

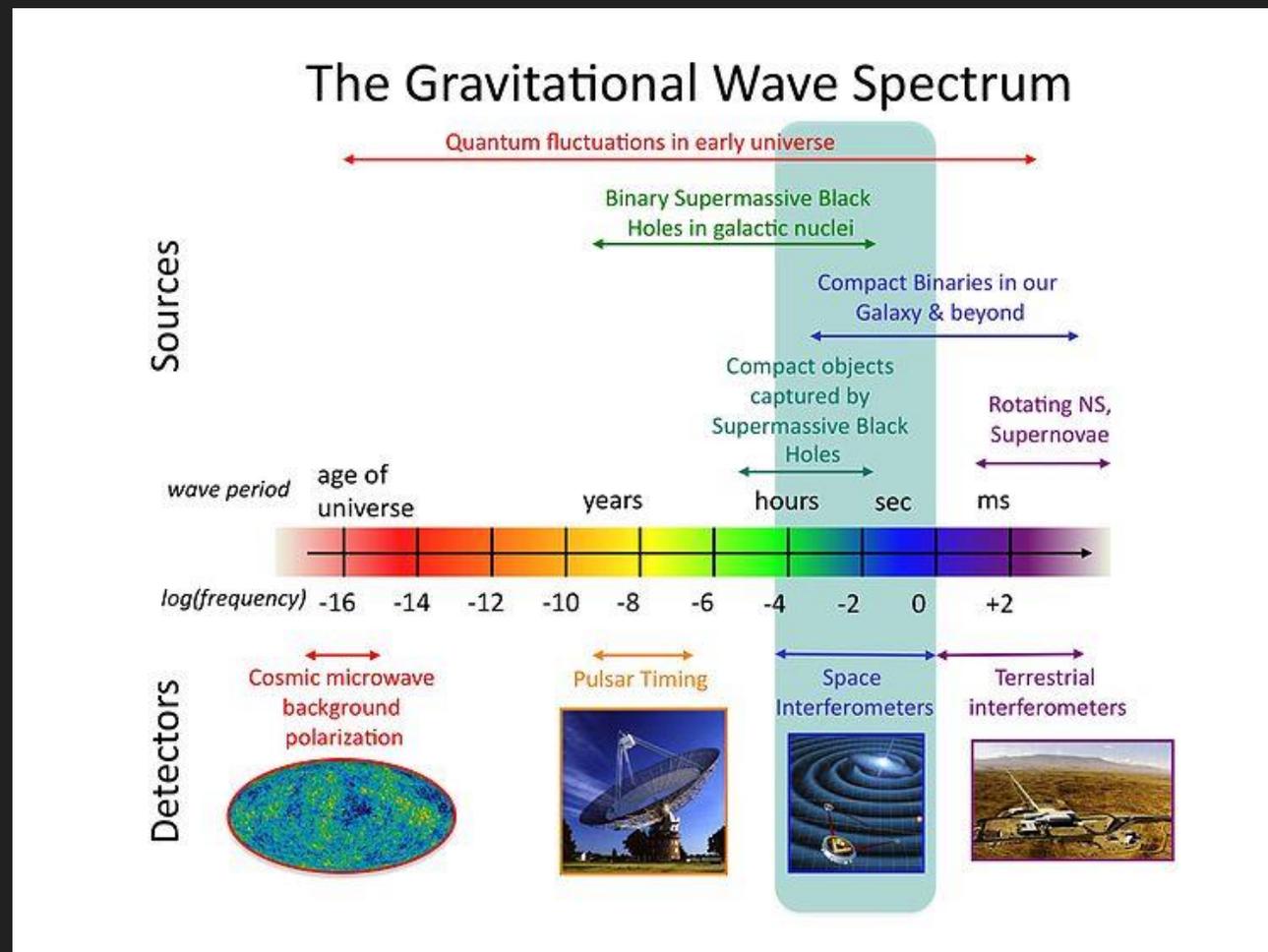
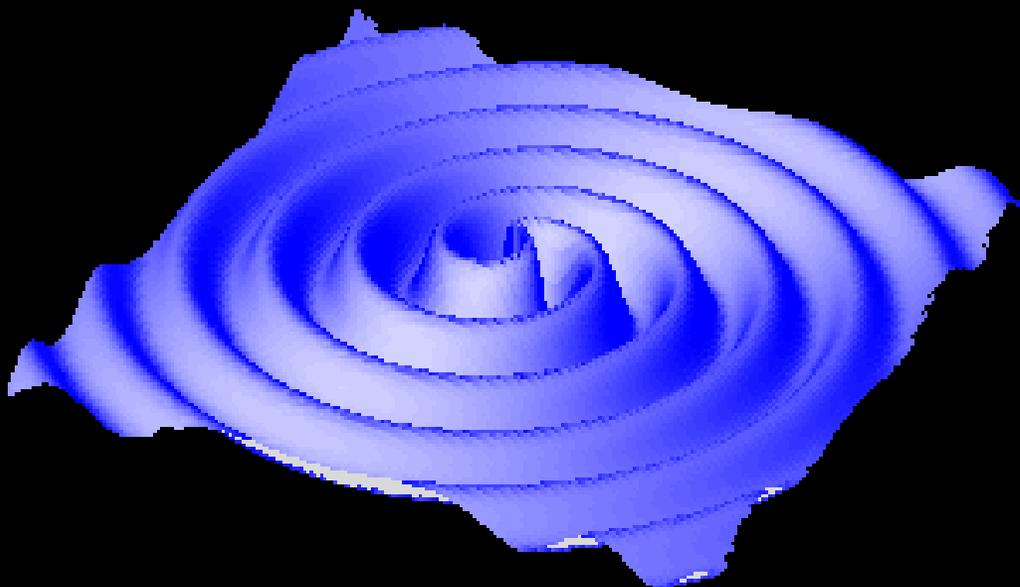
Регистрация гравитационных волн

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).

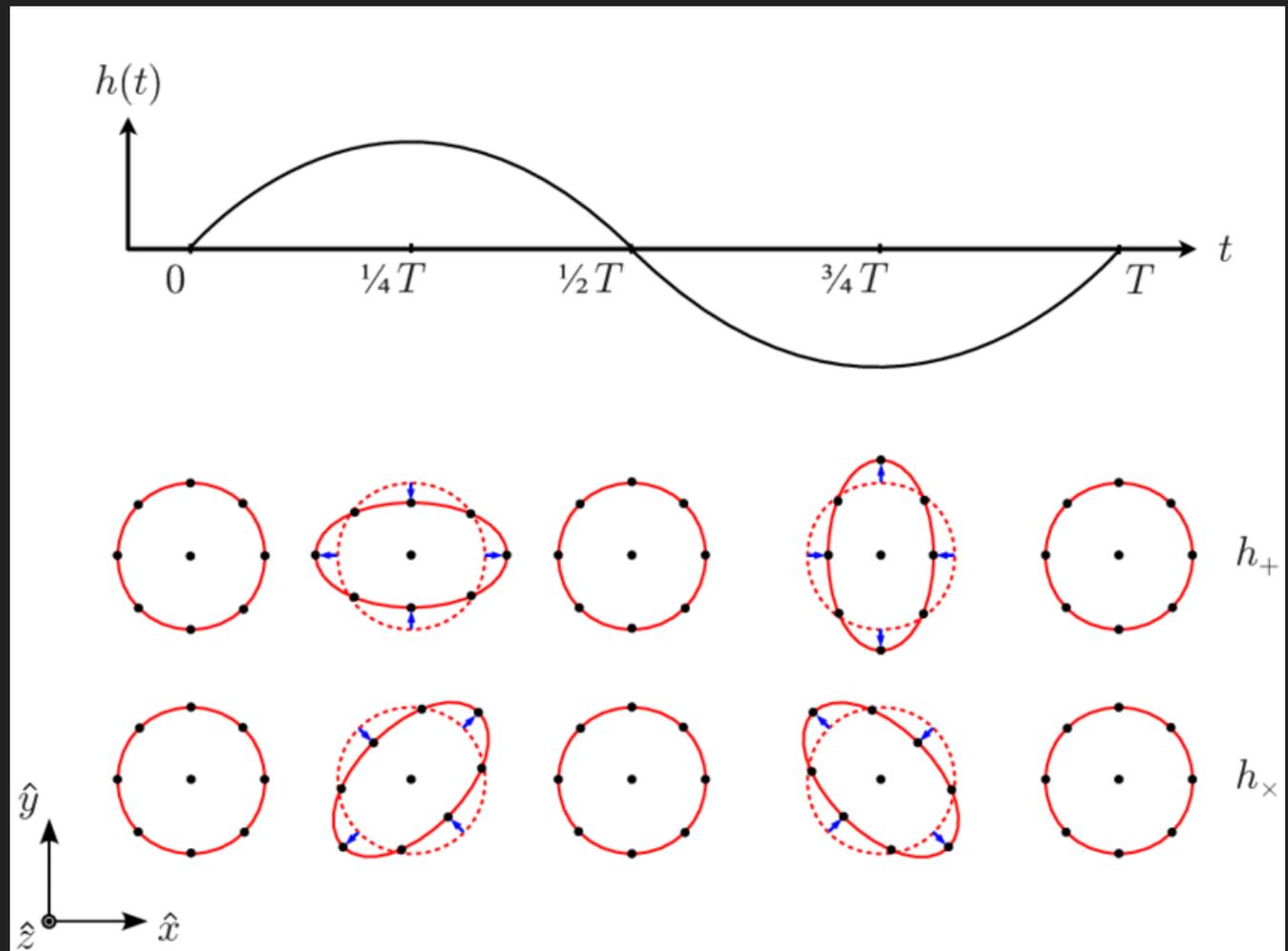
Спектр гравитационных волн

- 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

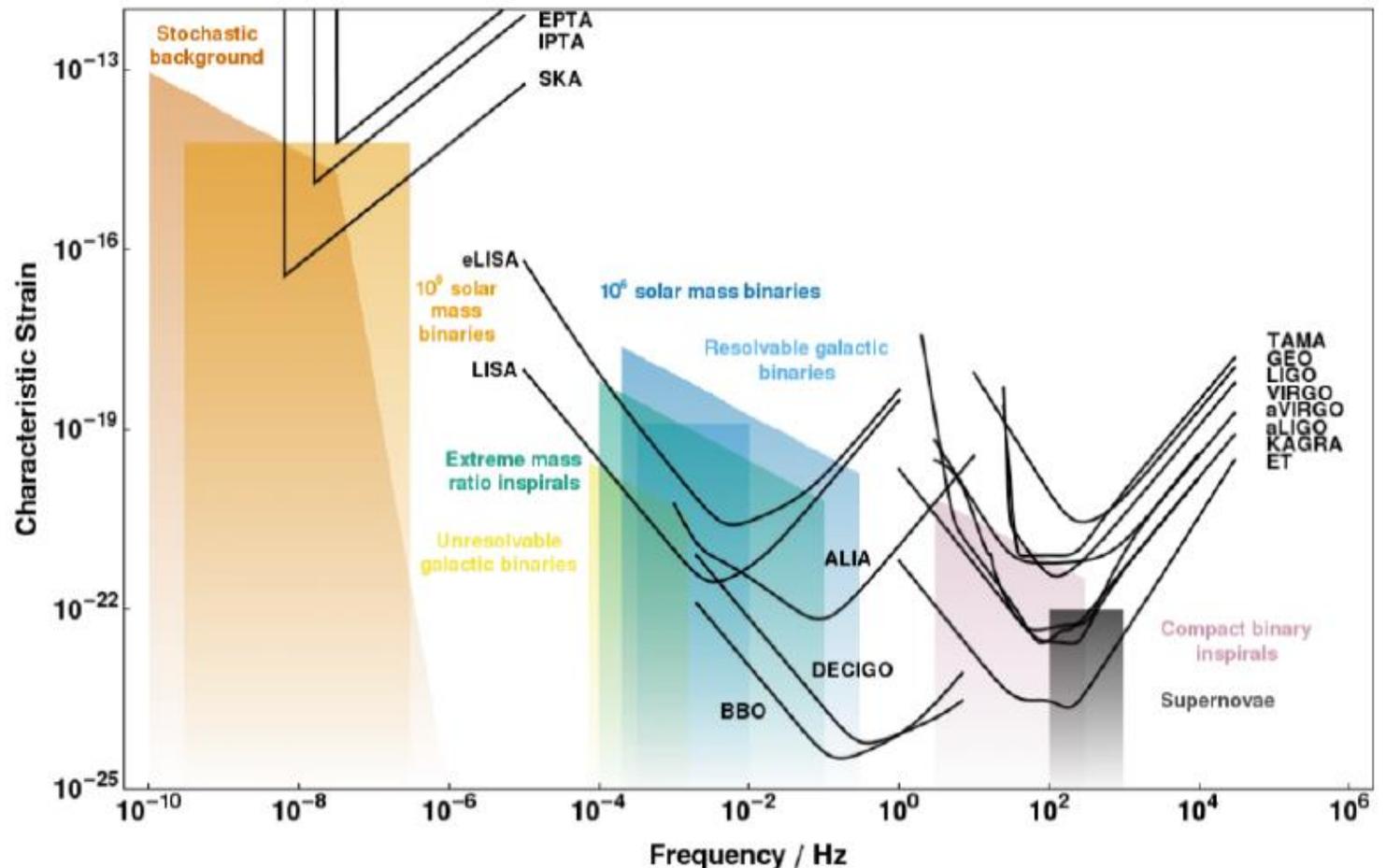


Косвенные (астрономические) методы:

- 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

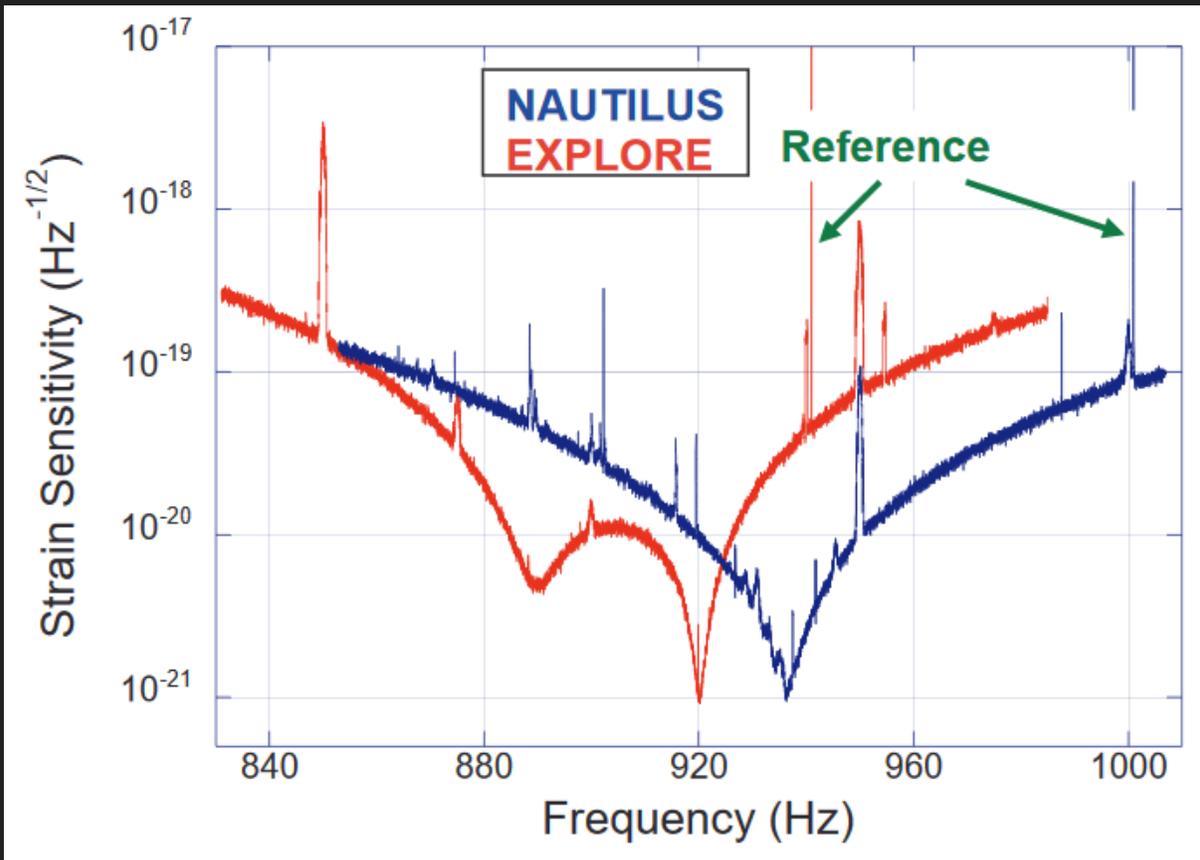
1009.1138

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)



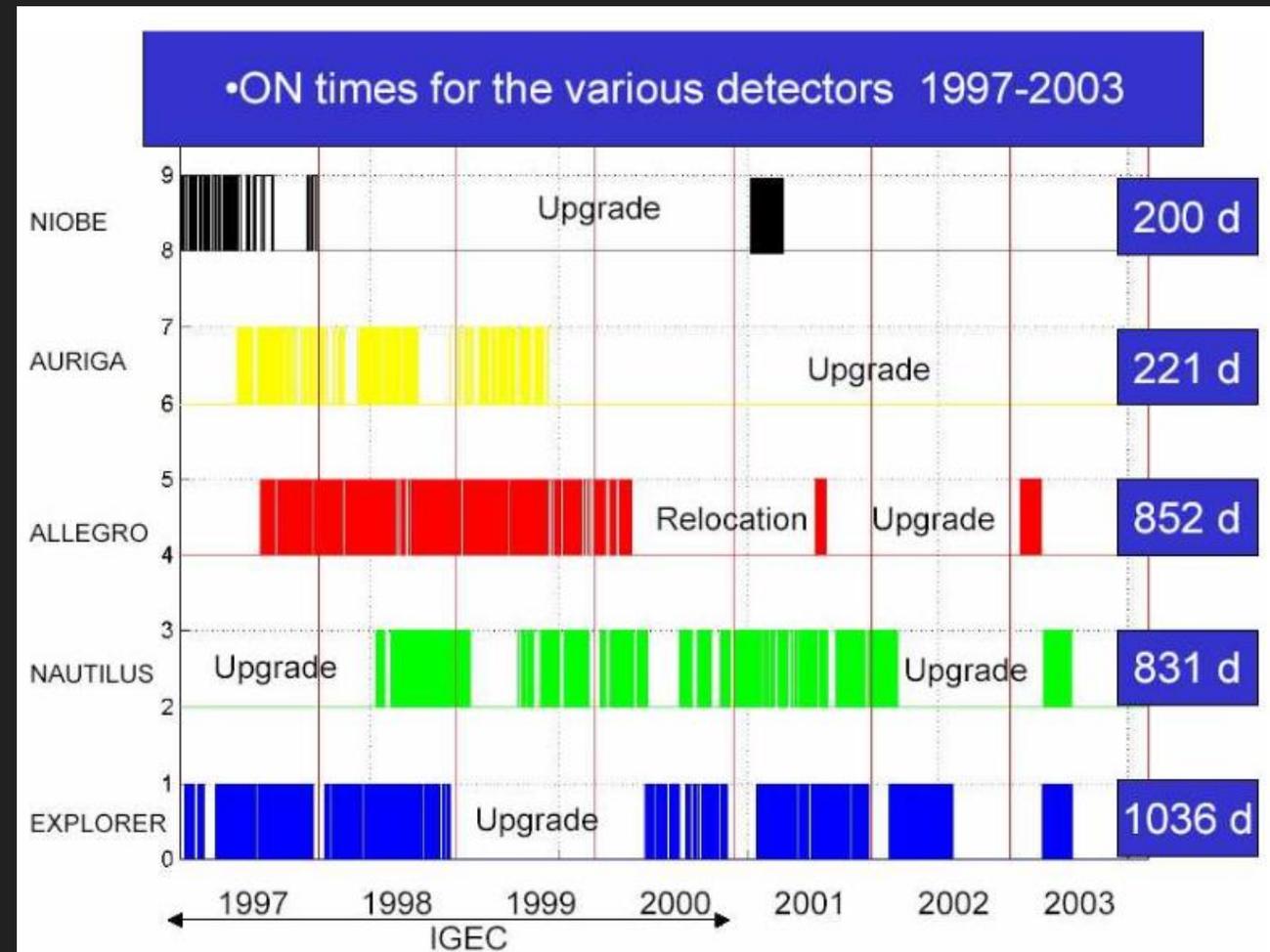
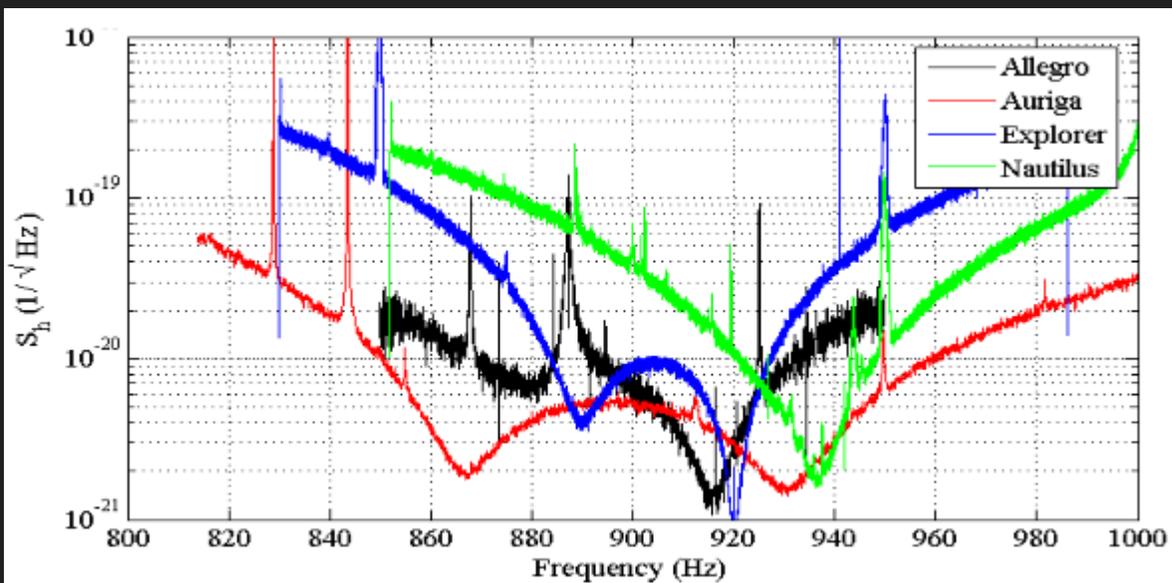
Чувствительность в узком
высокочастотном диапазоне.



Детекторы предпоследнего поколения

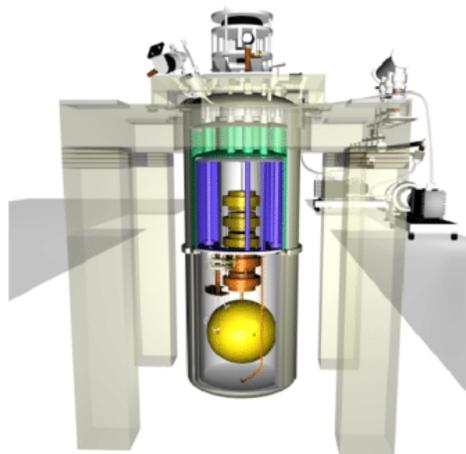
1009.1138

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

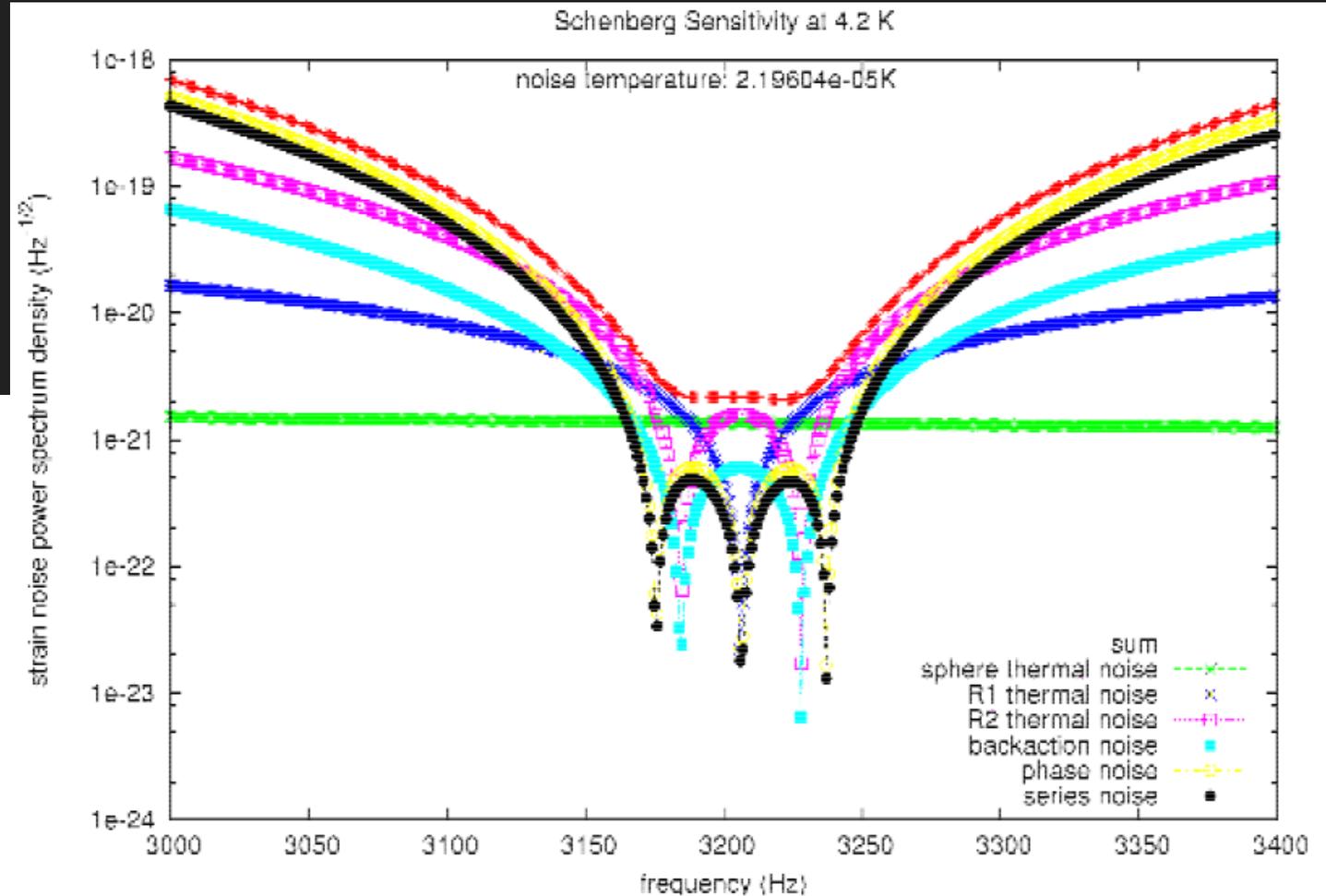


Сферические детекторы – последняя попытка

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

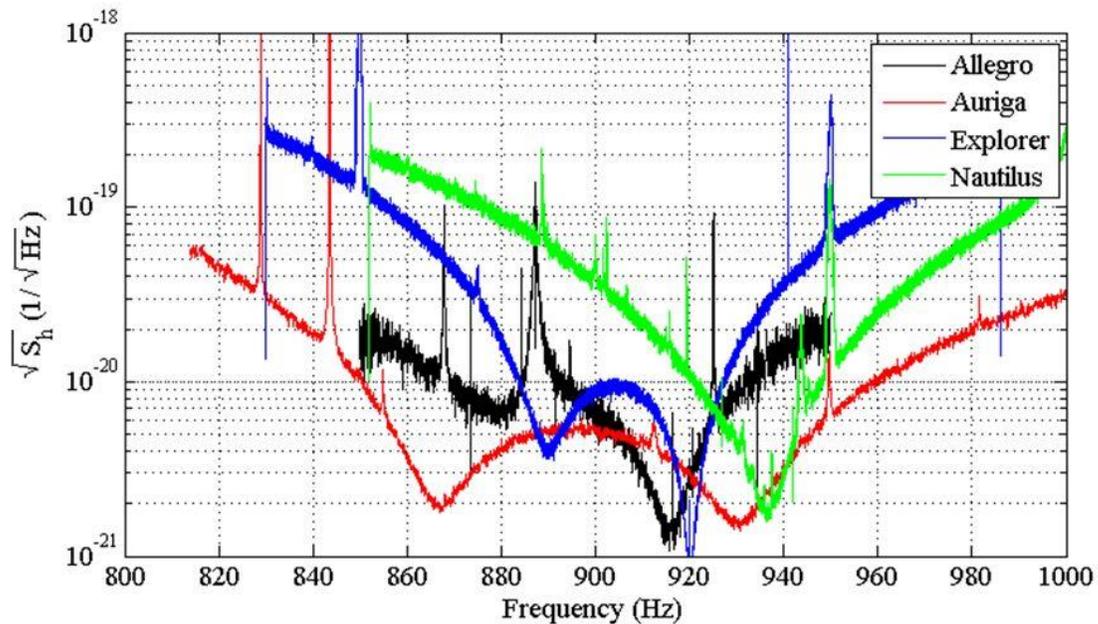


- Mass 1,15 ton
- Diameter 65 cm
- Alloy 94%Cu-6%Al
- Transducers:
μwave parametrics

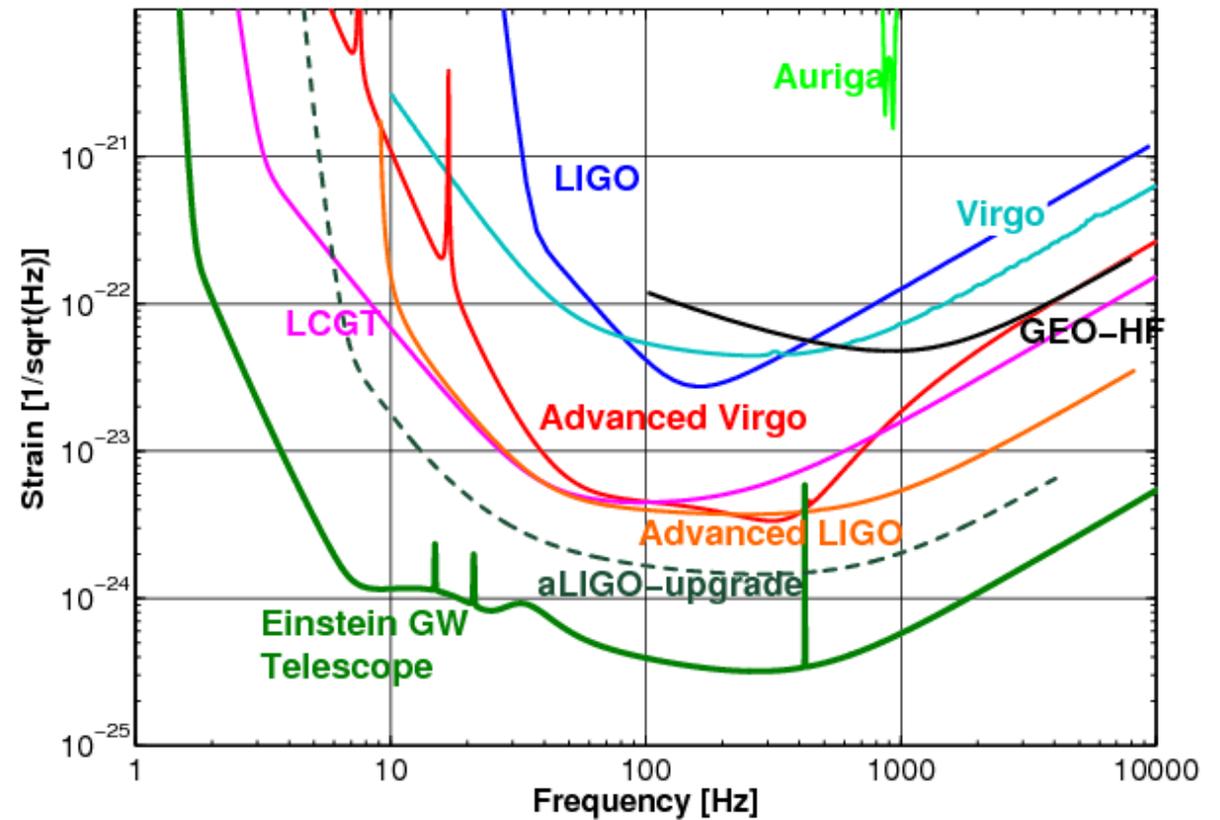


Бары против интерферометров

SENSITIVITY OF PRESENT DETECTORS

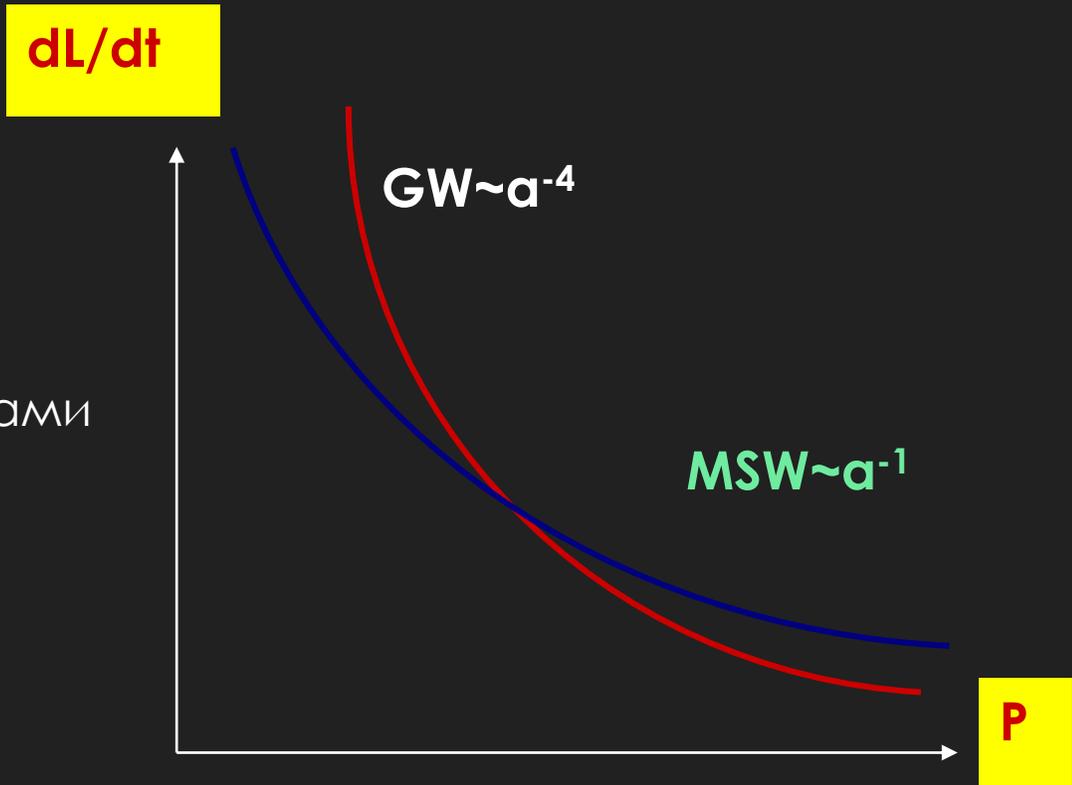
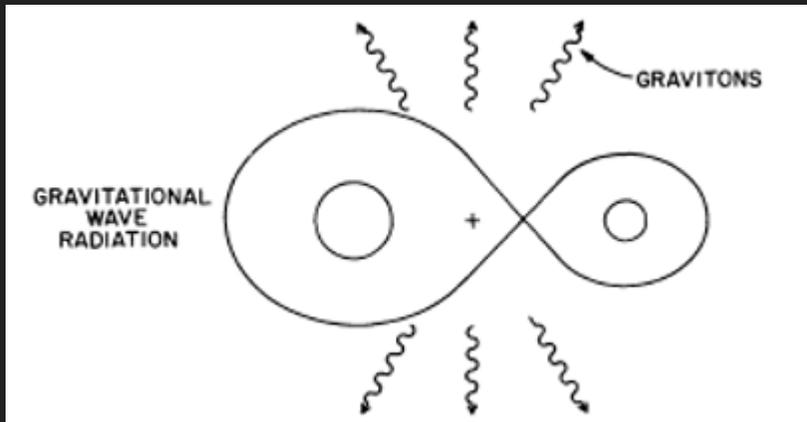


ILLIAS WP1 - Cascina 13.11.2006



Гравитационные волны и тесные двойные системы

Достаточно давно известно, что гравитационные волны играют большую роль в эволюции тесных двойных систем. Когда звезды существенно сблизилась, дальнейшее сближение возможно за счет испускания гравитационных волн. Это происходит как в системах с компактными объектами (белыми карликами и нейтронными звездами), так и в системах обычных звезд.

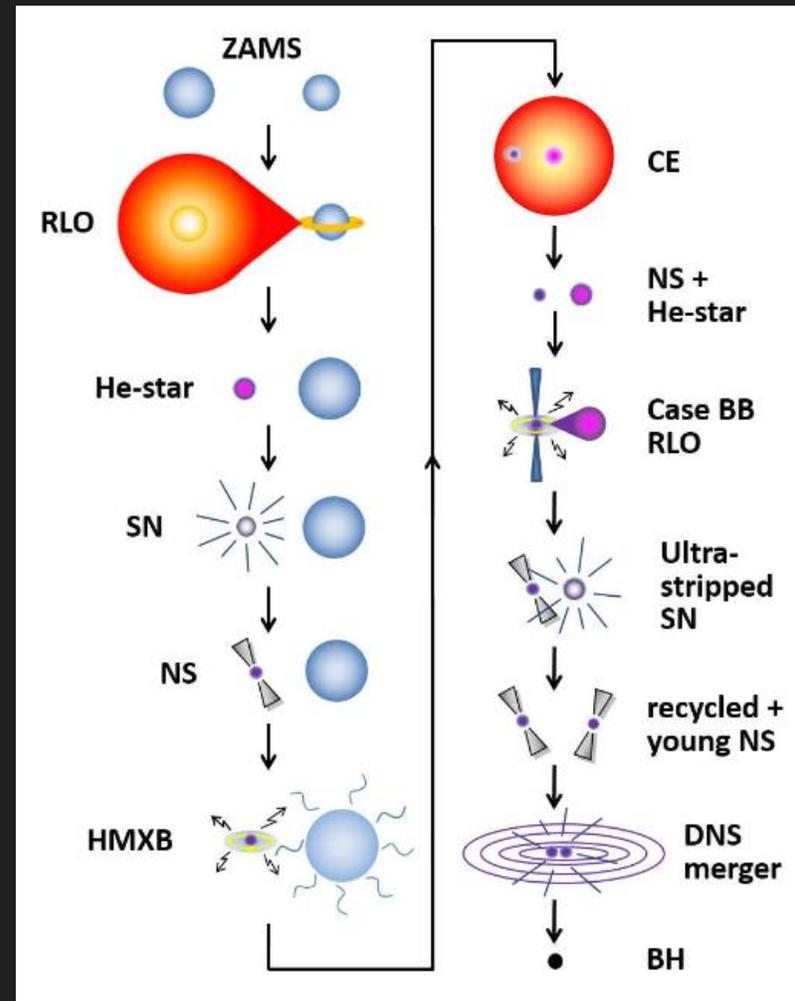


Но сильнее всего эффект проявляется в системах из двух нейтронных звезд.

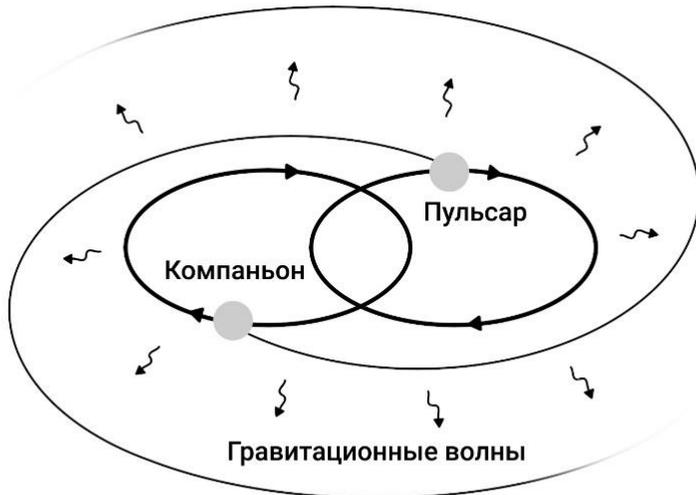
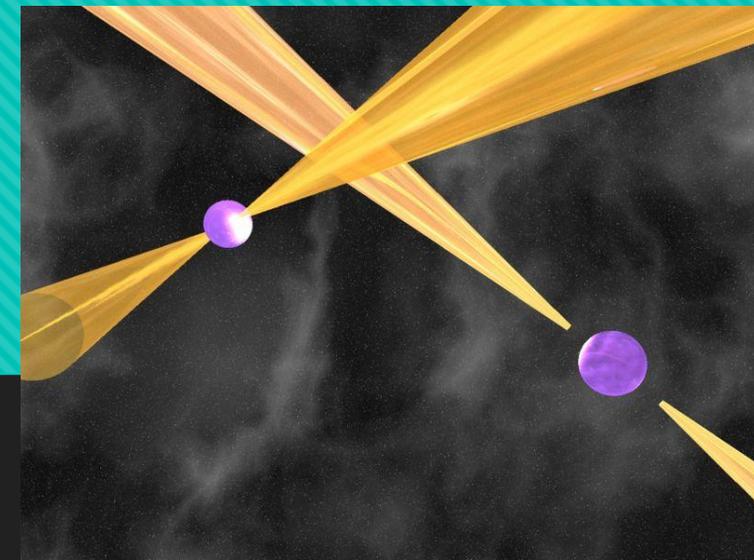
Двойные нейтронные звезды

1706.09438

Radio Pulsar	Type	P (ms)	\dot{P} (10^{-18})	B (10^9 G)	P_{orb} (days)	e	M_{psr} (M_{\odot})	M_{comp} (M_{\odot})
J0453+1559 ^a	recycled	45.8	0.186	0.92	4.072	0.113	1.559	1.174
J0737–3039A ^b	recycled	22.7	1.76	2.0	0.102	0.088	1.338	1.249
J0737–3039B ^b	young	2773.5	892	490	— —	— —	1.249	1.338
J1518+4904 ^c	recycled	40.9	0.0272	0.29	8.634	0.249	***	***
B1534+12 ^d	recycled	37.9	2.42	3.0	0.421	0.274	1.333	1.346
J1753–2240 ^e	recycled	95.1	0.970	2.7	13.638	0.304	—	—
J1755–2550 ^{f*}	young	315.2	2430	270	9.696	0.089	—	> 0.40
J1756–2251 ^g	recycled	28.5	1.02	1.7	0.320	0.181	1.341	1.230
J1811–1736 ^h	recycled	104.2	0.901	3.0	18.779	0.828	< 1.64	> 0.93
J1829+2456 ⁱ	recycled	41.0	0.0525	0.46	1.176	0.139	< 1.38	> 1.22
J1906+0746 ^{j*}	young	144.1	20300	530	0.166	0.085	1.291	1.322
J1913+1102 ^k	recycled	27.3	0.161	0.63	0.206	0.090	< 1.84	> 1.04
B1913+16 ^l	recycled	59.0	8.63	7.0	0.323	0.617	1.440	1.389
J1930–1852 ^m	recycled	185.5	18.0	18	45.060	0.399	< 1.32	> 1.30
J1807–2500B ^{n*}	GC	4.2	0.0823	0.18	9.957	0.747	1.366	1.206
B2127+11C ^p	GC	30.5	4.99	3.8	0.335	0.681	1.358	1.354



Двойные пульсары



Две нейтронные звезды, вращающиеся вокруг общего центра масс, сближаются за счет испускания гравитационных волн. Очень точные измерения возможны благодаря тому, что можно с очень высокой точностью измерять, как меняется время прихода импульсов радиопульсара.

$$\frac{d\Delta_{E\odot}}{dt} = \sum_i \frac{Gm_i}{c^2 r_i} + \frac{v_{\oplus}^2}{2c^2} - \text{constant} .$$

$$\Delta_{S\odot} = -\frac{2GM_{\odot}}{c^3} \log(1 + \cos \theta) ,$$

$$T = t_{\text{obs}} - t_0 + \Delta_C - D/f^2 + \Delta_{R\odot}(\alpha, \delta, \mu_{\alpha}, \mu_{\delta}, \pi)$$

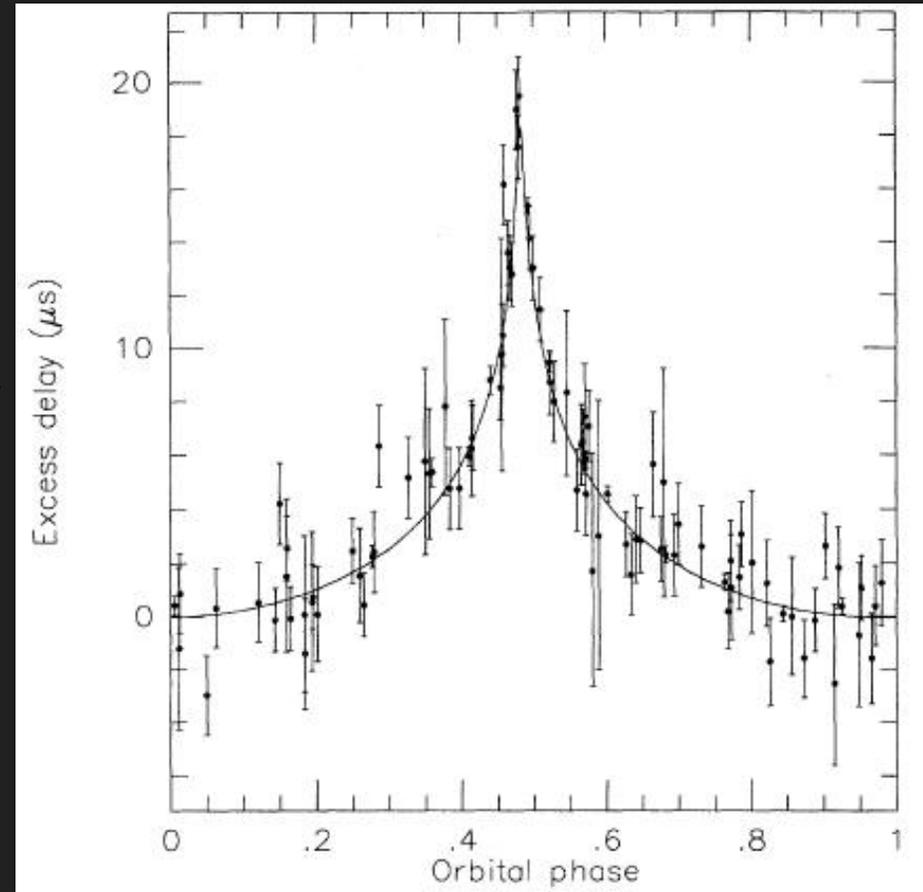
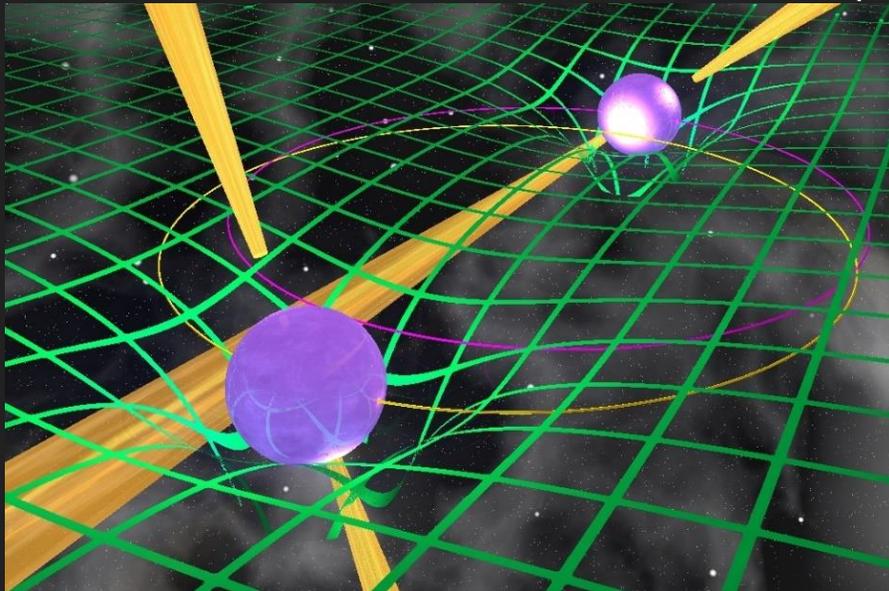
$$+ \Delta_{E\odot} - \Delta_{S\odot}(\alpha, \delta)$$

$$- \Delta_R(x, e, P_b, T_0, \omega, \dot{\omega}, \dot{P}_b) - \Delta_E(\gamma) - \Delta_S(r, s)$$

Задержка Шапиро

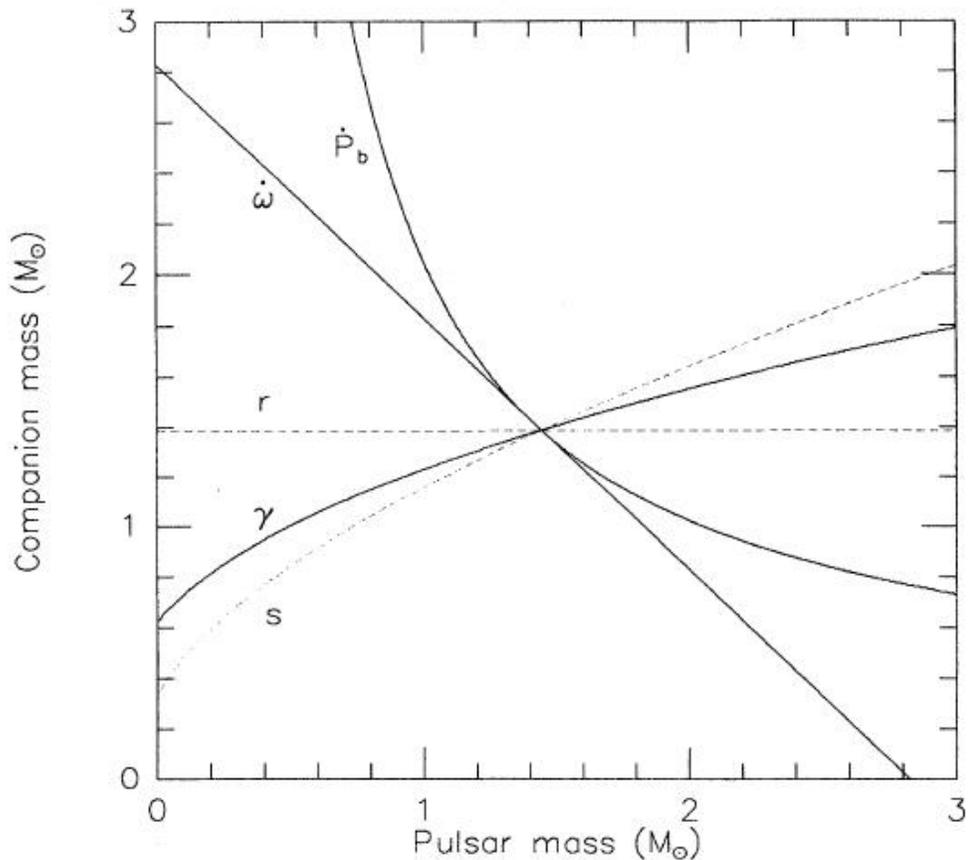
$$\Delta_S = -2r \log(1 - s \cos[2\pi(\phi - \phi_0)])$$

Измерения задержки Шапиро позволяют не только определять параметры двойной системы, но и проверять теории гравитации.



PSR 1855+09 (Taylor, Nobel lecture)

Измерения массы



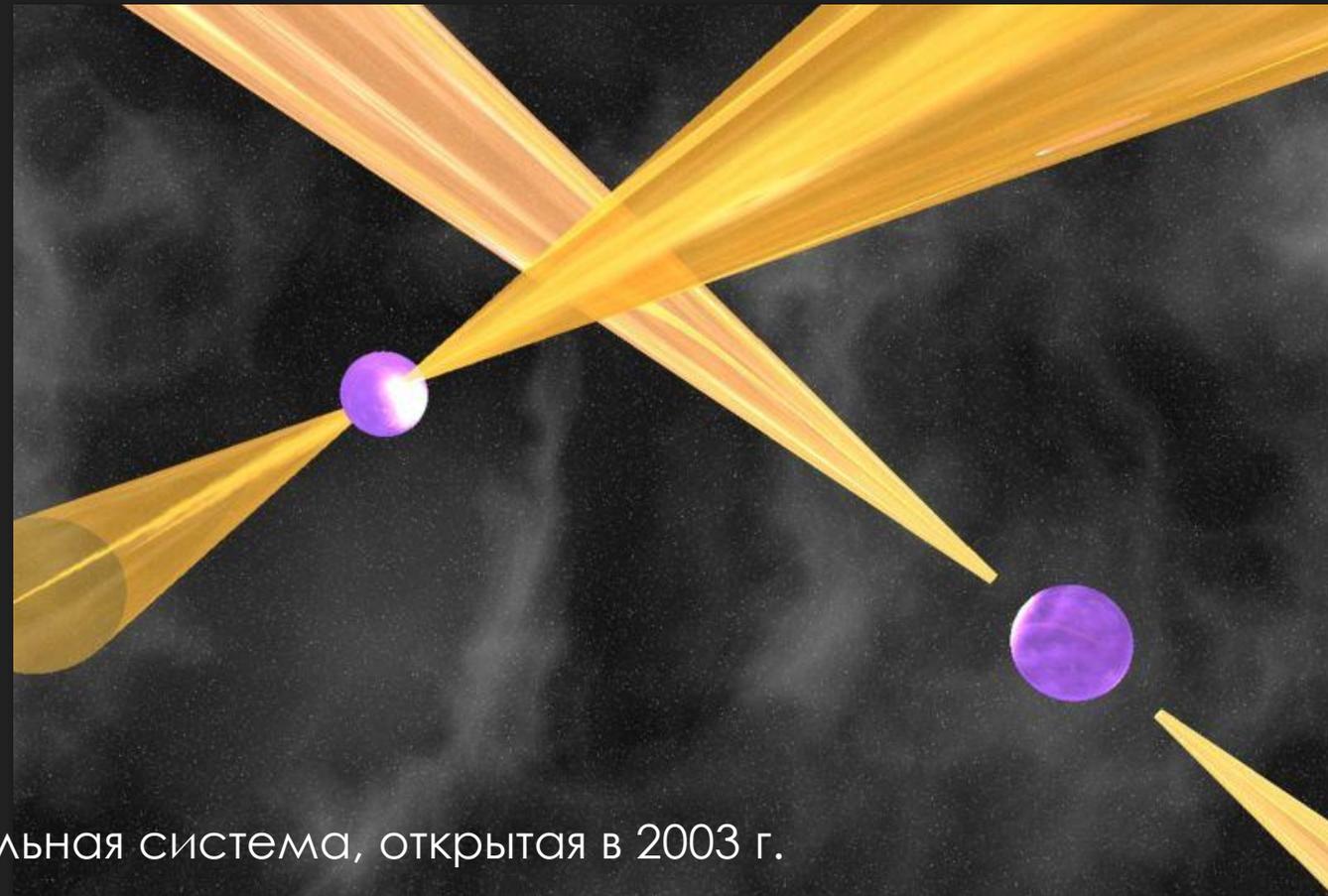
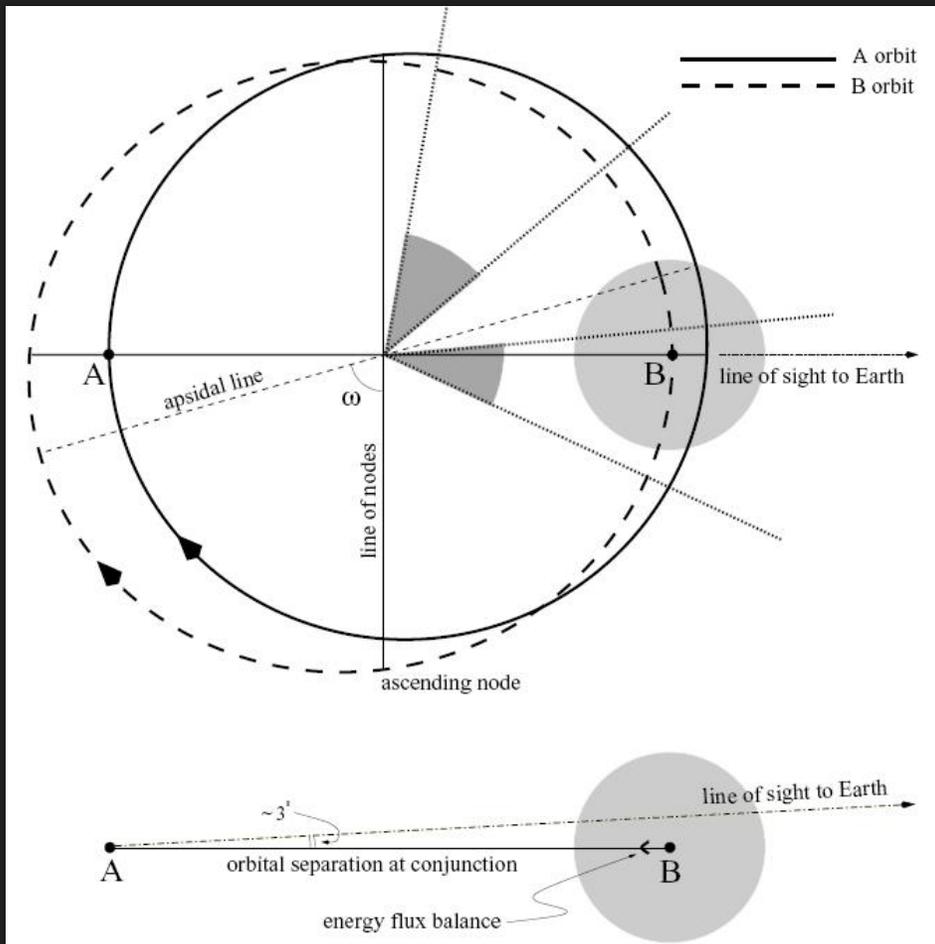
Наблюдение сразу нескольких эффектов позволяет измерить массы обеих звезд с очень высокой точностью. Иногда до 0.001.

Хорошо измерено, как происходит сближение компонент двойной. Оно находится в полном соответствии с предсказаниями ОТО. Это было сильнейшим аргументом в пользу существования гравволн.

Кроме того, можно оценить темп слияний нейтронных звезд.

Двойной PSR J0737-3039

(Lyne et al. astro-ph/0401086)

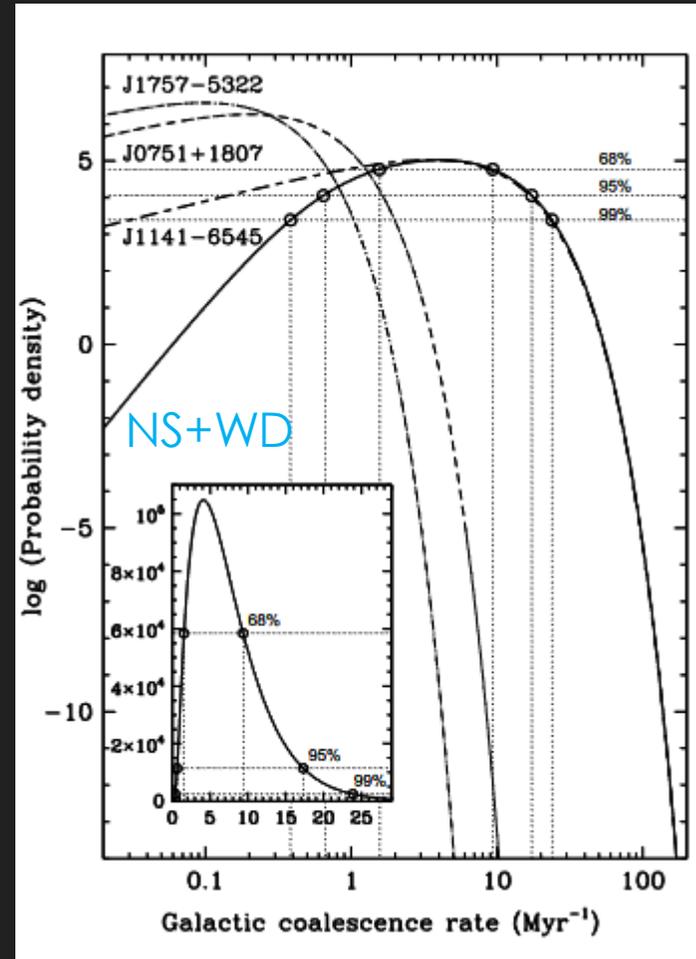
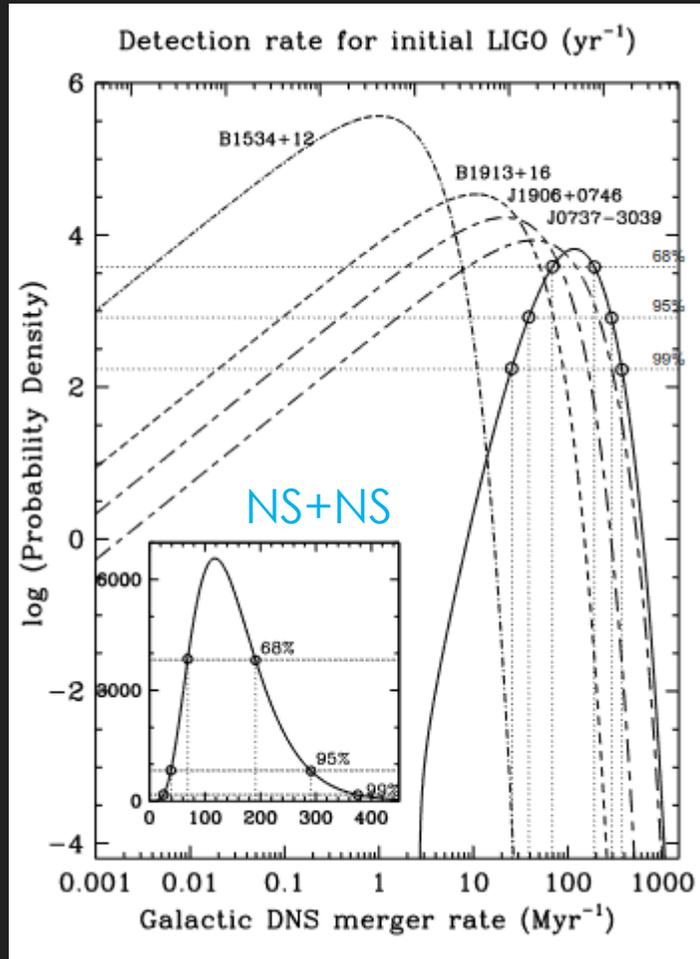


Уникальная система, открытая в 2003 г.

Аргумент в пользу высокого темпа слияний.

Темпы рождения и слияния пар релятивистских объектов в двойных

Type	Birth rate	Merger rate	Number
Detached DD	2.5×10^{-2}	1.1×10^{-2}	1.1×10^8
Semidetached DD	3.3×10^{-3}	—	4.2×10^7
NS + WD	2.4×10^{-4}	1.4×10^{-4}	2.2×10^6
NS + NS	5.7×10^{-5}	2.4×10^{-5}	7.5×10^5
BH + WD	8.2×10^{-5}	1.9×10^{-6}	1.4×10^6
BH + NS	2.6×10^{-5}	2.9×10^{-6}	4.7×10^5
BH + BH	1.6×10^{-4}	—	2.8×10^6



1403.4754

LIGO

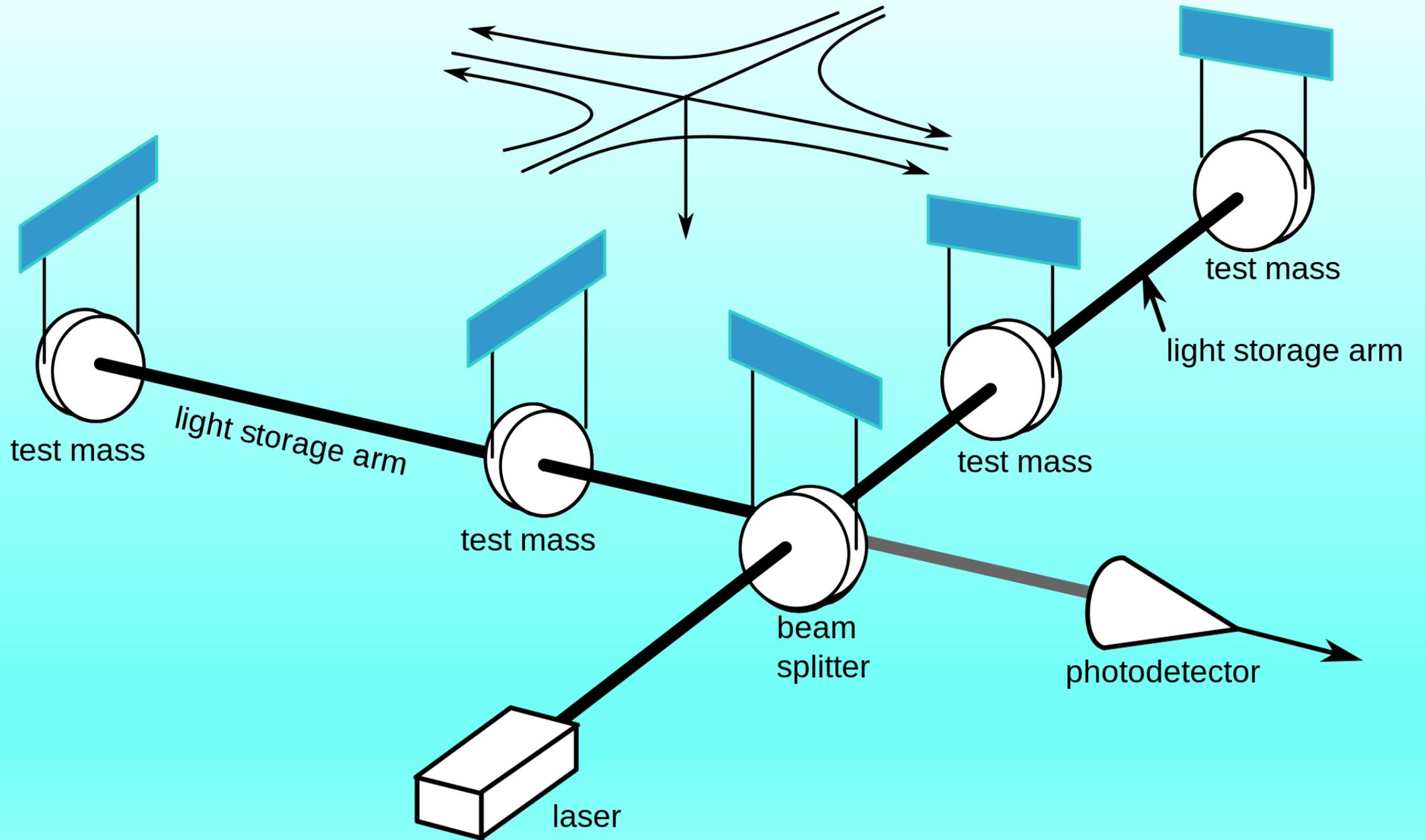
LIGO

VIRGO



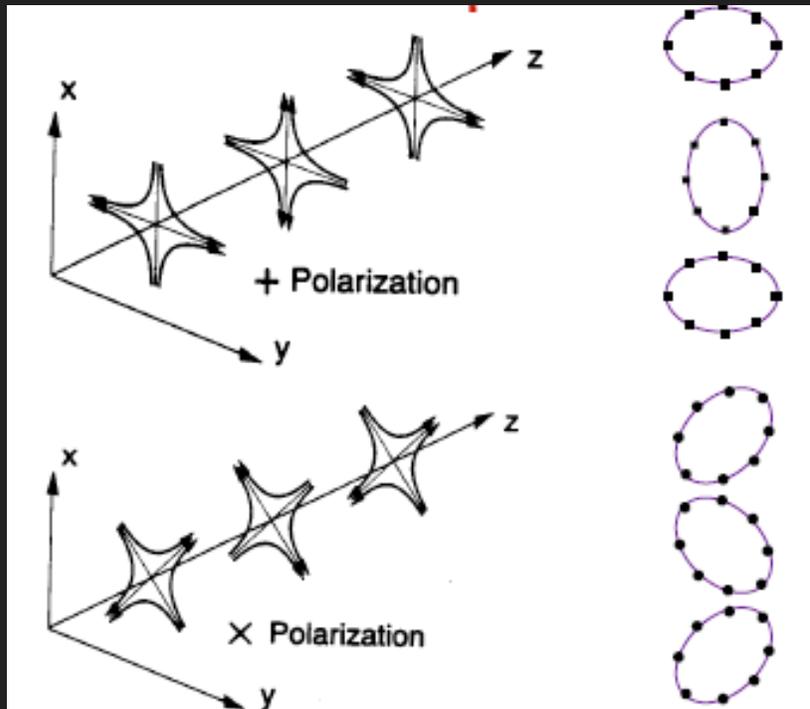
LIGO LabVirgo

Идея использования лазерных интерферометров для регистрации гравитационных волн была предложена Пустановой и Герценштейном в 1962 году.

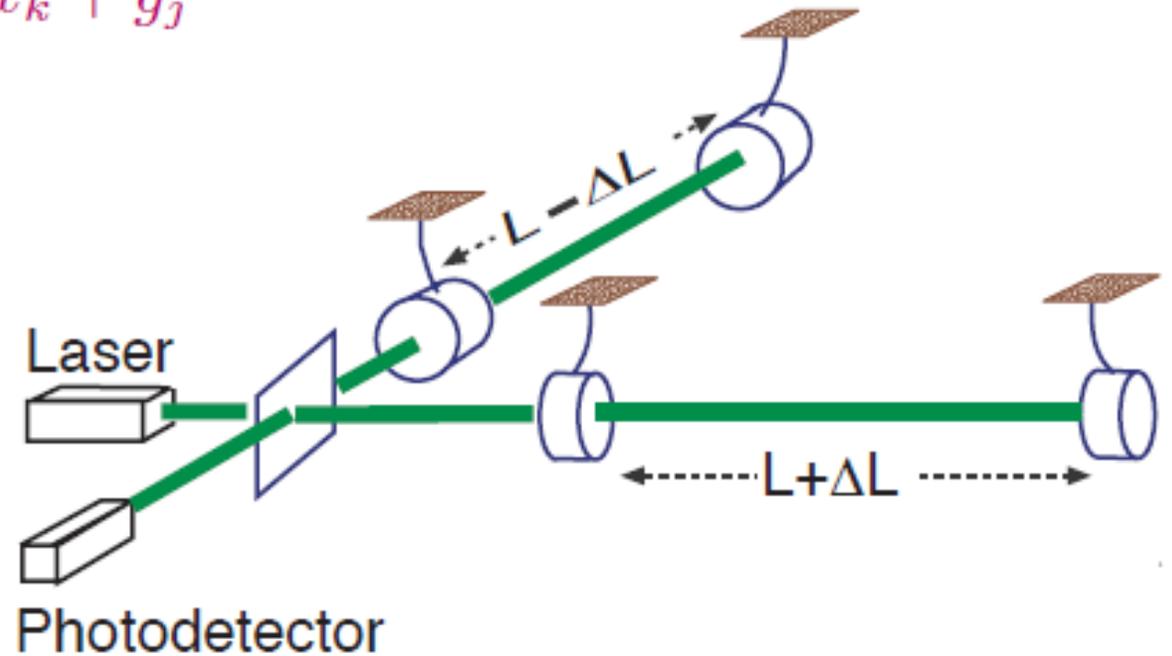


Изменение длины плеч

Прохождение гравитационной волны вызывает приливные силы. Меняется длина плеч интерферометра.



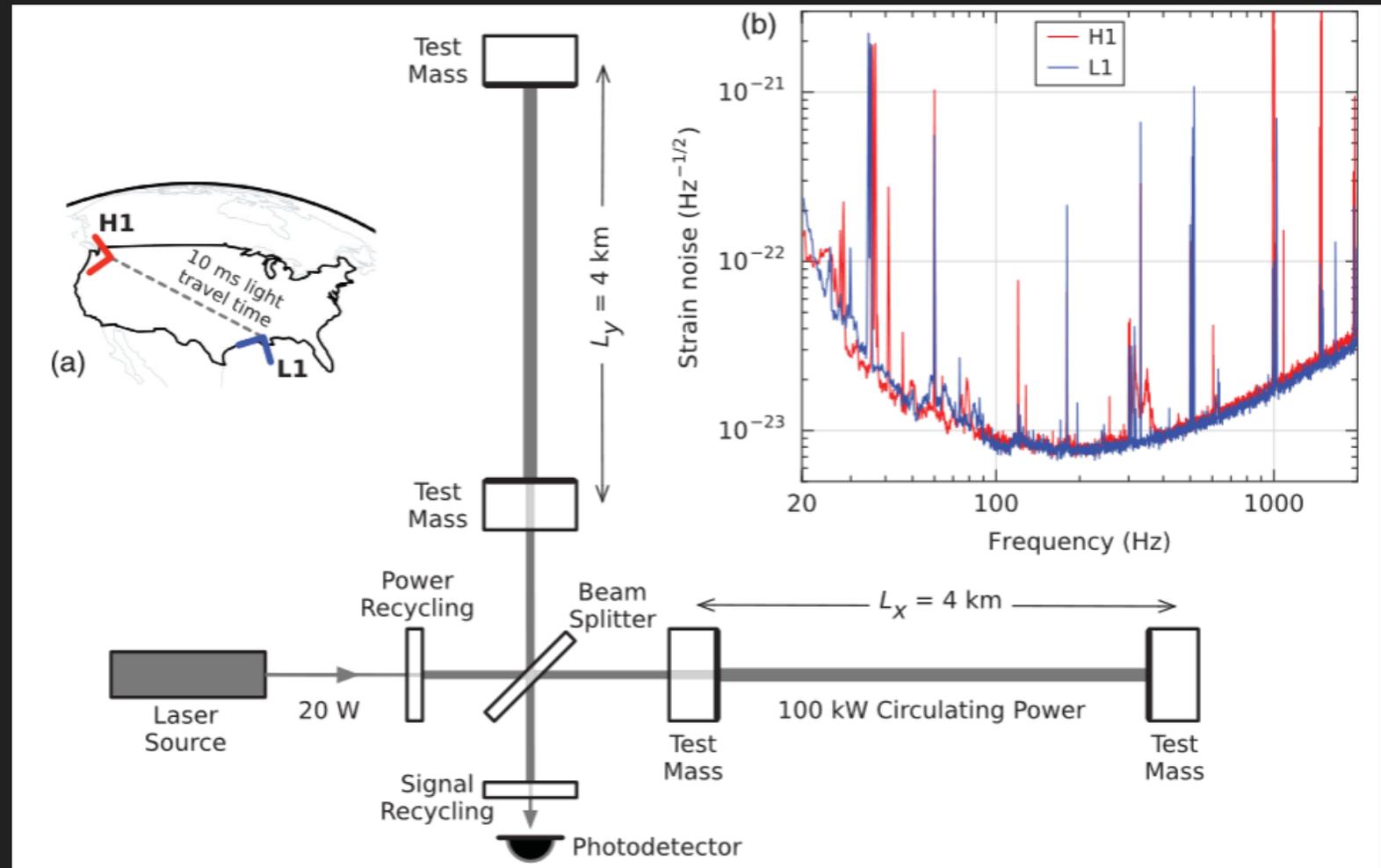
$$\ddot{x}_j = \frac{1}{2} \ddot{h}_{jk}^{GW} x_k + g_j$$



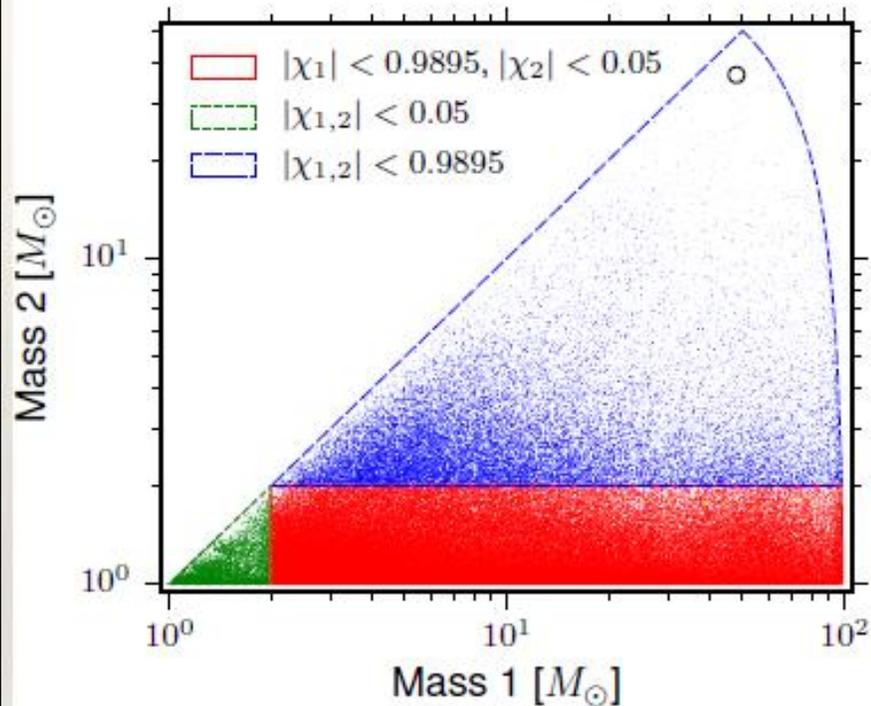
Относительное изменение длины плеч пропорционально амплитуде гравитационной волны. Измерение происходит довольно сложным способом.

Детекторы LIGO и их чувствительность

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



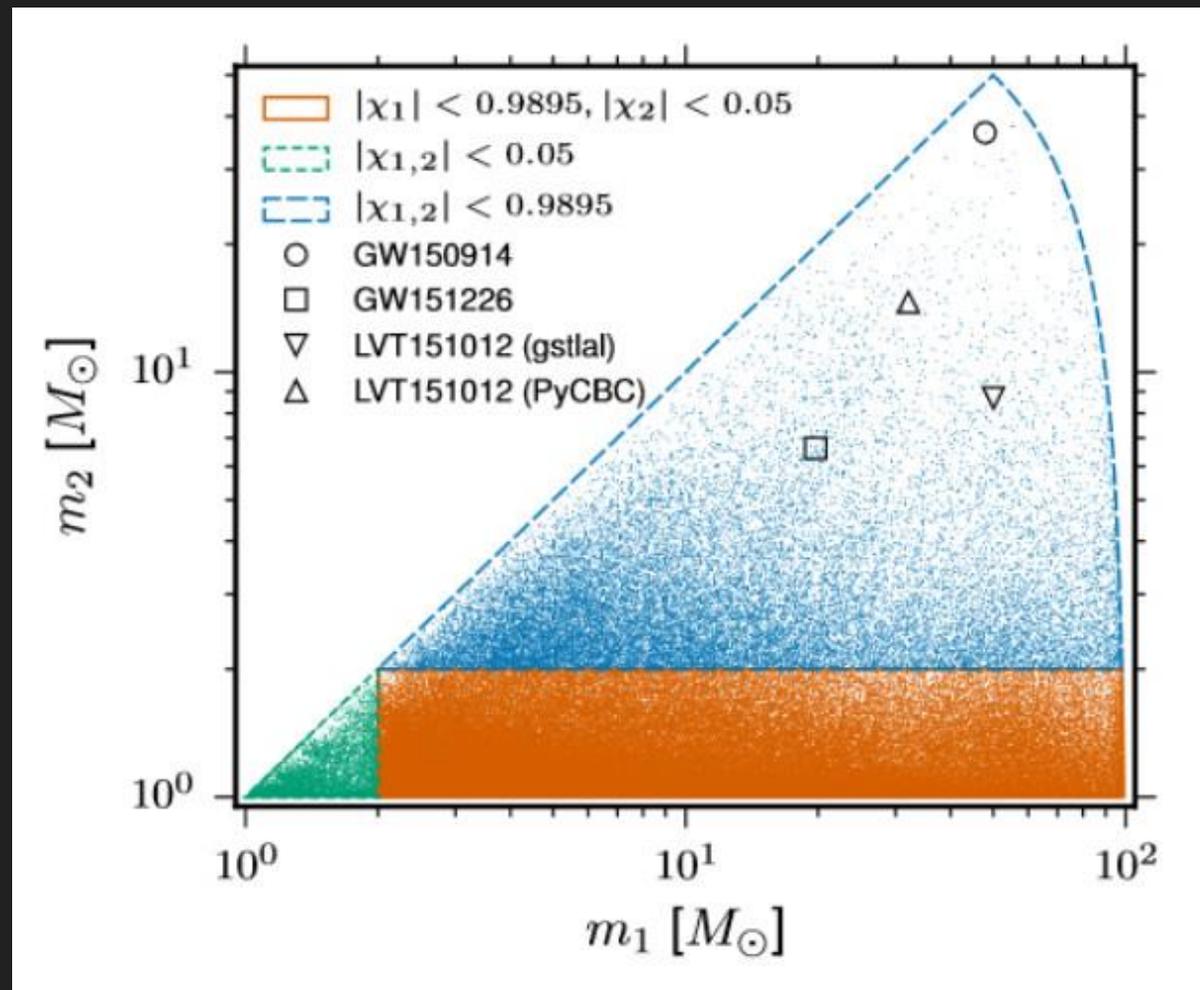
Template bank



- We don't know a priori 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 $\sim 250,000$

LVC: arXiv:1602.03839

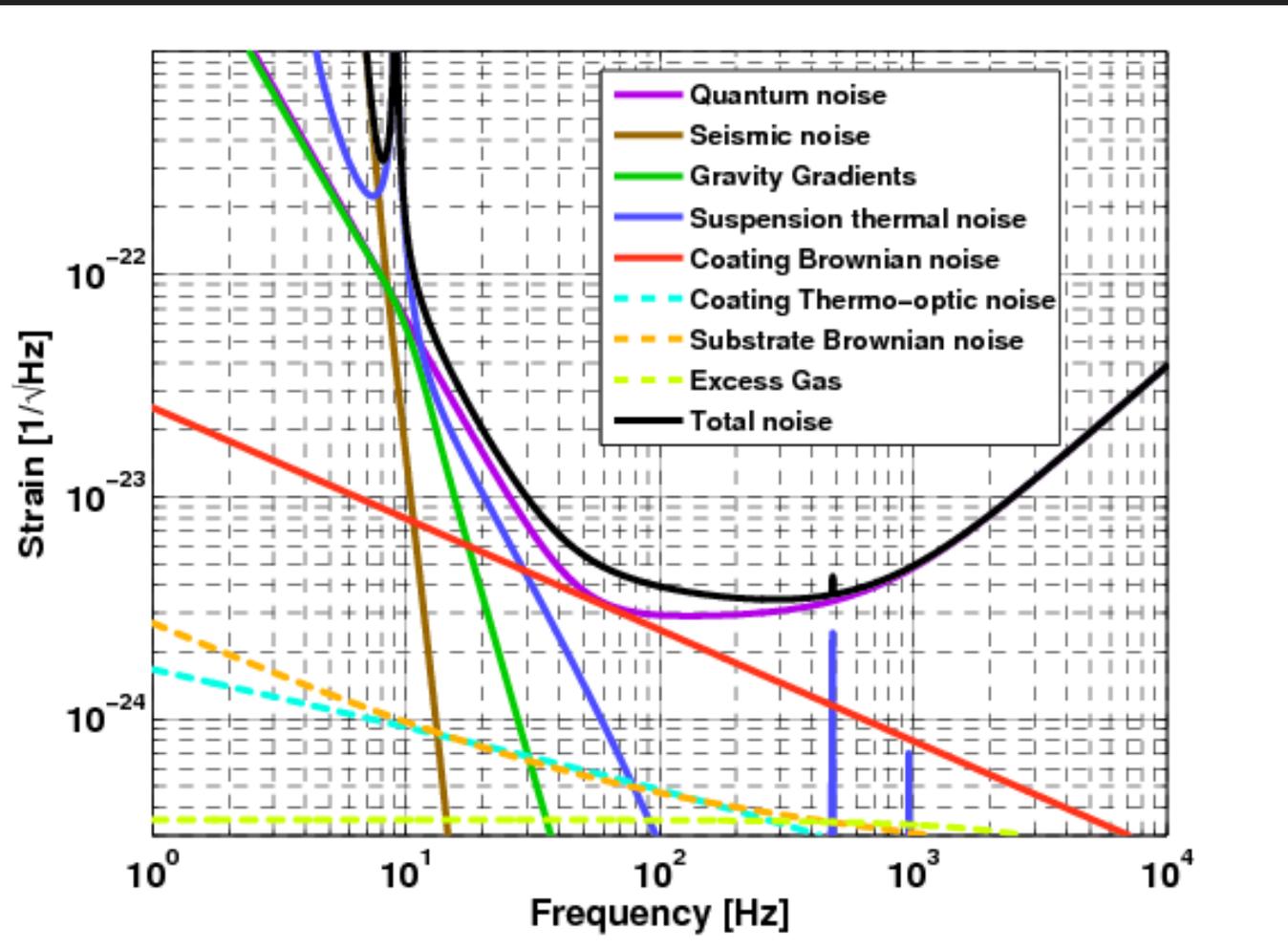
Моделирование и реальность



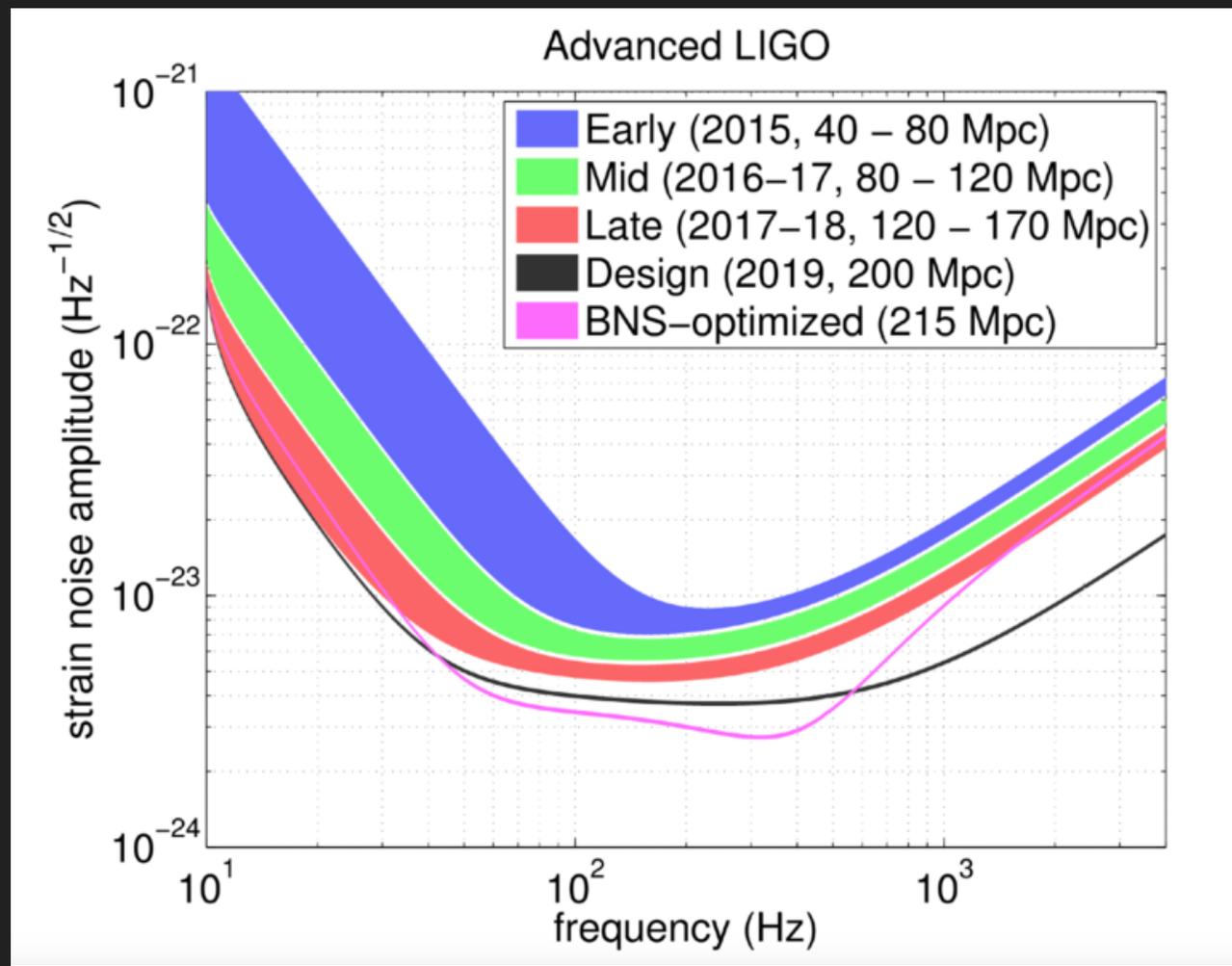
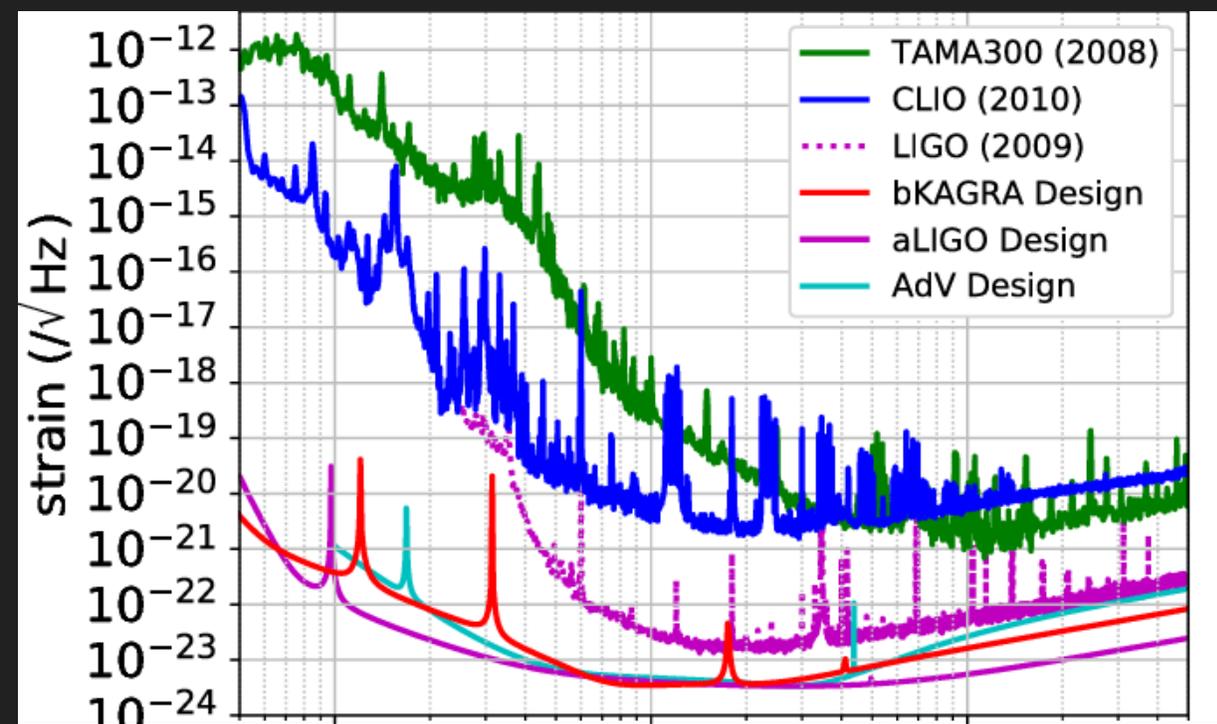
Разнообразные шумы

Влияют как внешние шумы, так и шумы самого детектора.

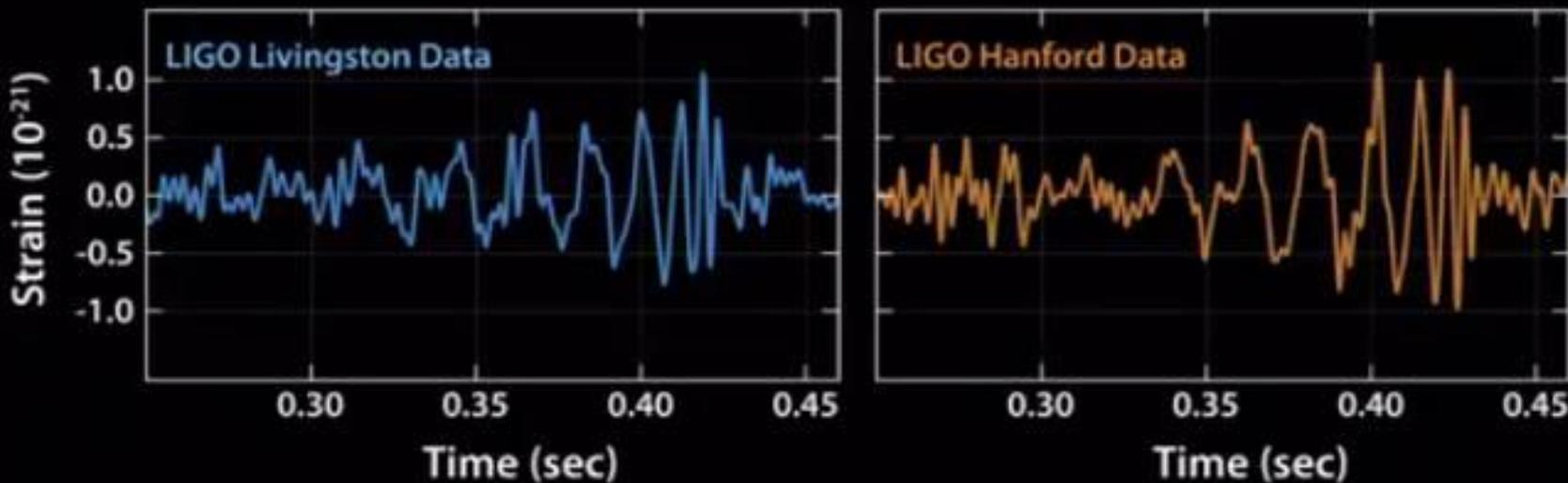
Совершенствование инструментов в первую очередь связано с борьбой с шумами.



РОСТ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ



GW150914 13-50 по Московскому времени



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

Параметры пары черных дыр

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

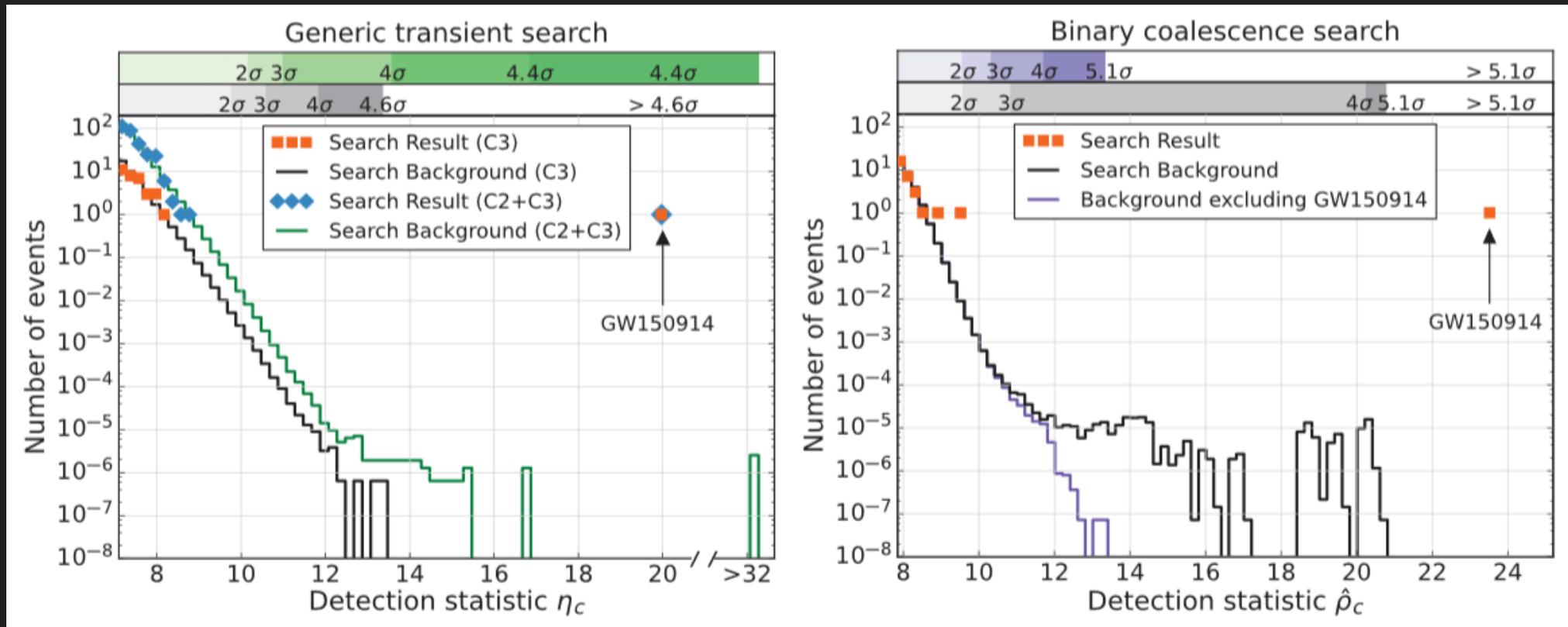
По частоте и форме сигнала можно достаточно точно определить многие параметры.

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

Отношение сигнал/шум = 24

Достоверность детектирования >5.1 сигма.

Достоверность результатов

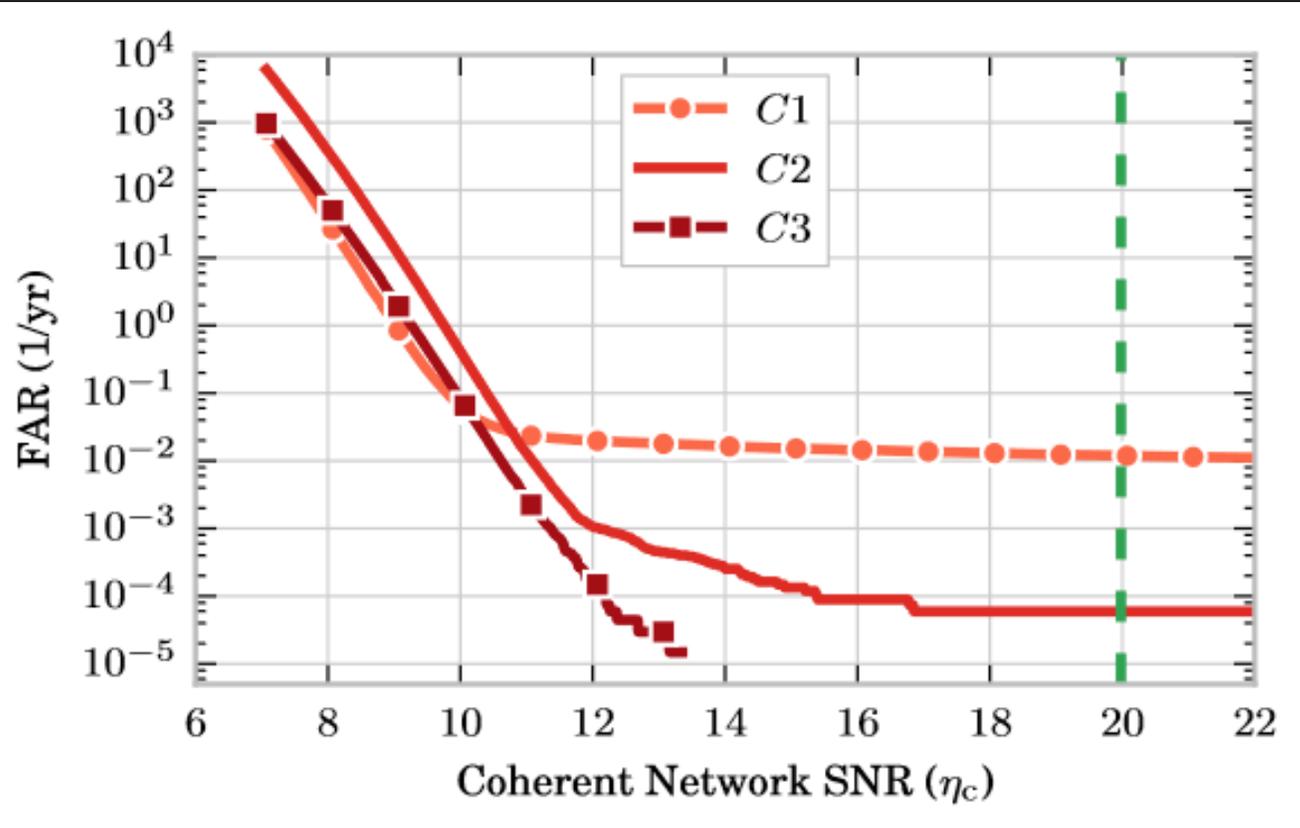


Два разных метода поиска сигнала.

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.

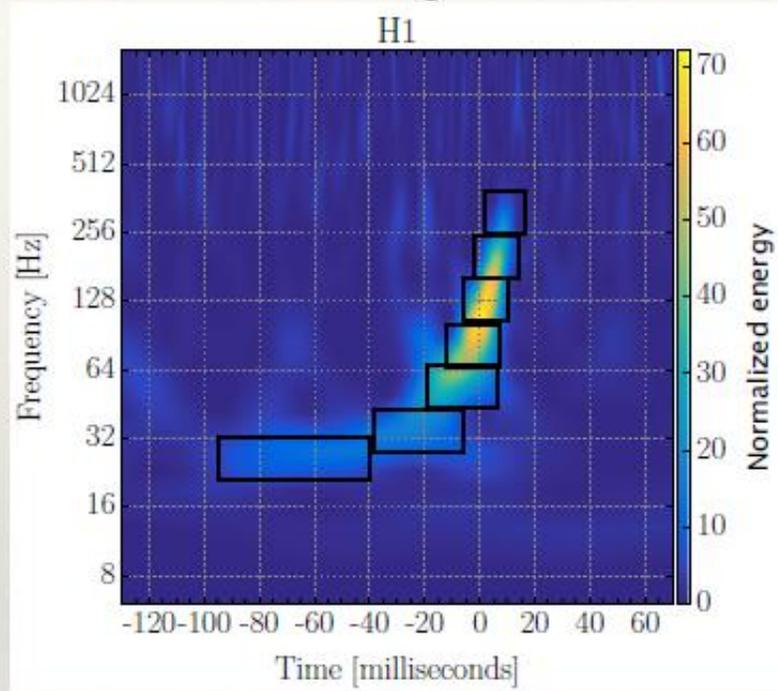
GW150914 относится к классу C3.

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

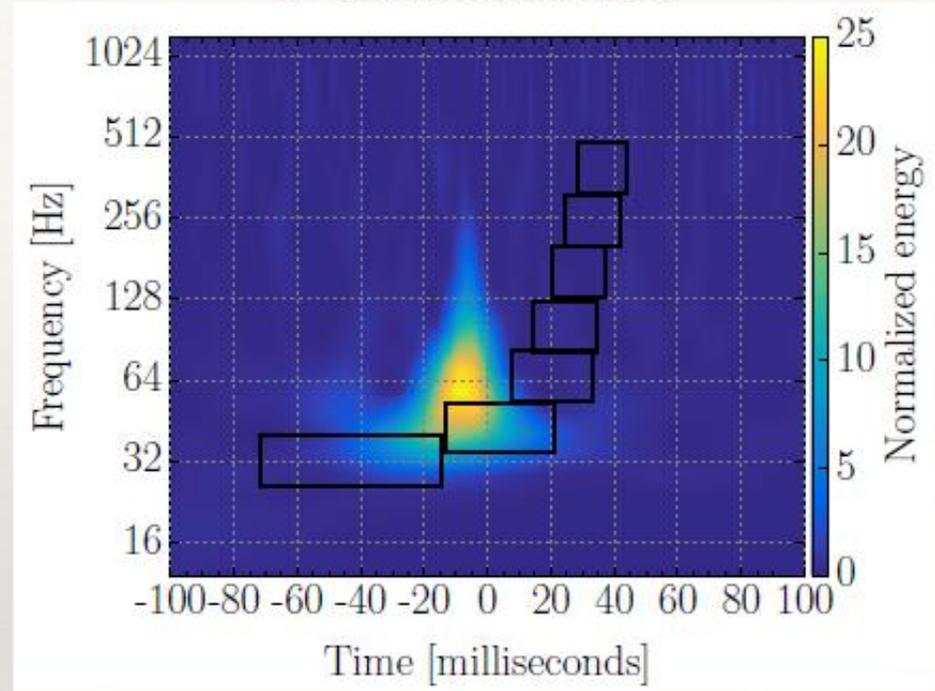
Более детальный анализ показывает, что появление сигнала типа GW150914 за время наблюдений составляет примерно одну миллионную.

Consistency check

Real signal



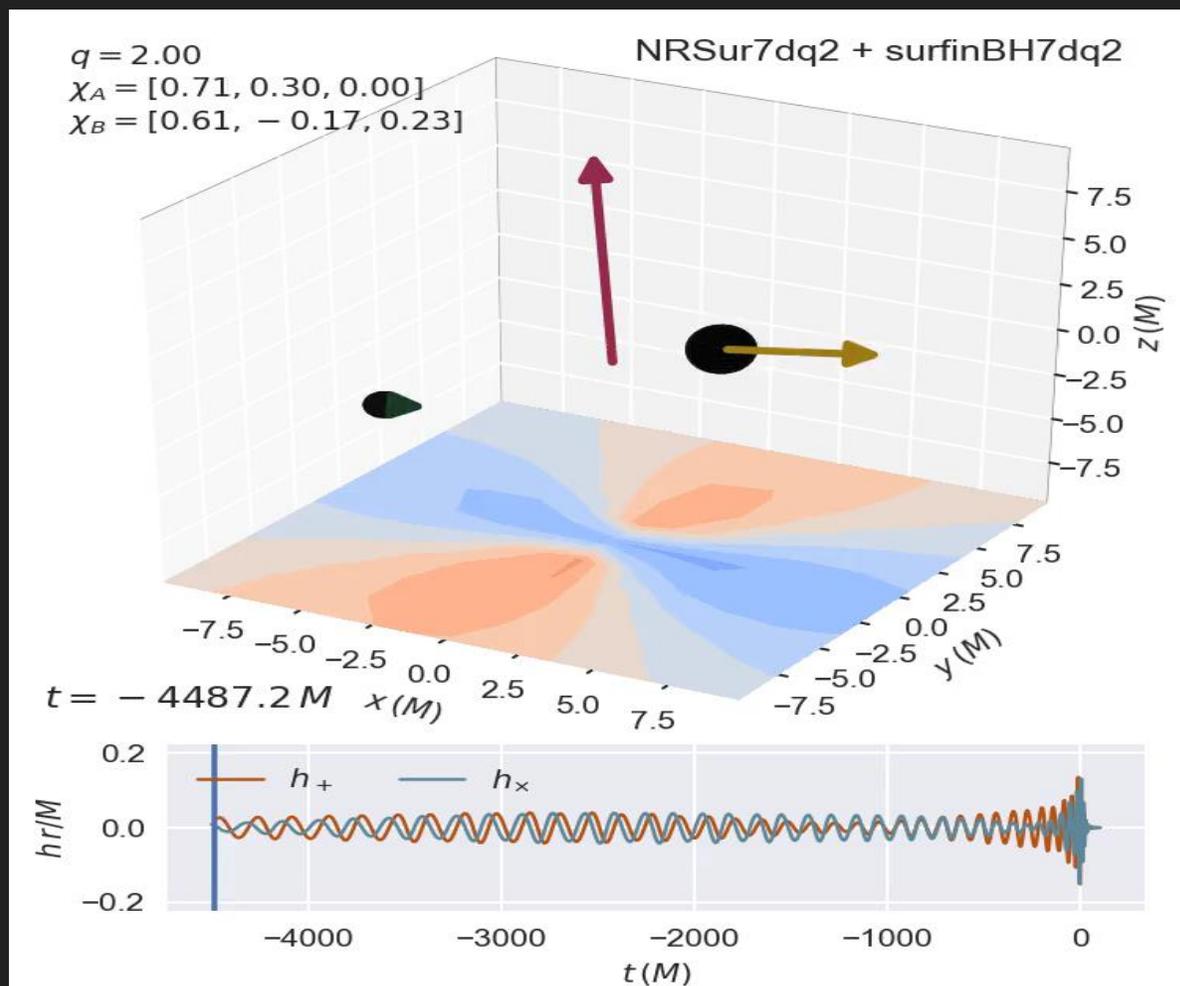
Instrumental artifact



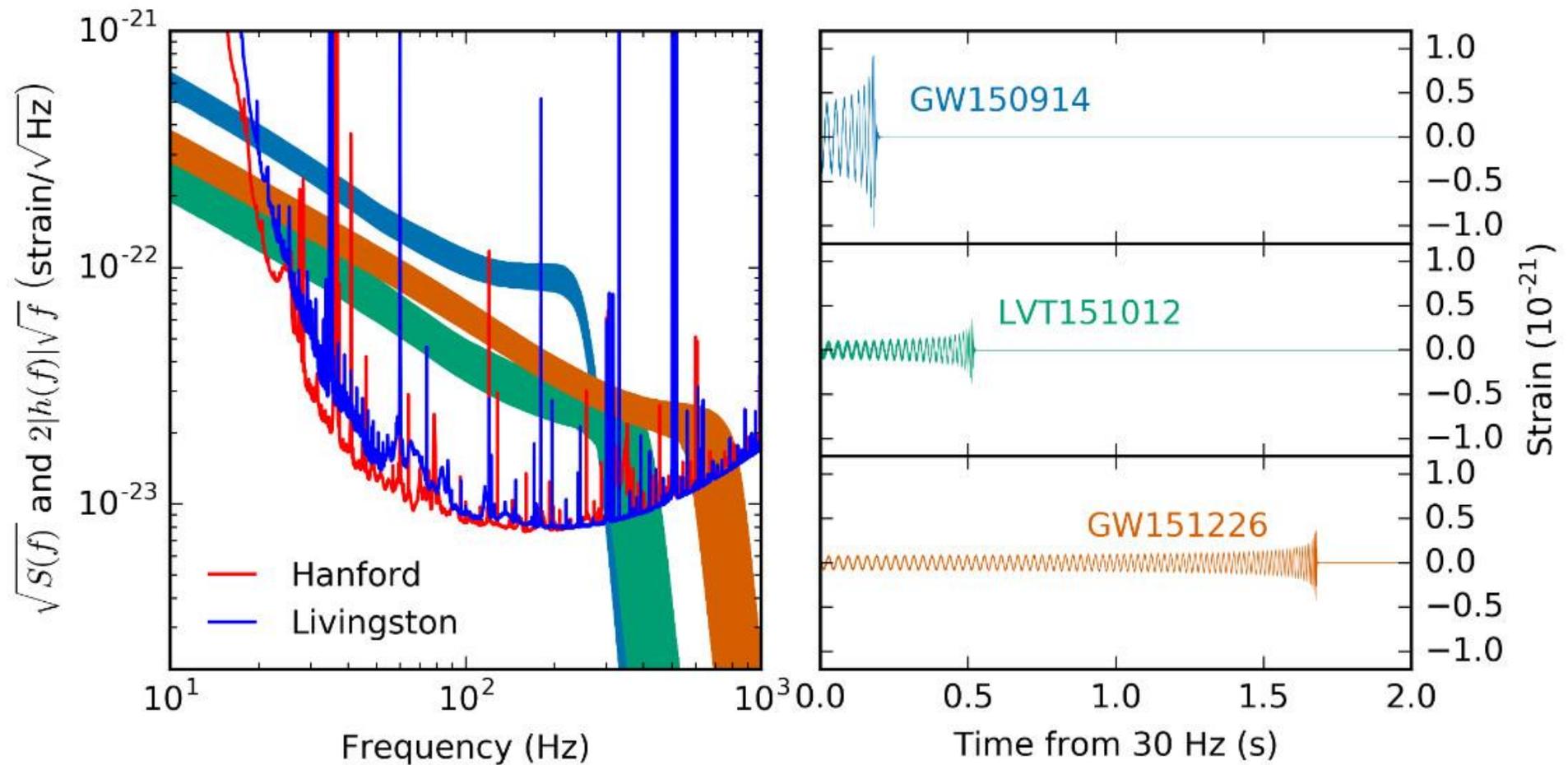
The noise is not Gaussian: need to introduce additional consistency checks into the detection statistic (distribution of power in the signal across the time/frequency).

Визуализация пары черных дыр

Направление осей вращения черных дыр не совпадают с направлением оси орбитального вращения двойной системы. Это приводит к прецессии.



Чувствительность



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.

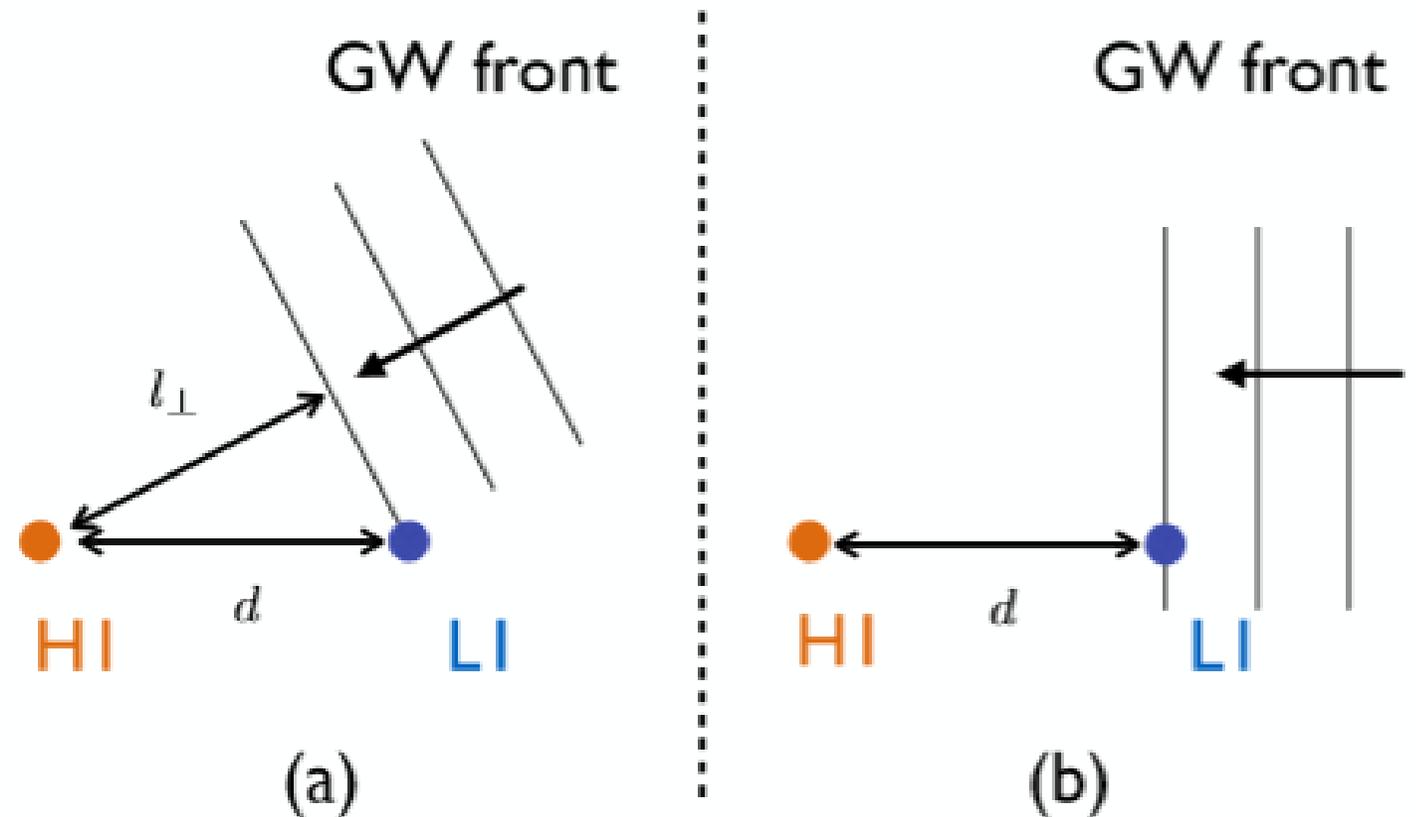


Предел на скорость гравитации

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 $< 1.7 c$



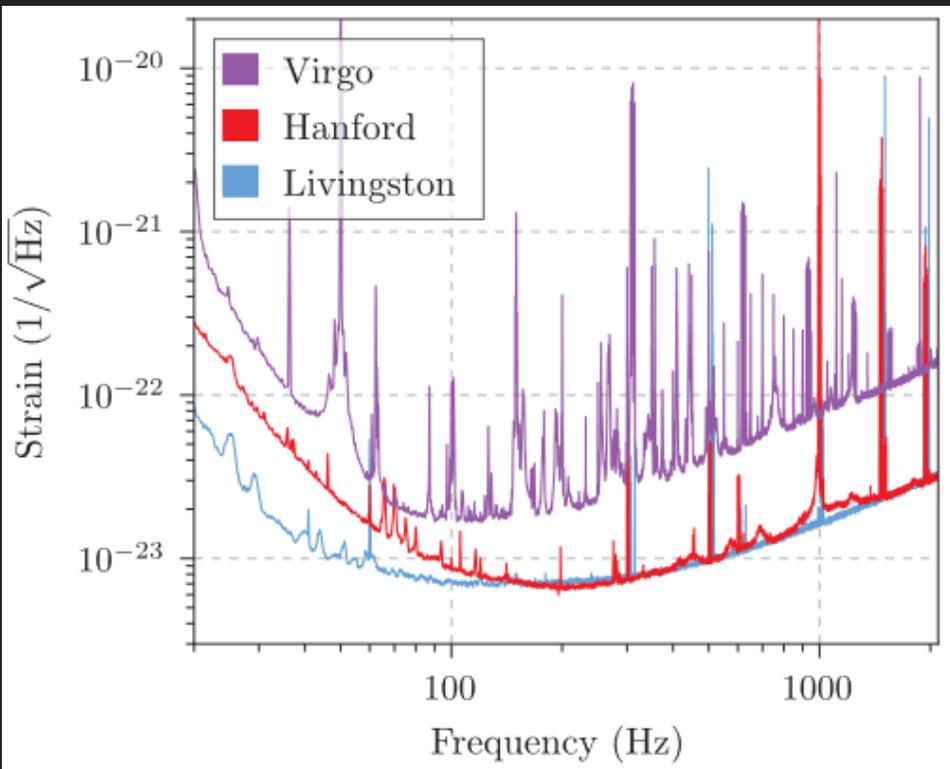
LIGO+VIRGO=.... ?

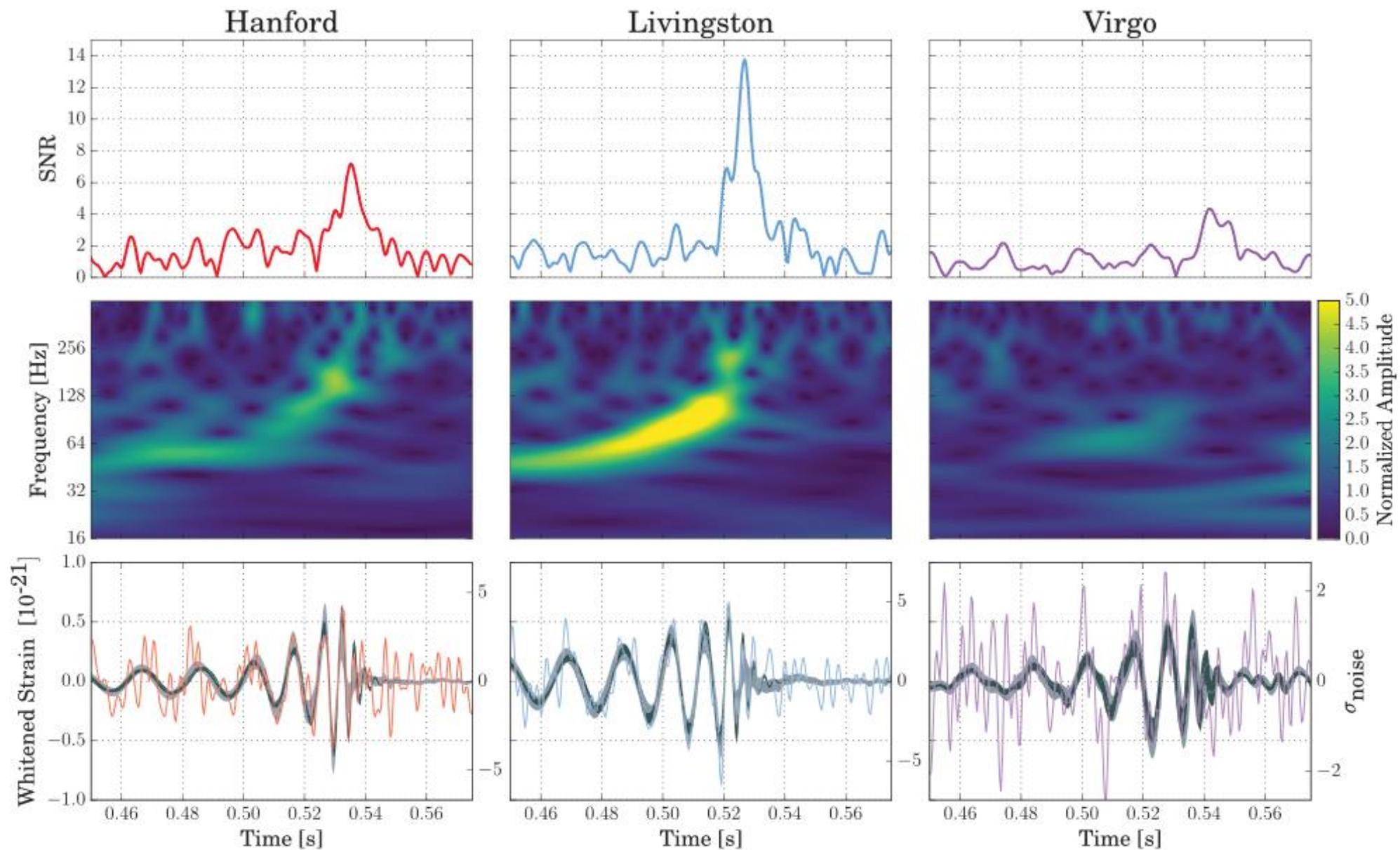
1709.09660

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.





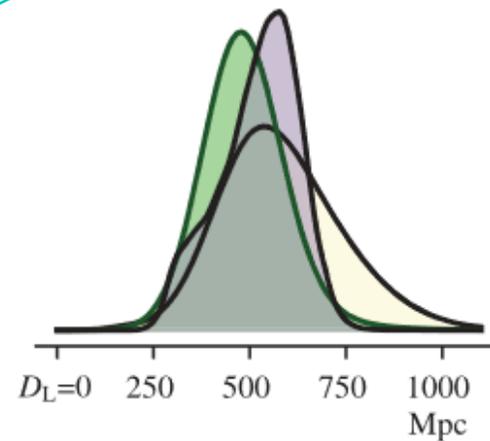
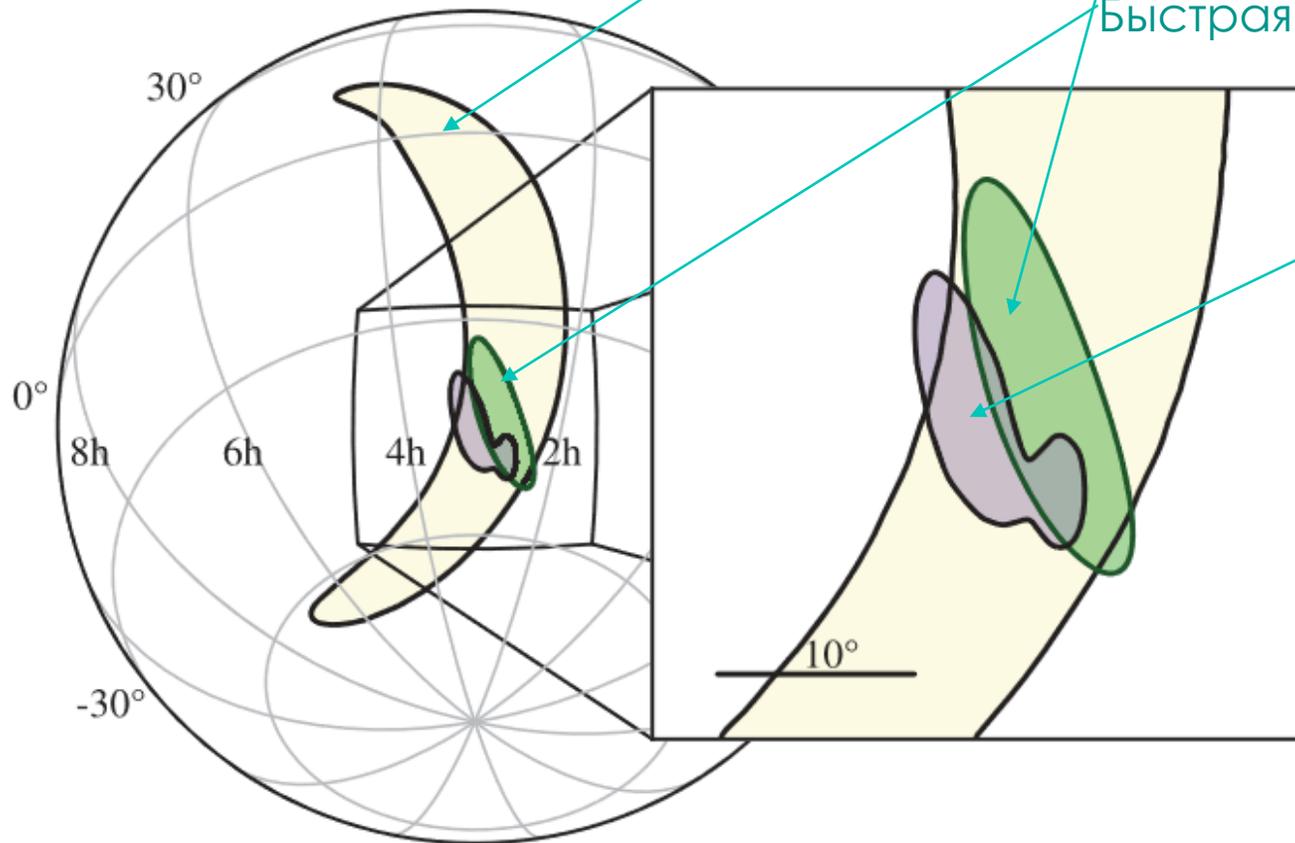
Быстрая и точная локализация

1709.09660

Быстрая локализация по двум LIGO

Быстрая по LIGO+VIRGO

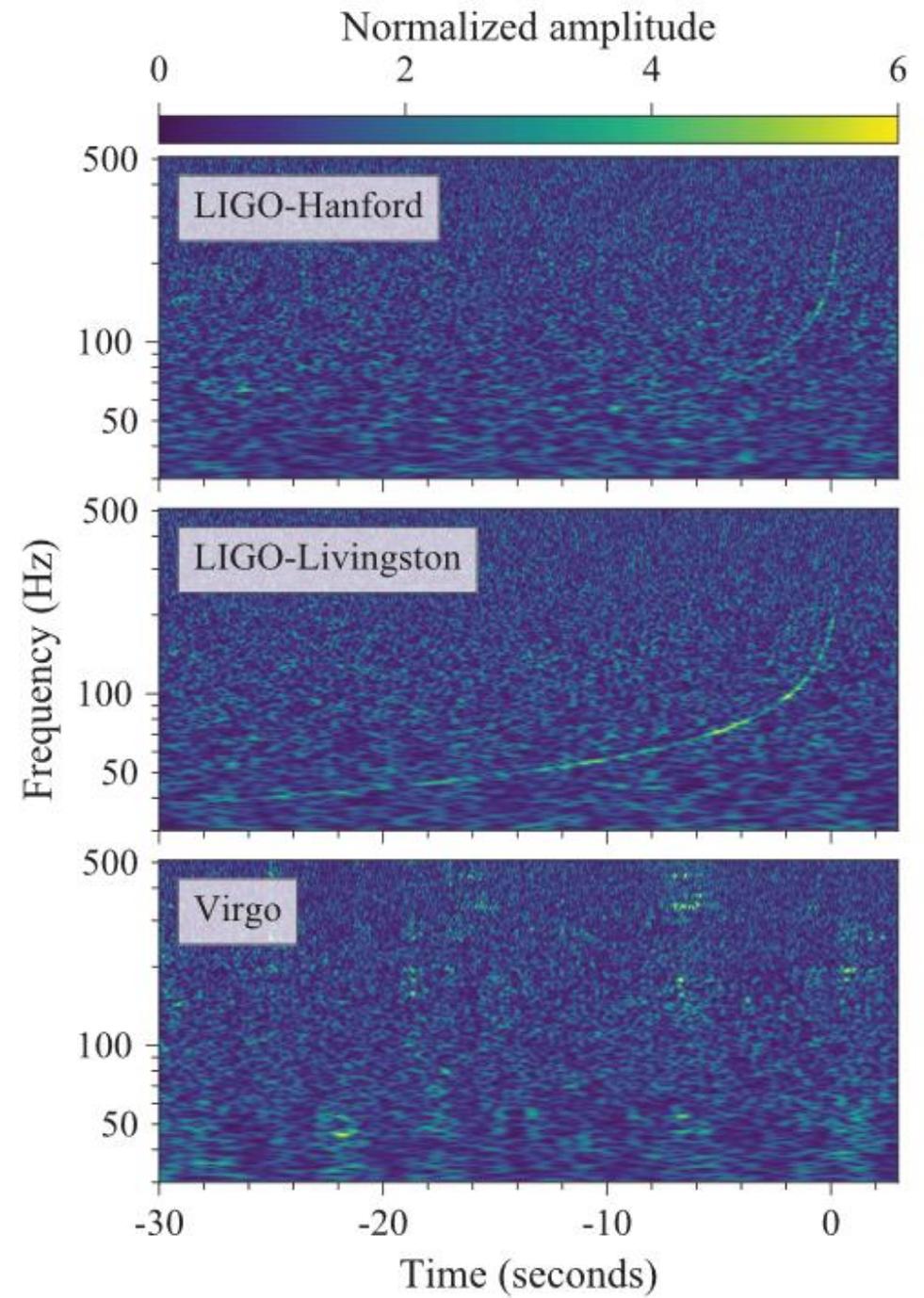
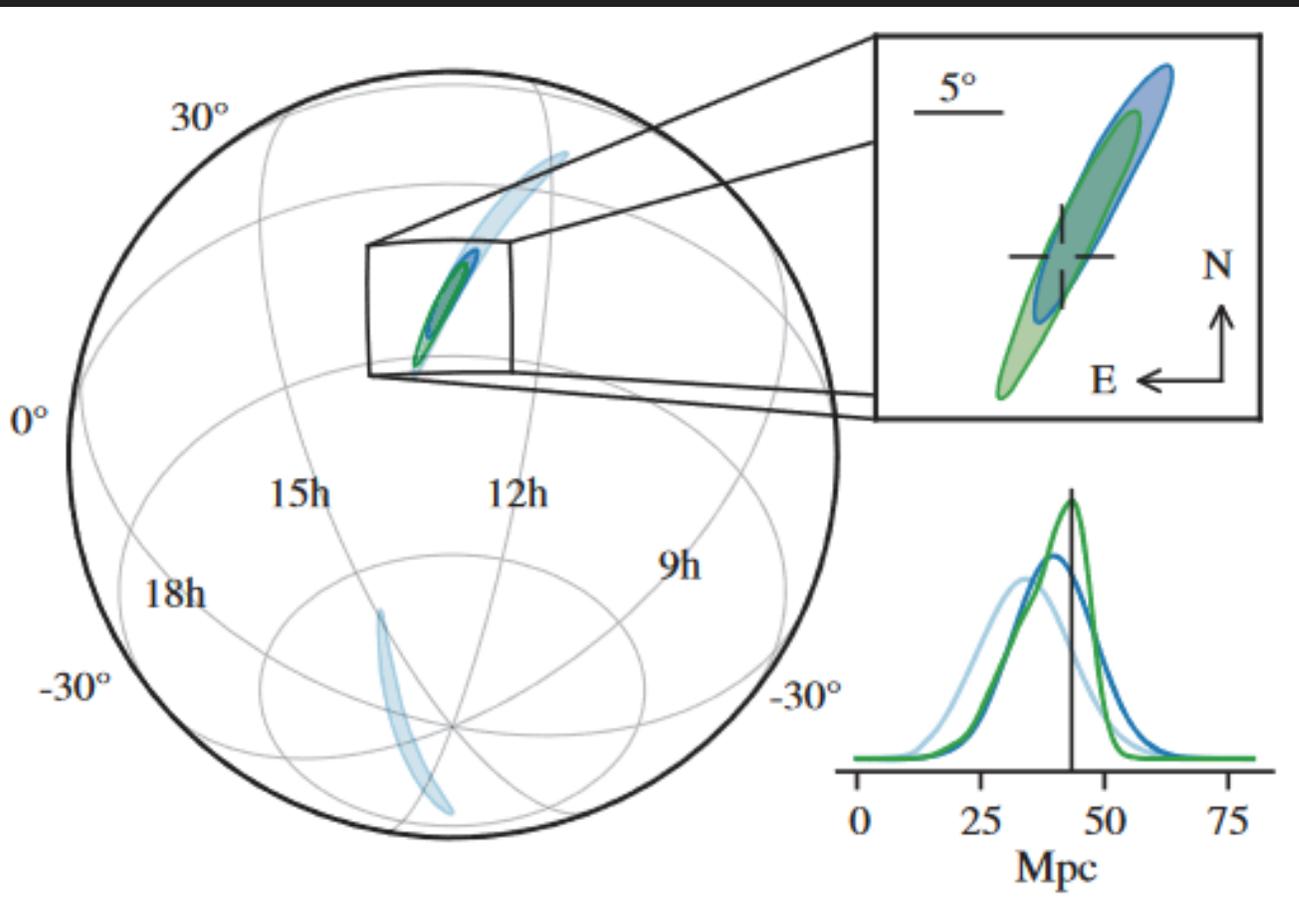
Полная обработка



Наблюдения сразу на нескольких детекторах позволяют лучше определять координаты источника.

Всплеск с H3

1710.05832



Параметры двойной системы

	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_{tot}	$2.74^{+0.04}_{-0.01} M_\odot$	$2.82^{+0.47}_{-0.09} M_\odot$
Radiated energy E_{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 Θ	$\leq 55^\circ$	$\leq 56^\circ$
Using NGC 4993 location	$\leq 28^\circ$	$\leq 28^\circ$
Combined dimensionless tidal deformability $\tilde{\Lambda}$	≤ 800	≤ 700
Dimensionless tidal deformability $\Lambda(1.4M_\odot)$	≤ 800	≤ 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

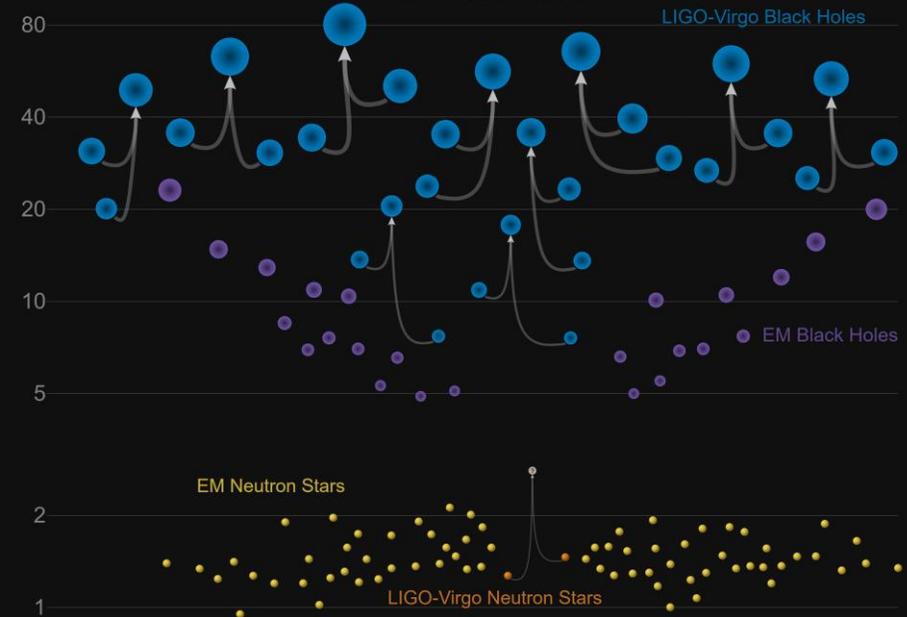
На начало 2019 г.

1811.12907, 1811.12940

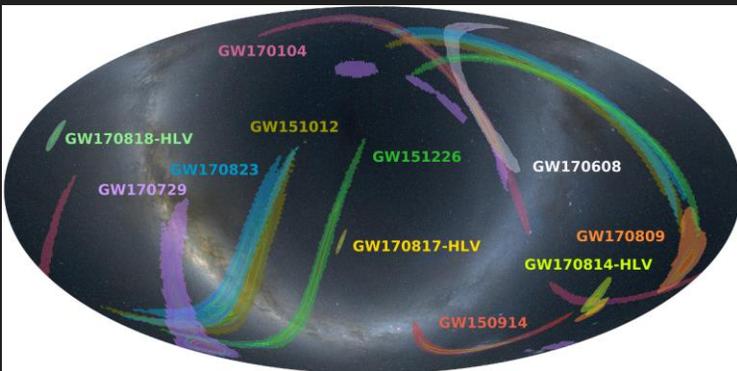
- GW150914
- GW151012 Одиннадцать всплесков.
- GW151226 Один из всплесков с нейтронной звездой.
- GW170104 Пять событий – совместно с VIRGO.
- GW170608
- GW170729
- GW170809 – VIRGO
- GW170814 – VIRGO
- GW170817 – VIRGO, H3
- GW170818 – VIRGO
- GW170823 – VIRGO

Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses

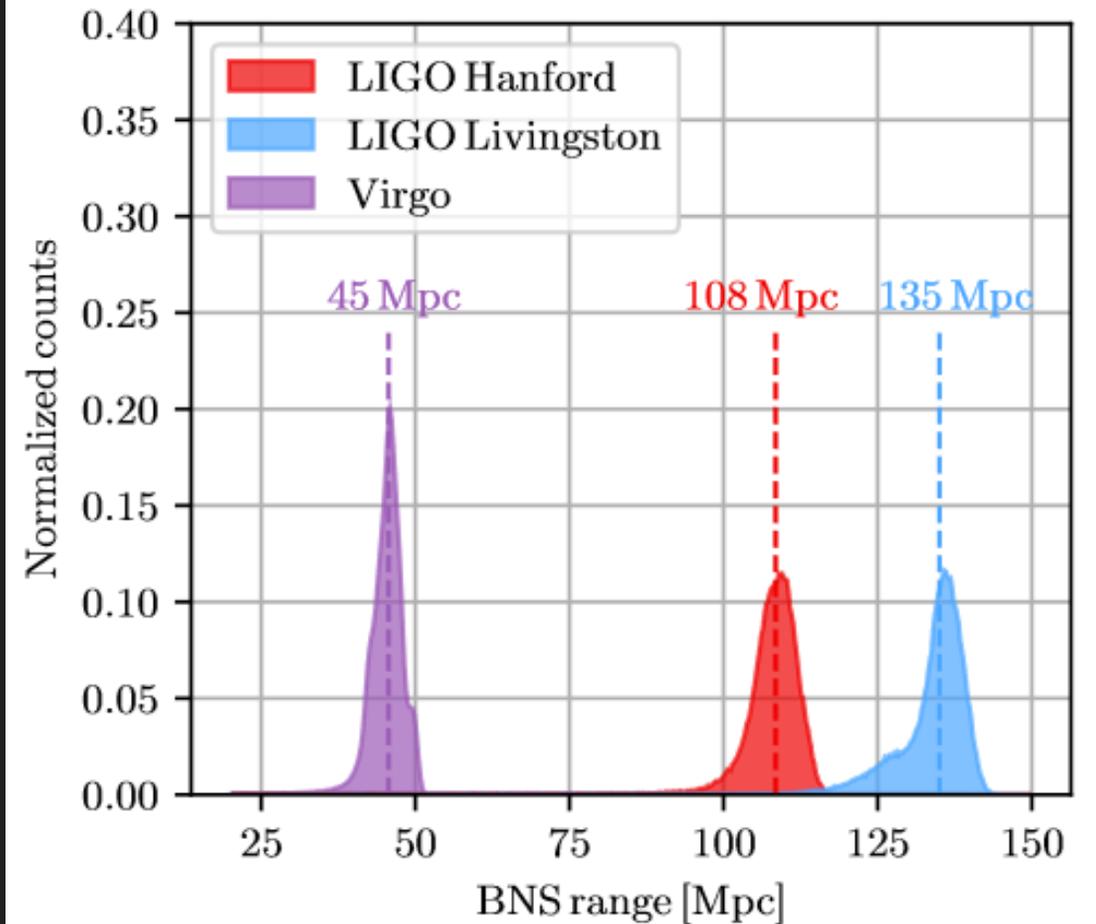
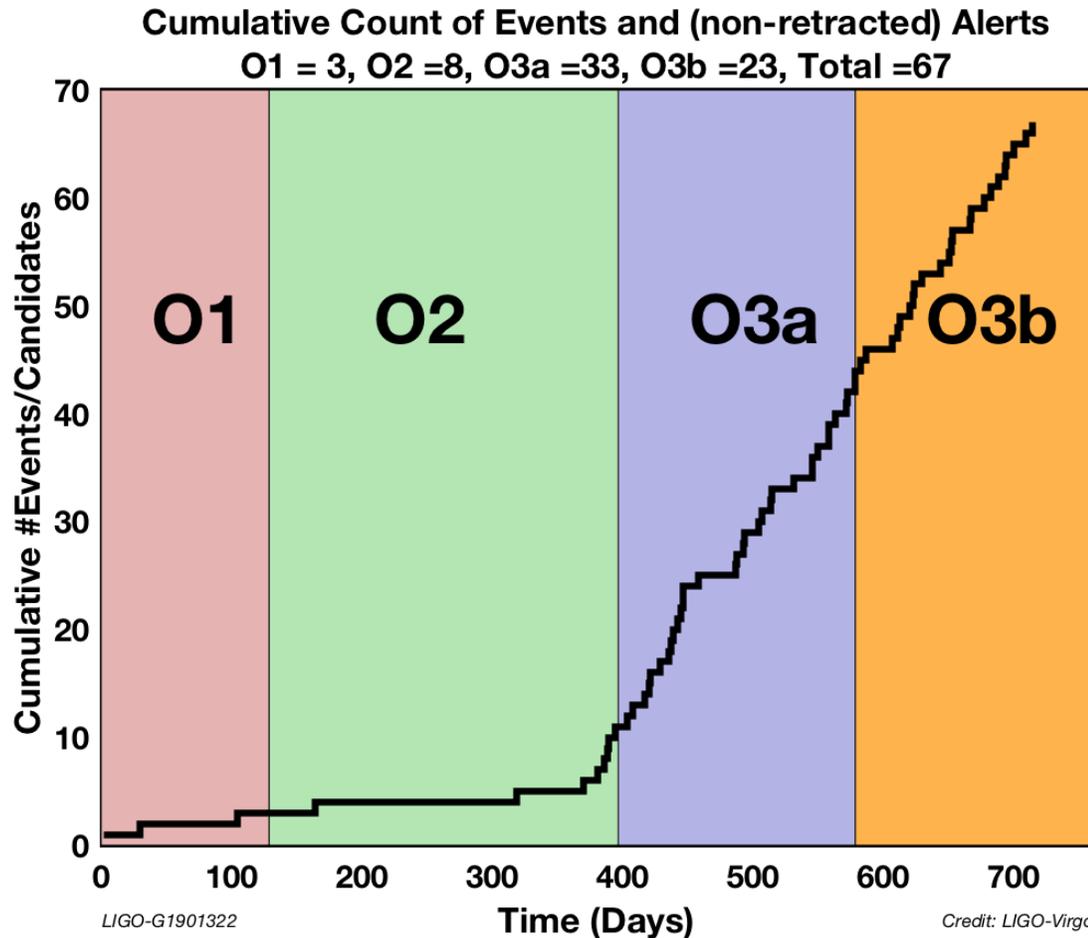


LIGO-Virgo | Frank Elavsky | Northwestern



LIGO/Virgo – 3й научный сеанс

2010.14527



О3а: параметры

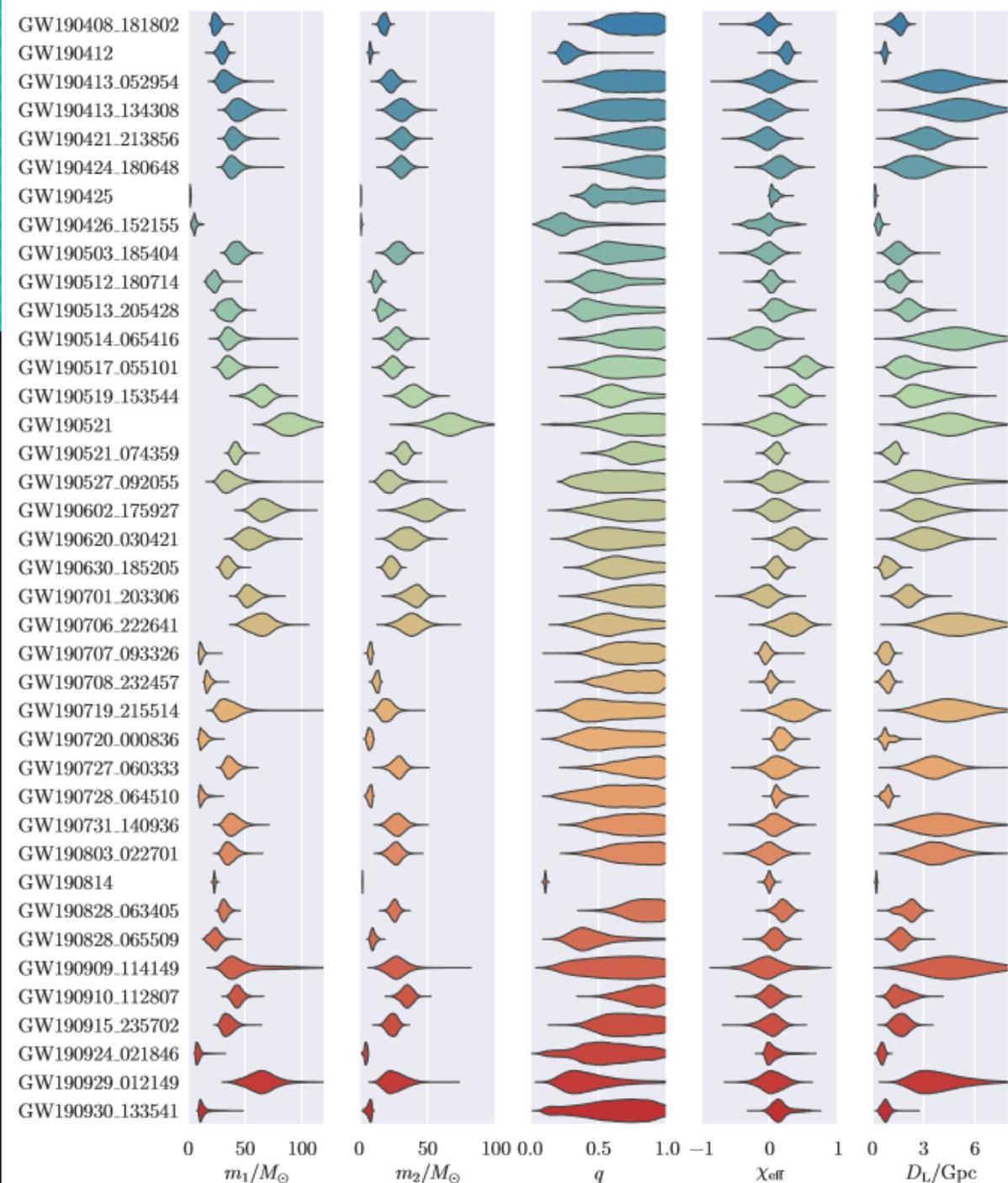
2010.14527

Представлен каталог событий, зарегистрированных в 1м и 2м сеансах, а также за первую половину 3го сеанса – О3а.

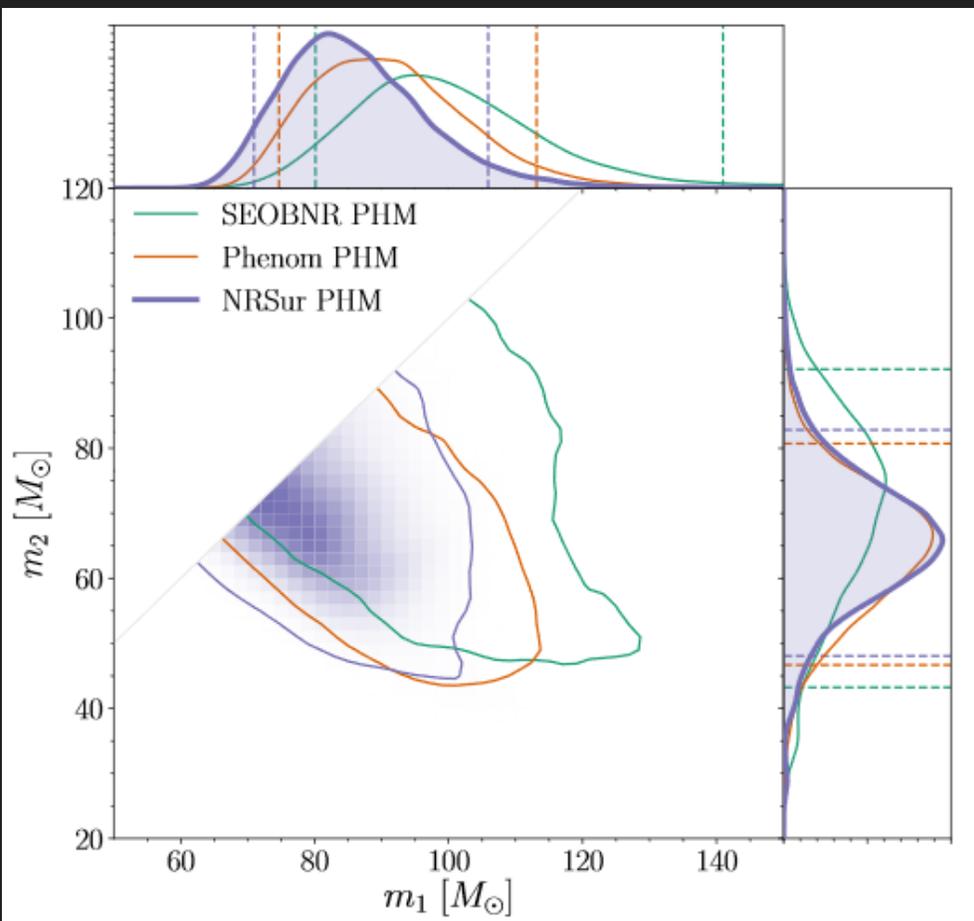
В каталог вошло 39 событий из О3а (апрель-октябрь 2019), а также 8 событий из ранних сеансов.

Всего 47.

Из них 13 представлены впервые – это результат более детальной обработки данных наблюдений. Из 47 событий: 44 - слияния двух черных дыр и 2 слияния двух нейтронных звезд. С оставшимся - непонятно (то ли NS-BH, то ли BH-BH).



Самые массивные (из слившихся)

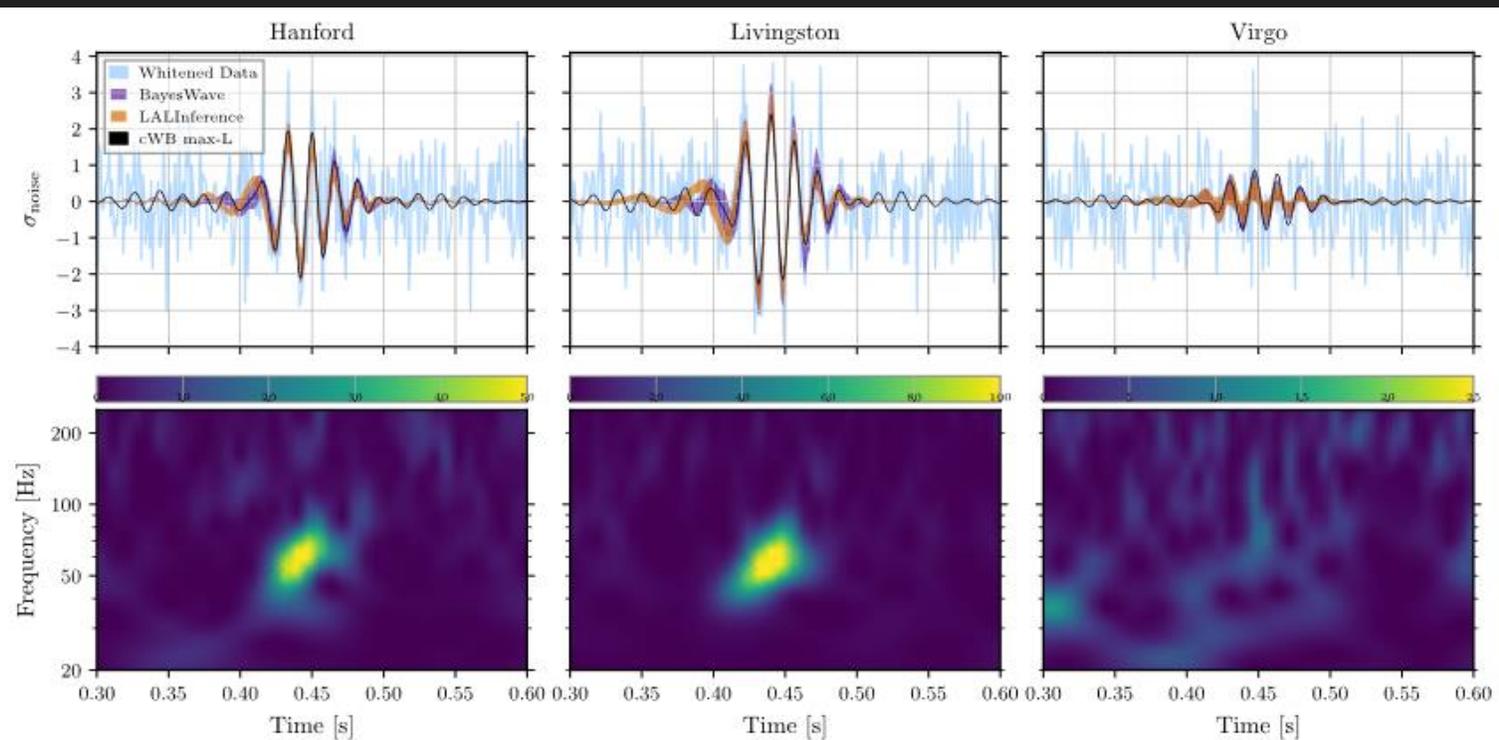


Primary mass $85^{+21}_{-14} M_{\odot}$

Secondary mass $66^{+17}_{-18} M_{\odot}$

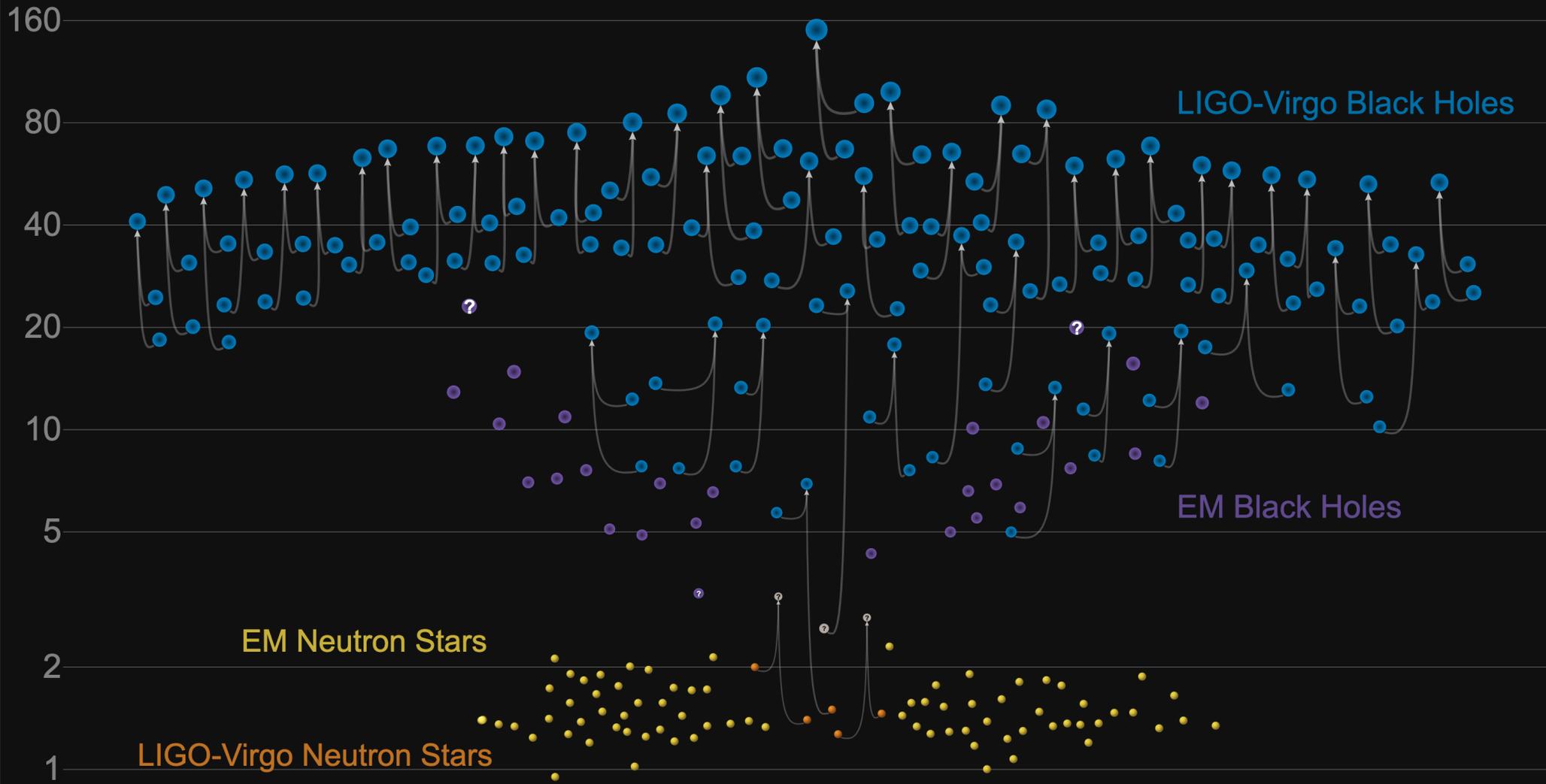
Total mass $150^{+29}_{-17} M_{\odot}$

2009.01190, 2009.01075



Masses in the Stellar Graveyard

in Solar Masses

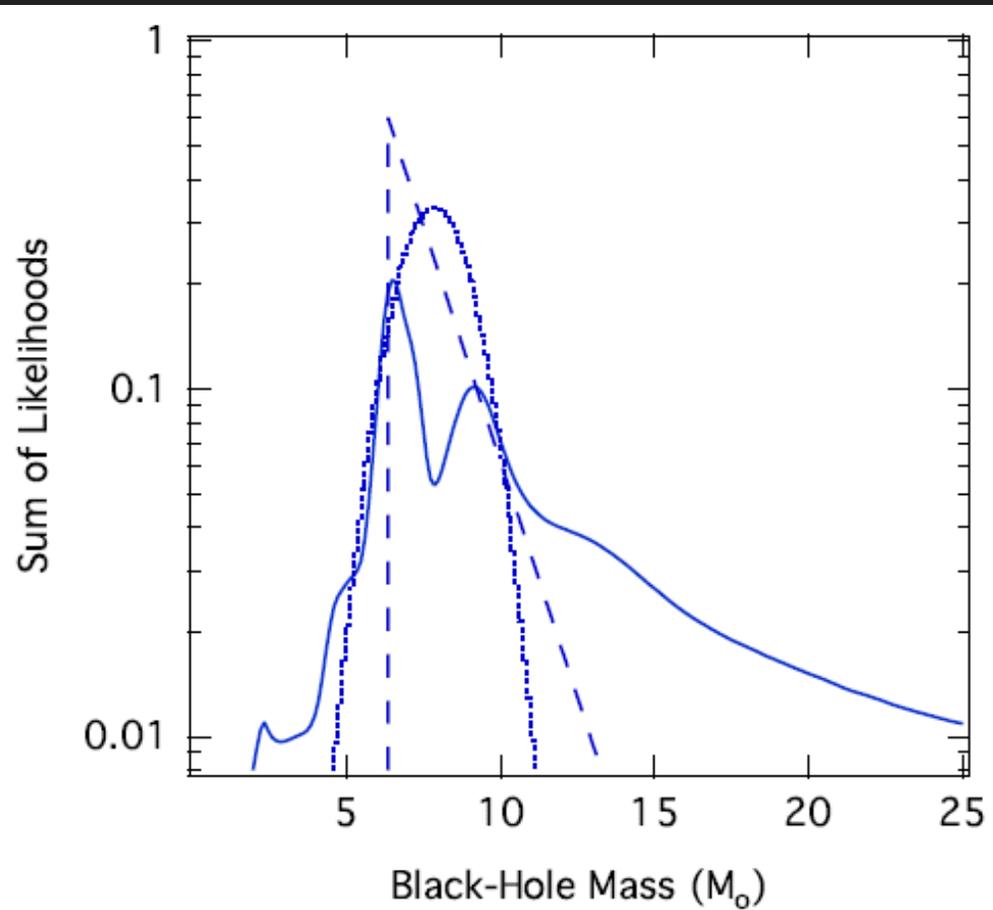


GWTC-2 plot v1.0

LIGO-Virgo | Frank Elavsky, Aaron Geller | Northwestern

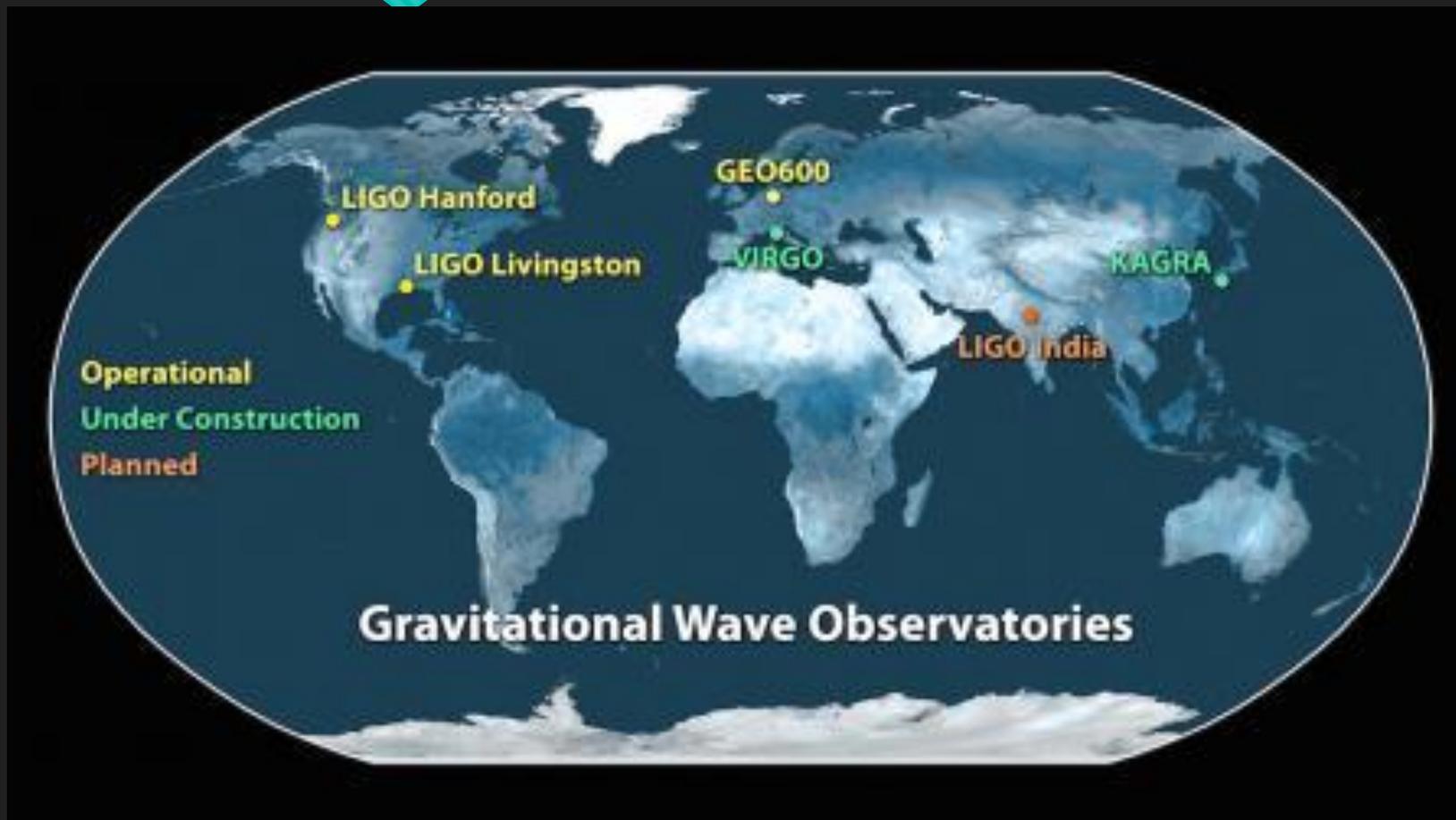
Массы черных дыр

На основе наблюдений 16 систем



Если говорить об известных в нашей Галактике кандидатах в черные дыры в двойных системах, то типичные массы составляют 5-10 солнечных.

Будущие детекторы



LIGO-India в 2023 г.

KAGRA 2020

KAGRA



Kamioka Gravitational Wave Detector
Работы начались в апреле 2012 г.

Наблюдения начались 25 февраля 2020 г.

gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp

KAGRA



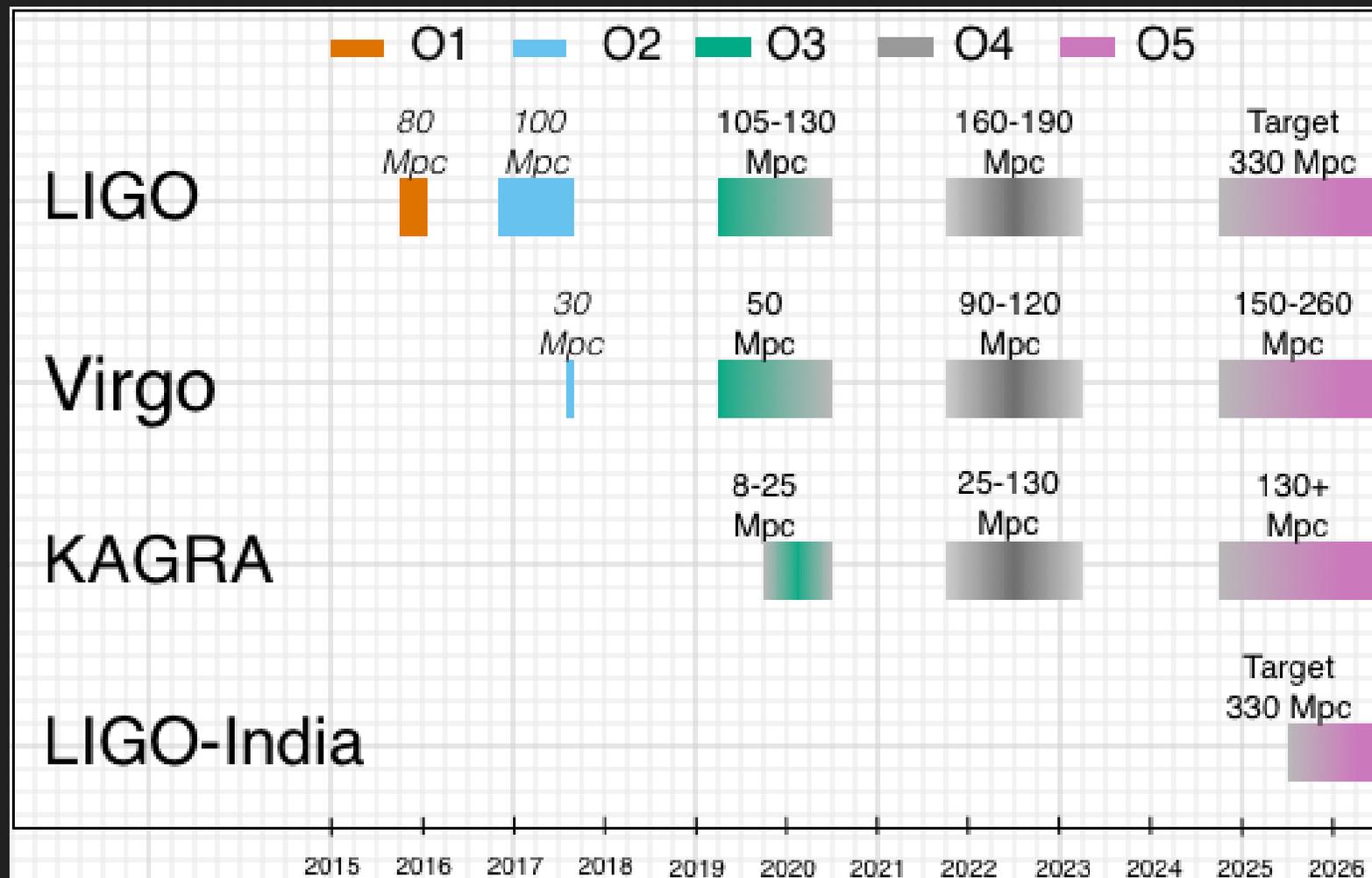
gwcenter.icrr.u-tokyo.ac.jp

В феврале 2020 г. начала свой первый научный сеанс новая японская установка KAGRA.

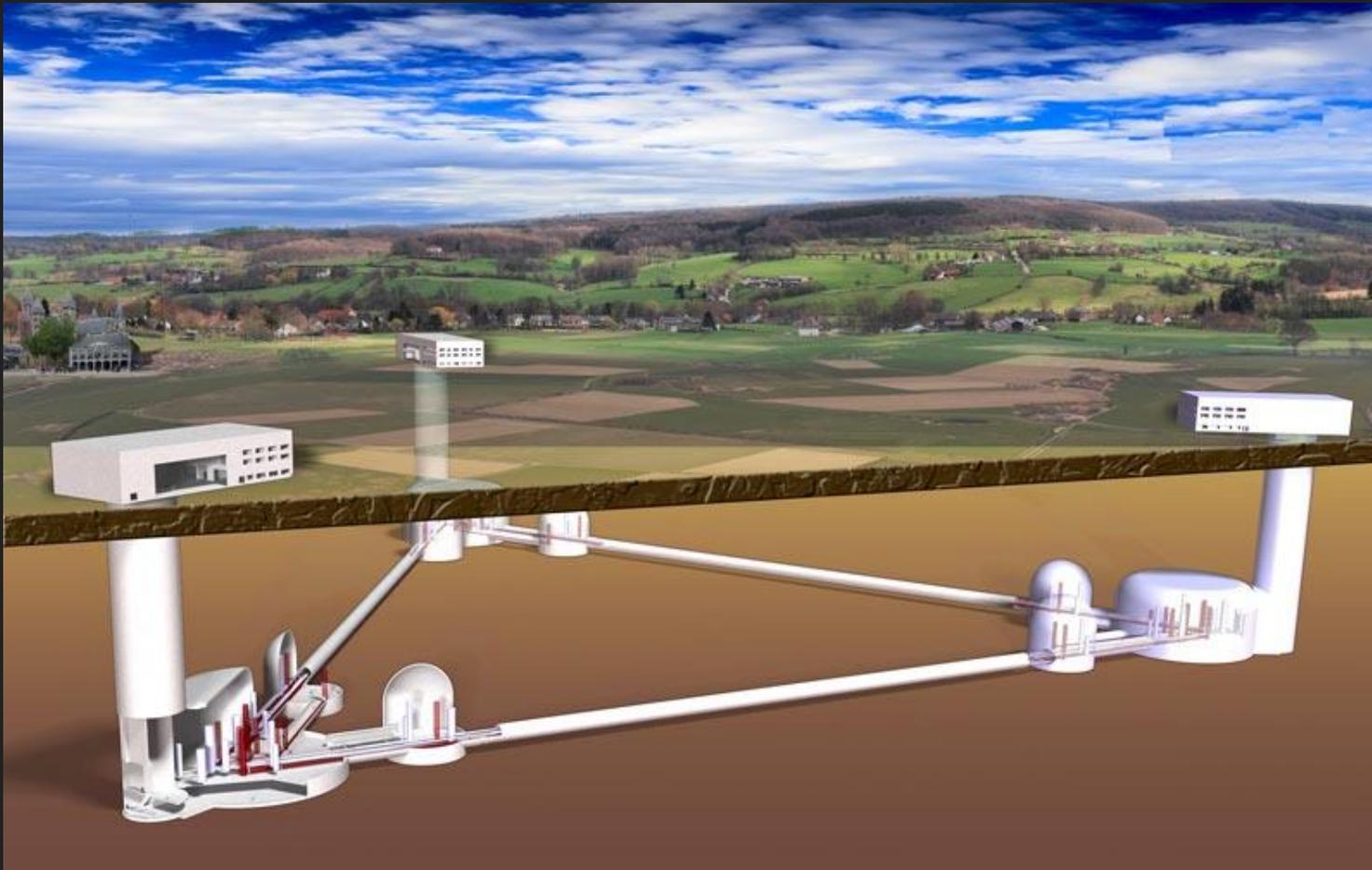
Пока по чувствительности она сильно уступает Virgo.

Четвертый сеанс (O4) начнется во второй половине 2022 года.

Совместные наблюдения в ближайшем будущем



Einstein Telescope

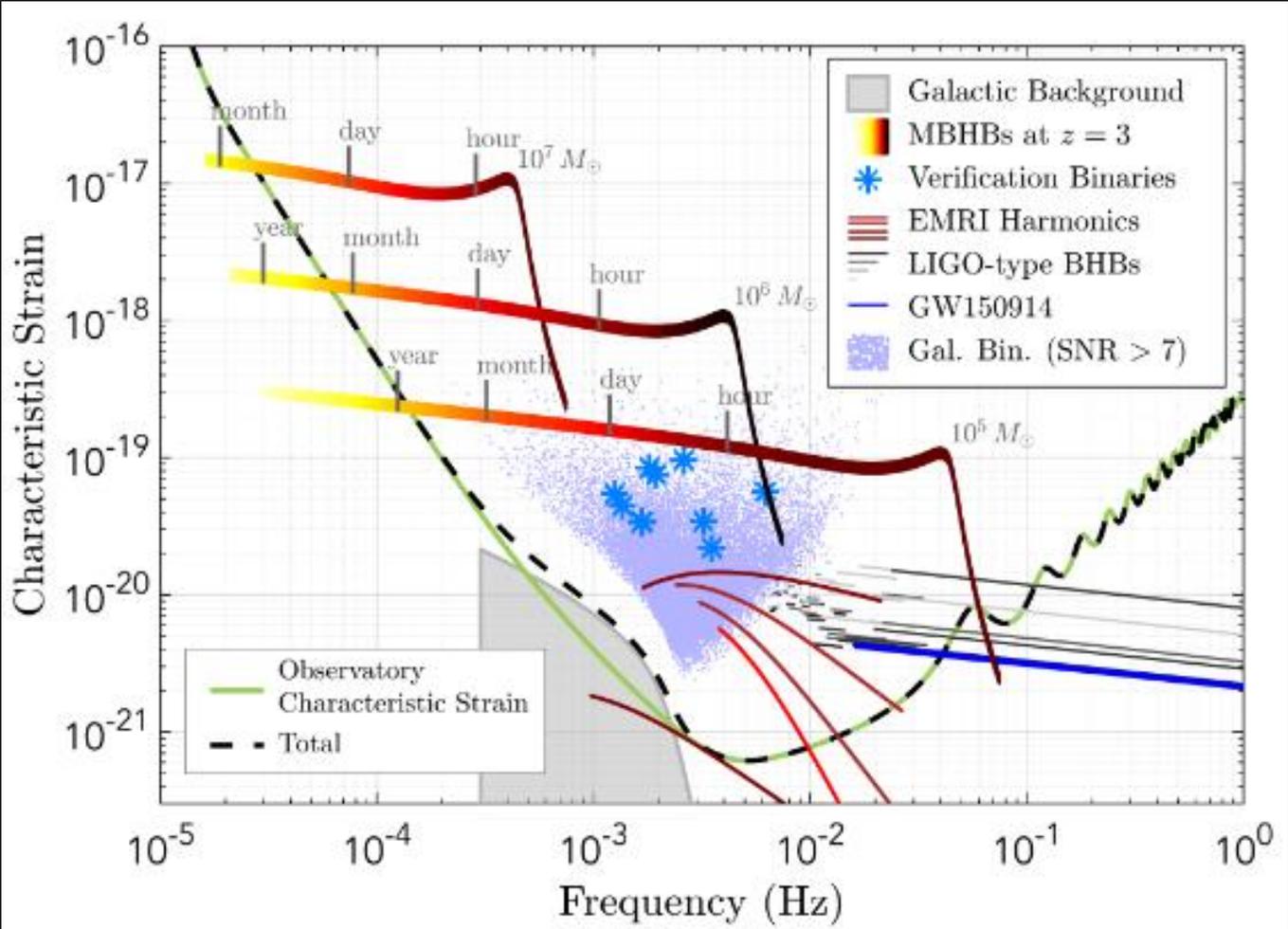
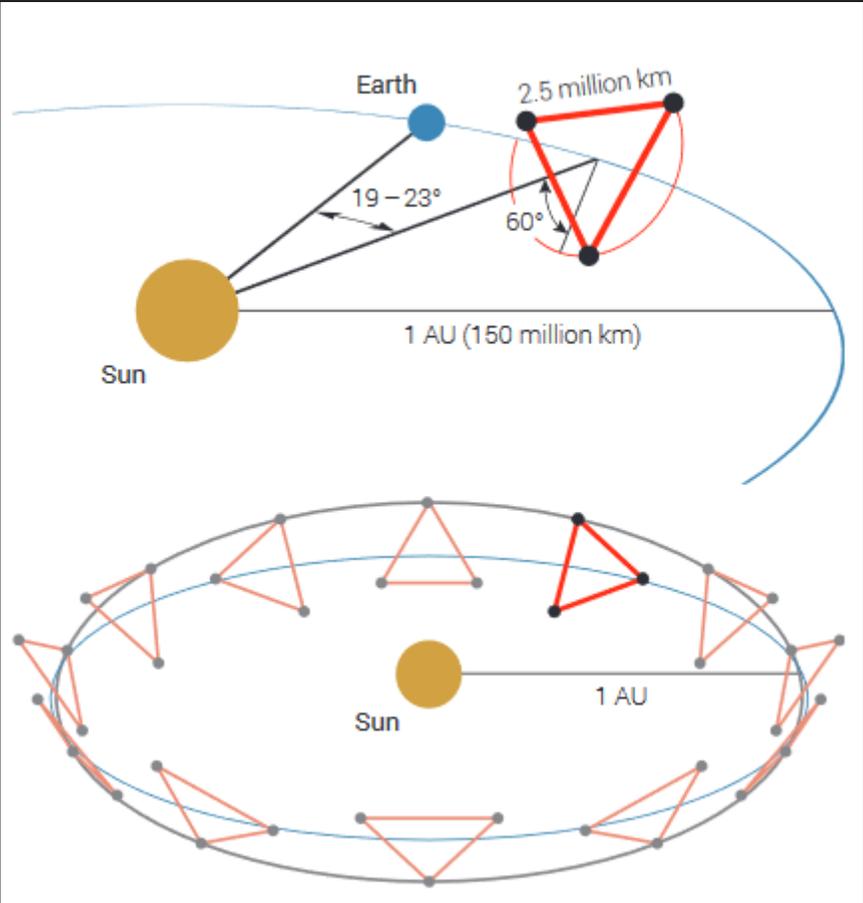


Установка третьего поколения.
В 2017 г. закончился этап
технической разработки проекта.

Широкая полоса 1Hz- 10 kHz.
Высокая чувствительность.

eLISA

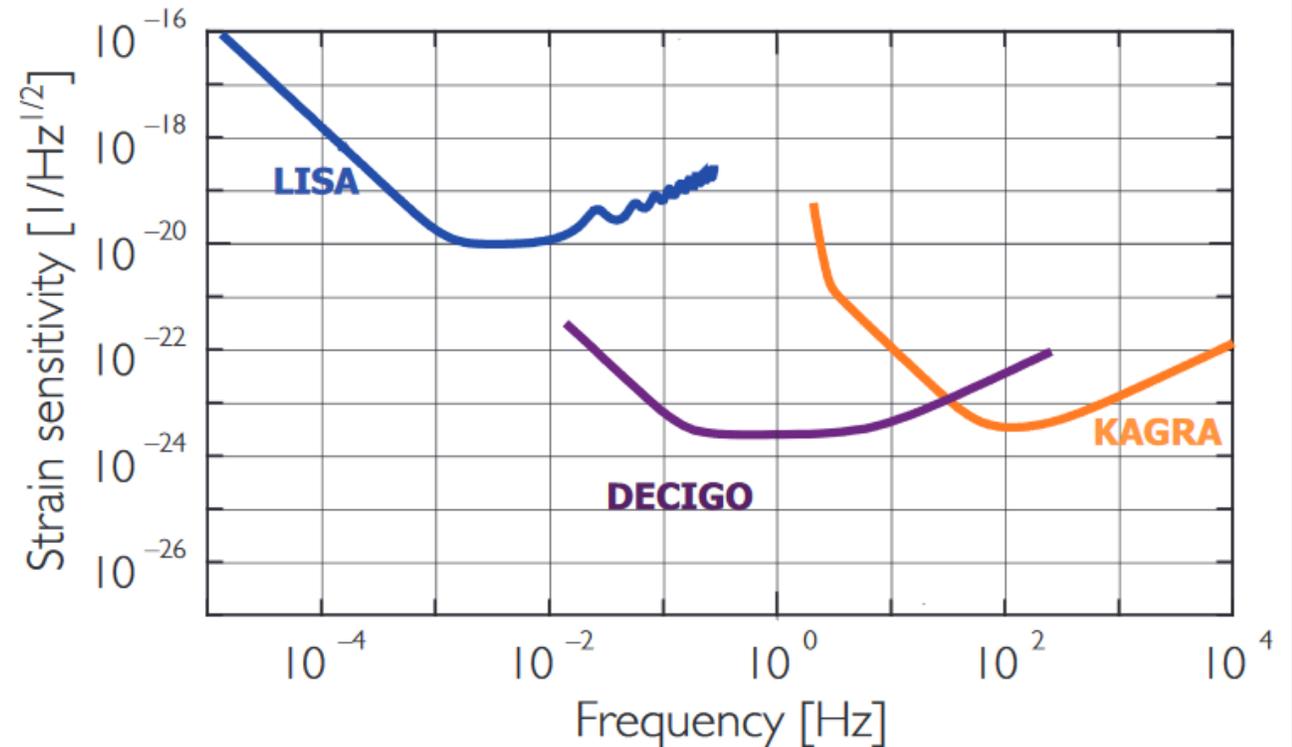
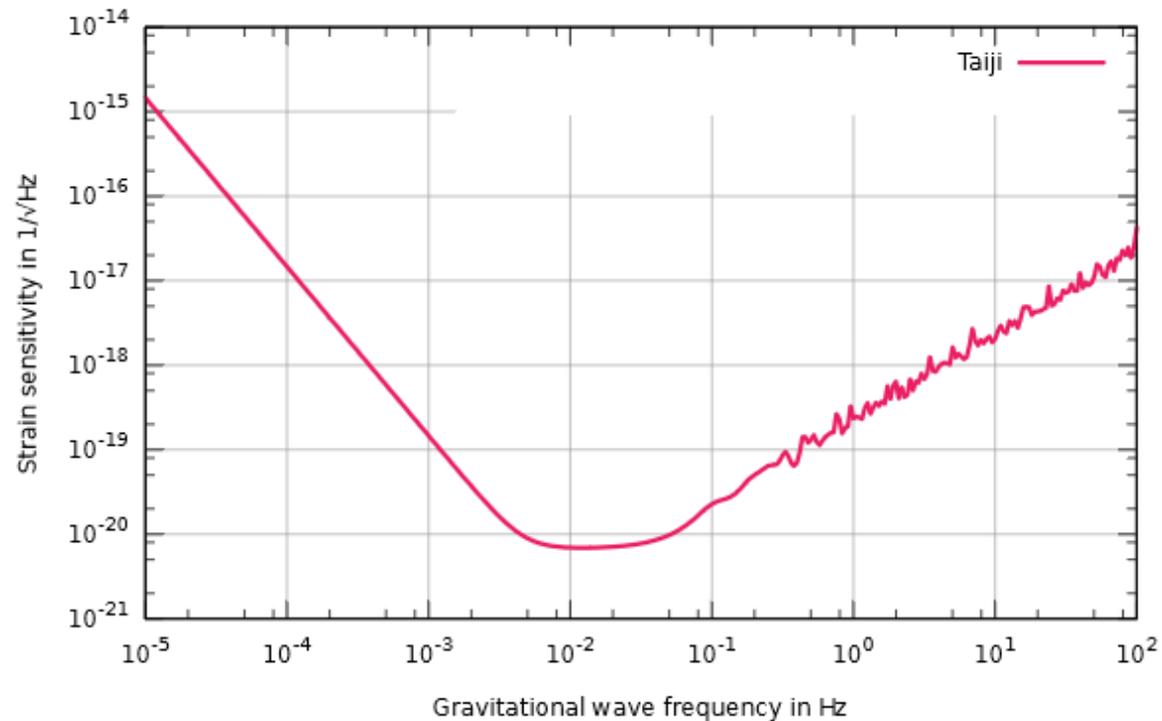
1702.00786



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)

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

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

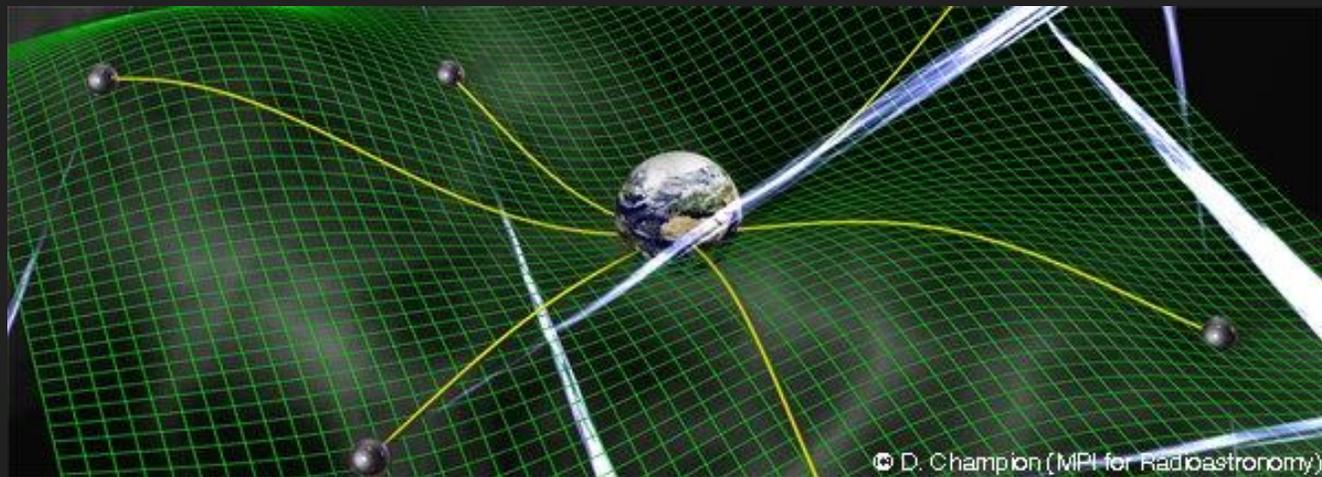
$$R_e(t) = \int_0^t \frac{P_+ A_+(t) + P_\times A_\times(t)}{2(1 - \gamma)} dt$$

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

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 ~ (недель – лет)



Hellings-and-Downs curve

1707.01615

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

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

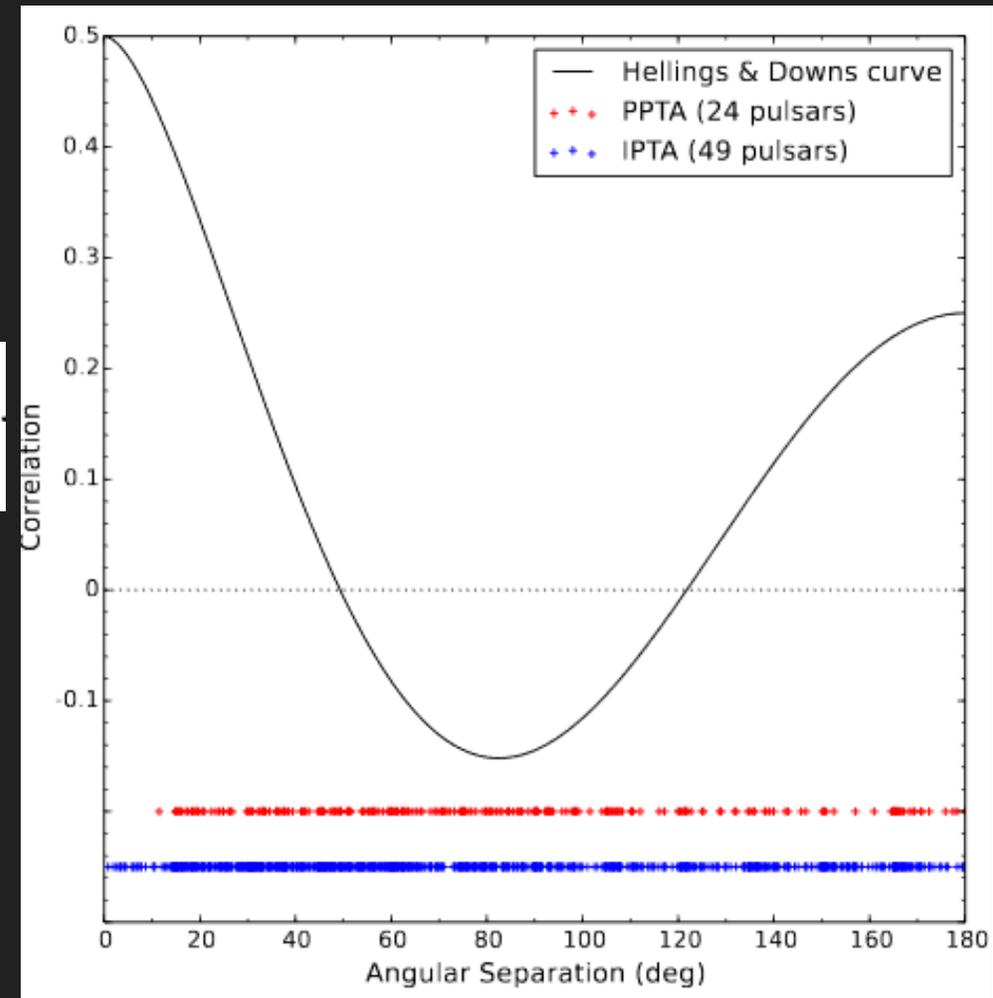
$$x = [1 - \cos \theta]/2$$

Θ – угол между пульсарами

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

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

См. детали в 1412.1142



Три проекта и их объединение

IPTA=PPTA+EPTA+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

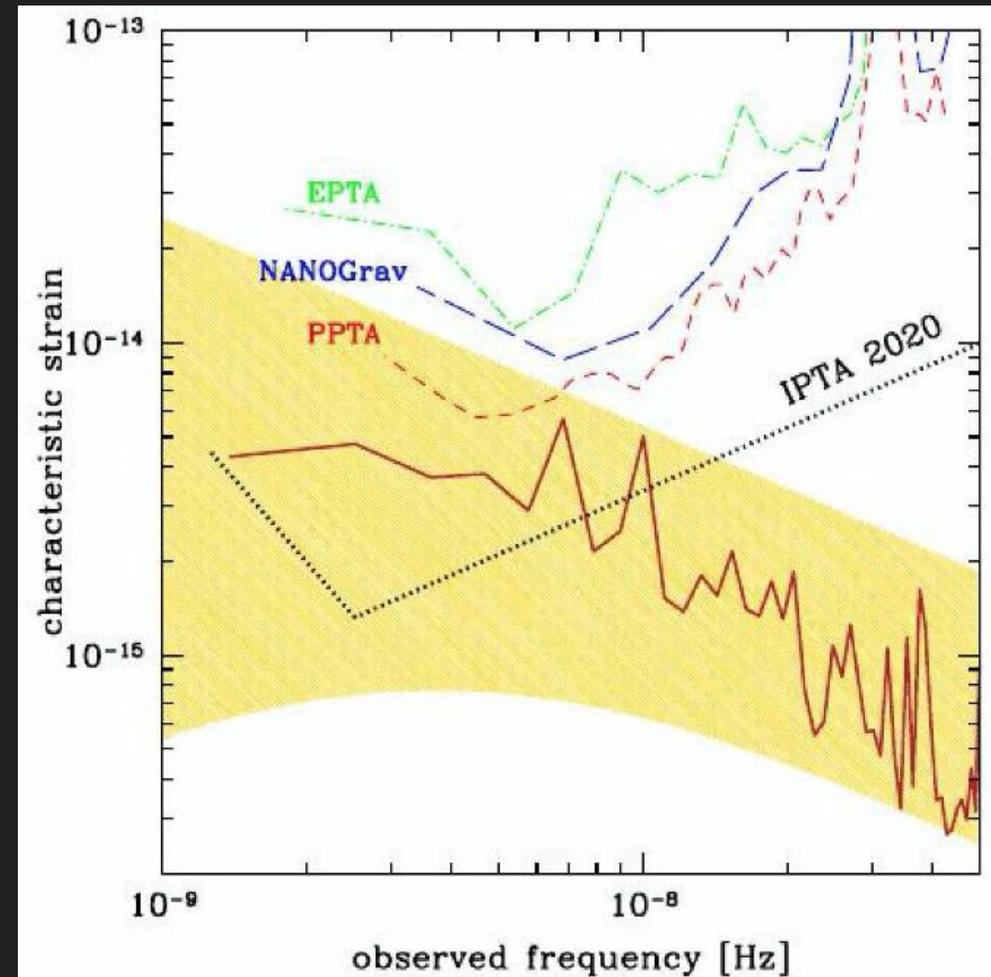
Пределы и прогнозы

1707.01615

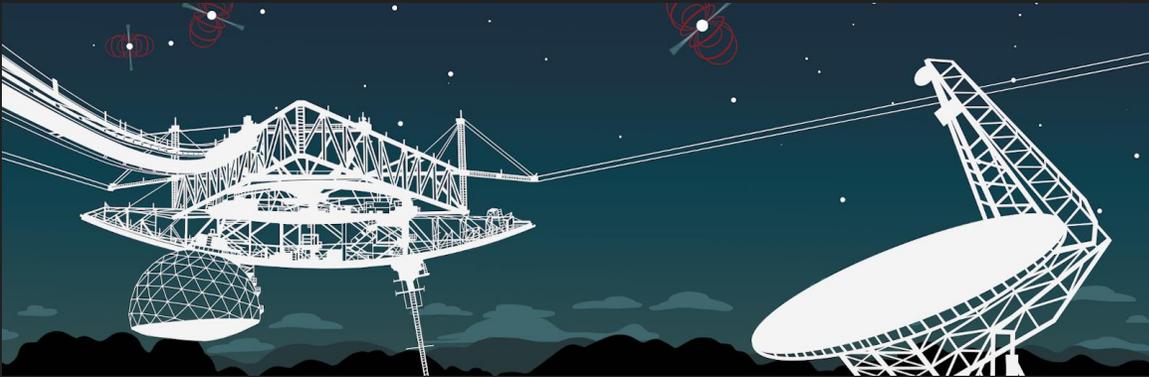
По индивидуальным источникам пределы
 $\sim h < 2 \cdot 10^{-14}$ на частоте 10 nHz.

Пределы на всплески

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



NANOGrav: 12.5 лет наблюдений

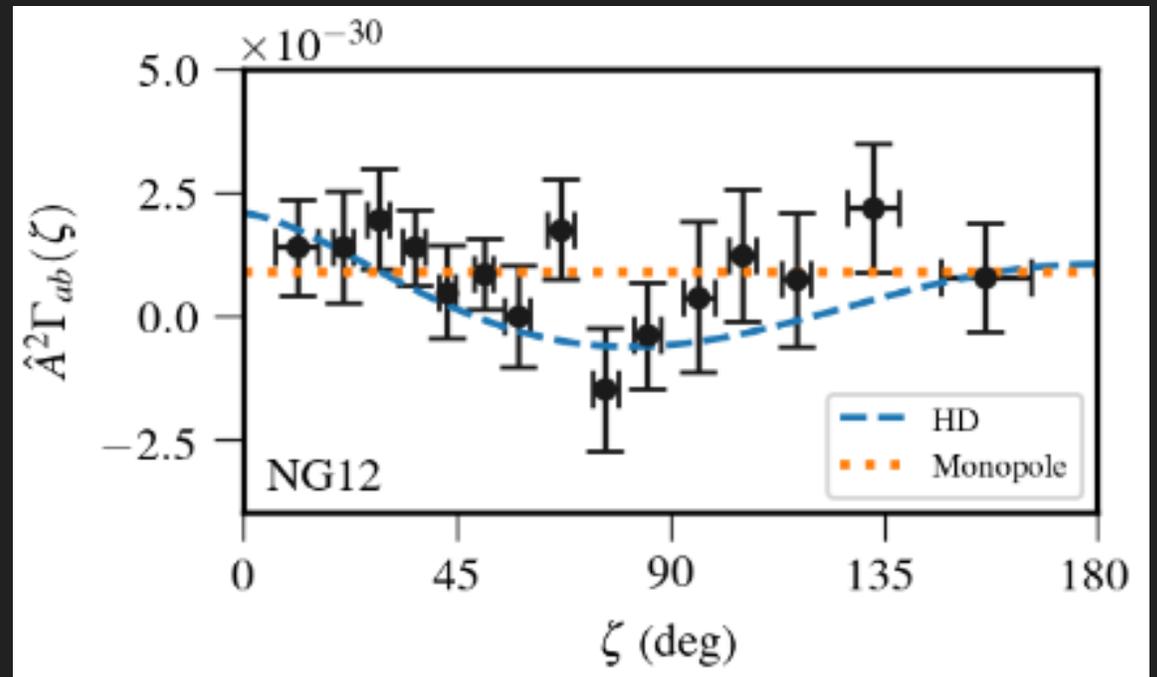


Впервые PTA заявляет о каком-либо сигнале. Правда, что это за сигнал – непонятно.

Появилось уже довольно много публикаций, пытающихся проинтерпретировать сигнал.

Сигнал не связан с ошибками часов или с недостаточно точно учитываемыми параметрами движения Солнечной системы.

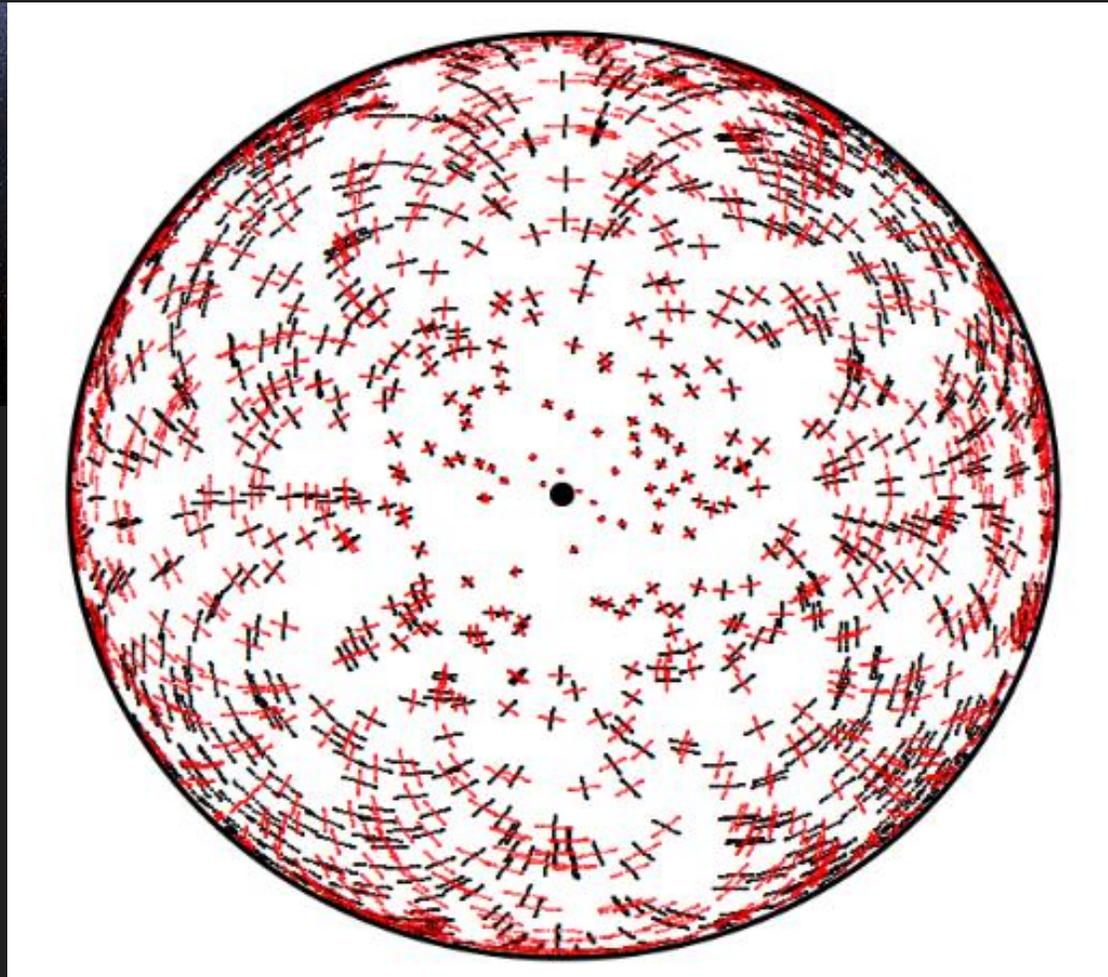
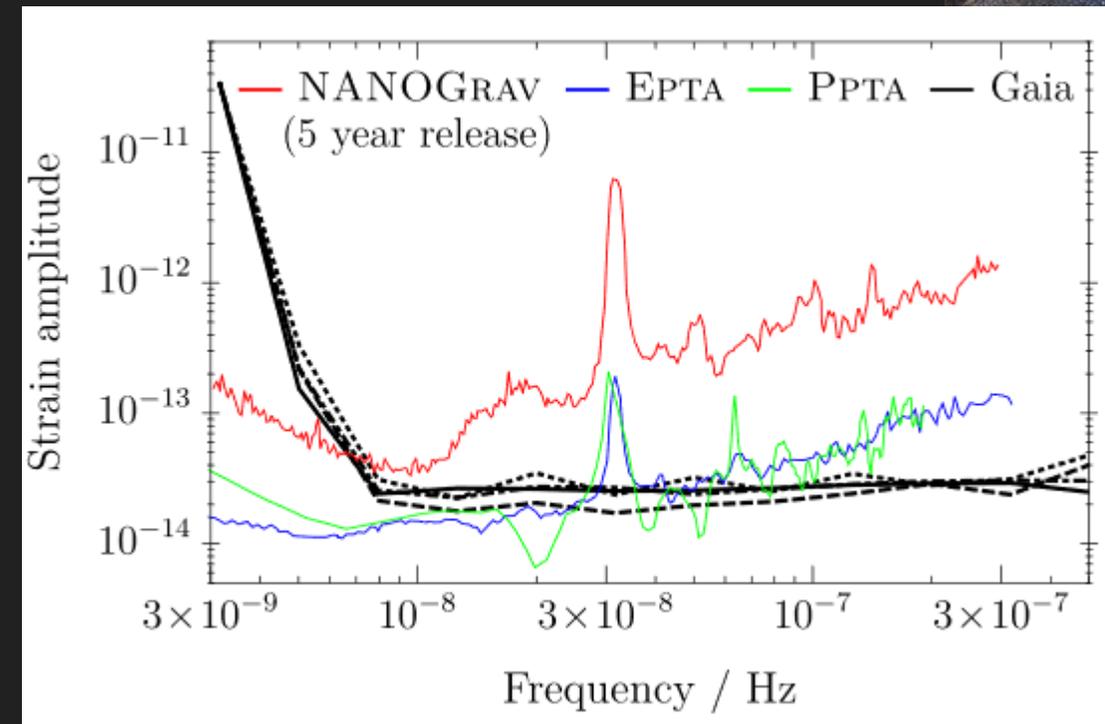
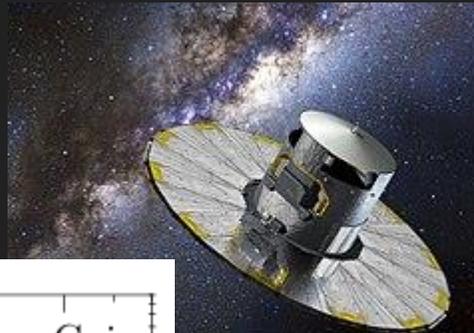
Сигнал не похож на ожидаемый от фона гравитационных волн от сливающихся сверхмассивных черных дыр.



Астрометрия и гравволны

1707.06239

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



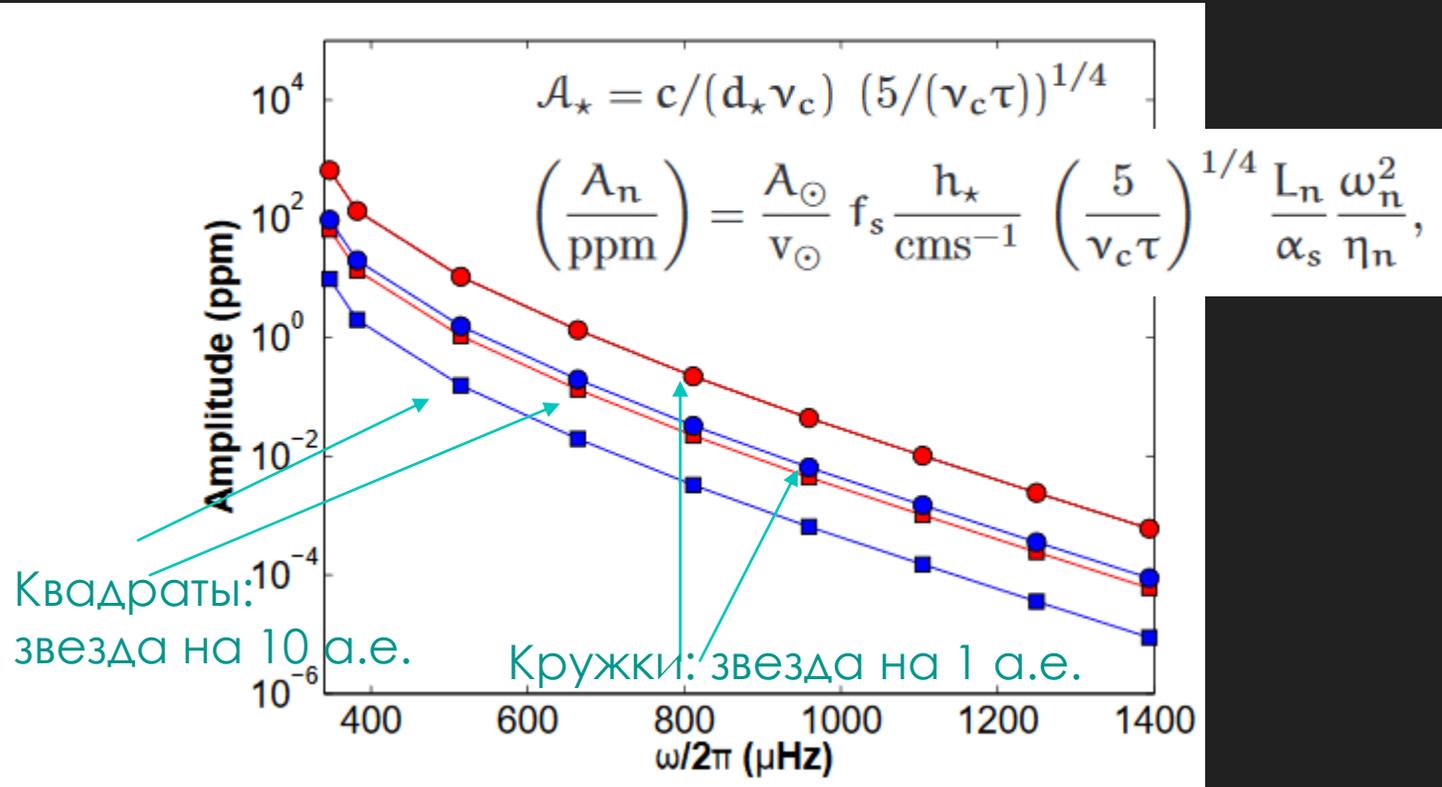
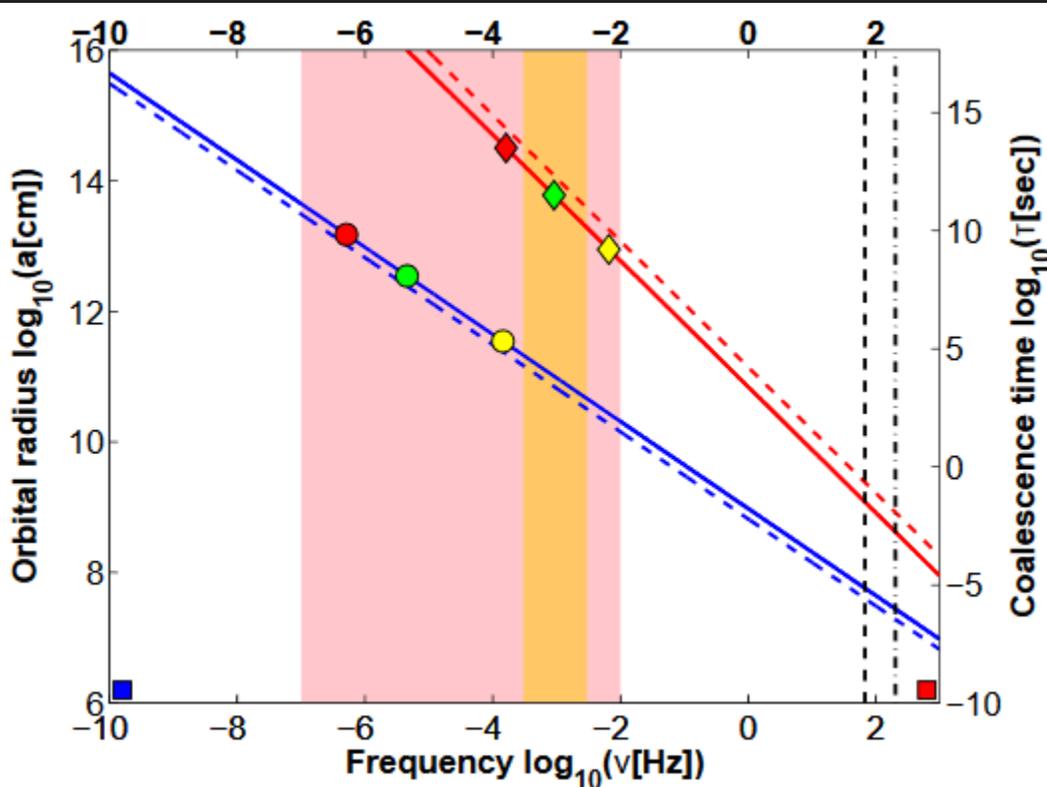
Влияние на звезды на резонансной частоте

1707.06249

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

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

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



Затухание гравволн в среде

1707.05192

Хокинг:
верхний предел для
гидродинамического
приближения

Damping rate

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

Для нерелятивистских частиц,
где τ – 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
 τ_U – возраст вселенной.

$$1/(\omega\tau_U)$$

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