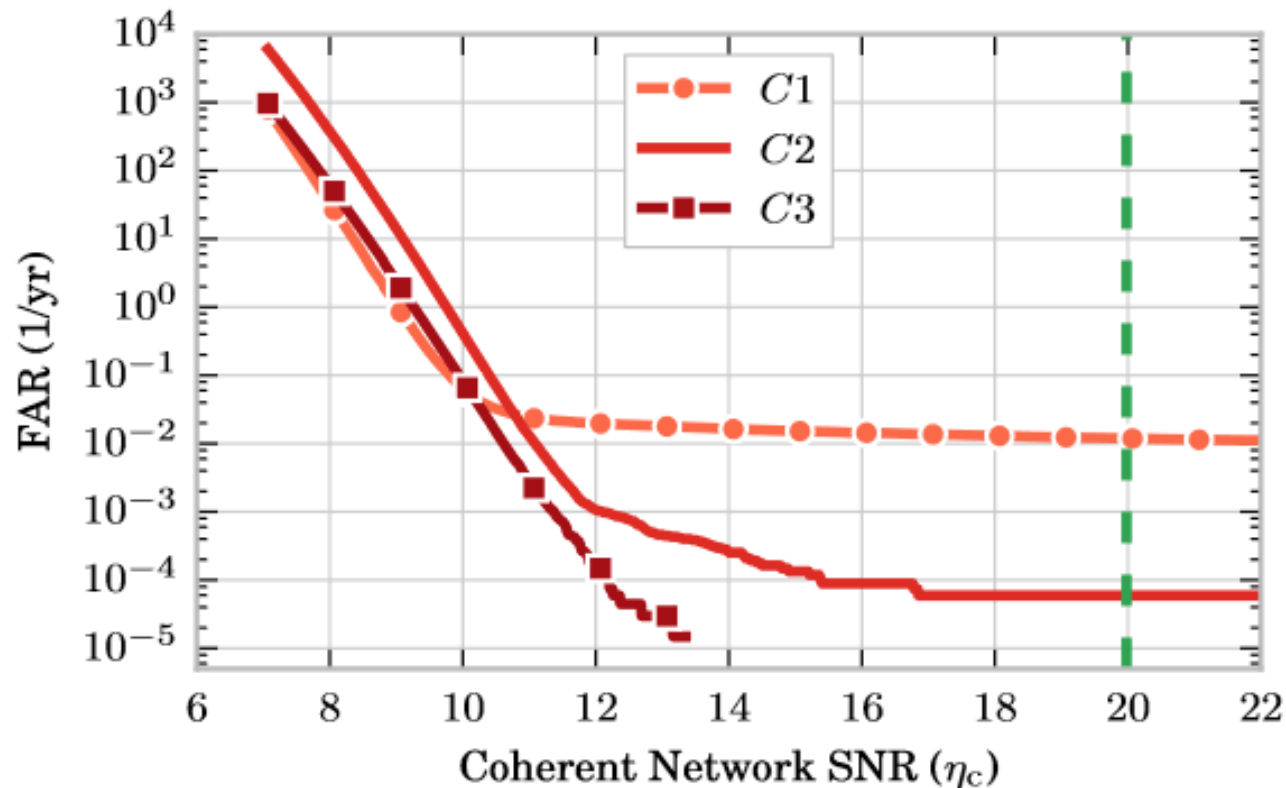


Два разных метода поиска сигнала.

5.1 сигма соответствует примерно одному случайному событию за 200 000 лет.

# Выделение событий

1602.03843



Анализирующие алгоритмы распределяют потенциальные всплески по трем классам.

Для попадания в третий класс сигнал по форме и частоте должен быть похожим на ожидаемые сигналы от слияния компактных объектов.

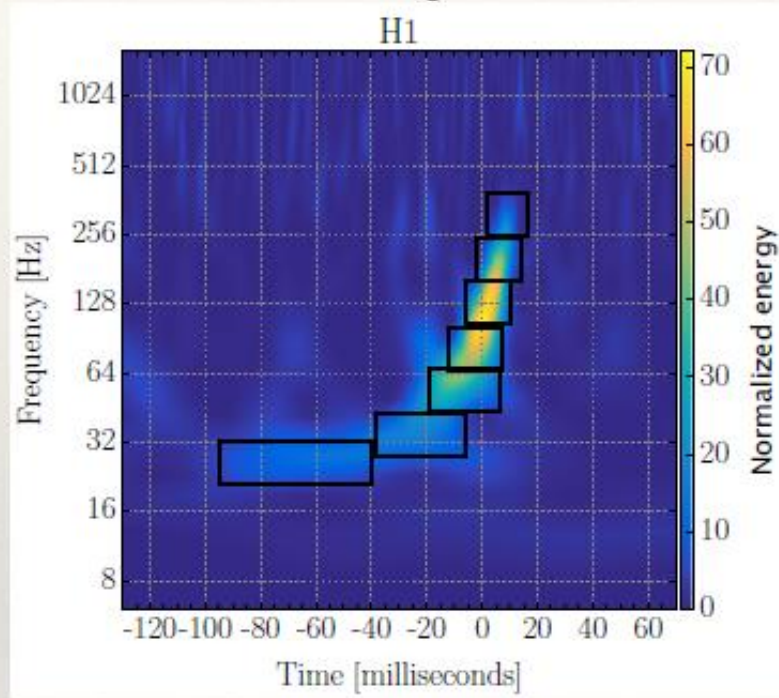
GW150914 относится к классу C3.

Для этого класса вероятность случайного появления на уровне сигнал/шум=24 составляет раз в несколько миллионов лет.

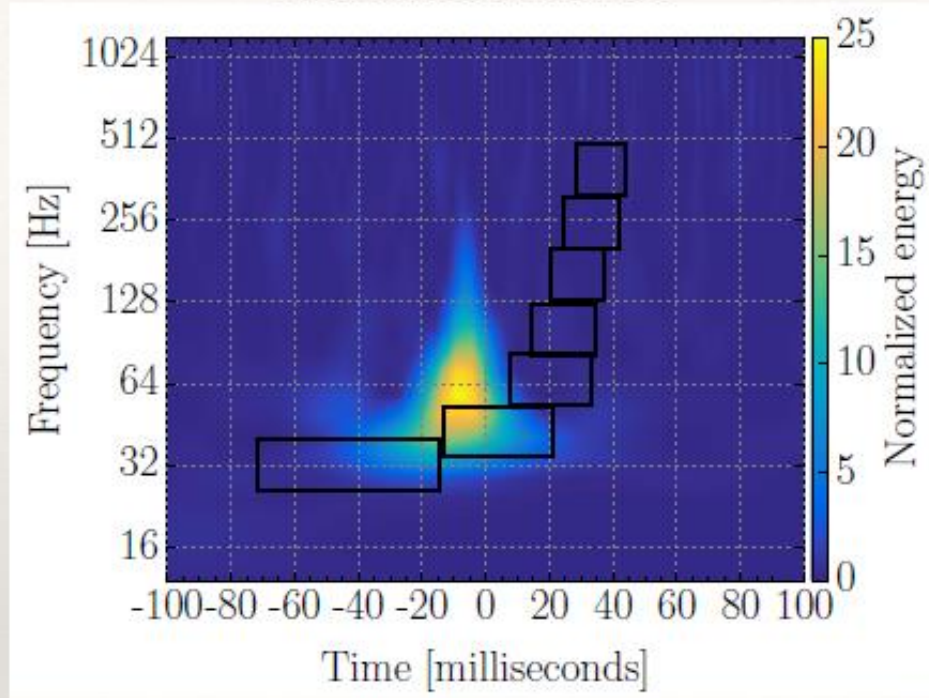
Более детальный анализ показывает, что появление сигнала типа GW150914 за время наблюдений составляет примерно одну миллионную.

# Consistency check

Real signal



Instrumental artifact

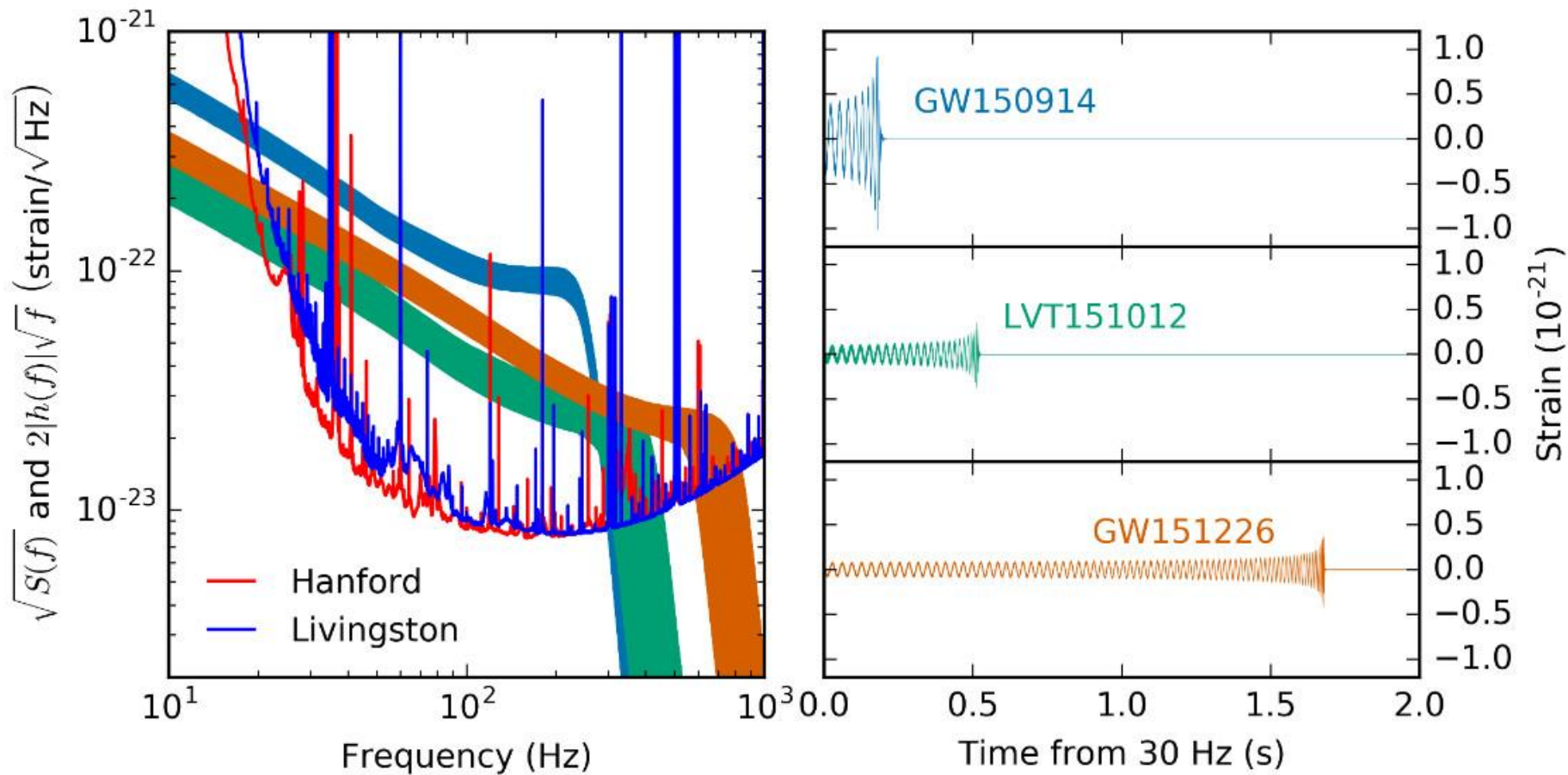


The noise is not Gaussian: need to introduce additional consistency checks into the detection statistic (distribution of power in the signal across the time / frequency).



# Чувствительность

1606.04856





# Предел на массу гравитона

$$m_g < 1.2 \times 10^{-22} \text{ эВ}/c^2 \approx 10^{-55} \text{ г}$$

Автоматически это дает предел и на разницу в скоростях между светом и гравитацией.

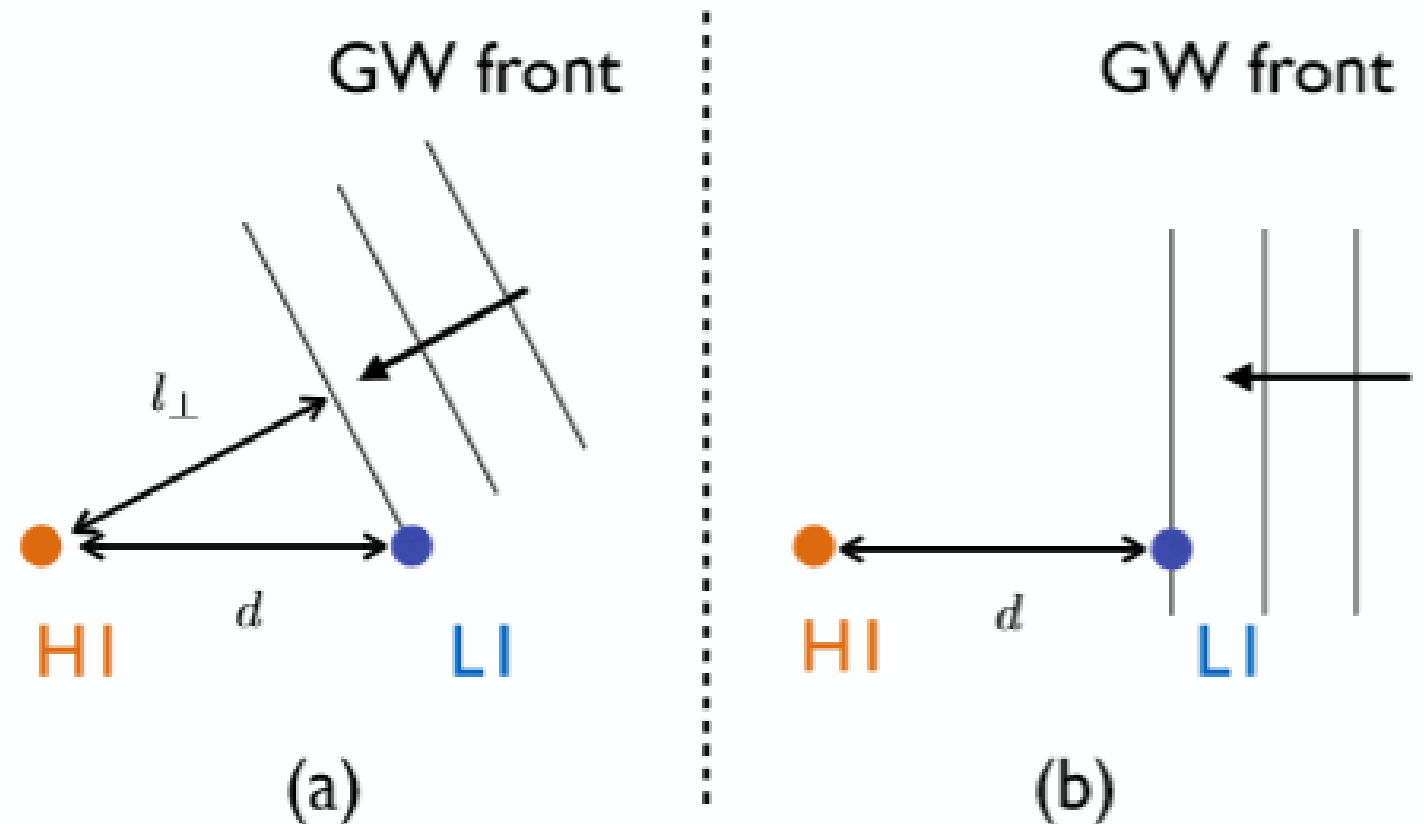


# Предел на скорость гравитации

1602.04188

Т.к. гравитон очень легкий,  
то скорость гравитации  
не может быть  
существенно меньше  
скорости света.  
А больше?  
Это можно измерить  
по задержке сигнала,  
принимаемого двумя детекторами.

Получается, что  
скорость гравитации  $< 1.7 c$



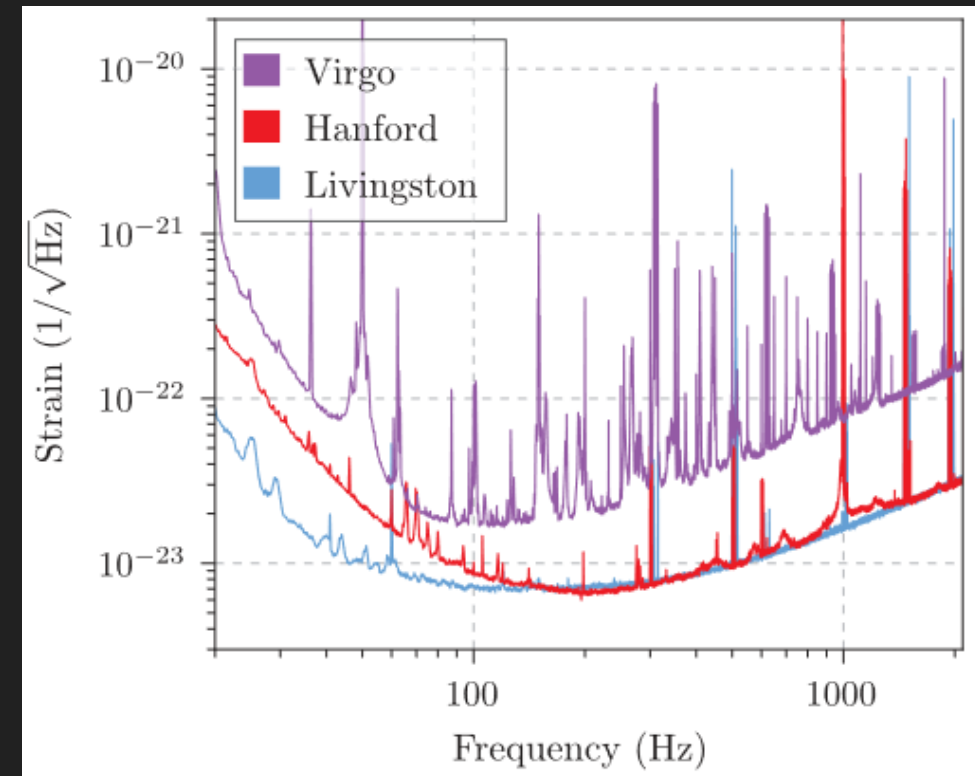
# LIGO+VIRGO=.... ?

1709.09660

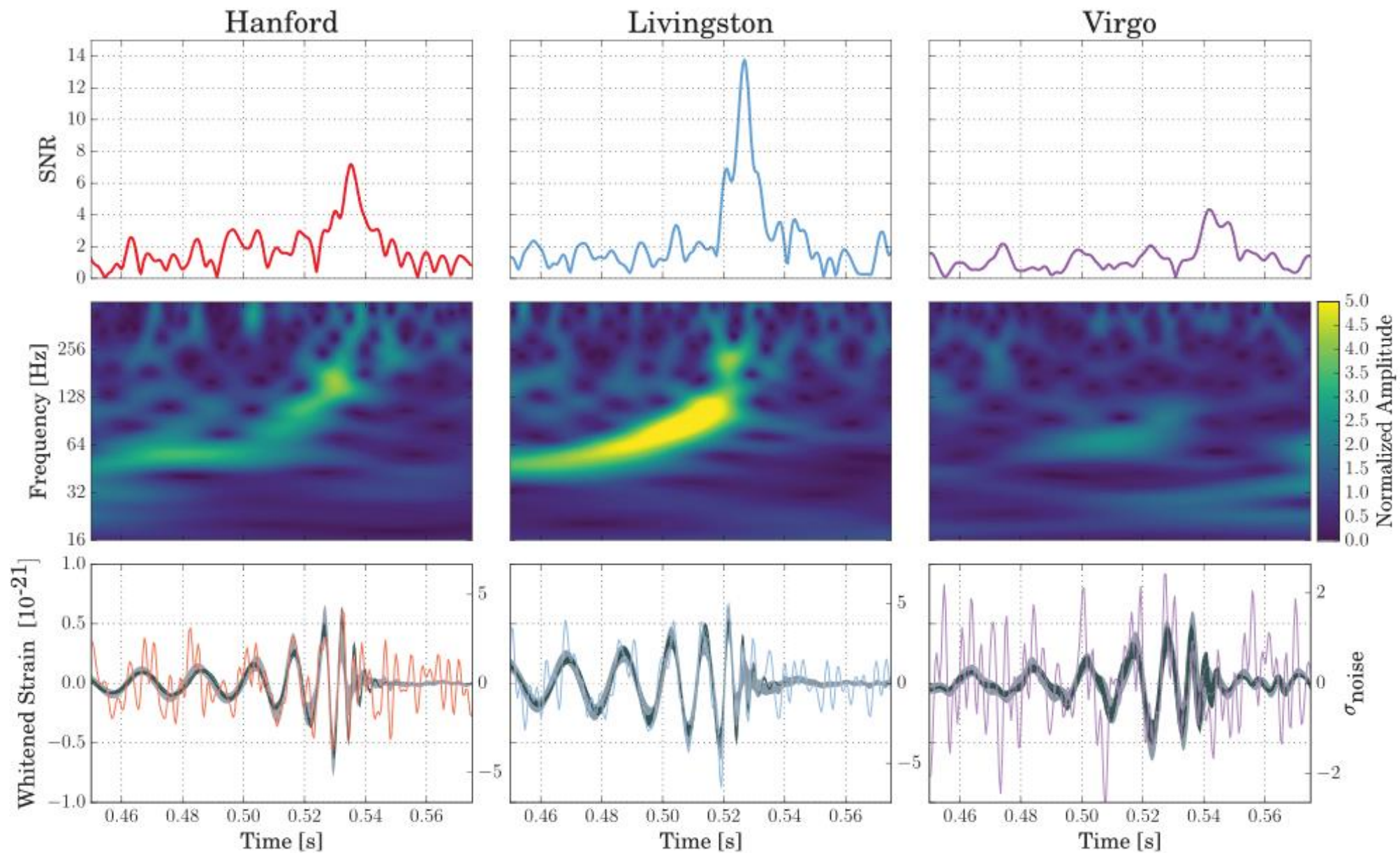
В 2017м году впервые прошли сеансы совместной (одновременной) работы двух детекторов LIGO и детектора VIRGO после серьезной модернизации (и, т.о., увеличения чувствительности) всех трех.

Это позволило точнее определять координаты всплесков.

Совместная работа с ноября 2016 г. до августа 2017 г.







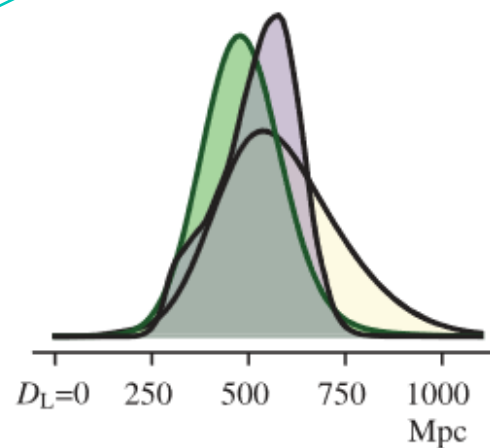
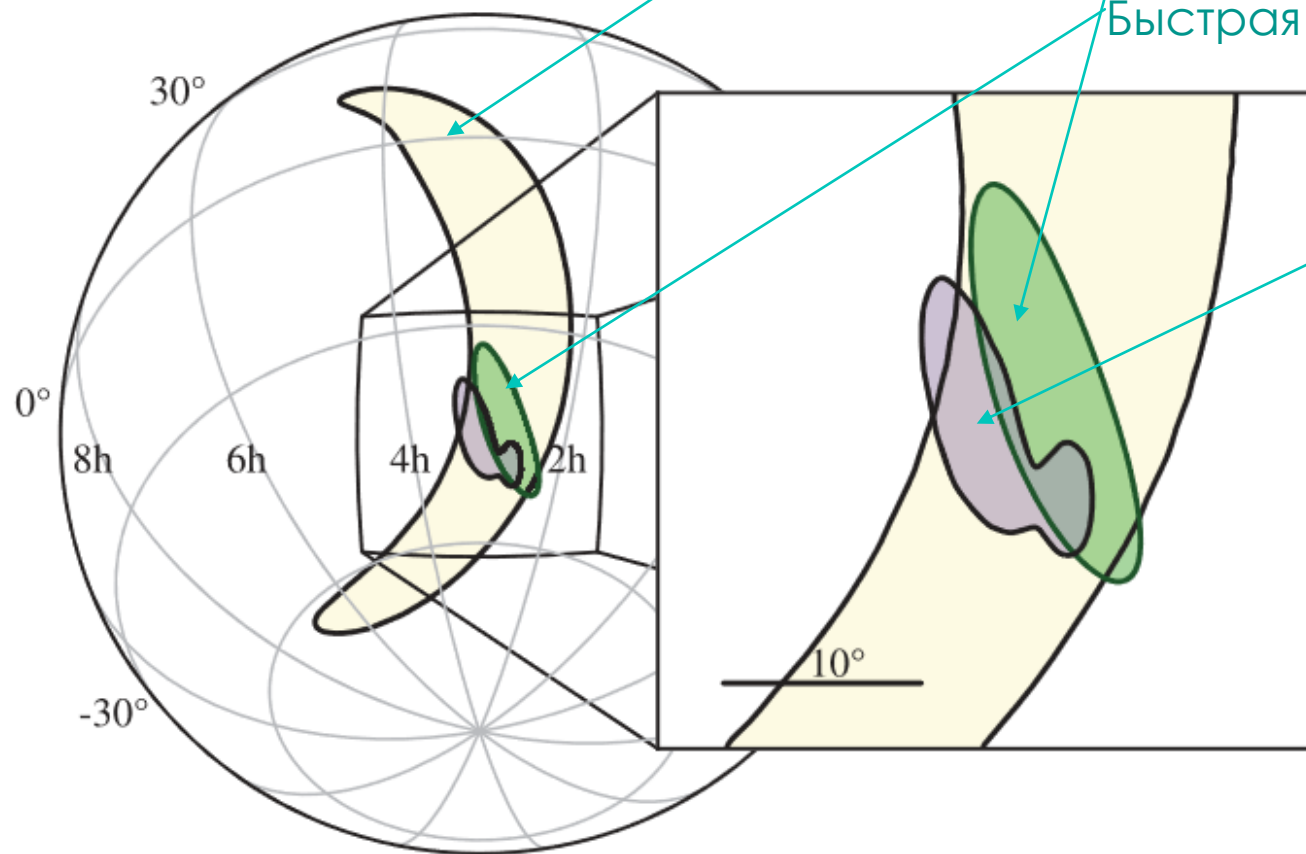
# Быстрая и точная локализация

1709.09660

Быстрая локализация по двум LIGO

Быстрая по LIGO+VIRGO

Полная обработка

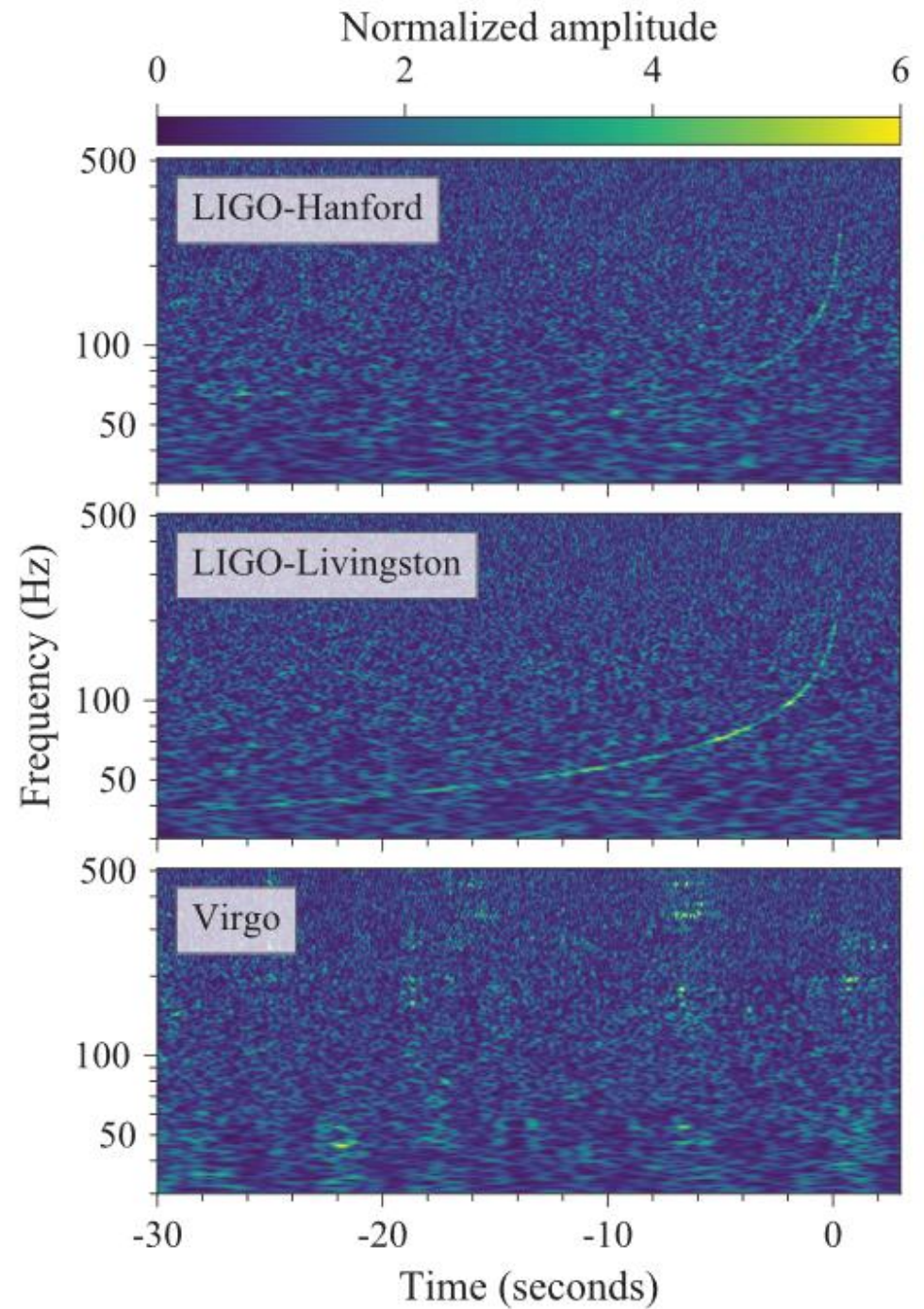
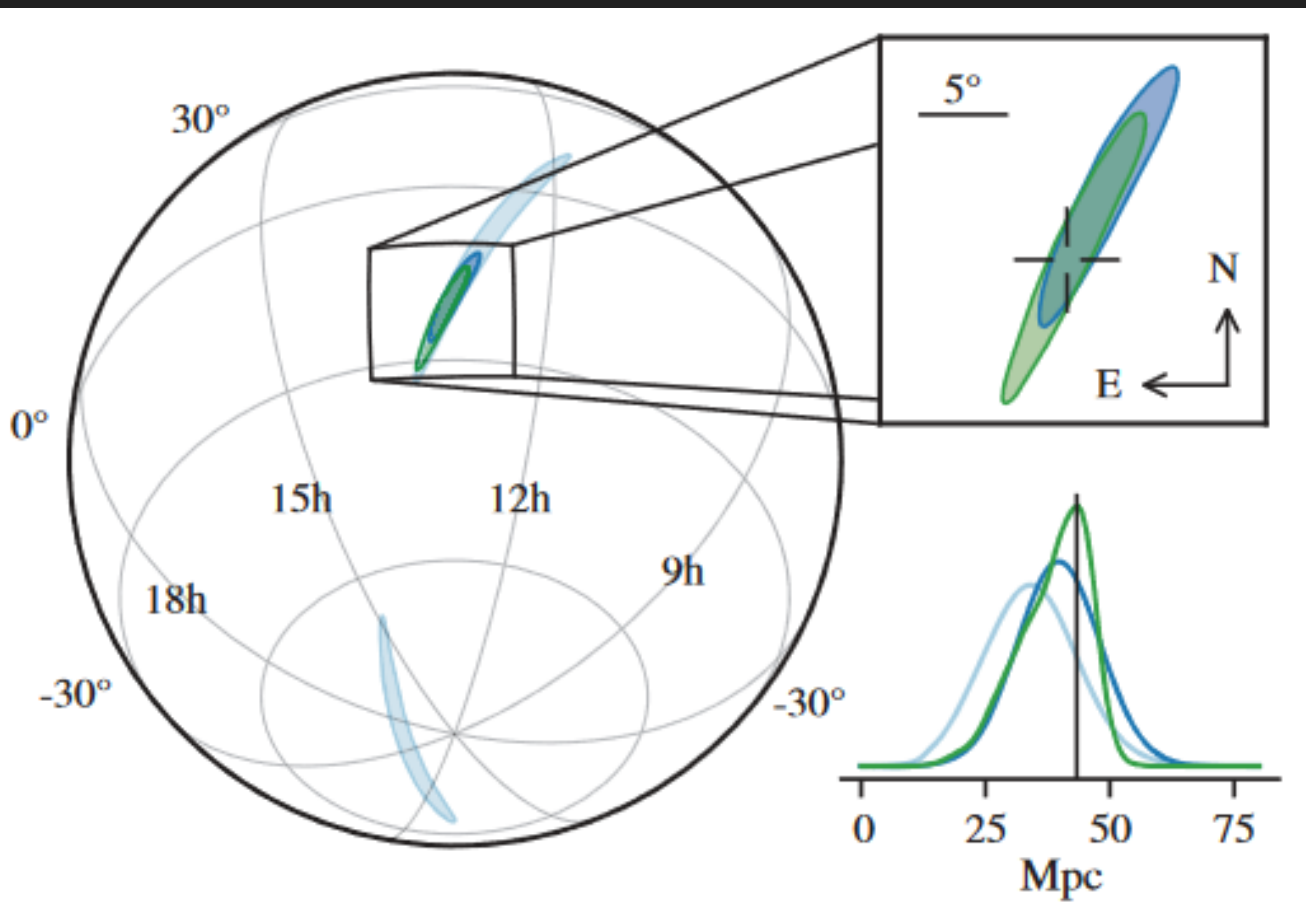


Наблюдения сразу на нескольких детекторах позволяют лучше определять координаты источника.



# Всплеск с H3

1710.05832



# Параметры двойной системы

1710.05832

	Low-spin priors ( $ \chi  \leq 0.05$ )	High-spin priors ( $ \chi  \leq 0.89$ )
Primary mass $m_1$	1.36–1.60 $M_\odot$	1.36–2.26 $M_\odot$
Secondary mass $m_2$	1.17–1.36 $M_\odot$	0.86–1.36 $M_\odot$
Chirp mass $\mathcal{M}$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$
Mass ratio $m_2/m_1$	0.7–1.0	0.4–1.0
Total mass $m_{\text{tot}}$	$2.74^{+0.04}_{-0.01} M_\odot$	$2.82^{+0.47}_{-0.09} M_\odot$
Radiated energy $E_{\text{rad}}$	$> 0.025 M_\odot c^2$	$> 0.025 M_\odot c^2$
Luminosity distance $D_L$	$40^{+8}_{-14}$ Mpc	$40^{+8}_{-14}$ Mpc
Viewing angle $\Theta$	$\leq 55^\circ$	$\leq 56^\circ$
Using NGC 4993 location	$\leq 28^\circ$	$\leq 28^\circ$
Combined dimensionless tidal deformability $\tilde{\Lambda}$	$\leq 800$	$\leq 700$
Dimensionless tidal deformability $\Lambda(1.4M_\odot)$	$\leq 800$	$\leq 1400$

# Ключевые научные результаты

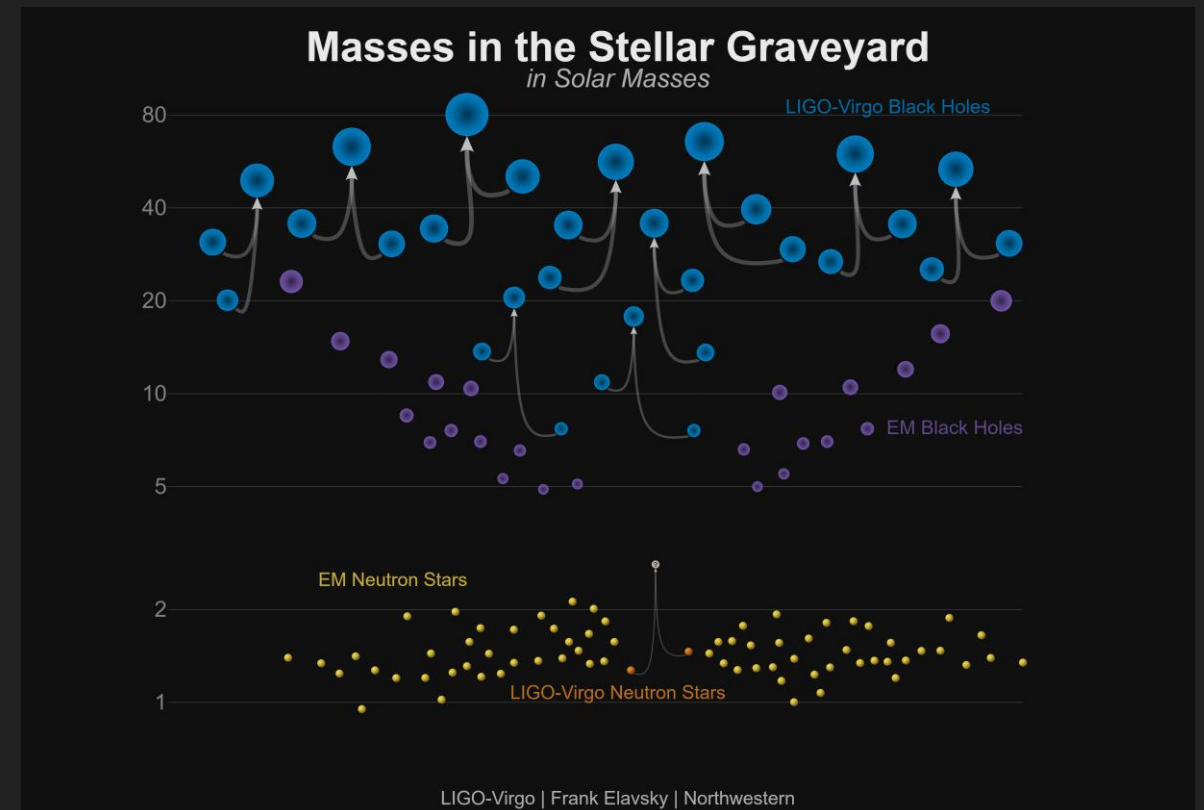
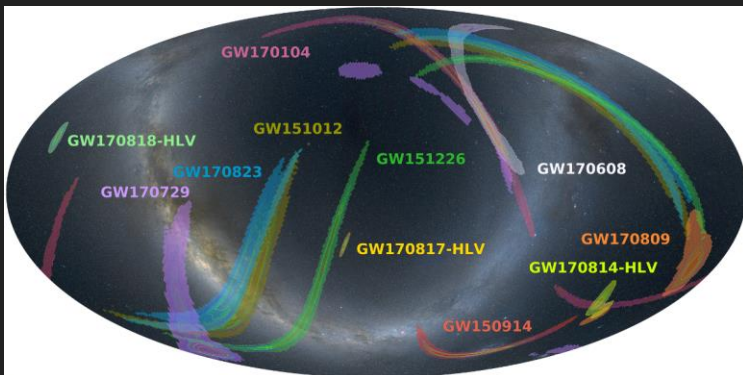
- Доказательство связи коротких гамма-всплесков со слияниями нейтронных звезд
- Прямые наблюдения, позволяющие изучать нуклеосинтез при слияниях нейтронных звезд
- Данные по уравнению состояния нейтронных звезд
- Измерение постоянной Хаббла
- Тест принципа эквивалентности
- Тест лоренц-инвариантности
- Измерение скорости распространения гравитационных волн

О фундаментальной физике по GW170817 см. 1710.05834

# Итого (на начало 2019 г.)

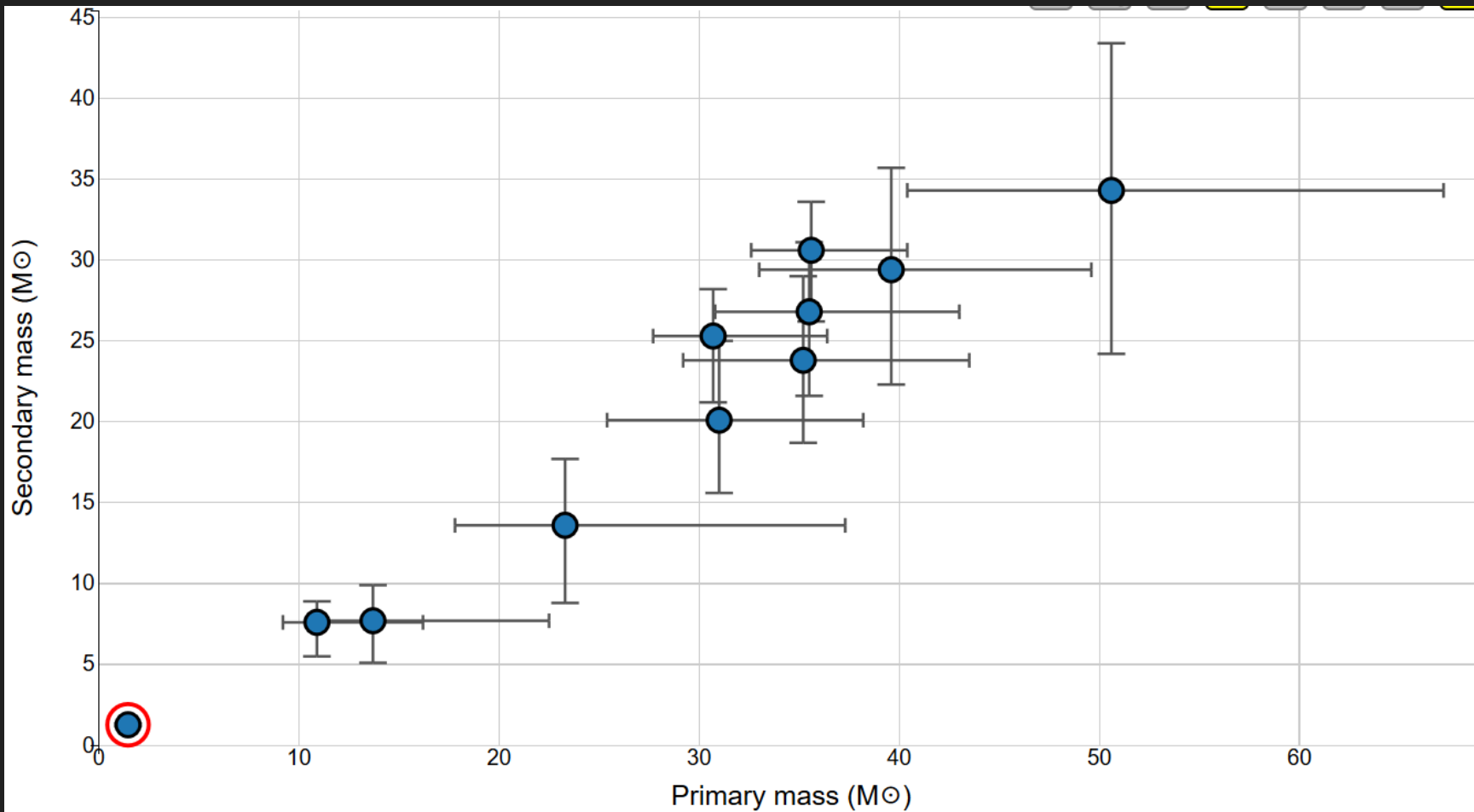
1811.12907, 1811.12940

- GW150914
- GW151012 Одиннадцать всплесков.
- GW151226 Один из всплесков с нейтронной звездой.
- GW170104 Пять событий – совместно с VIRGO.
- GW170608
- GW170729
- GW170809 – VIRGO
- GW170814 – VIRGO
- GW170817 – VIRGO, H3
- GW170818 – VIRGO
- GW170823 – VIRGO





# Массы по данным новой обработки

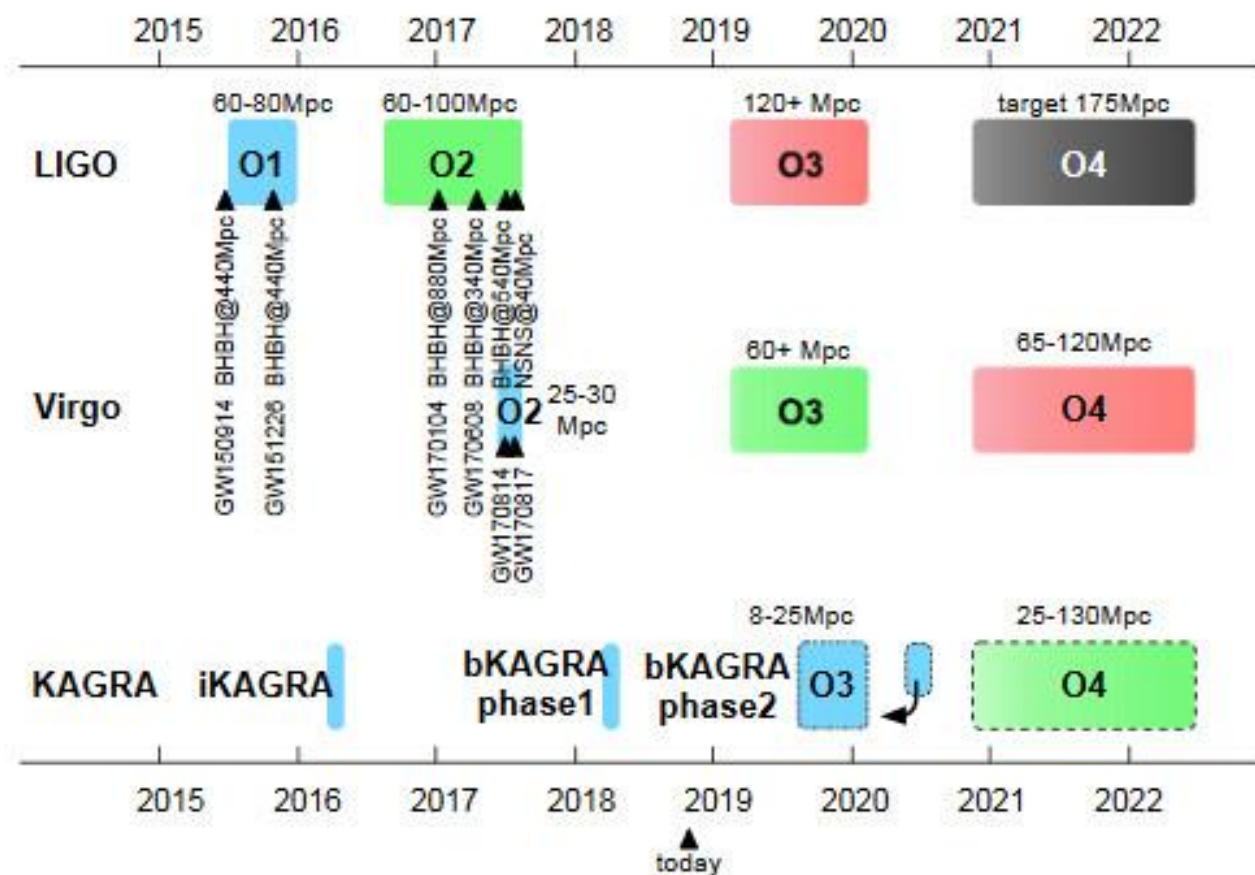
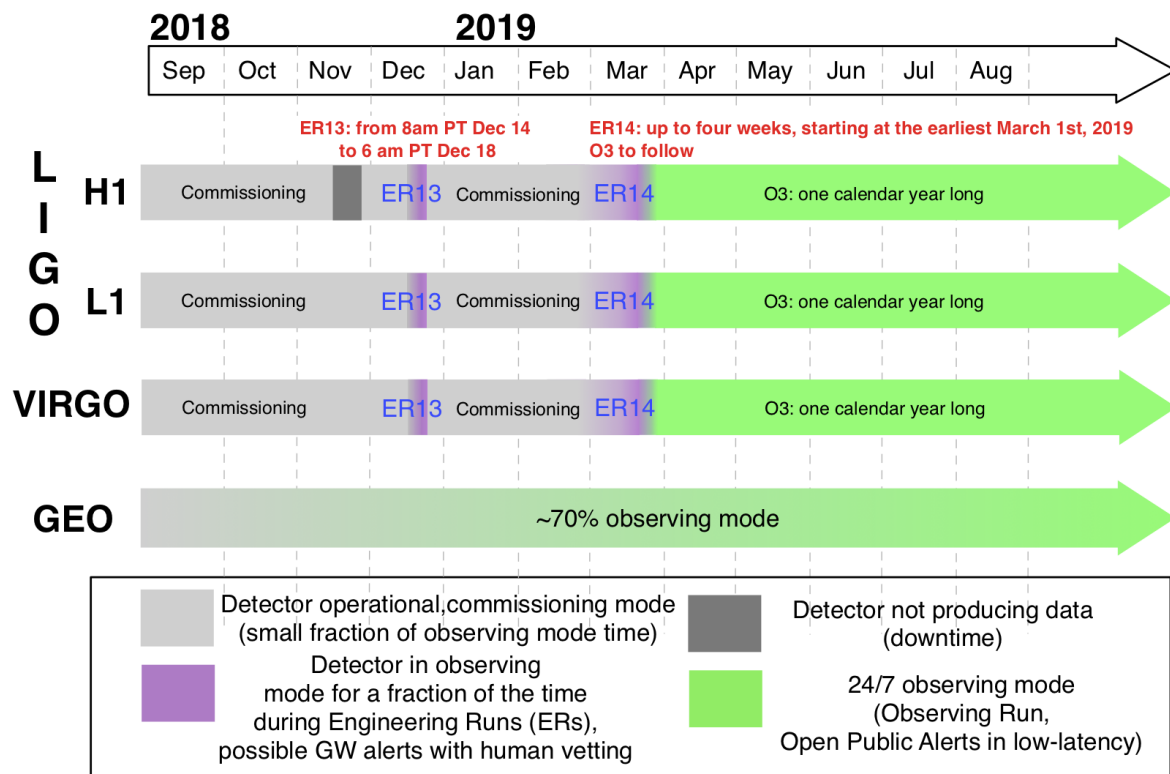


# Ближайшие планы

LIGO-VIRGO Joint Run Planning Committee

## Working schedule for O3

(Public document G1801056-v4, based on G1800889-v7)



# Будущие детекторы



LIGO-India в 2023 г.

KAGRA >2019?



# KAGRA

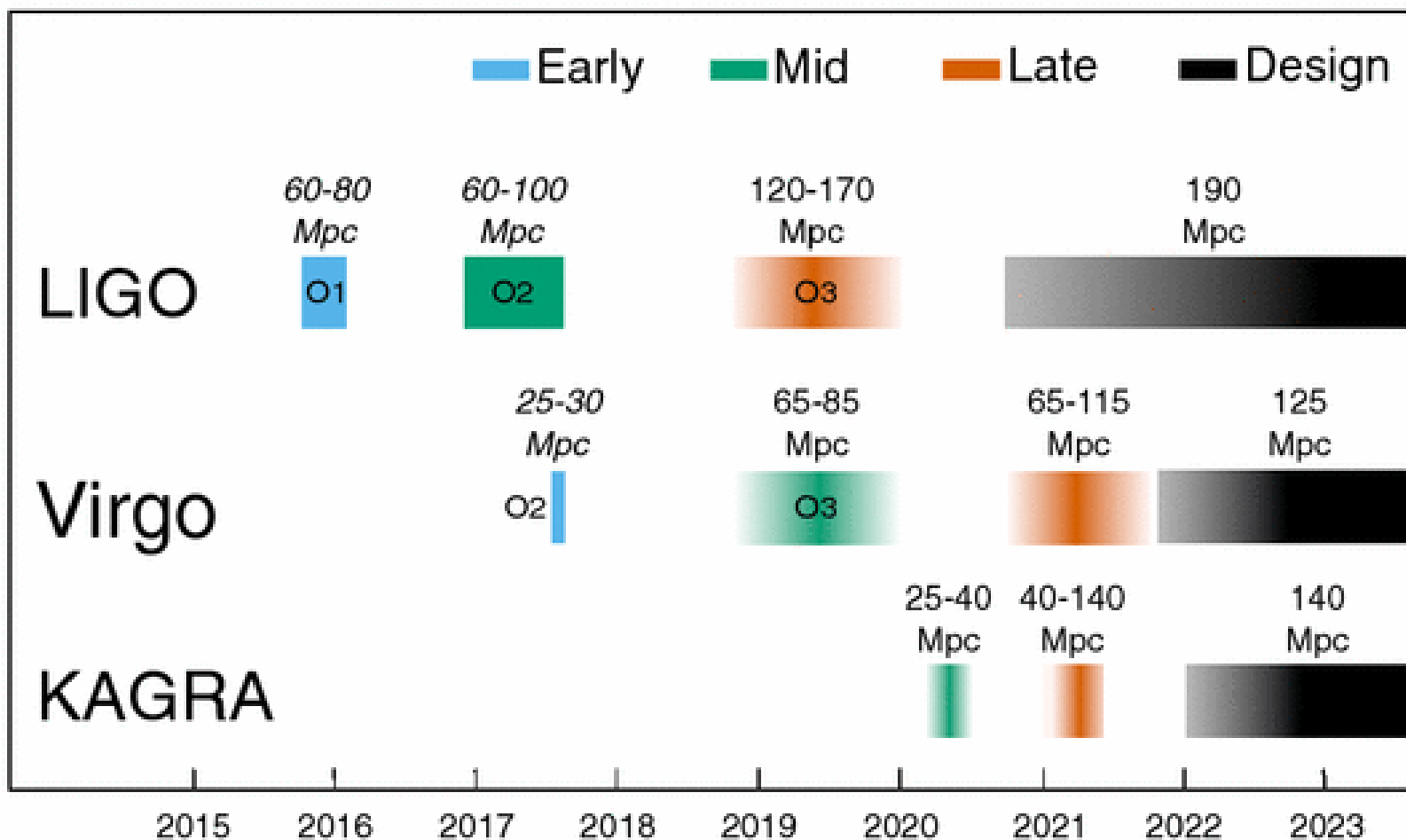


Kamioka Gravitational Wave *Detector*  
Работы начались в апреле 2012 г.  
Возможно, запуск состоится уже в 2019 г.



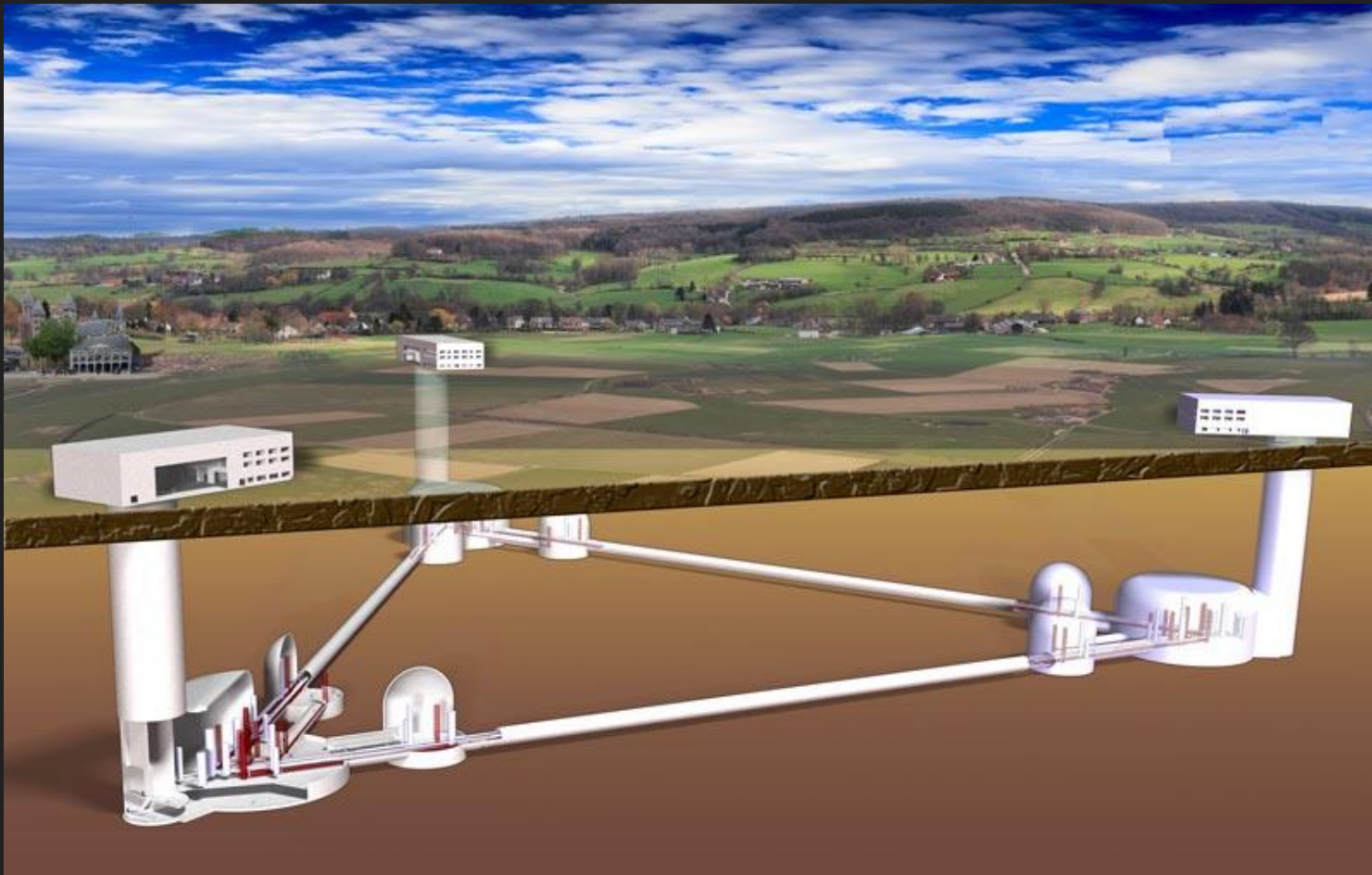
# Совместные наблюдения в ближайшем будущем

Многие десятки (до сотни)  
ожидаемых событий  
в 2019-2020 гг.



# Einstein Telescope

<http://physicsworld.com>

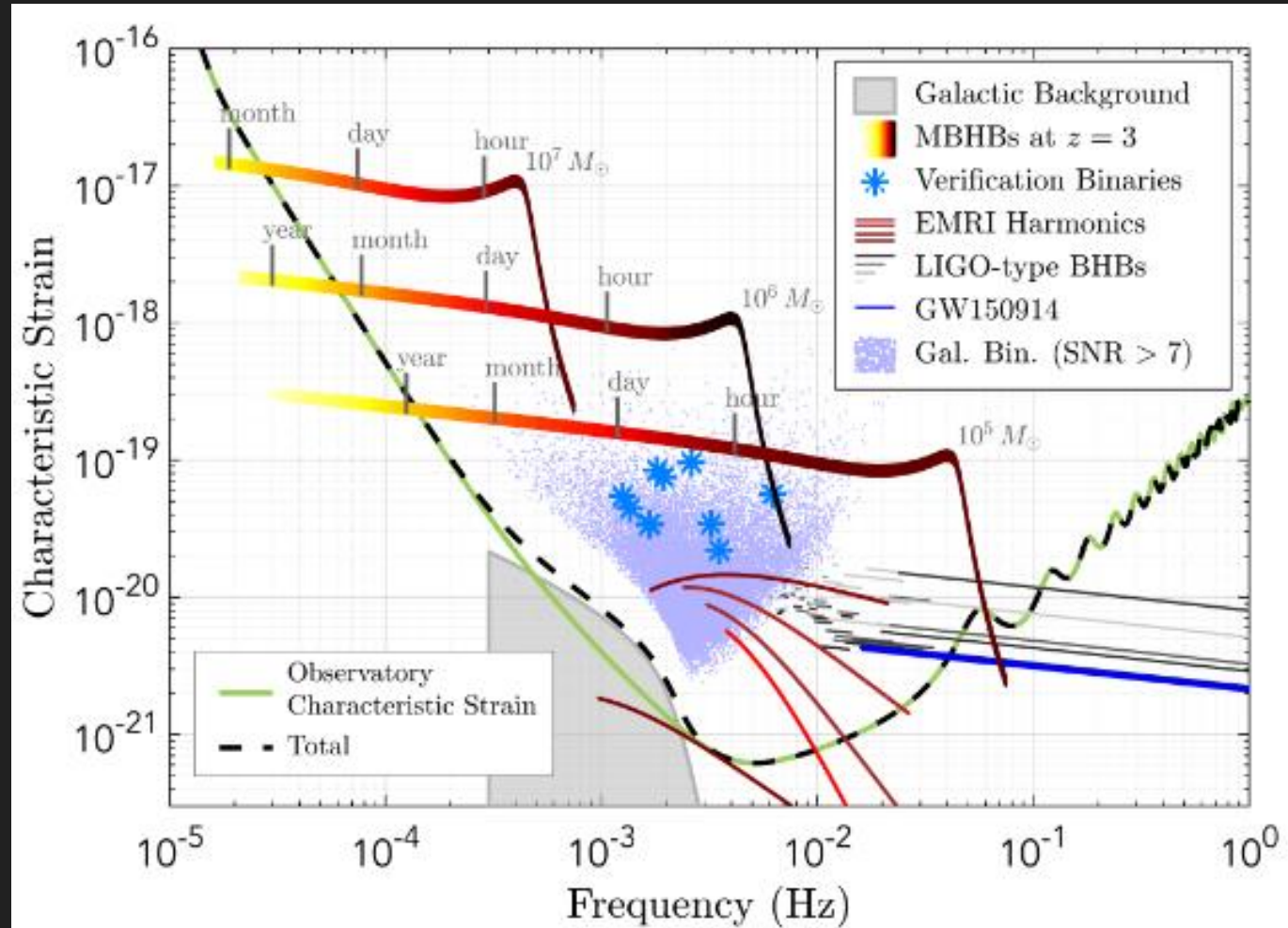
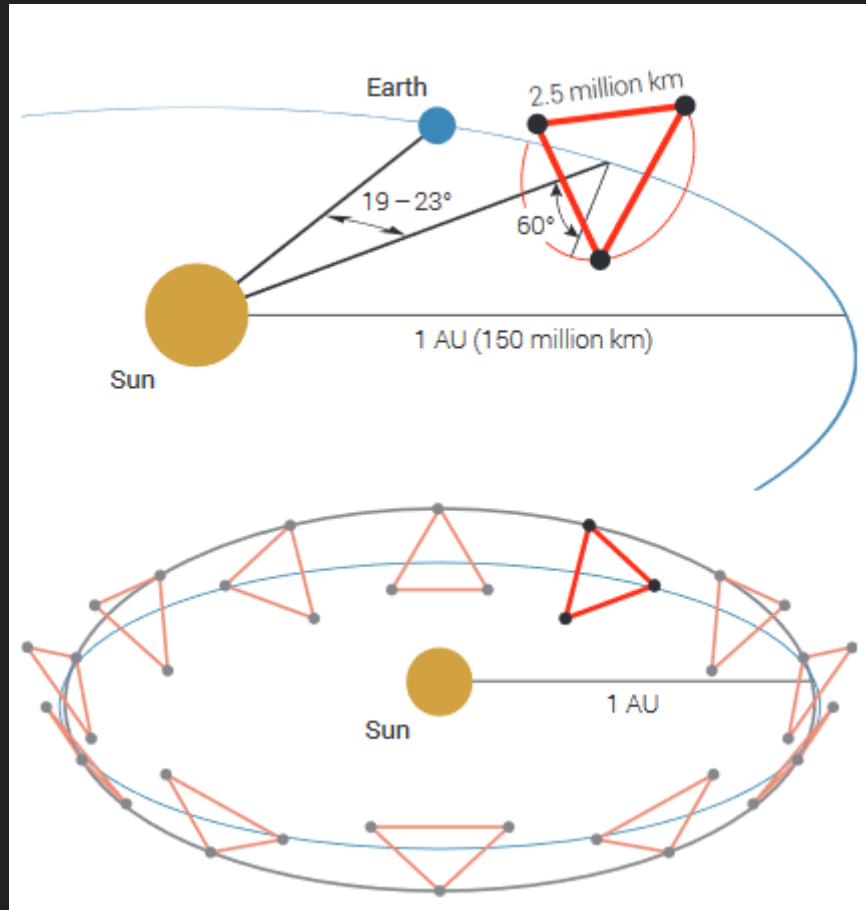


Установка третьего поколения.  
В 2017 г. закончился этап  
технической разработки проекта.

Широкая полоса 1 Hz- 10 kHz.  
Высокая чувствительность.

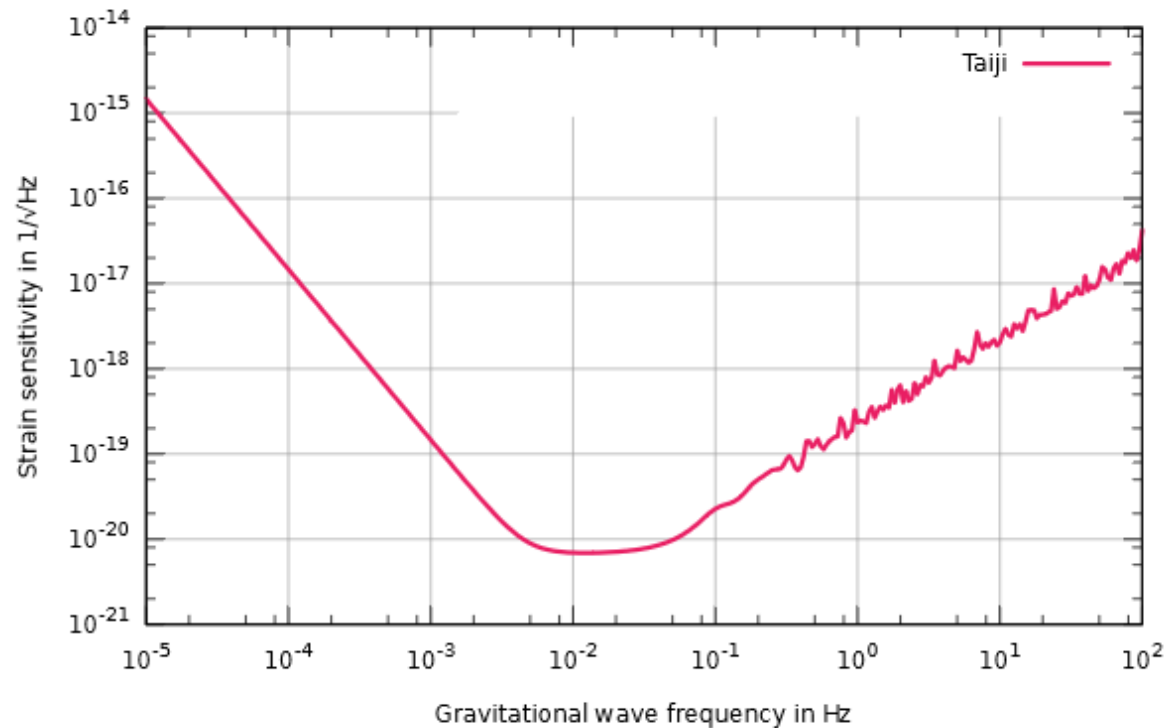
# eLISA

1702.00786

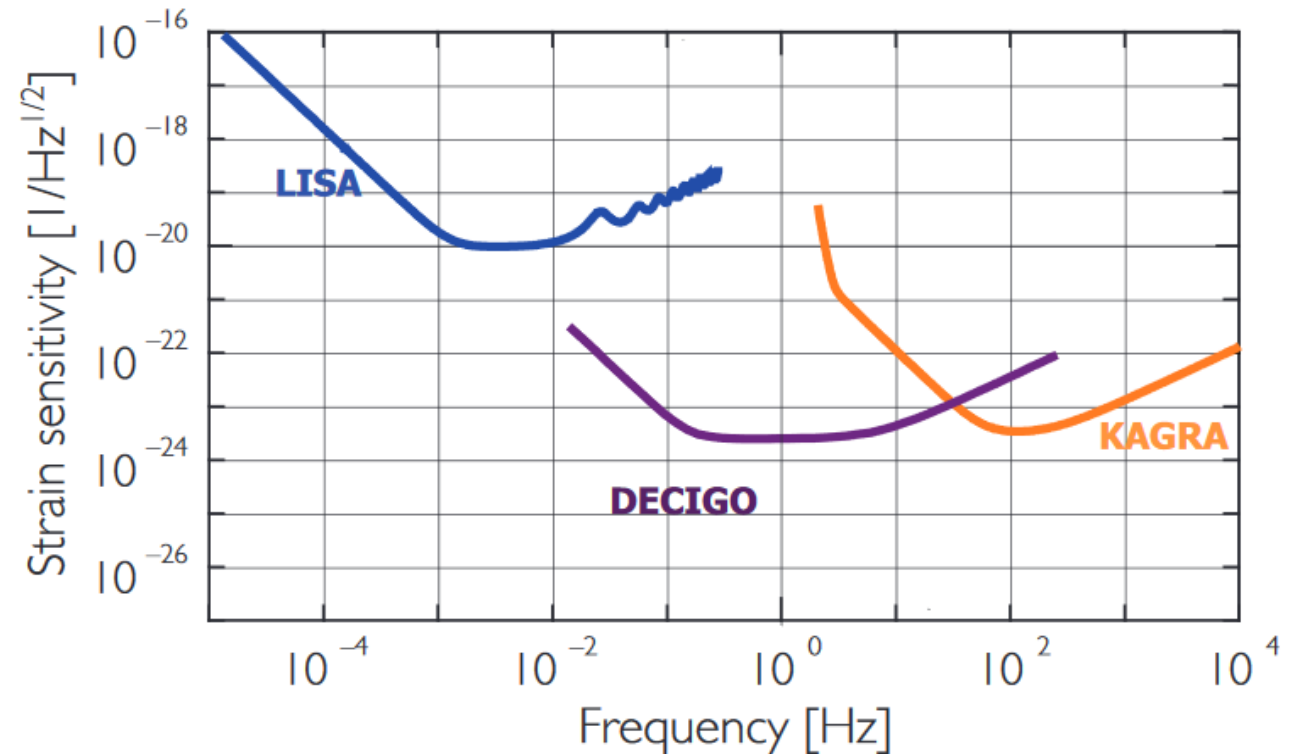


# TAIJI, TIANQIN и DECIGO

TAIJI и TIANQIN – китайские проекты  
1807.09495, 1902.04423



DECIGO, Pre-DECIGO – японские проекты  
1802.06977, 1607.00897





# Пульсары и гравитационные волны

Сажин (1978), Детвейлер [Detweiler] (1979)

$$\frac{\delta\nu}{\nu} = -H^{ij} [h_{ij}(t_e, x_e^i) - h_{ij}(t_e - D/c, x_p^i)]$$

$$R(t) = - \int_0^t \frac{\delta\nu}{\nu} dt.$$

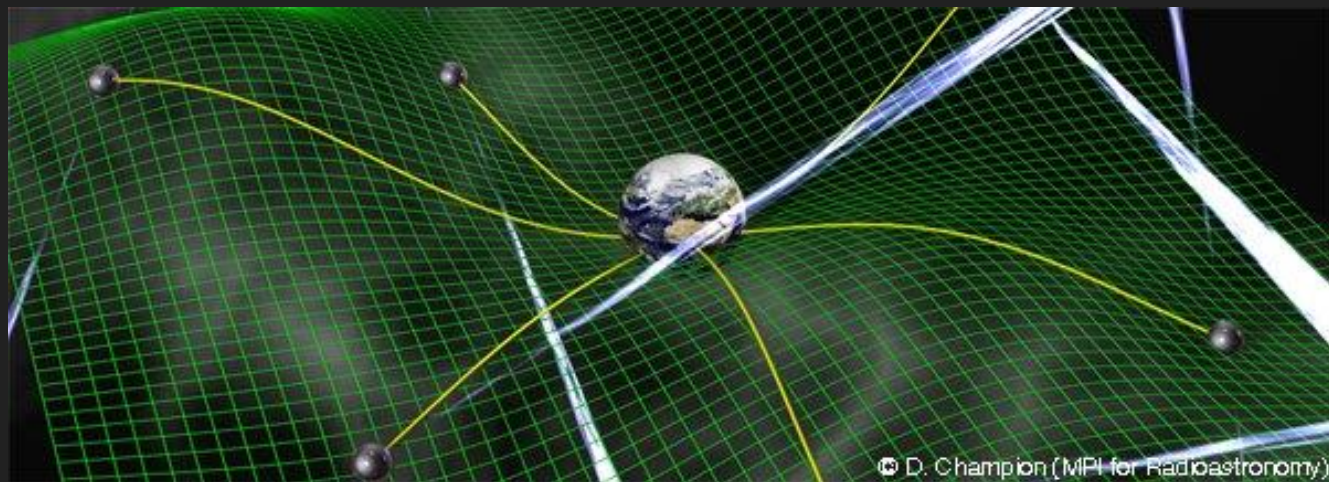
$$R_e(t) = \int_0^t \frac{P_+ A_+(t) + P_\times A_\times(t)}{2(1 - \gamma)} dt$$

$$\Delta t \sim 10\text{ns} \left( \frac{1\text{Gpc}}{d} \right) \left( \frac{M}{10^9 M_\odot} \right)^{5/3} \left( \frac{10^{-7}\text{Hz}}{f} \right)^{1/3}$$

Наблюдения большого количества радиопульсаров с хорошими временными характеристиками должны позволить выделить сигнал в точке наблюдения.

Будут наблюдаться скоррелированные изменения отклонения во времени прихода импульсов.

Периоды волн  $\sim$  (недель – лет)



# Hellings-and-Downs curve

1707.01615

Для изотропного стохастического неполяризованного фонового сигнала для пары пульсаров получим корреляцию отклонений в тайминге:

$$c(\theta) = \frac{3}{2}x \ln x - \frac{x}{4} + \frac{1}{2} + \frac{1}{2}\delta(x)$$

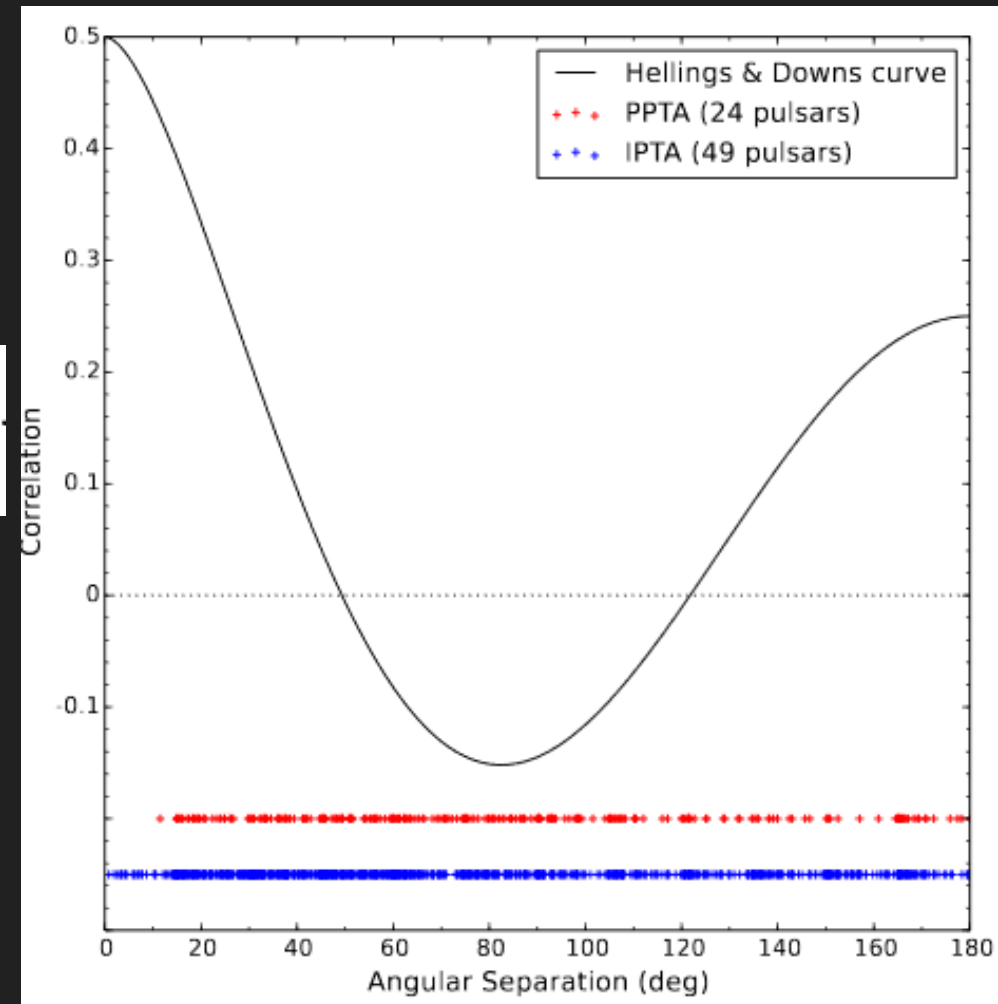
$$x = [1 - \cos \theta]/2$$

$\Theta$  – угол между пульсарами

См. детали в 1412.1142

$$\frac{\text{cov}_{XY}}{\sigma_X \sigma_Y} = \frac{\sum (X - \bar{X})(Y - \bar{Y})}{\sqrt{\sum (X - \bar{X})^2 \sum (Y - \bar{Y})^2}}$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t, \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Y_t$$





# Три проекта и их объединение

$\text{IPTA} = \text{PPTA} + \text{EPTA} + \text{NANOGrav}$   
<http://ipta4gw.org/>



EPTA - 18 пульсаров  
PPTA - 24 пульсара  
NANOGrav - 28 пульсаров



PPTA – Телескоп в Парксе

NANOGrav – GBT и Аресибо

EPTA – Эффелсберг, Сардиния, Джодрелл Бэнк, Нанси, Вестерборк

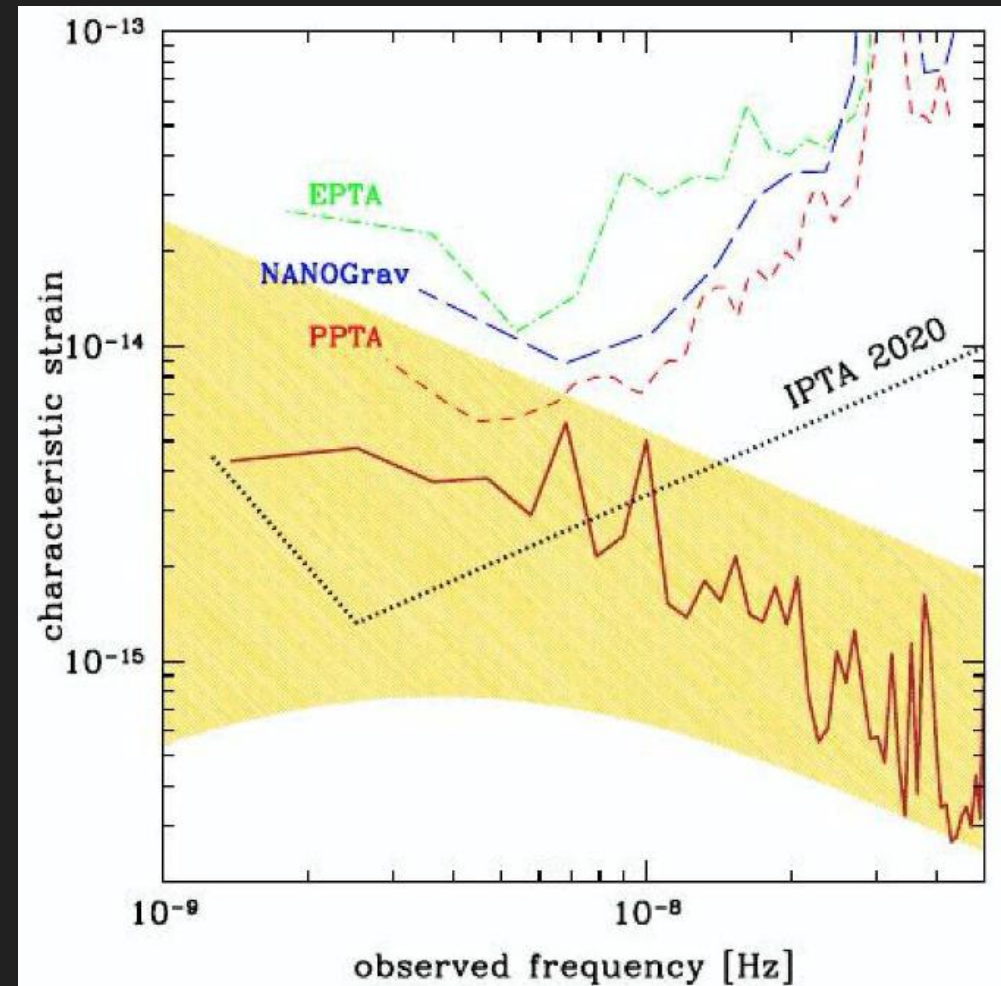
# Пределы и прогнозы

1707.01615

По индивидуальным источникам пределы  
 $\sim h < 2 \cdot 10^{-14}$  на частоте 10 nHz.

Пределы на всплески

$$h^{\text{mem}} \sim 5 \times 10^{-16} \left( \frac{\mu}{10^8 M_{\odot}} \right) \left( \frac{1 \text{ Gpc}}{D} \right)$$

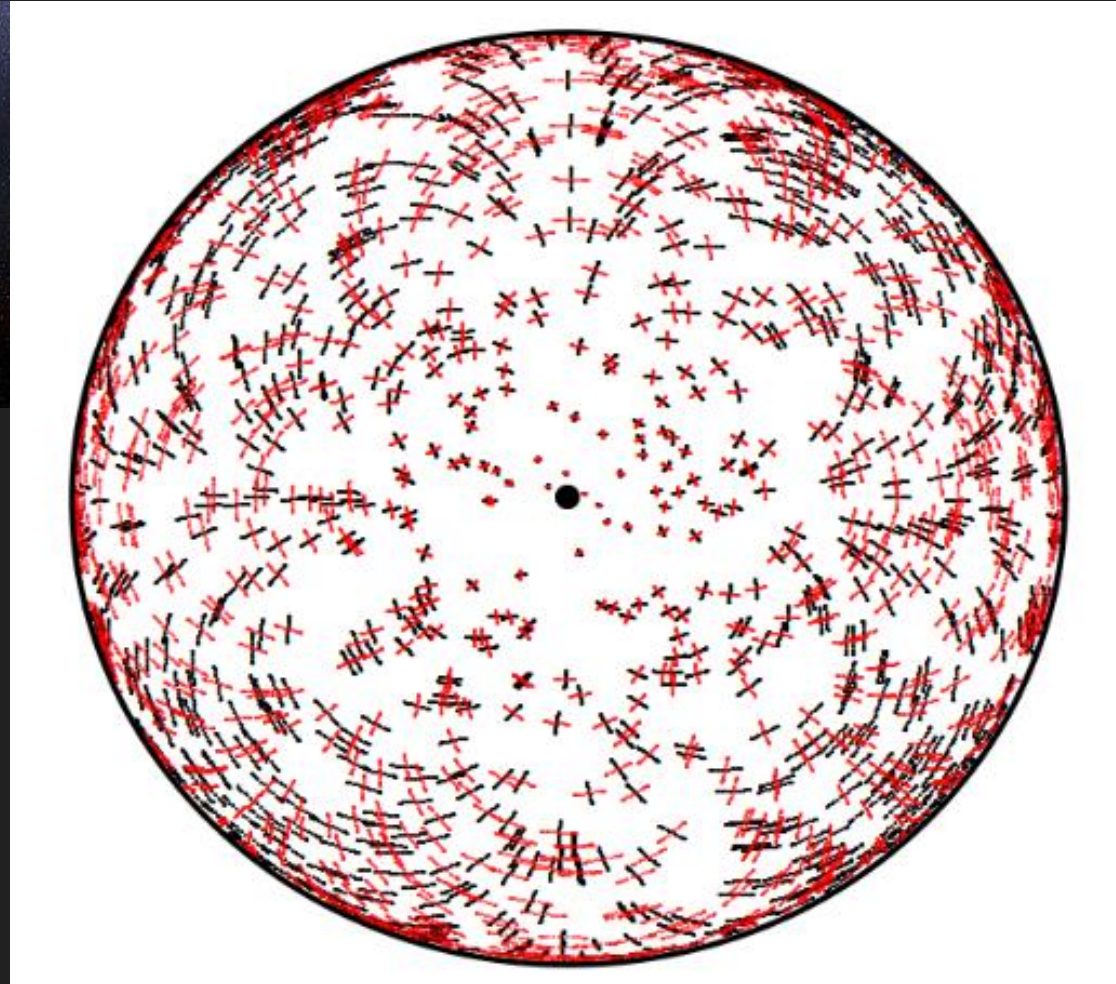
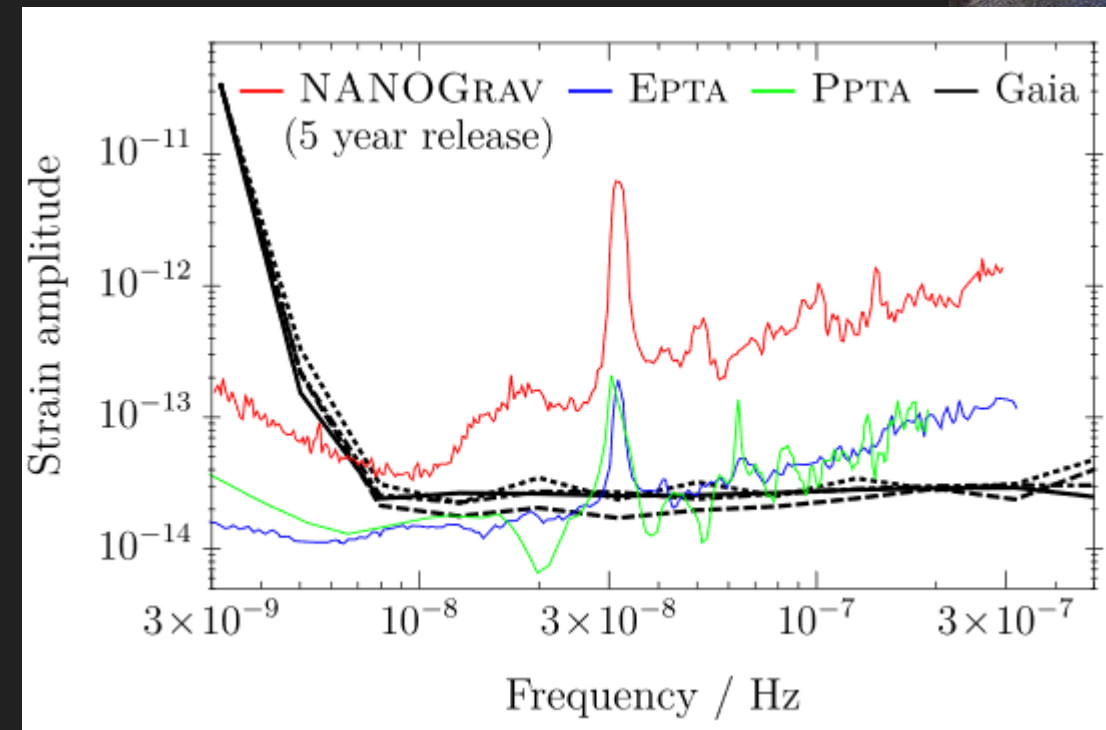




# Астрометрия и гравволны

1707.06239

Идея: Брагинский, Кардашев,  
Полнарев, Новиков (1990).



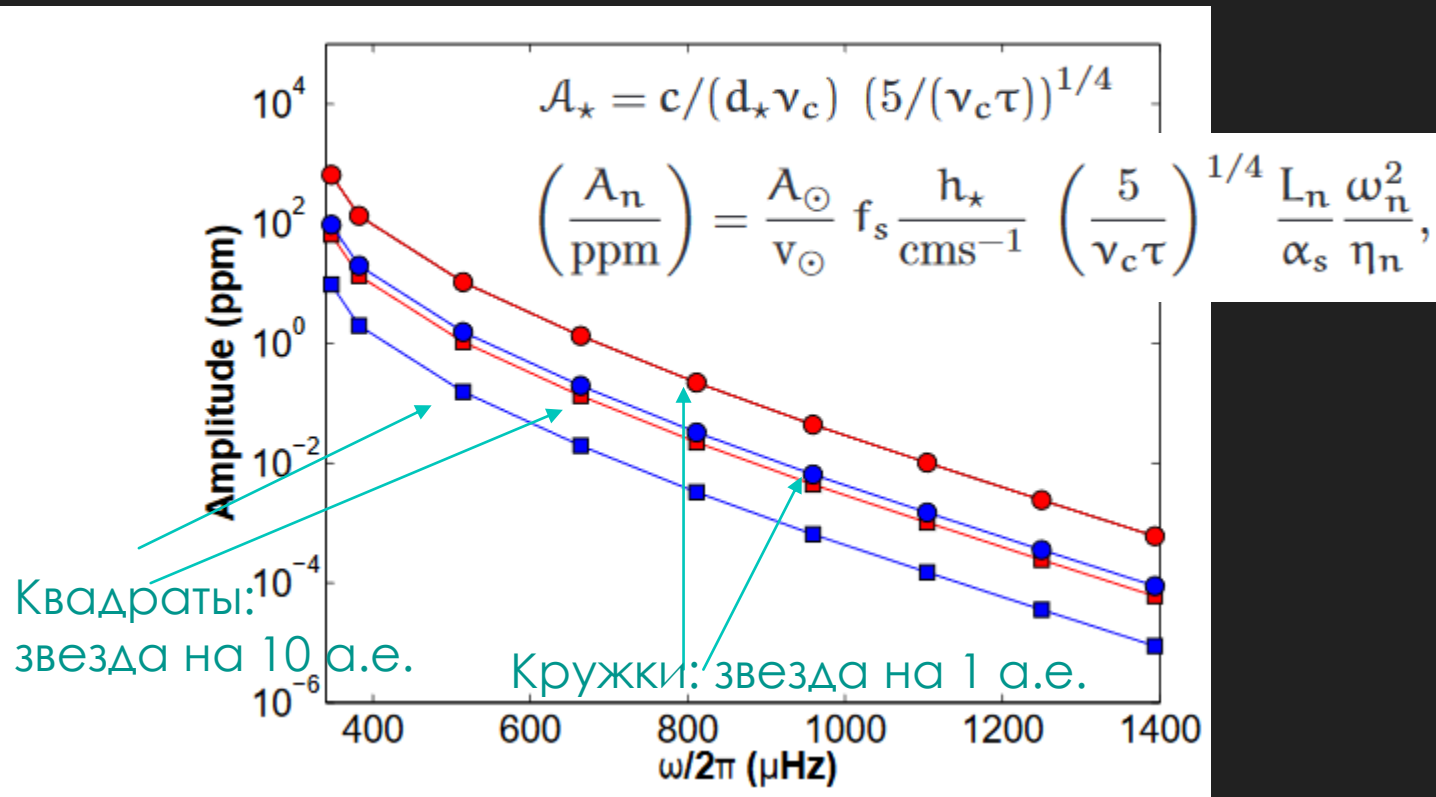
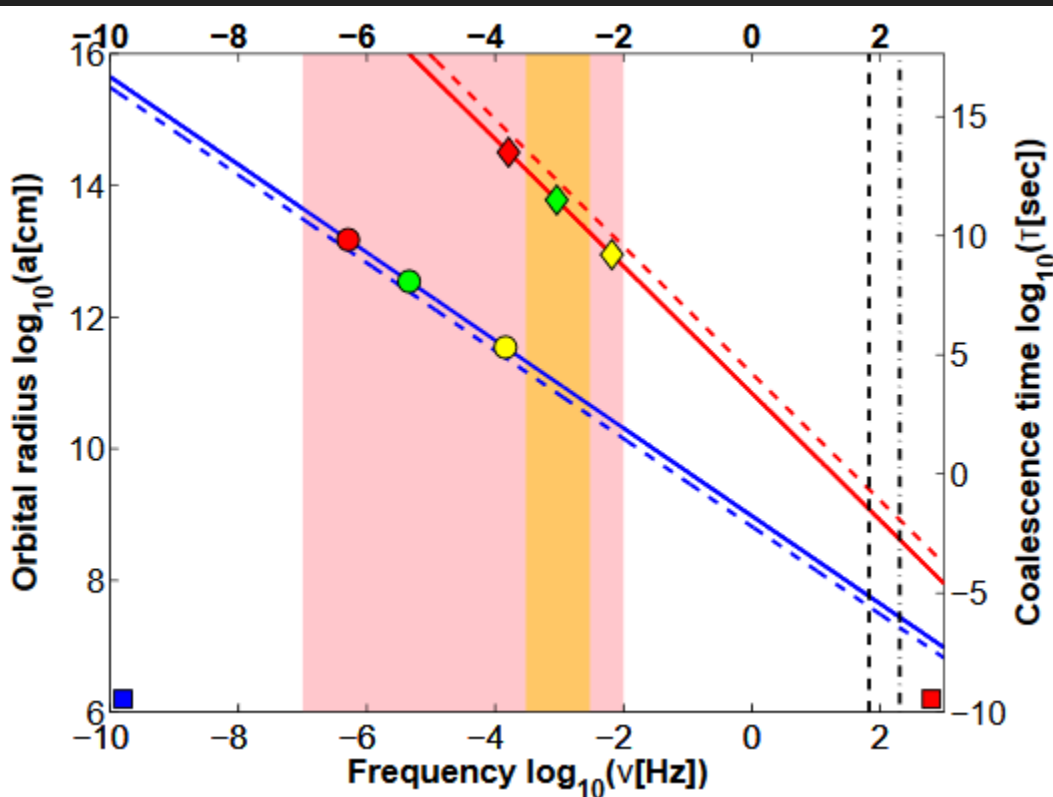
# Влияние на звезды на резонансной частоте

1707.06249

Влияние на звезду в кратной системе, включающей в себя пару сливающихся компактных объектов (черных дыр).

$$\nu/\nu_c = 0.0728 (\nu_c \tau)^{-3/8}$$

$\nu_c$  is equal to  $(c^3/(GM_c))$



# Затухание гравволн в среде

1707.05192

Хокинг:  
верхний предел для  
гидродинамического  
приближения

$$\gamma = 16\pi G\eta$$

Для нерелятивистских частиц,  
где  $\tau_{\text{au}}$  – интервал между  
столкновениями частиц

$$\gamma \sim \frac{Gnm}{\omega^2} \left(\frac{\bar{v}}{c}\right)^2 \frac{1}{\tau}$$

Также может быть существенно затухание Ландау  
в расширяющейся вселенной.

Затухание важно для первичных волн с большой длиной.

Затухание амплитуды порядка  $1/(\omega\tau_U)$   
 $\tau_U$  – возраст вселенной.

# Полезные статьи и обзоры

- “Gravitational wave astronomy: the current status”. Blair et al. 1602.02872
- “A common misconception about LIGO detectors of gravitational waves”. Faraoni. gr-qc/0702079