

ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ В АСТРОНОМИИ

(ЛЕКЦИЯ 9. МОДУЛЬ «АСТРОФИЗИКА». ВЕСНА 2022. ВШЭ)

АНТОН БИРЮКОВ, К.Ф.-М.Н.

(ОРИГИНАЛЬНАЯ ПРЕЗЕНТАЦИЯ: СЕРГЕЙ ПОПОВ, ГАИШ МГУ)

НЕМНОГО ИСТОРИИ

- Ранние работы (до ОТО). Хевисайд (1893), Лоренц (1900), Пуанкаре (1905, 1908), Абрахам (1912).
- ОТО. Эйнштейн (1916). Квадрупольная формула.
- 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).

ВОЛНОВОЕ УРАВНЕНИЕ

$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}$, $\eta_{\mu\nu} = \text{diag}(-1, 1, 1, 1)$ -- метрика.

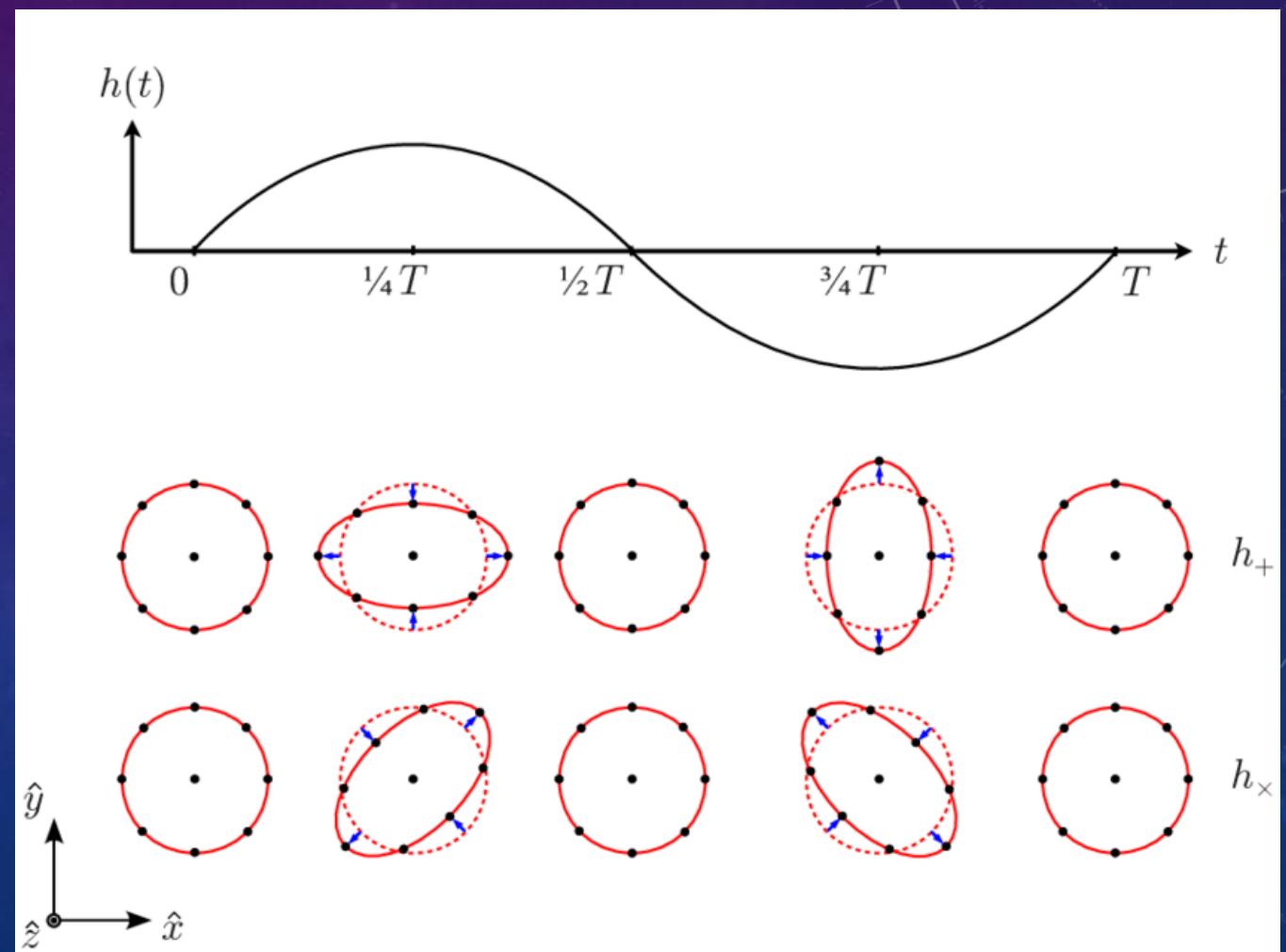
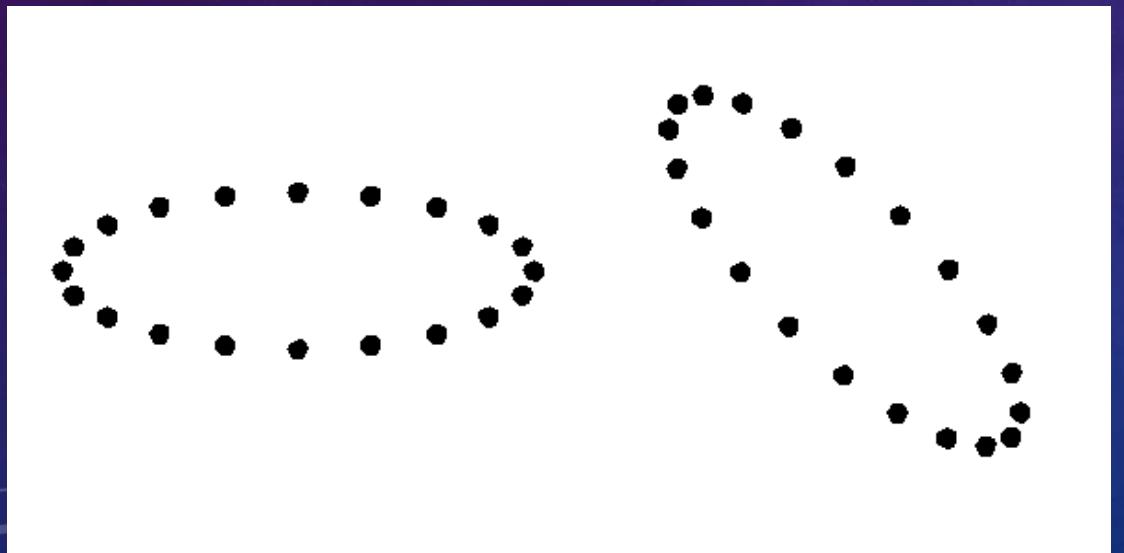
$h_{\mu\nu} = \bar{h}_{\mu\nu} + \frac{1}{2}\eta_{\mu\nu}h$ -- пертурбации.

$\left(\nabla^2 - \frac{1}{c^2}\frac{\partial^2}{\partial t^2}\right)h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ -- волновое уравнение.

$= 0$ -- в пустом пространстве.

ПРОЯВЛЕНИЕ ГРАВИТАЦИОННОЙ ВОЛНЫ

Действие гравитационной волны аналогично эффекту приливов.



АМПЛИТУДА ГВ

$$h \sim \frac{G}{c^4} \frac{\ddot{Q}}{r} \sim \frac{r_s}{r} \frac{v^2}{c^2}$$

$r_s = \frac{2GM}{c^2}$ – радиус Шварцшильда
 v – характерные скорости
 r – расстояние до источника

$$h \approx 10^{-21} \left(\frac{M}{2M_\odot} \right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{P}{1 \text{ час}} \right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{r}{1 \text{ кпк}} \right)^{-1}$$

$$h \approx 10^{-22} \left(\frac{M}{2.8M_\odot} \right)^{\frac{5}{3}} \left(\frac{P}{0.01 \text{ сек}} \right)^{-\frac{2}{3}} \left(\frac{r}{100 \text{ Мпк}} \right)^{-1}$$

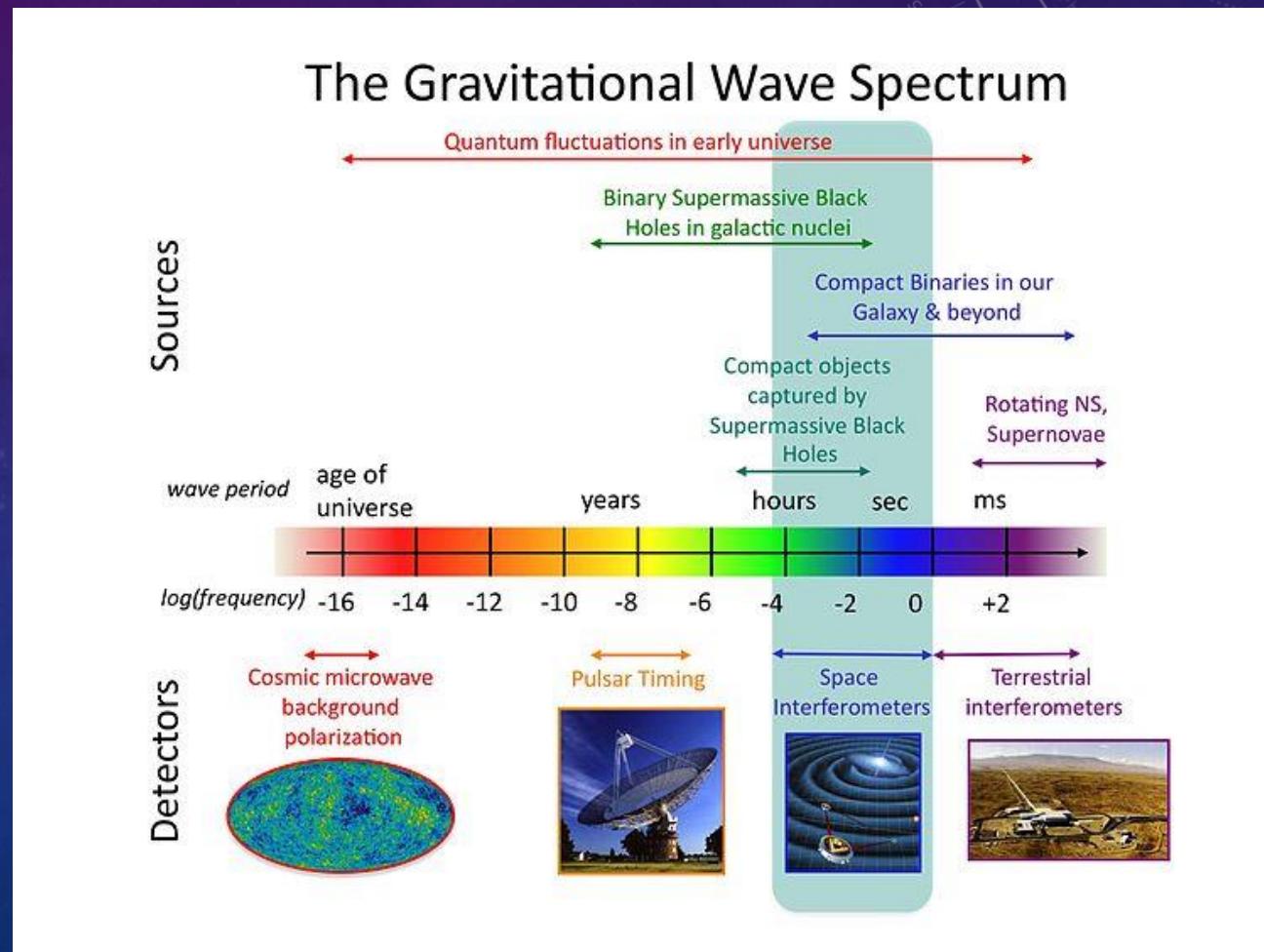
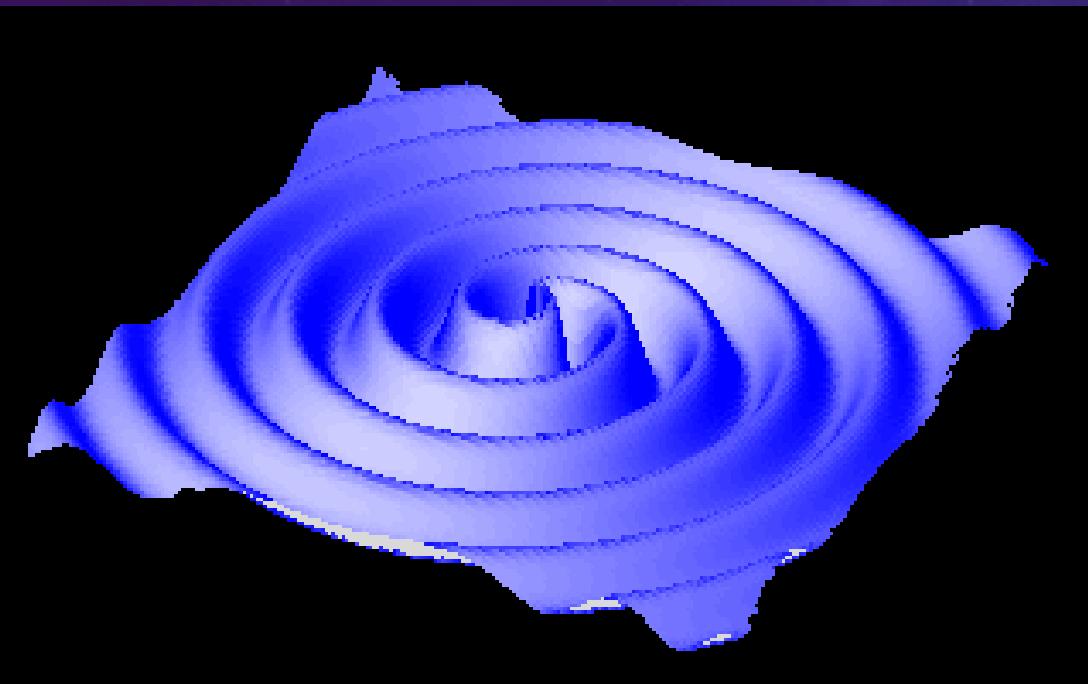
Strain:
$$\begin{cases} h \sim \frac{\Delta L}{L} \\ h_c(f) = h \sqrt{N_{cycles}} \end{cases}$$

ГВ VS ЭМ

	Электромагнитные волны	Гравитационные волны
Физика	Магнито-Гидро-Термо-Динамика	Макроскопическое движение
Спектр	Широкий	Узкий
Взаимодействие с материей	Сильное	Слабое
Угловое разрешение	Лучше	Хуже
Данные	Поток	Амплитуда

СПЕКТР ГРАВВОЛН

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



МЕТОДЫ РЕГИСТРАЦИИ

Прямые

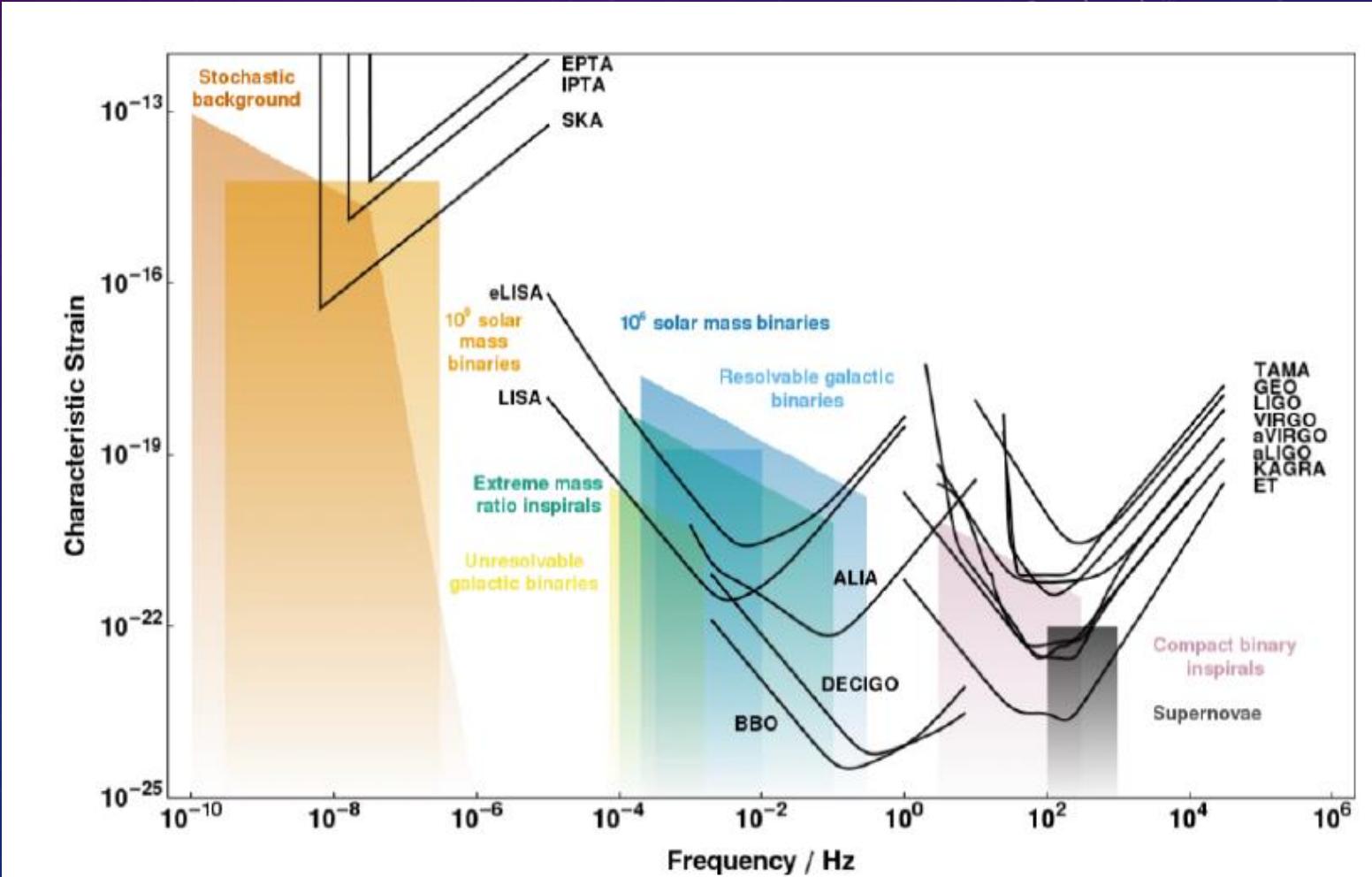
- Твердотельные (бар) детекторы
- Наземные лазерные интерферометры
- Космические лазерные интерферометры

Косвенные (астрономические)

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

РАЗНЫЕ МЕТОДЫ В РАЗНЫХ ДИАПАЗОНАХ

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



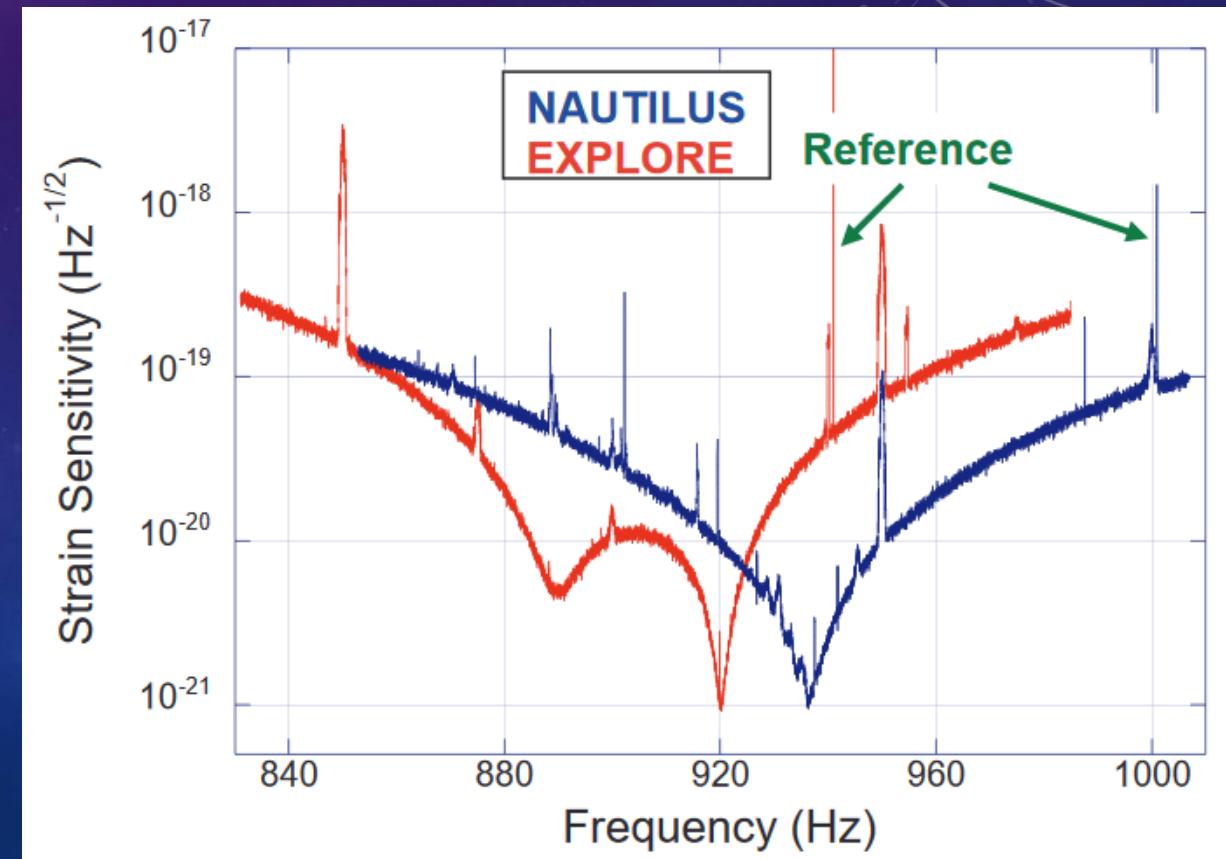
ТВЕРДОТЕЛЬНЫЕ (БАР) ДЕТЕКТОРЫ

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)

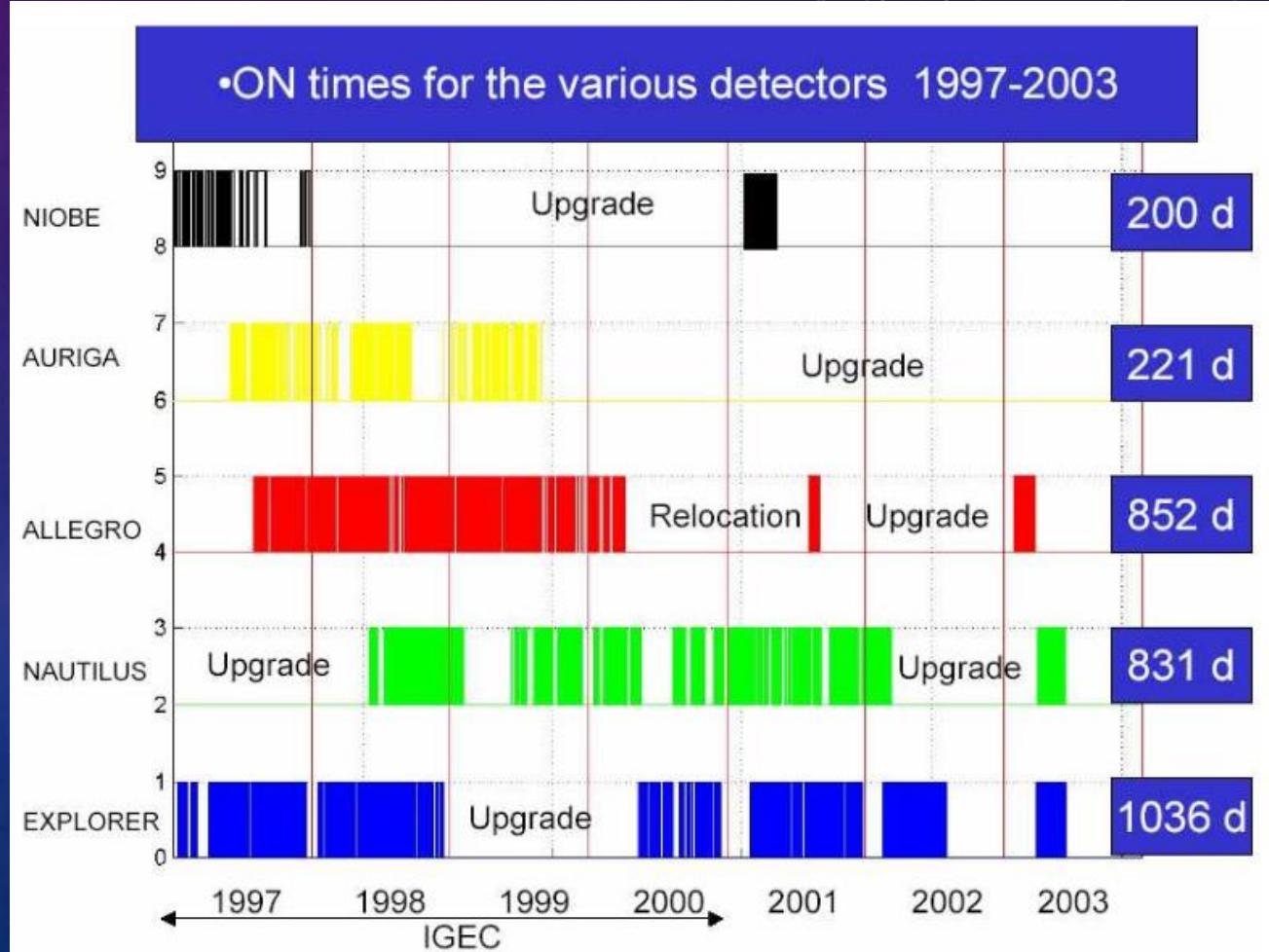
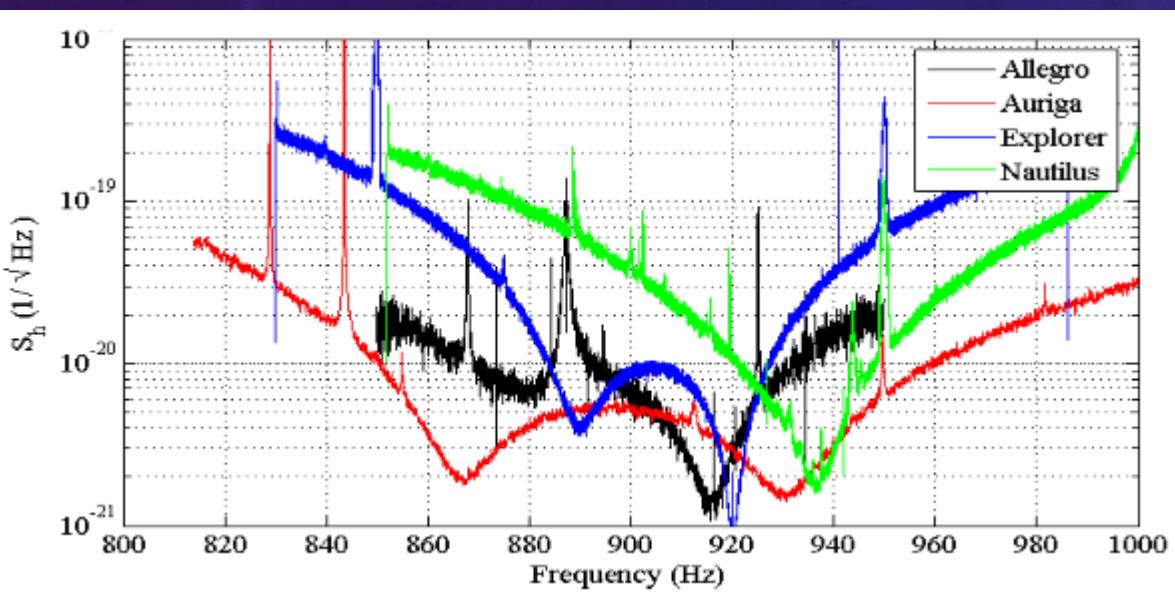


Чувствительность в узком
высокочастотном диапазоне.



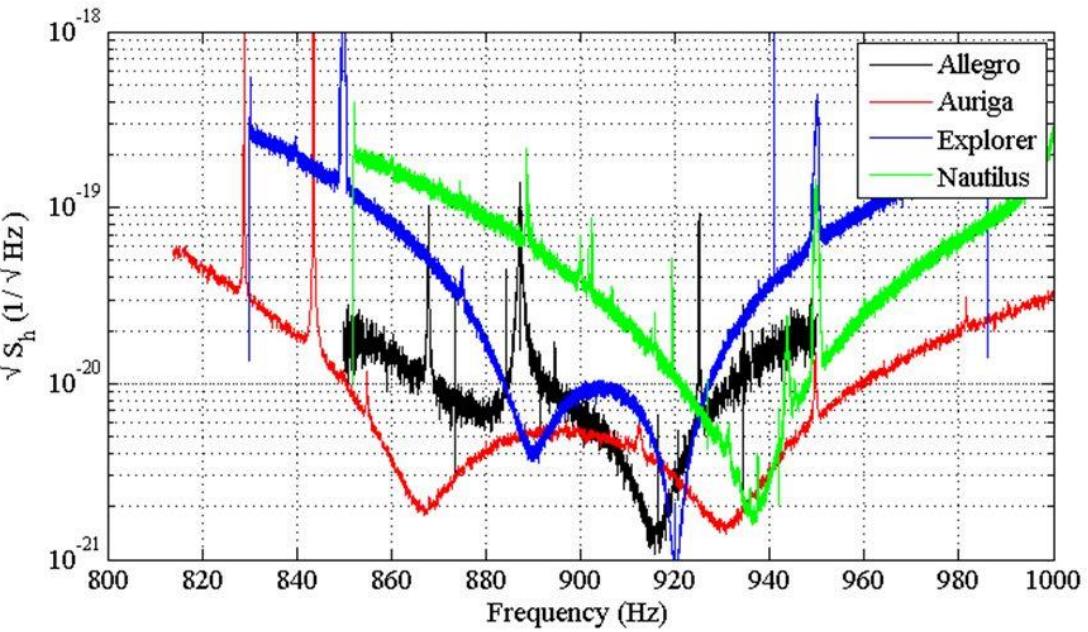
ДЕТЕКТОРЫ ПРЕДПОСЛЕДНЕГО ПОКОЛЕНИЯ

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

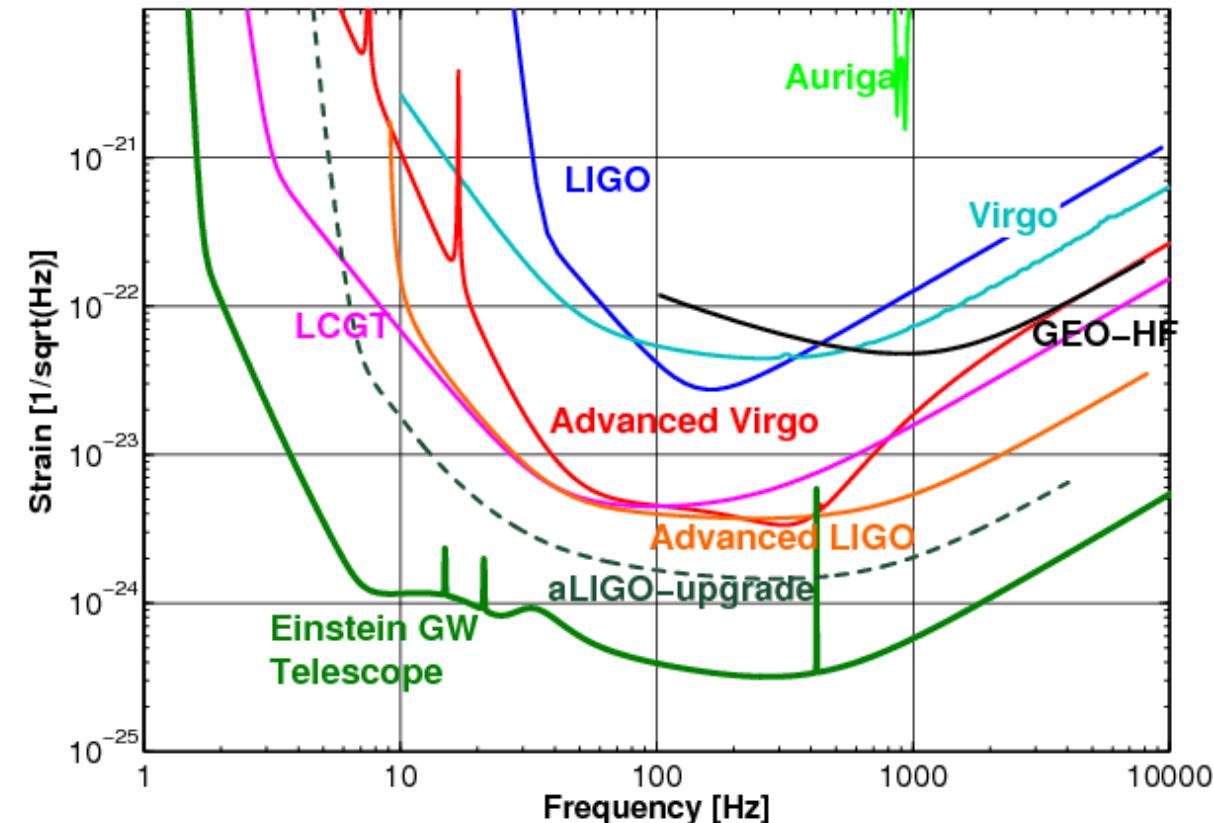


БАРЫ ПРОТИВ ИНТЕРФЕРОМЕТРОВ

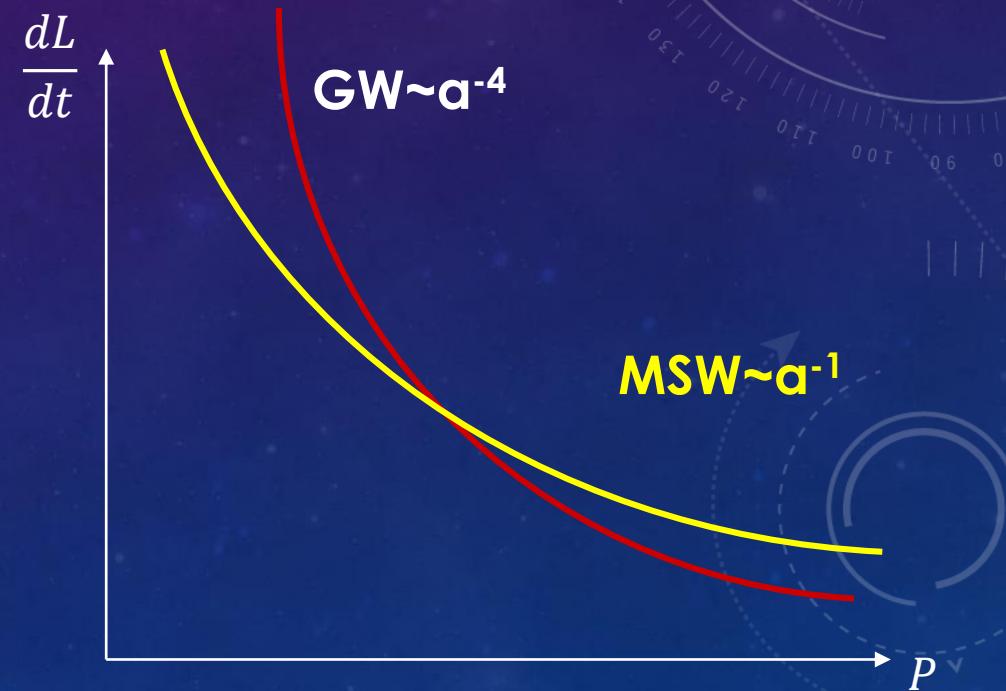
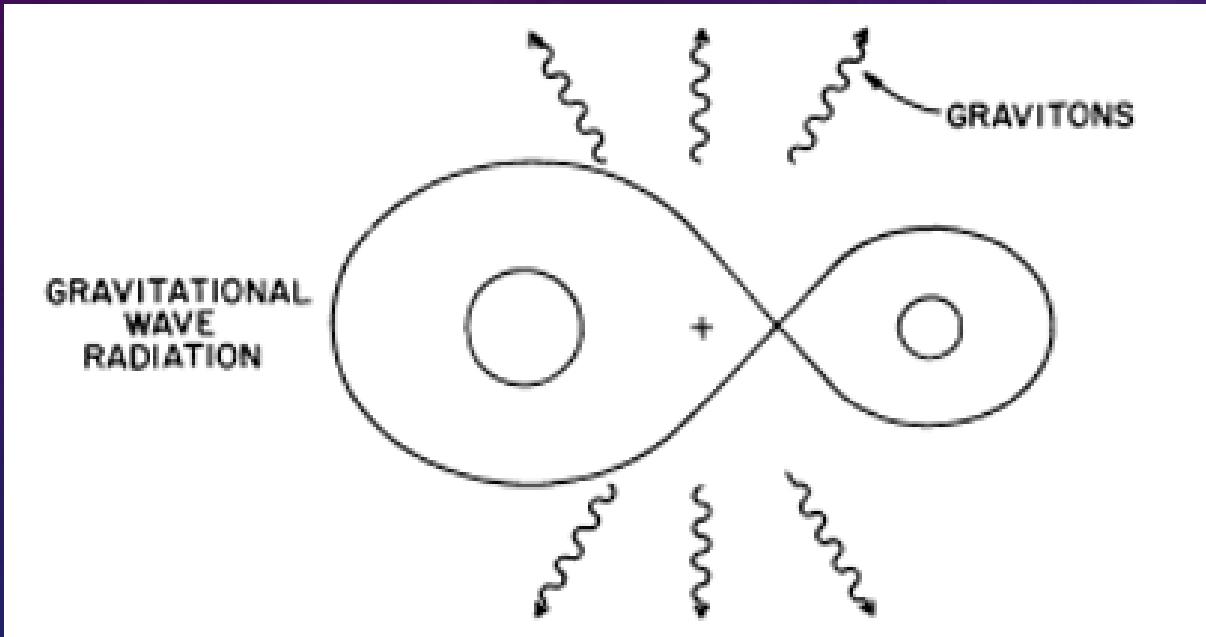
SENSITIVITY OF PRESENT DETECTORS



ILIAS WP1 – Cascina 13.11.2006



ГВ В ТЕСНЫХ ДВОЙНЫХ СИСТЕМАХ

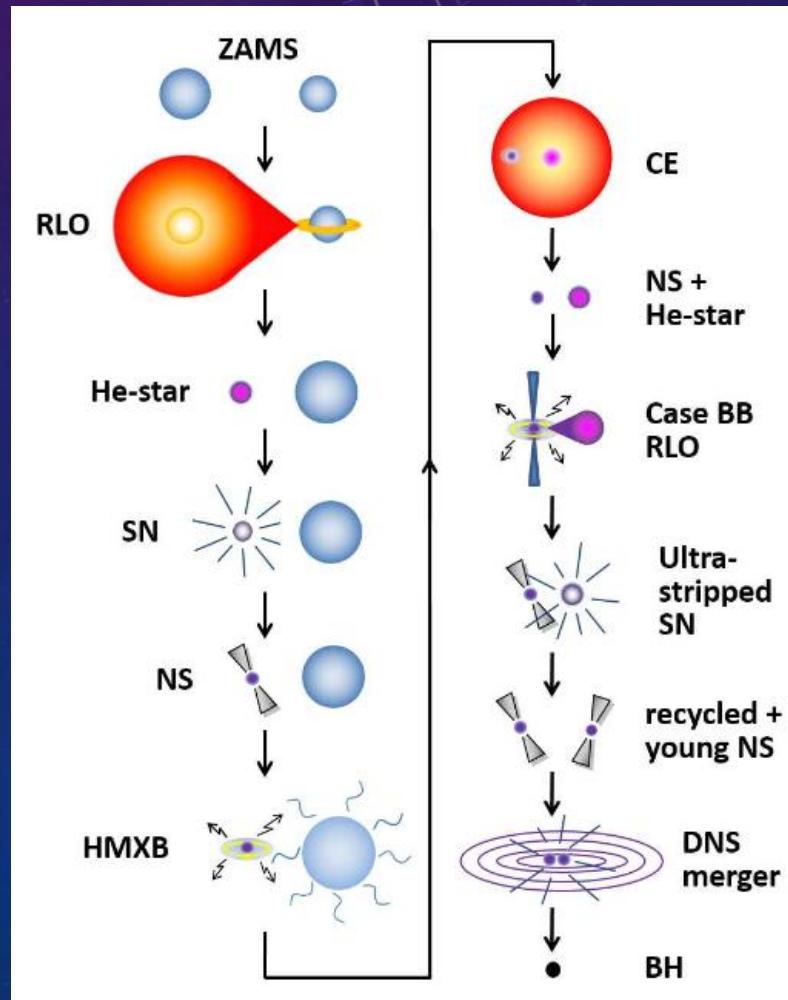


Сильнее всего эффект проявляется в системах из двух нейтронных звезд.

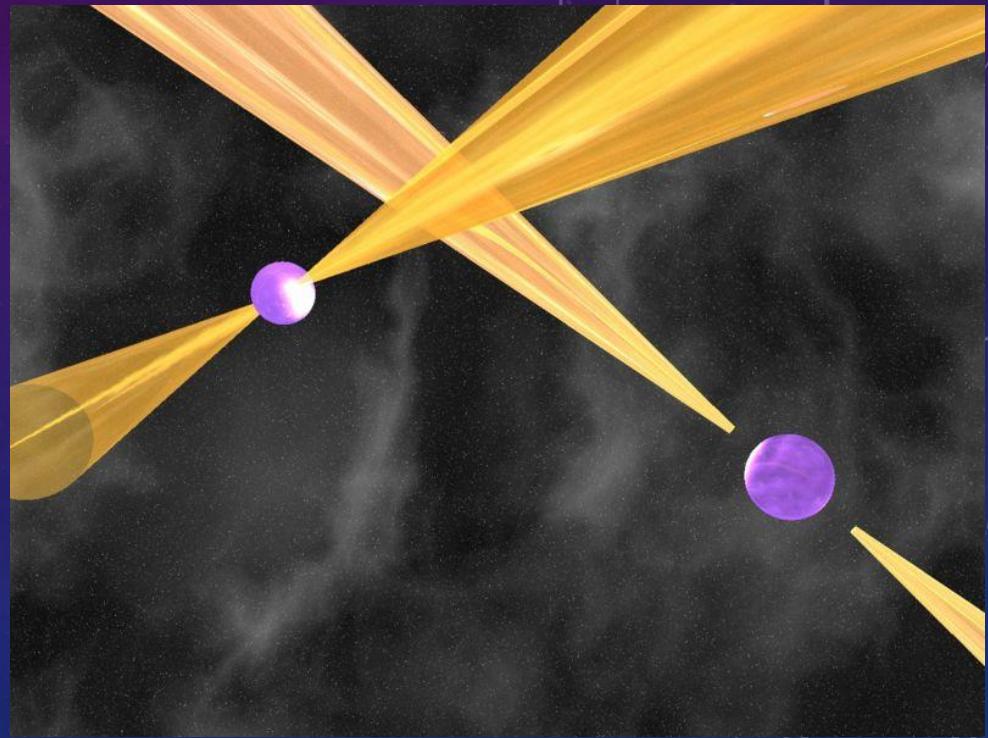
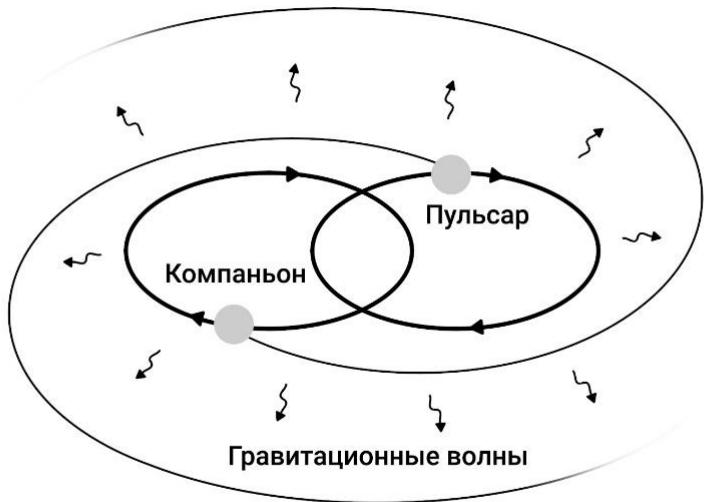
ДВОЙНЫЕ НЕЙТРОННЫЕ ЗВЁЗДЫ

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



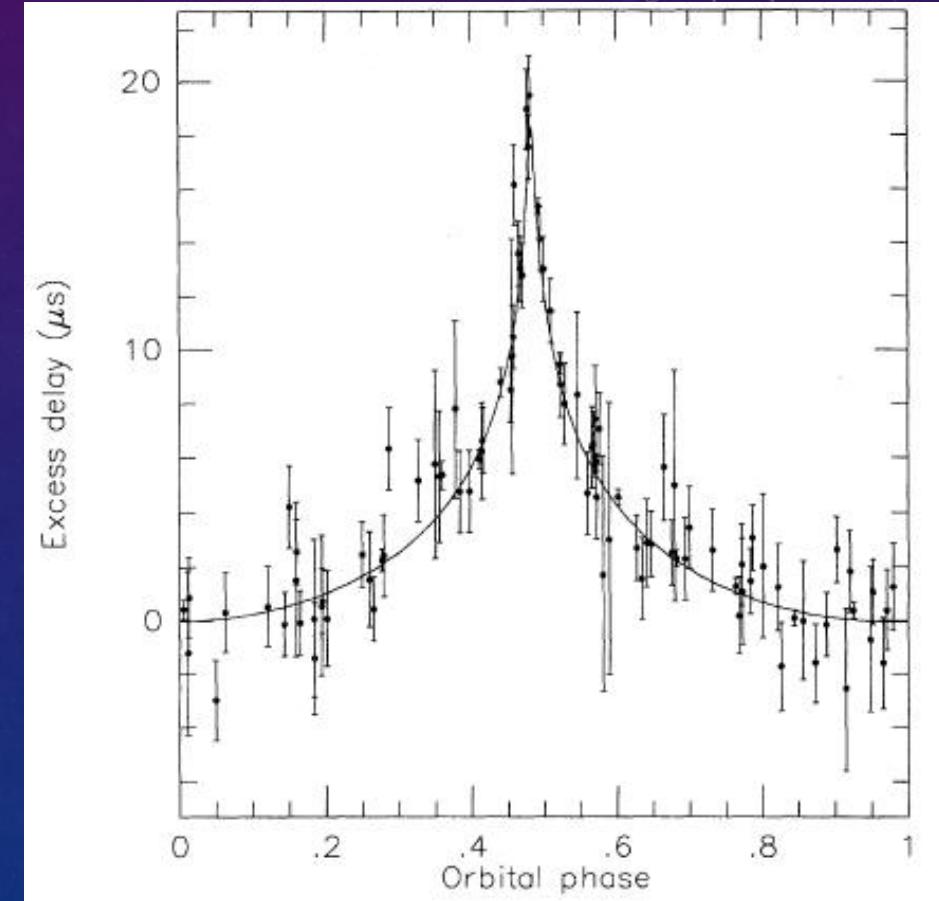
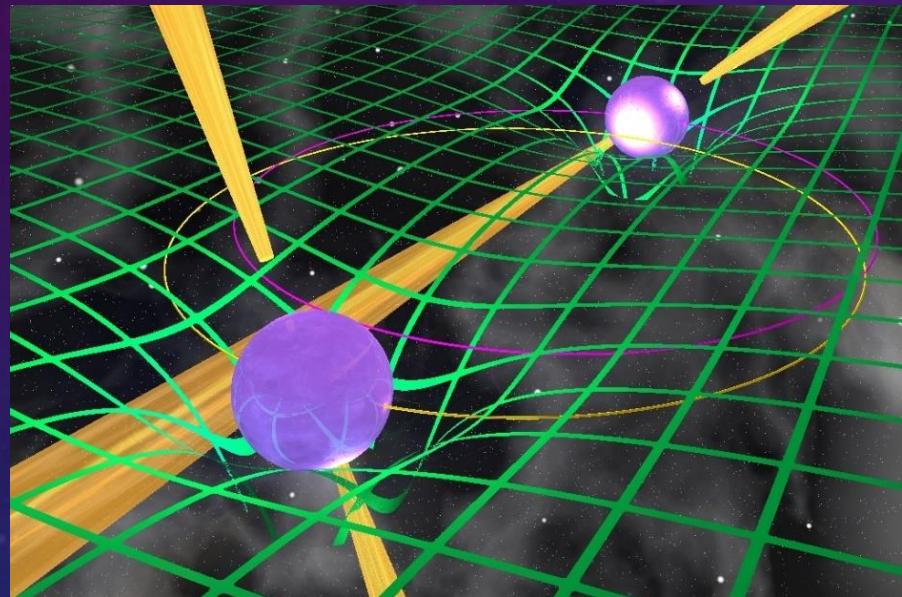
$$T = t_{\text{obs}} - t_0 + \Delta_C - D/f^2 + \Delta_R \odot (\alpha, \delta, \mu_\alpha, \mu_\delta, \pi) \\ + \Delta_E \odot - \Delta_S \odot (\alpha, \delta) \\ - \Delta_R (x, e, P_b, T_0, \omega, \dot{\omega}, \dot{P}_b) - \Delta_E (\gamma) - \Delta_S (r, s)$$

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

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

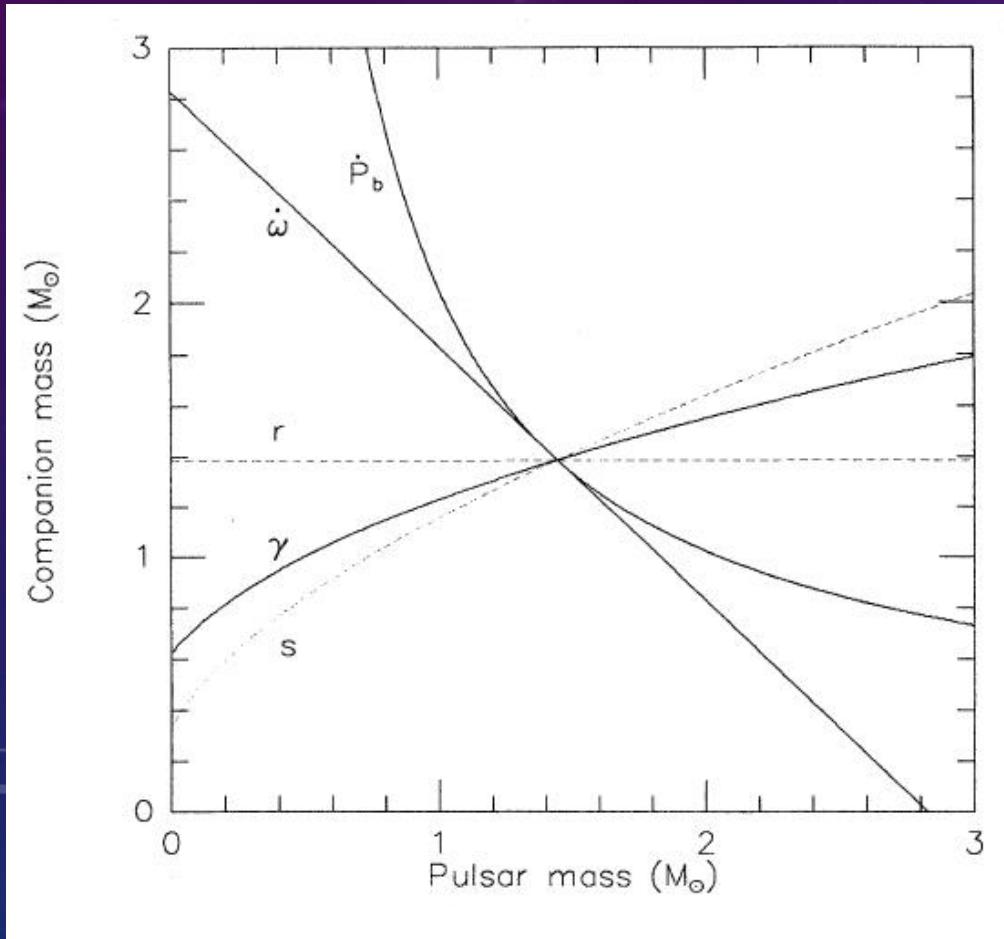
ЭФФЕКТ ШАПИРО

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



PSR 1855+09 (Taylor, Nobel lecture)

ИЗМЕРЕНИЕ МАСС НЕЙТРОННЫХ ЗВЁЗД

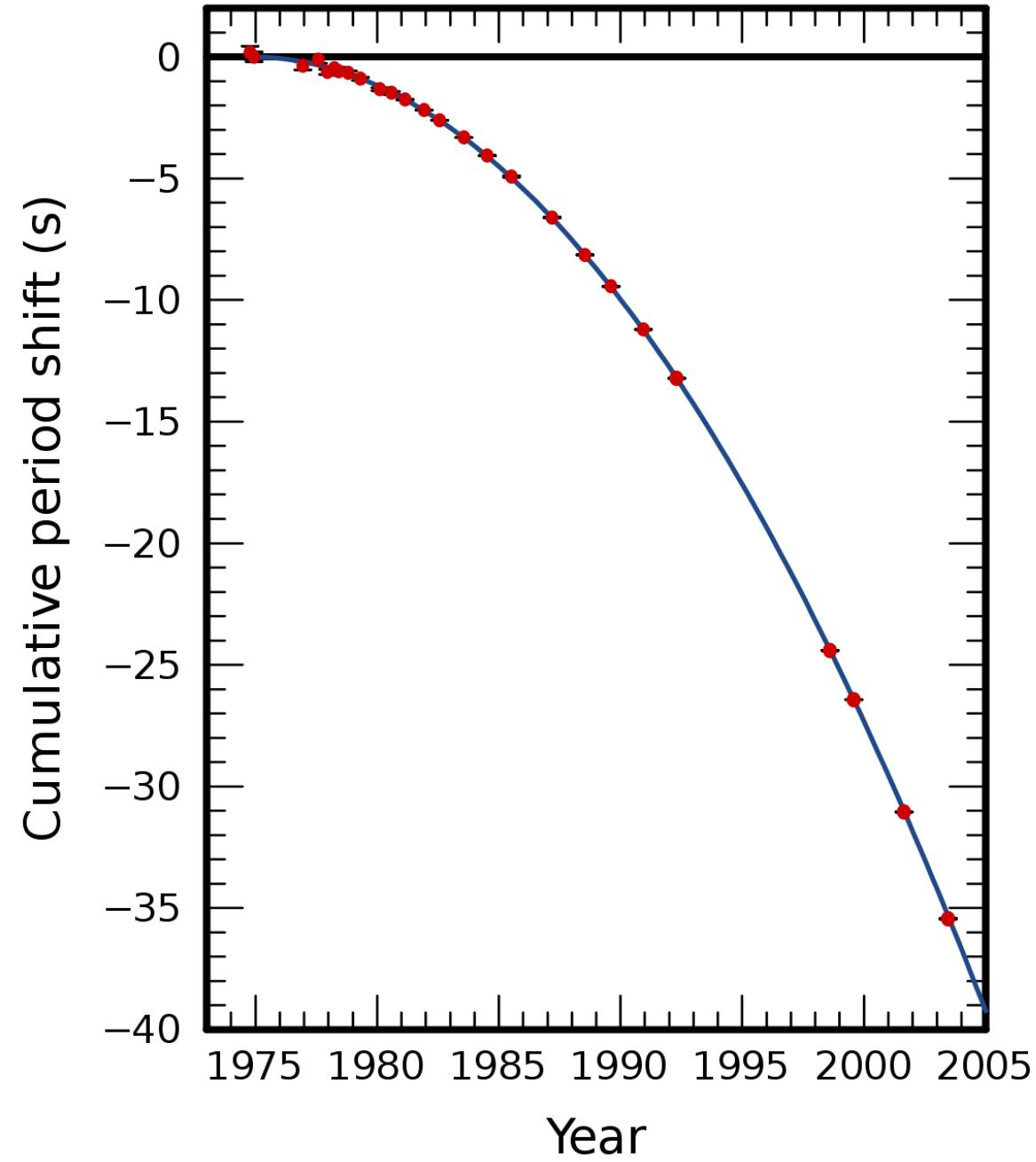
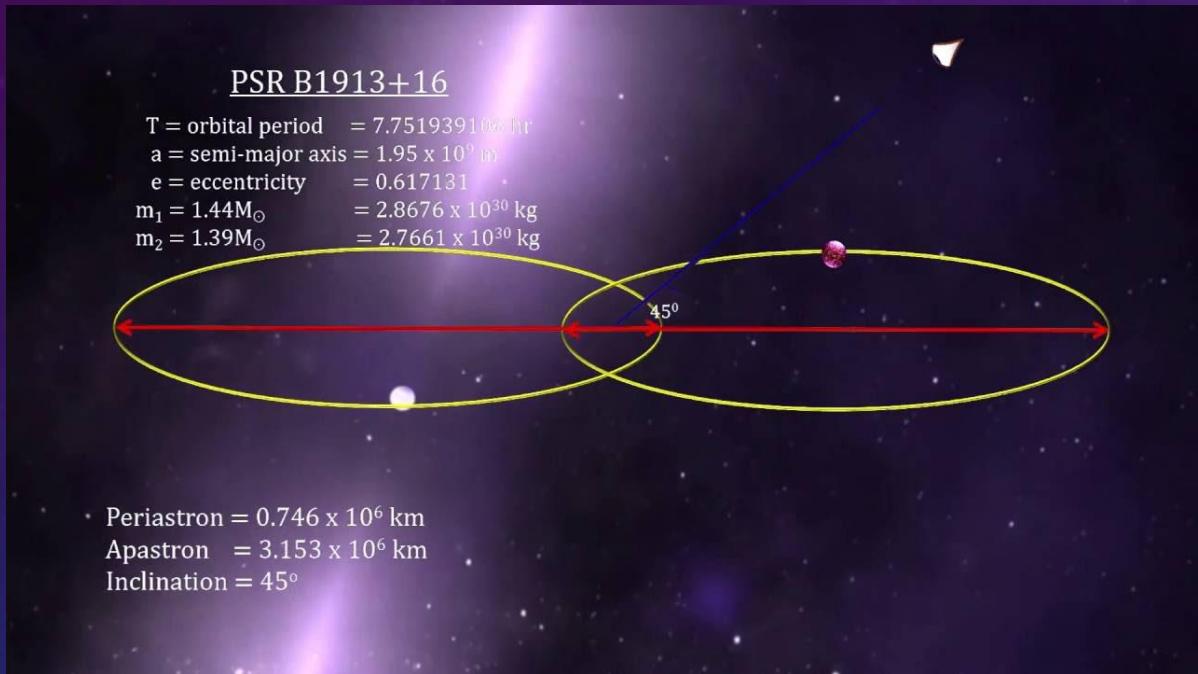


Наблюдение сразу нескольких эффектов позволяет измерить массы обеих звезд с очень высокой точностью. Иногда до 0.001.

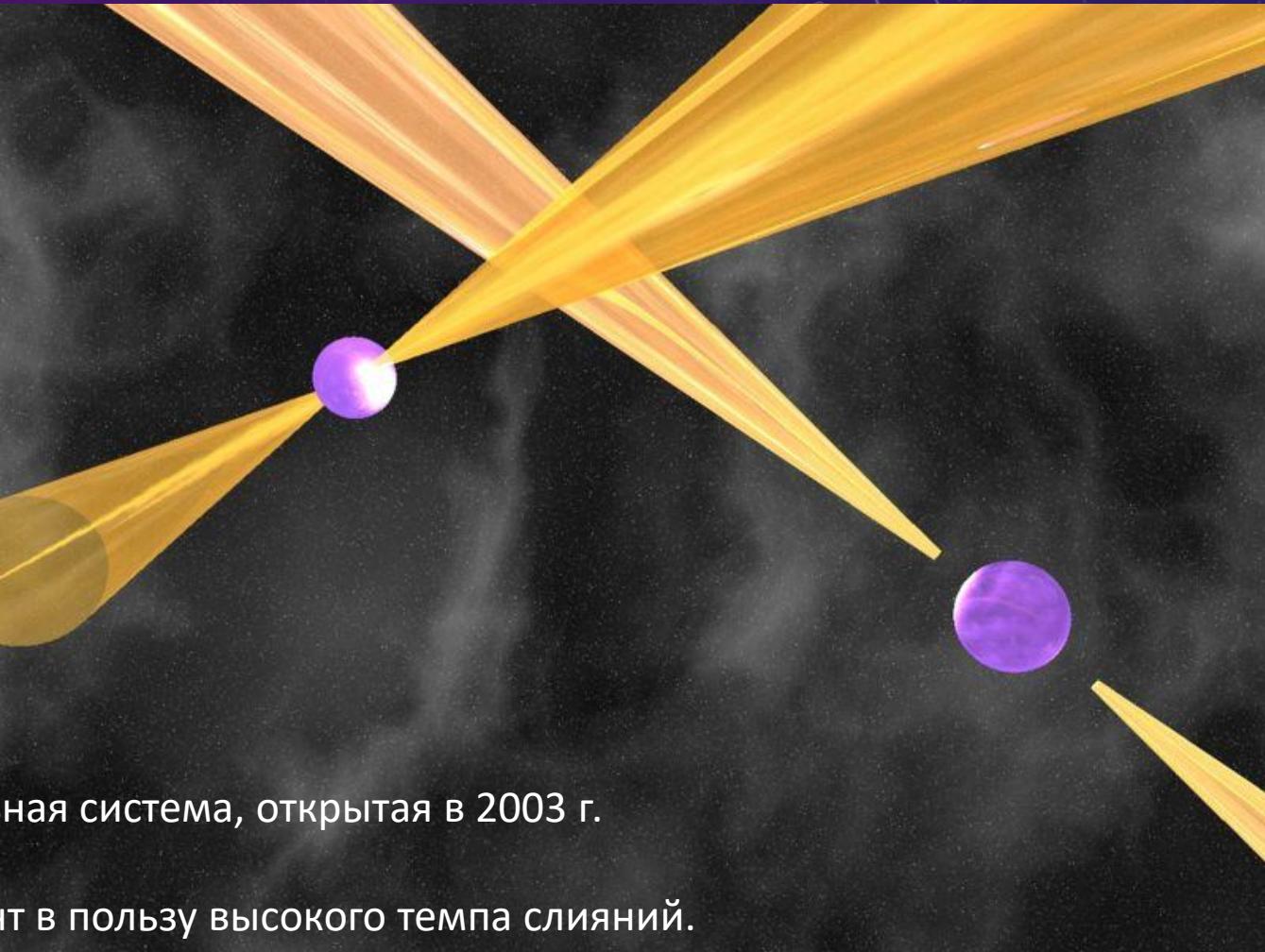
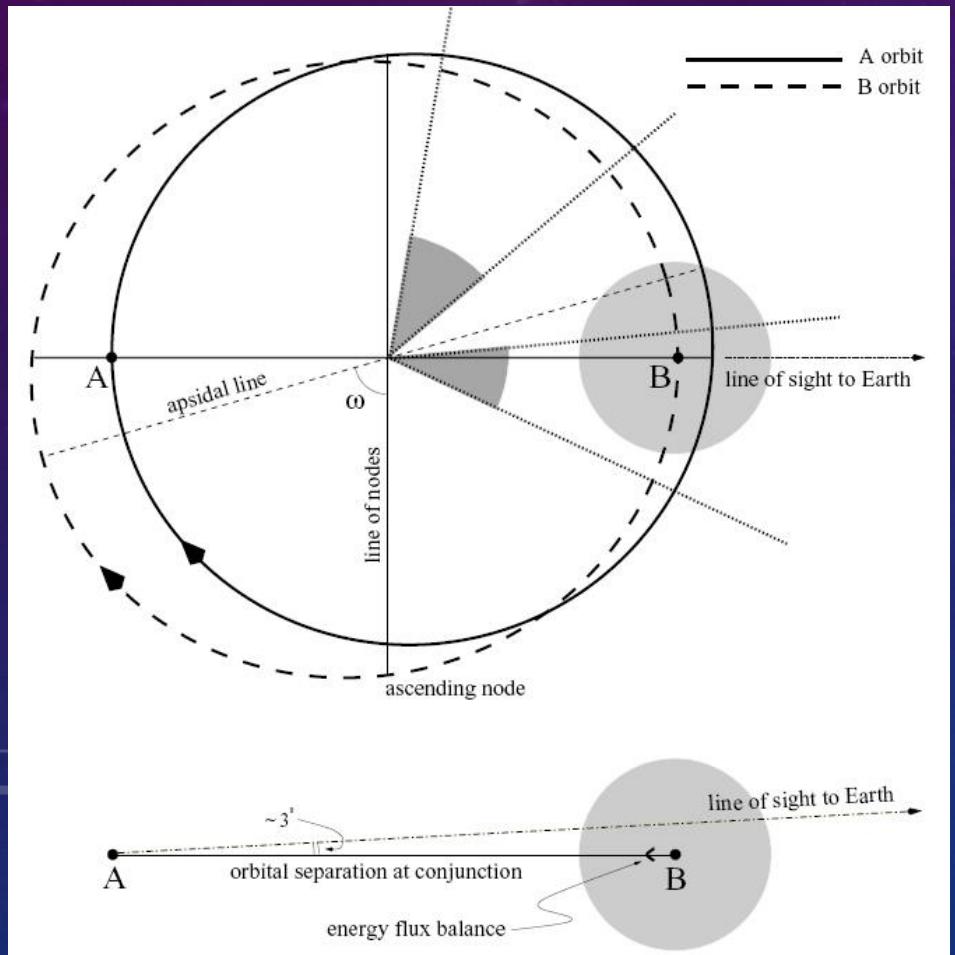
Хорошо измерено, как происходит сближение компонент двойной. Оно находится в полном соответствии с предсказаниями ОТО. Это было сильнейшим аргументом в пользу существования гравитации.

Кроме того, можно оценить темп слияний нейтронных звезд.

ПУЛЬСАР ХАЛСА-ТЕЙЛОРА



ДВОЙНОЙ ПУЛЬСАР PSR J0737-3039



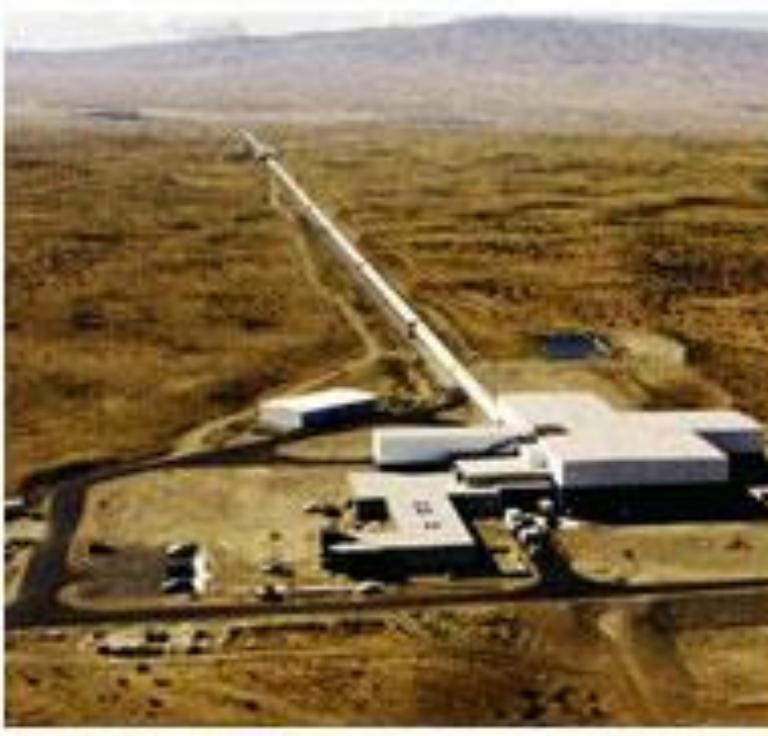
Уникальная система, открытая в 2003 г.

Аргумент в пользу высокого темпа слияний.

LIGO

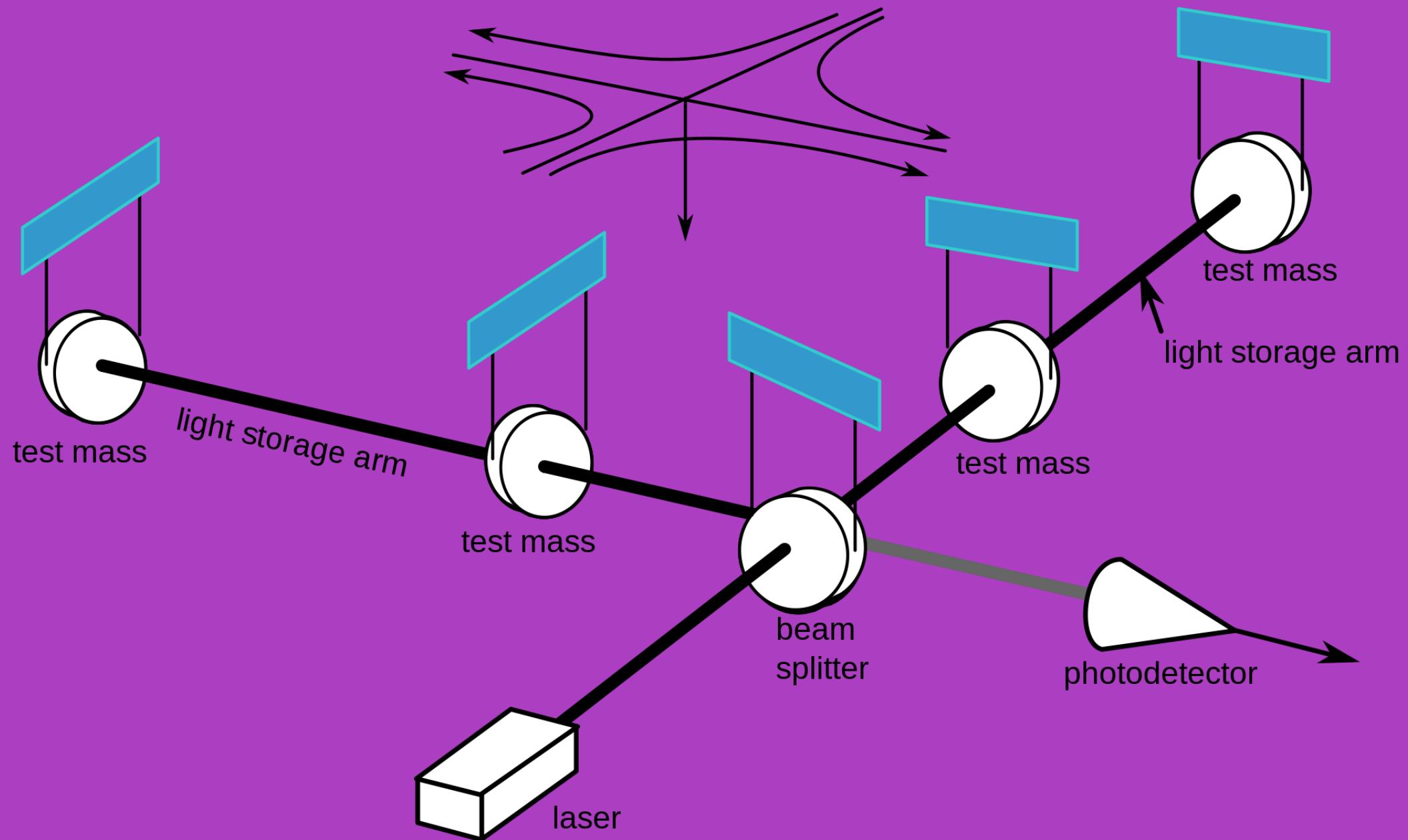
LIGO

VIRGO



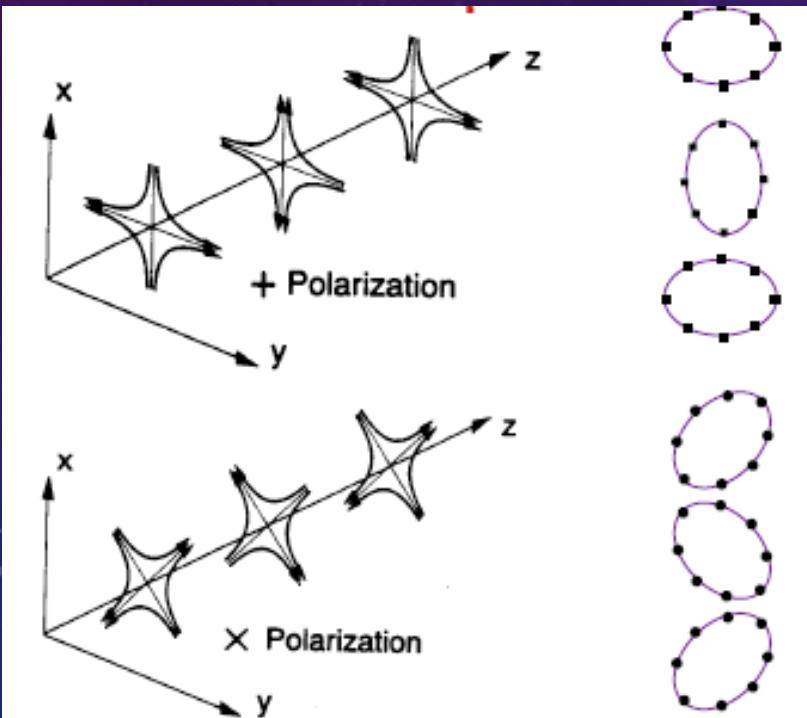
LIGO Lab/Virgo

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

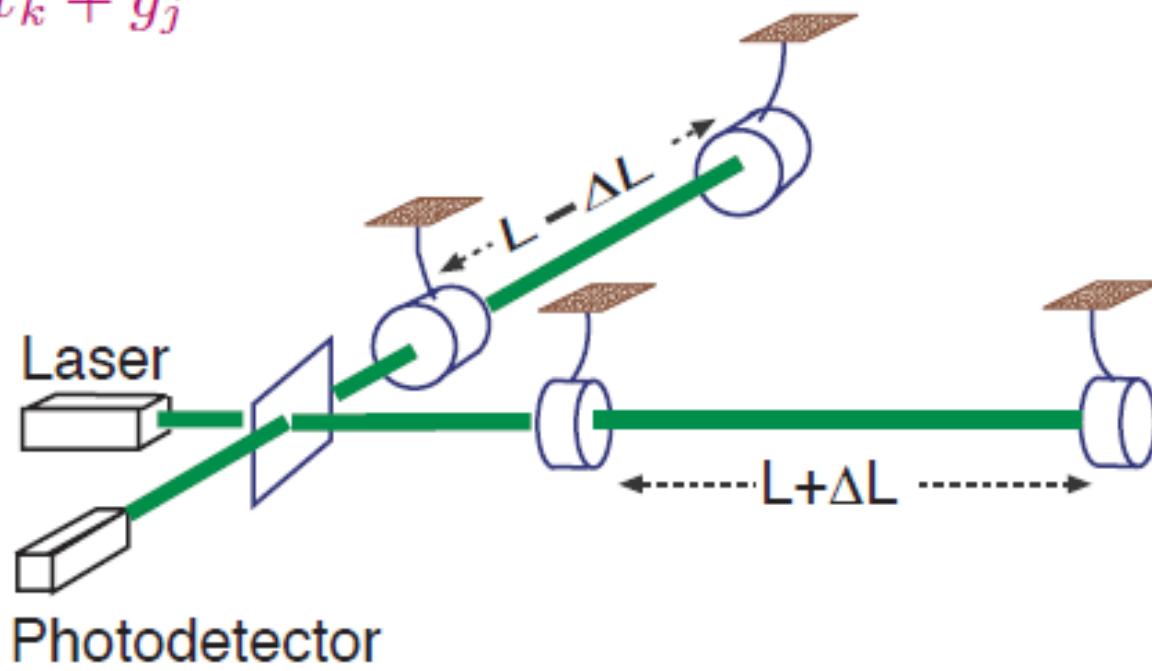


ИЗМЕНЕНИЕ ВРЕМЕНИ ПРОХОЖДЕНИЯ ФОТОНОА

Прохождение граввовны вызывает приливные силы. Меняется длина плеч интерферометра.



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

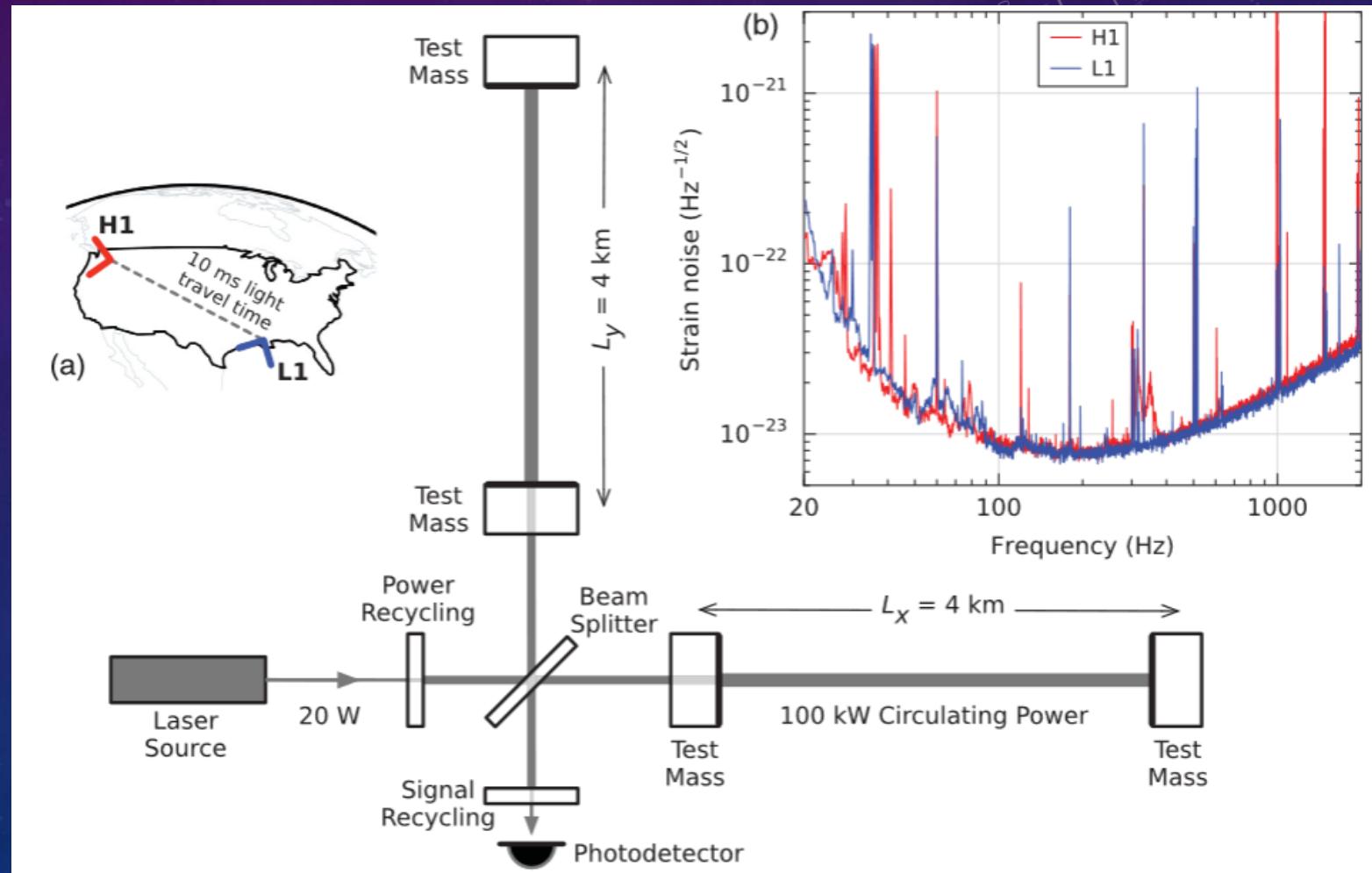


Относительное изменение длины плеч пропорционально амплитуде гравитационной волны.
Измерение происходит довольно сложным способом.

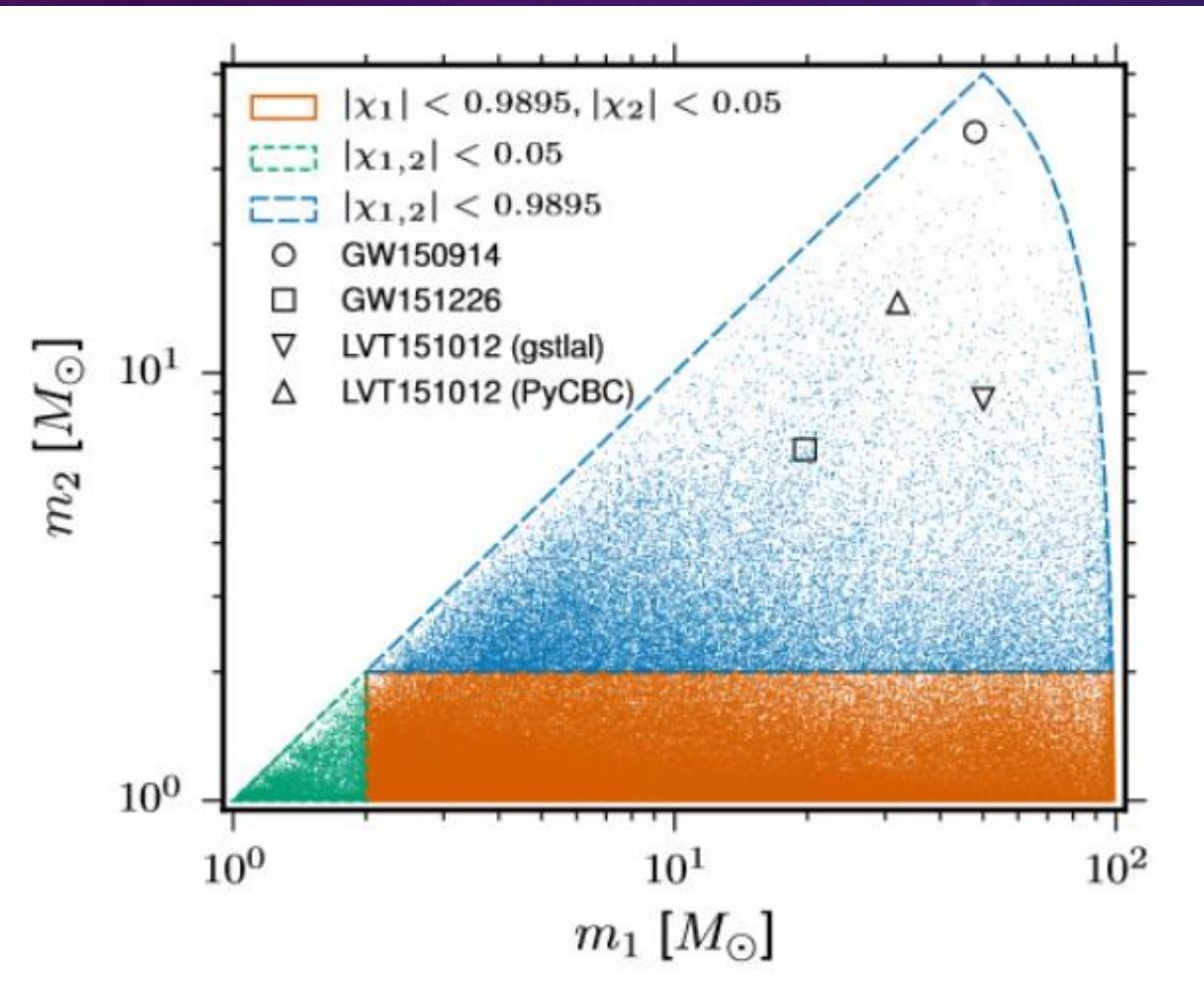


ДЕТЕКТОРЫ LIGO И ИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТЬ

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



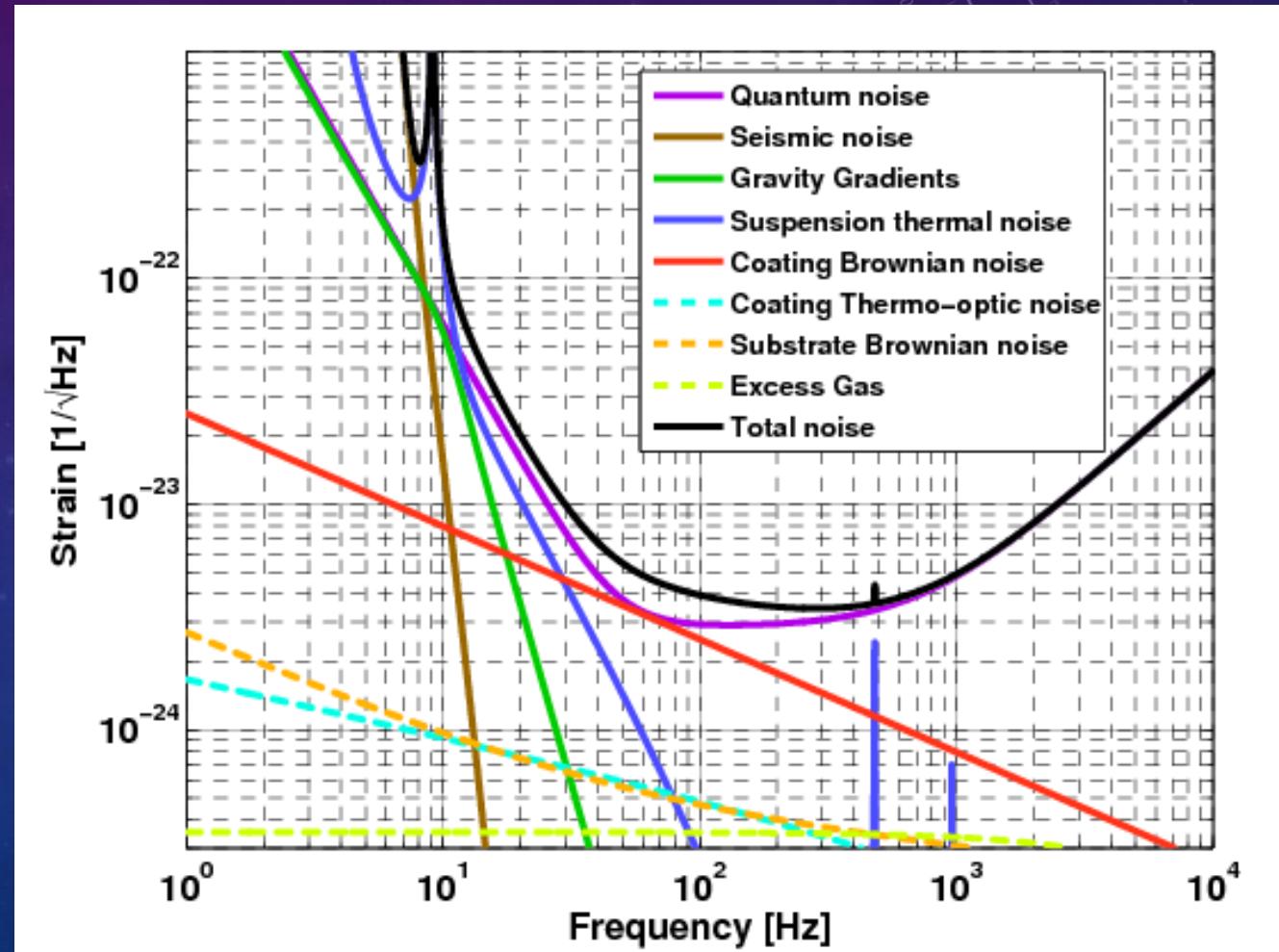
МОДЕЛИРОВАНИЕ И РЕАЛЬНОСТЬ



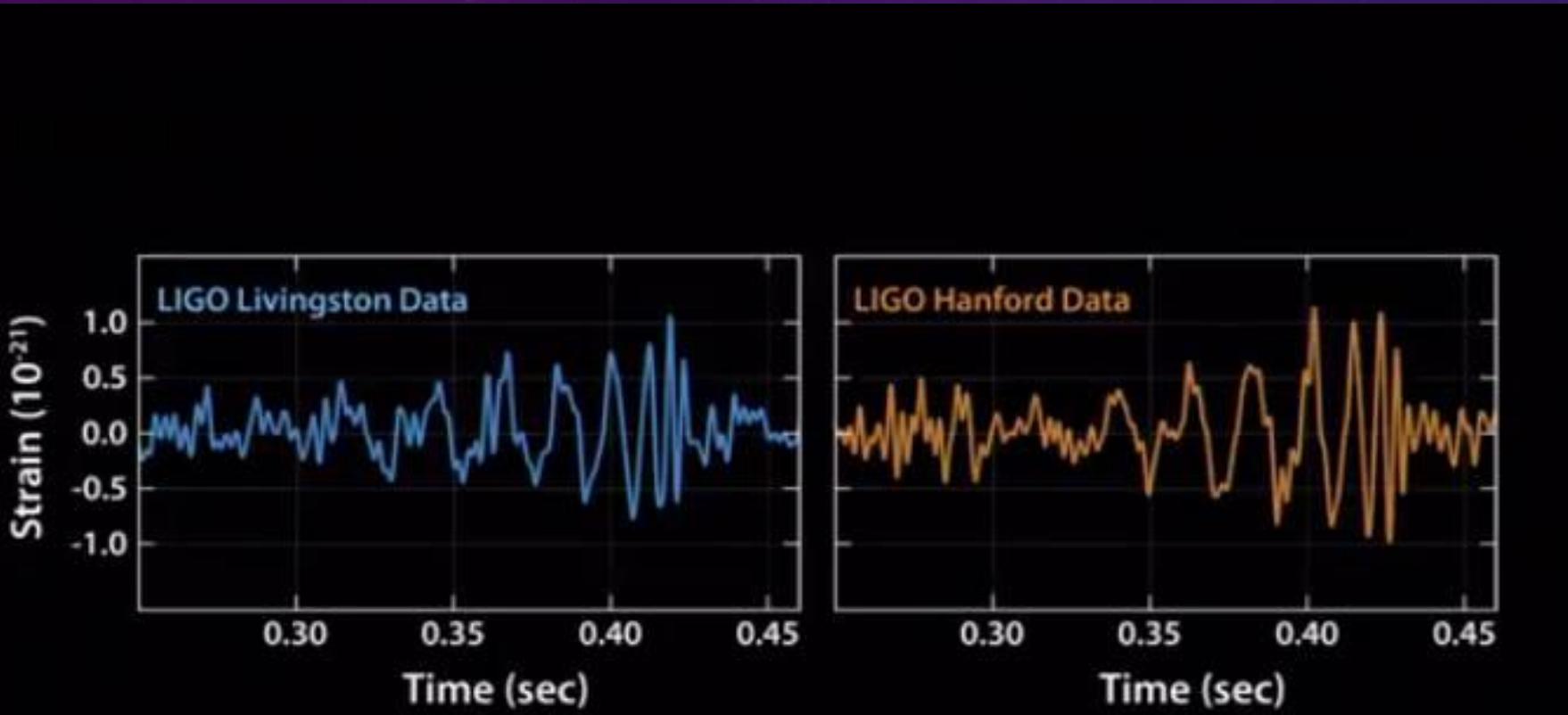
ШУМЫ

Влияют как внешние шумы, так и шумы самого детектора.

Совершенствование инструментов в первую очередь связано с борьбой с шумами.



GW150914 13-50 ПО МОСКОВСКОМУ ВРЕМЕНИ



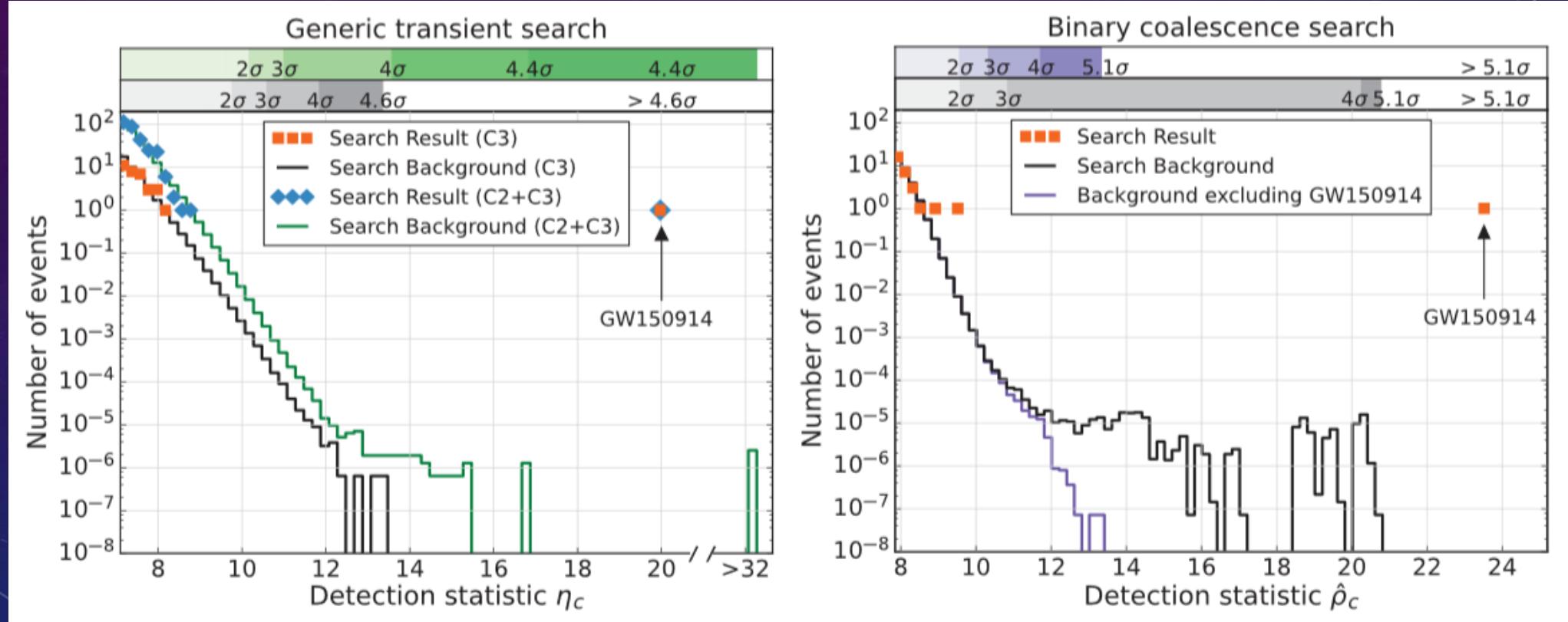
Официальное объявление
11 февраля 2016 года.
За 16 дней совместных
наблюдений двух детекторов
надежно обнаружено
одно событий –
слияние двух черных дыр
в >400 Мпк от нас.

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} Мpc
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

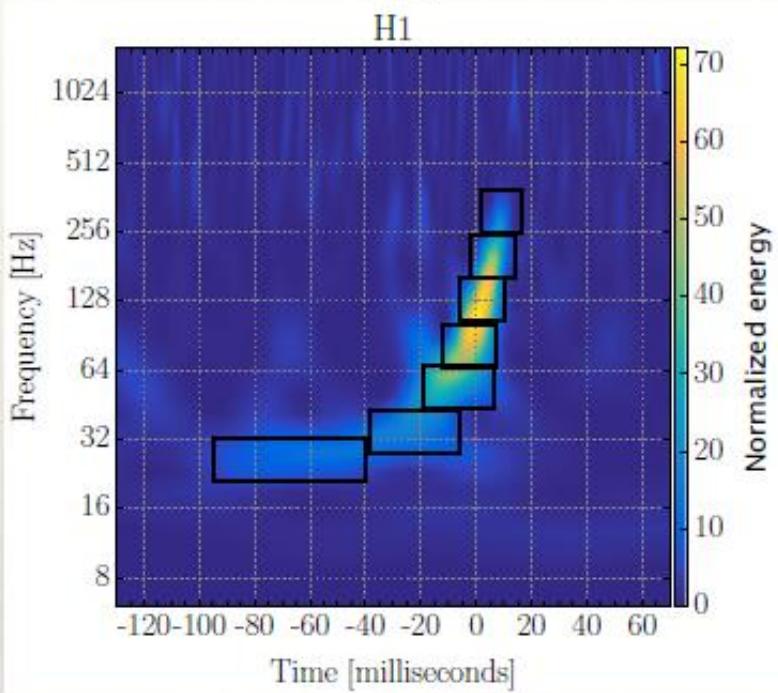


Два разных метода поиска сигнала.

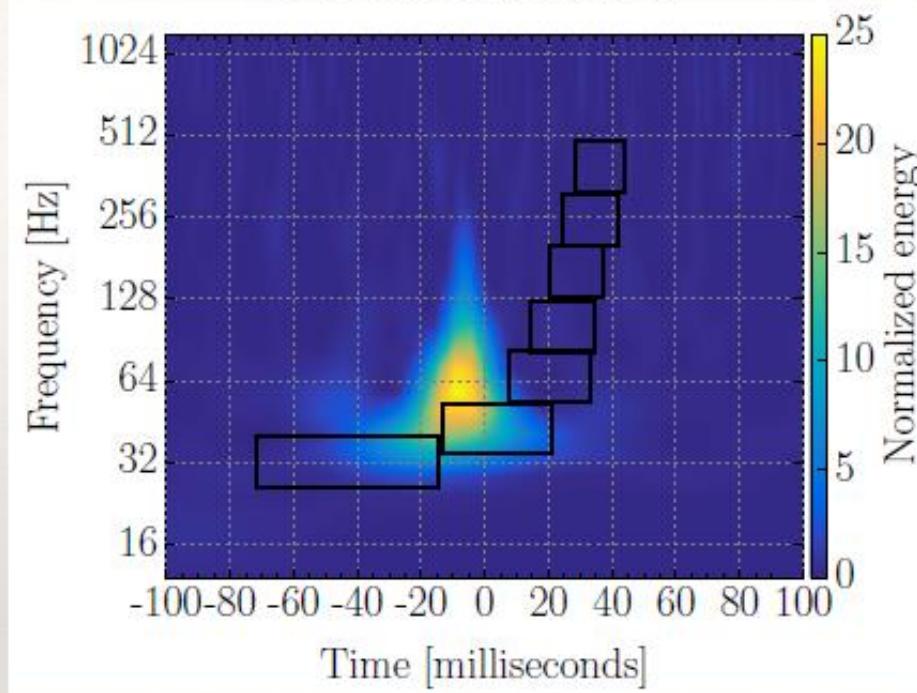
5.1 сигма соответствует примерно одному случайному событию за 200 000 лет.

Consistency check

Real signal



Instrumental artifact



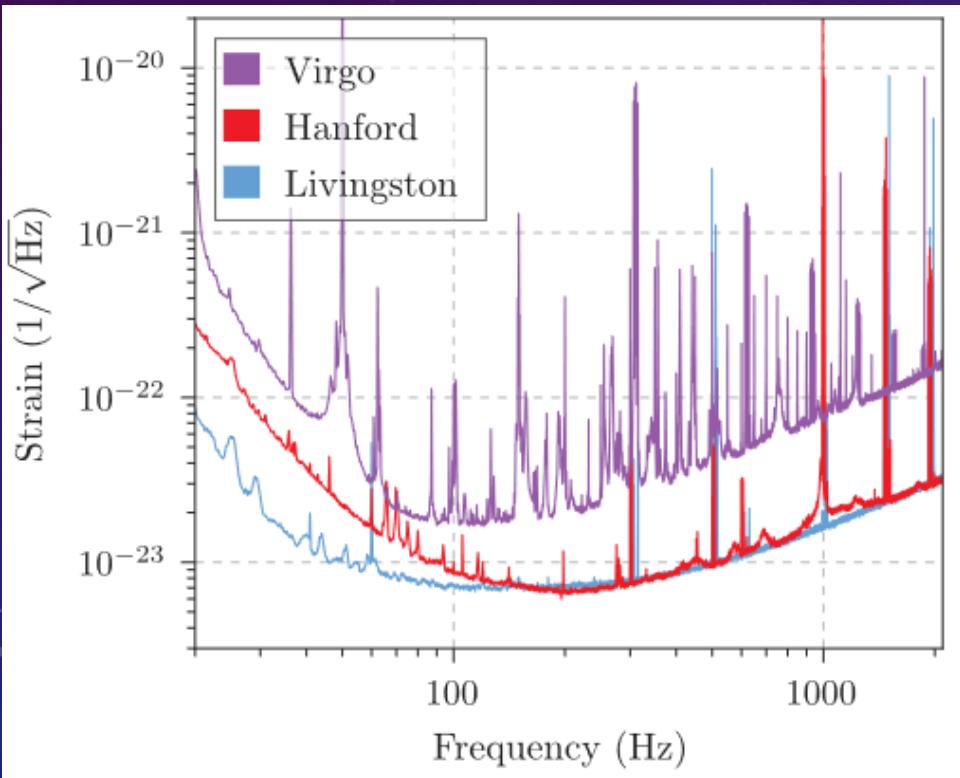
The noise is not Gaussian: need to introduce additional consistency checks into the detection statistic (distribution of power in the signal across the time / frequency).



С. Бабак 2016



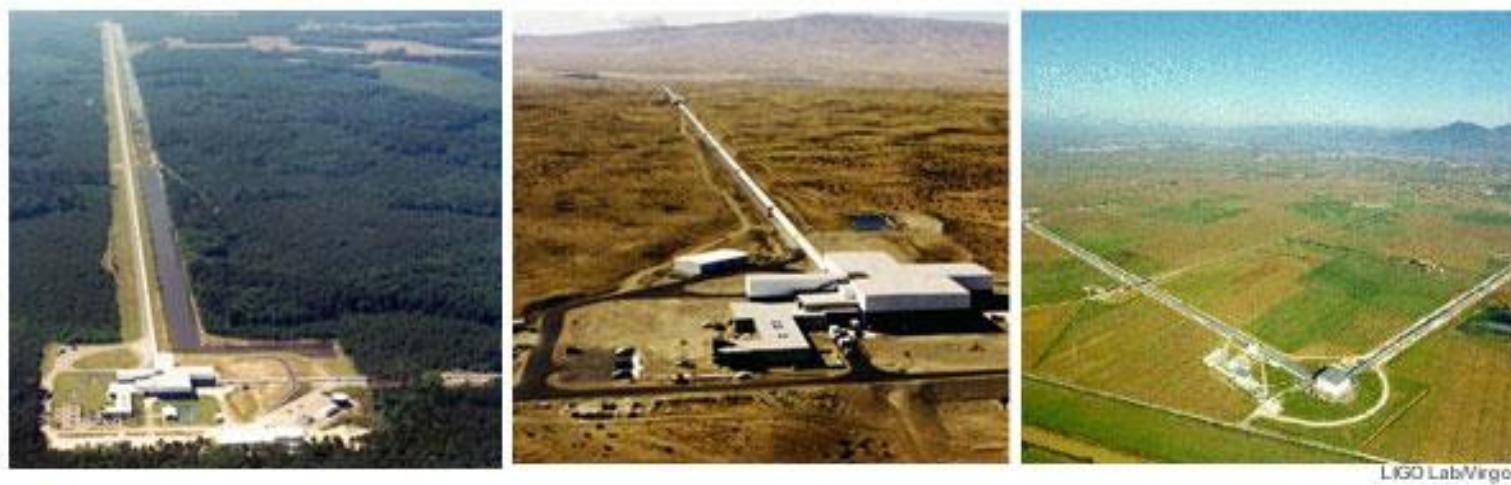
LIGO+VIRGO=.... ?

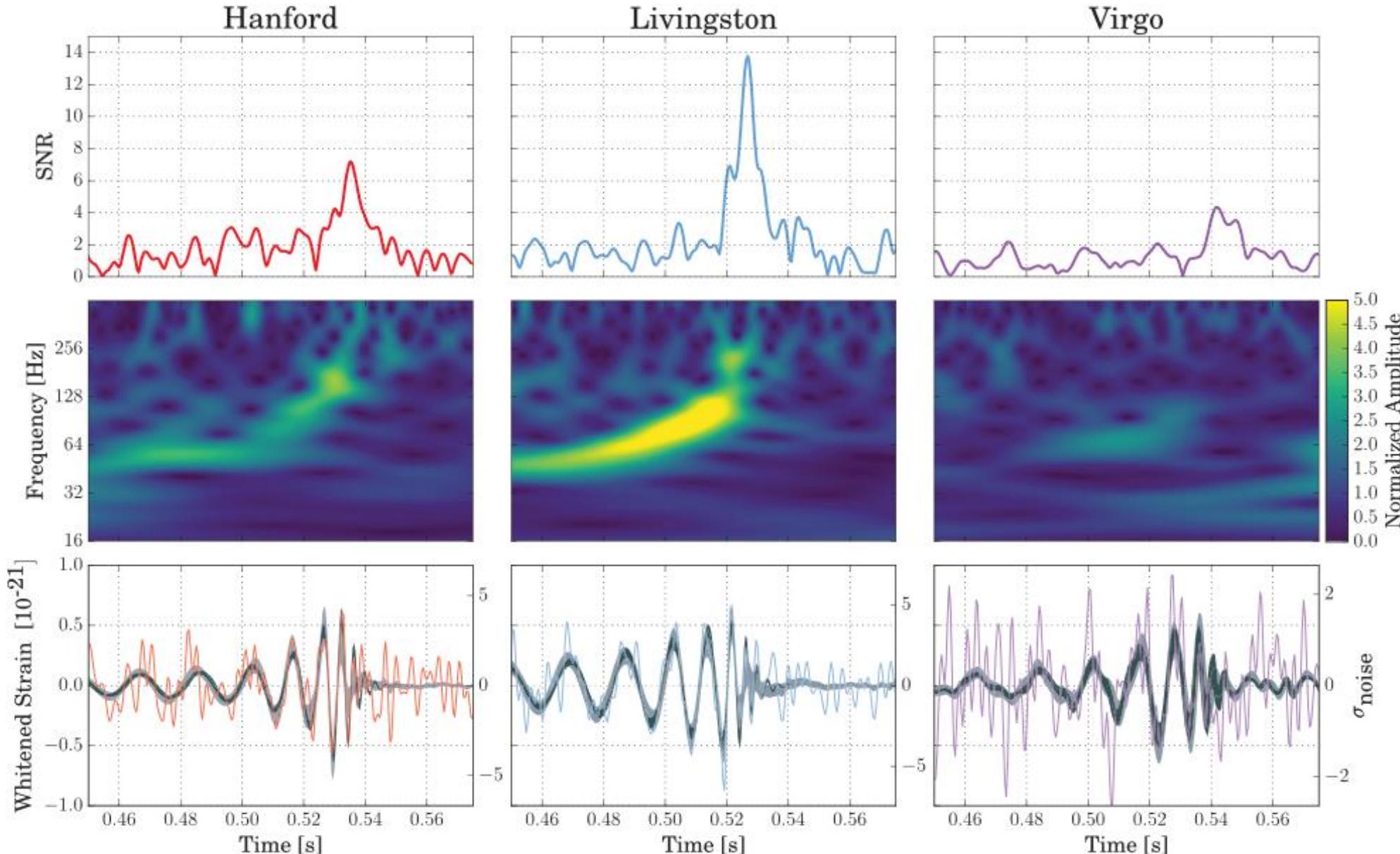


В 2017м году впервые прошли сеансы совместной (одновременной) работы двух детекторов LIGO и детектора VIRGO после серьезной модернизации (и, т.о., увеличения чувствительности) всех трех.

Это позволило точнее определять координаты всплесков.

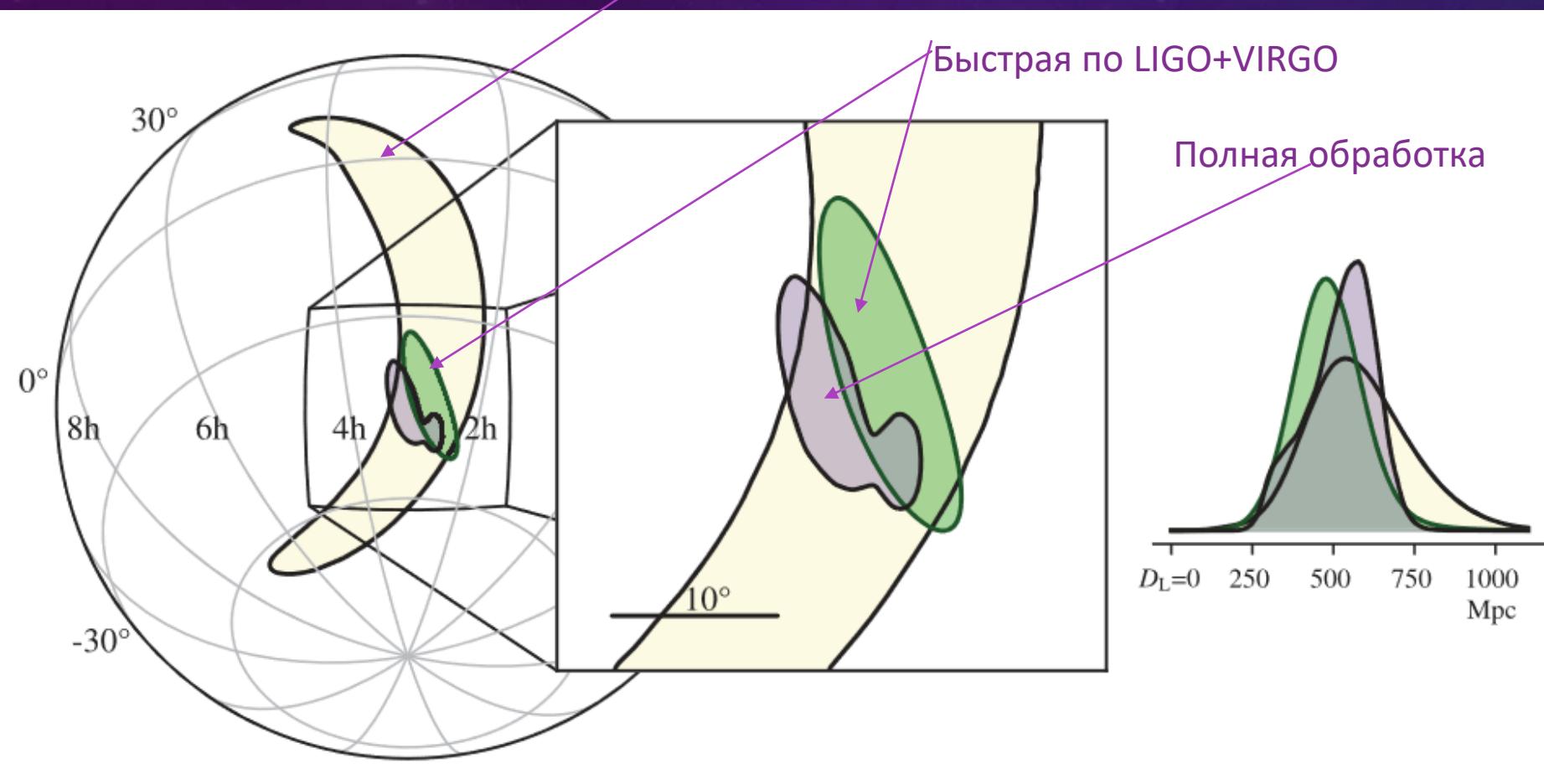
Совместная работа с ноября 2016 г. до августа 2017 г.





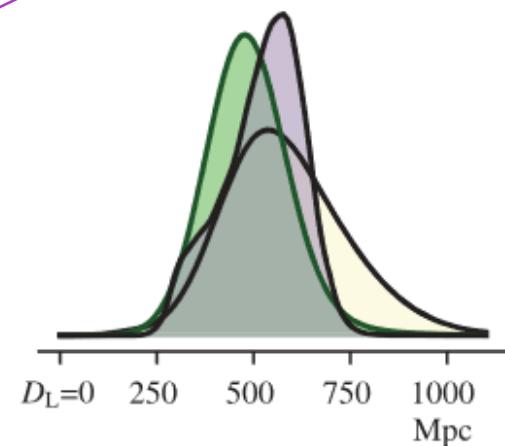
БЫСТРАЯ И ТОЧНАЯ ЛОКАЛИЗАЦИЯ

Быстрая локализация по двум LIGO



Быстрая по LIGO+VIRGO

Полная обработка



Наблюдения сразу на нескольких детекторах позволяют лучше определять координаты источника.

1709.09660

Normalized amplitude



LIGO-Hanford

LIGO-Livingston

Virgo

Frequency (Hz)

500

100

50

500

100

50

500

100

50

-30

-20

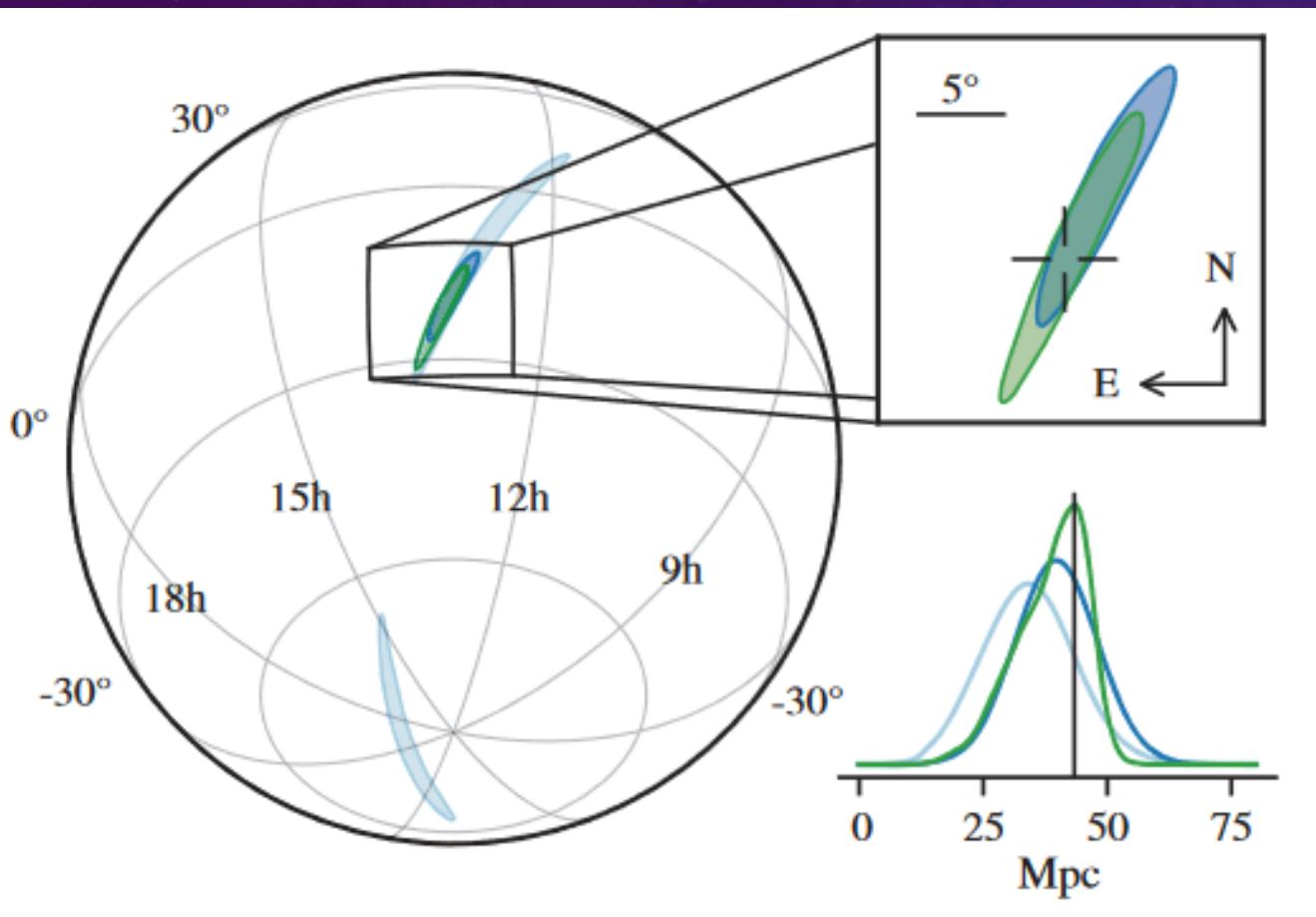
-10

0

Time (seconds)

ВСПЛЕСК С НЗ

1710.05832



ПАРАМЕТРЫ ДВОЙНОЙ СИСТЕМЫ

	Low-spin priors ($ \chi \leq 0.05$)	High-spin priors ($ \chi \leq 0.89$)
Primary mass m_1	$1.36\text{--}1.60 M_{\odot}$	$1.36\text{--}2.26 M_{\odot}$
Secondary mass m_2	$1.17\text{--}1.36 M_{\odot}$	$0.86\text{--}1.36 M_{\odot}$
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	$0.7\text{--}1.0$	$0.4\text{--}1.0$
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}	$40^{+8}_{-14} \text{ Mpc}$	$40^{+8}_{-14} \text{ Mpc}$
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

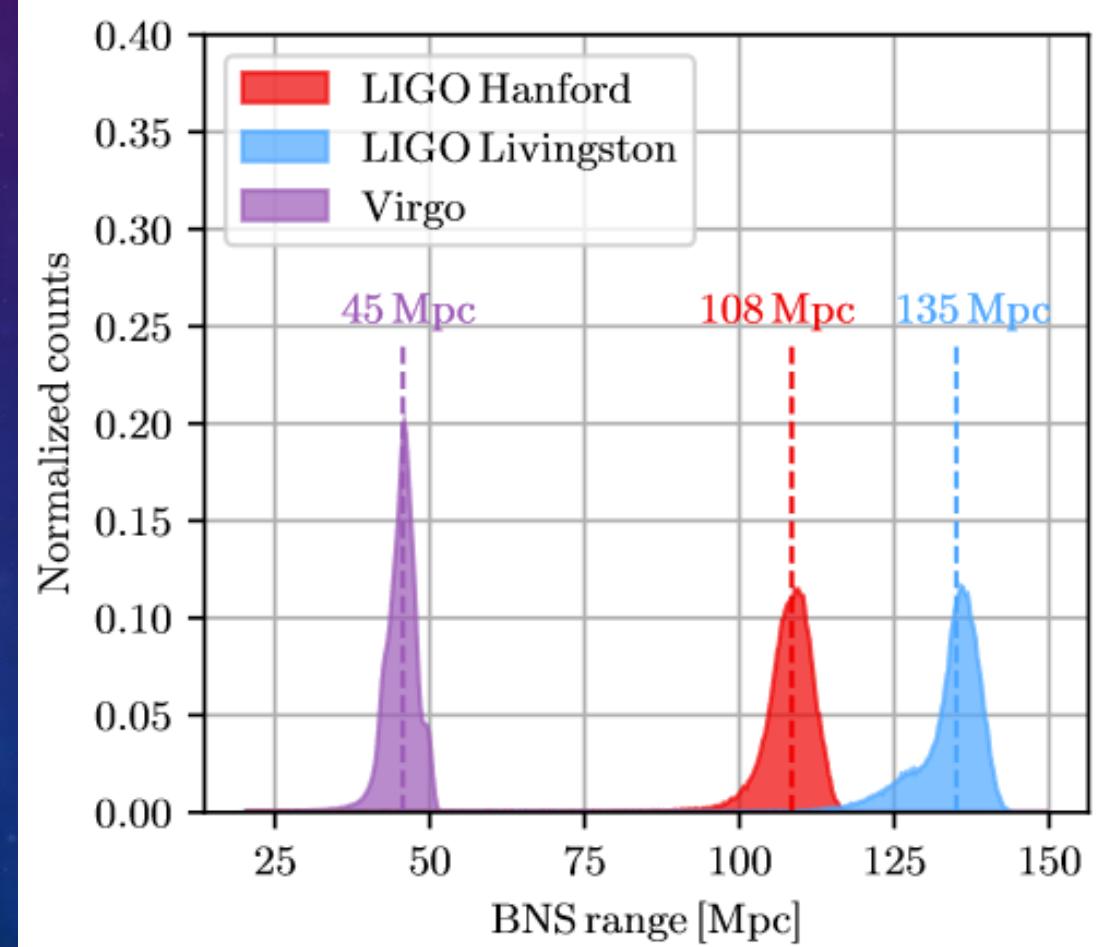
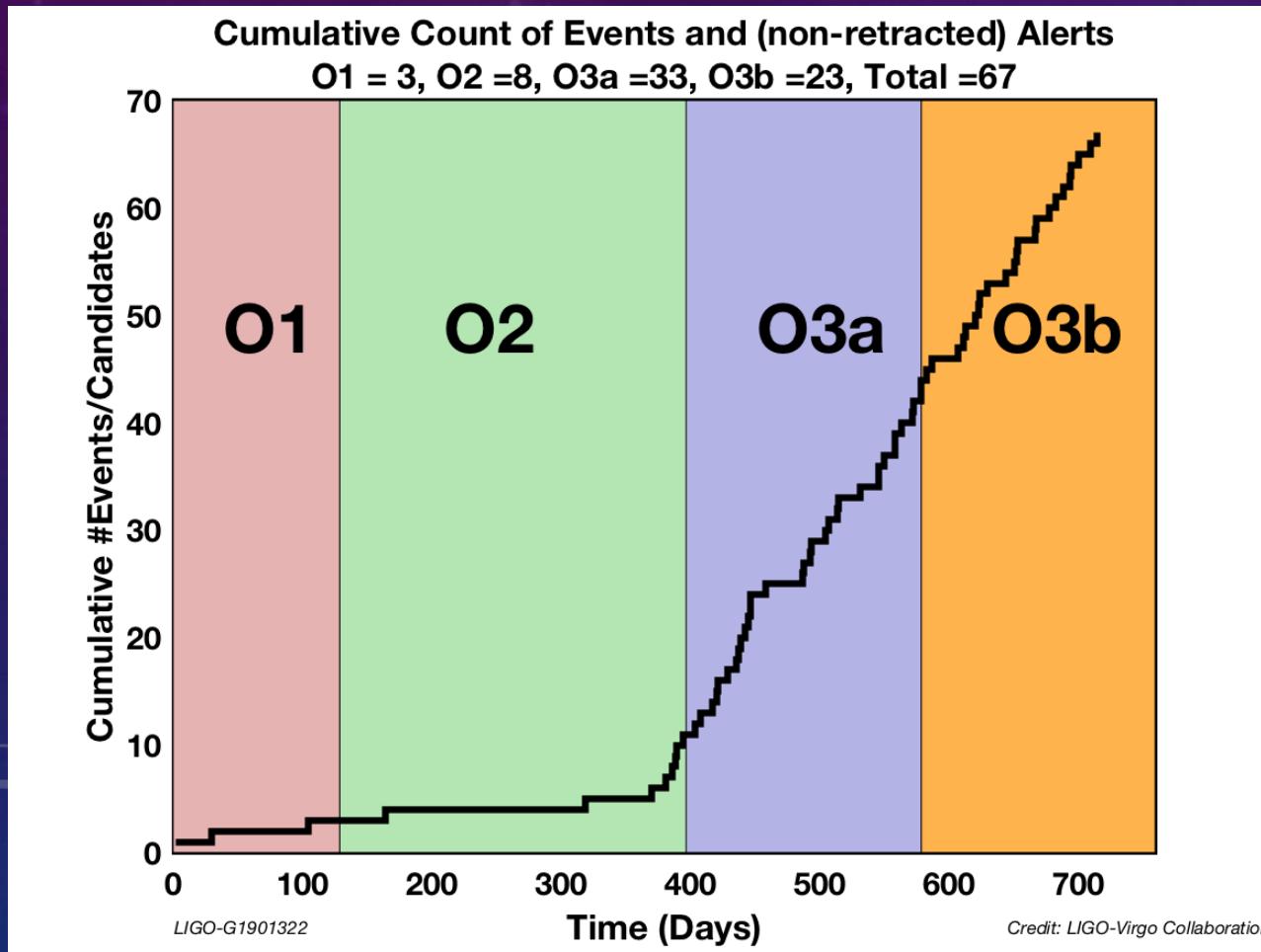
О фундаментальной физике по GW170817 см. 1710.05834

LIGO/VIRGO – 3Й НАУЧНЫЙ СЕАНС

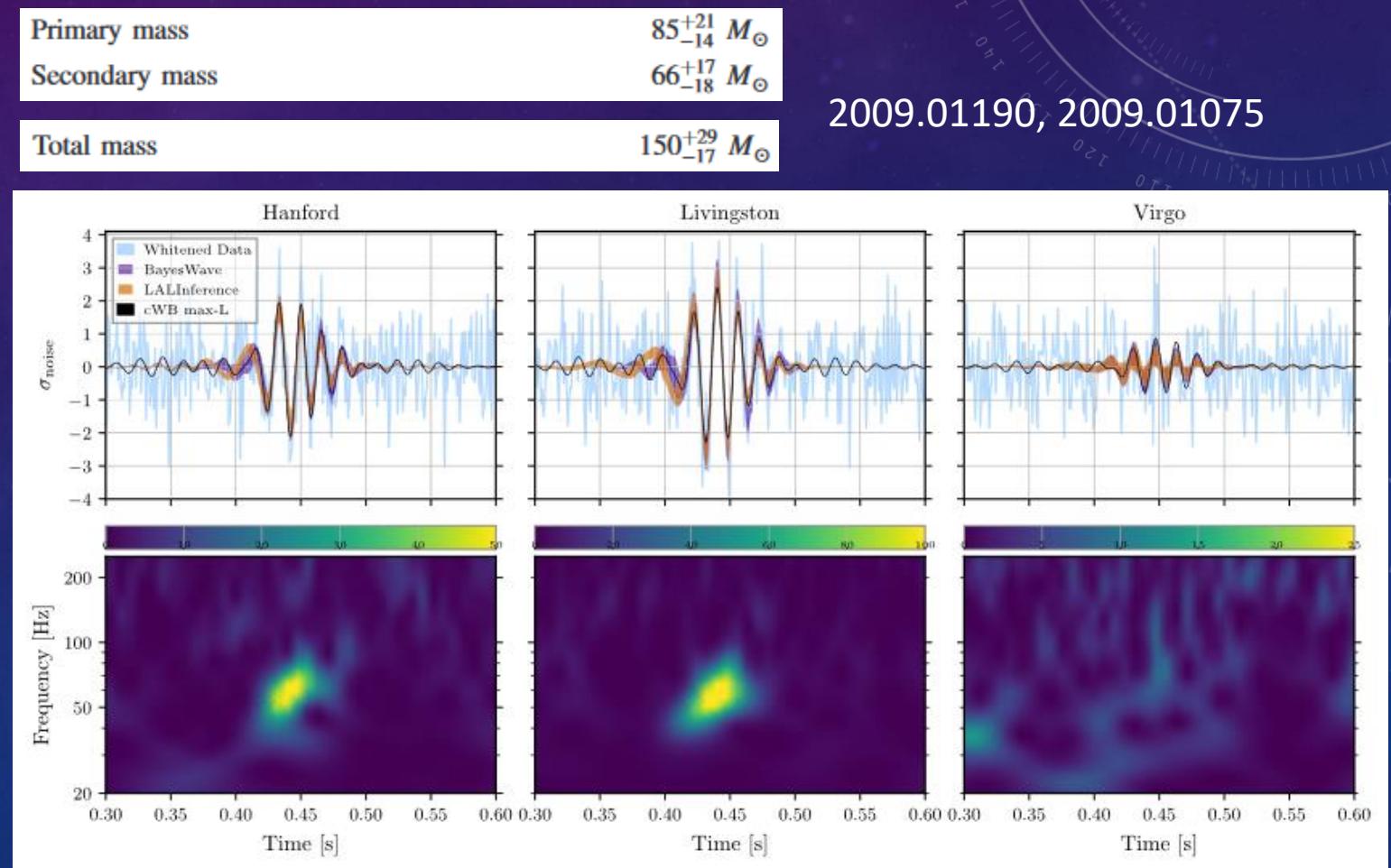
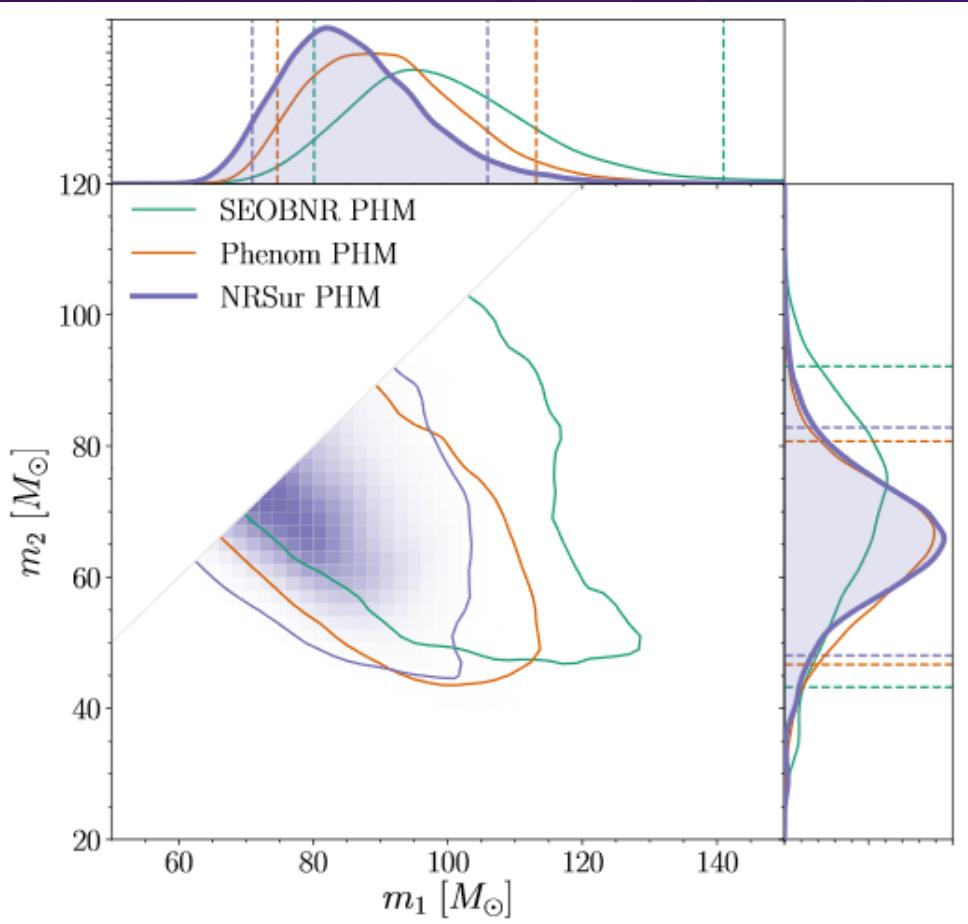
2010.14527

04: декабрь 2022 ?

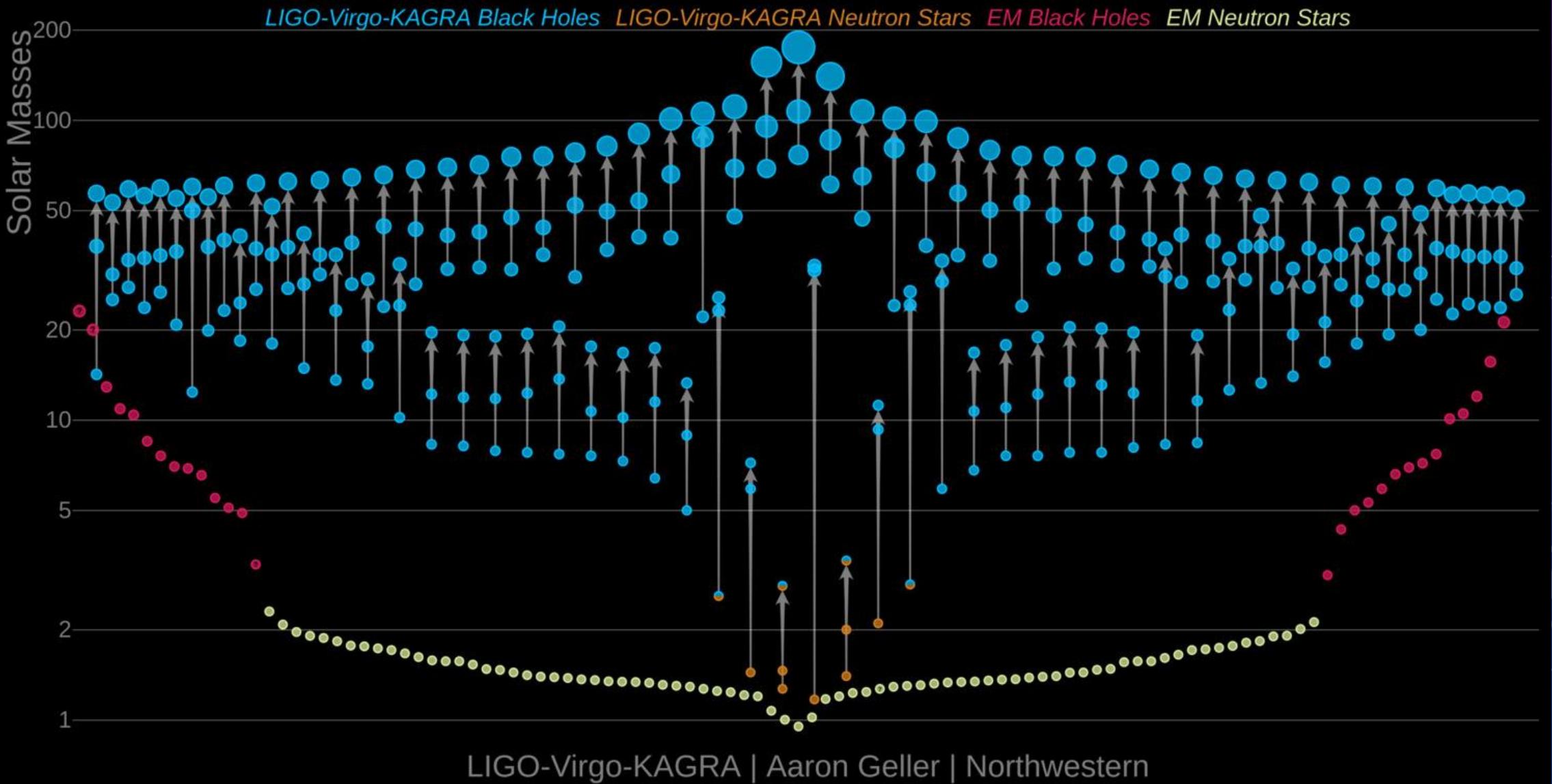
О3: апрель 2019 – март 2020



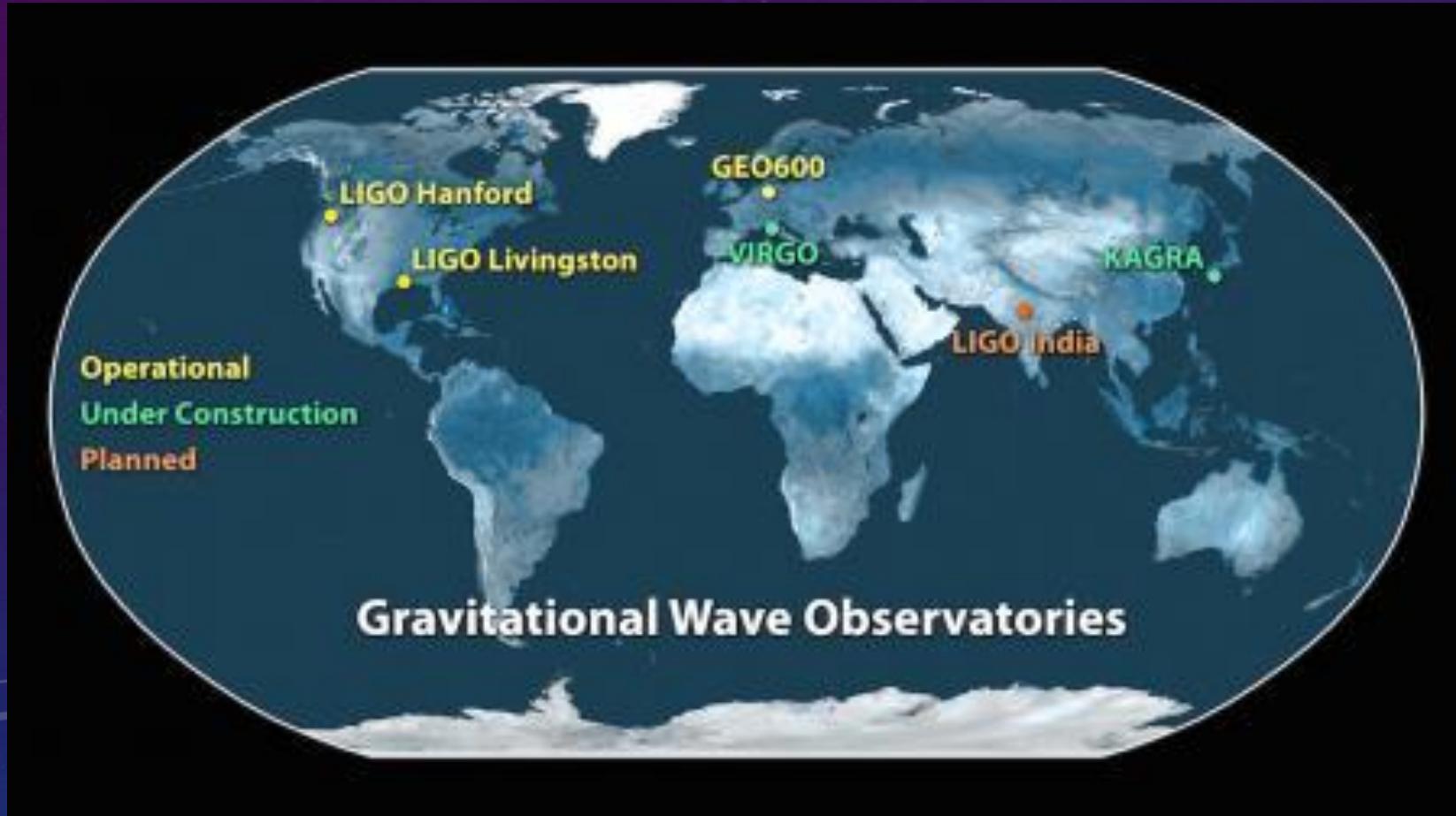
САМЫЕ МАССИВНЫЕ (ИЗ СЛИВШИХСЯ)



Masses in the Stellar Graveyard



ДРУГИЕ ДЕТЕКТОРЫ



LIGO-India в 2023 г.

KAGRA: фактически с
ноября 2021

KAGRA



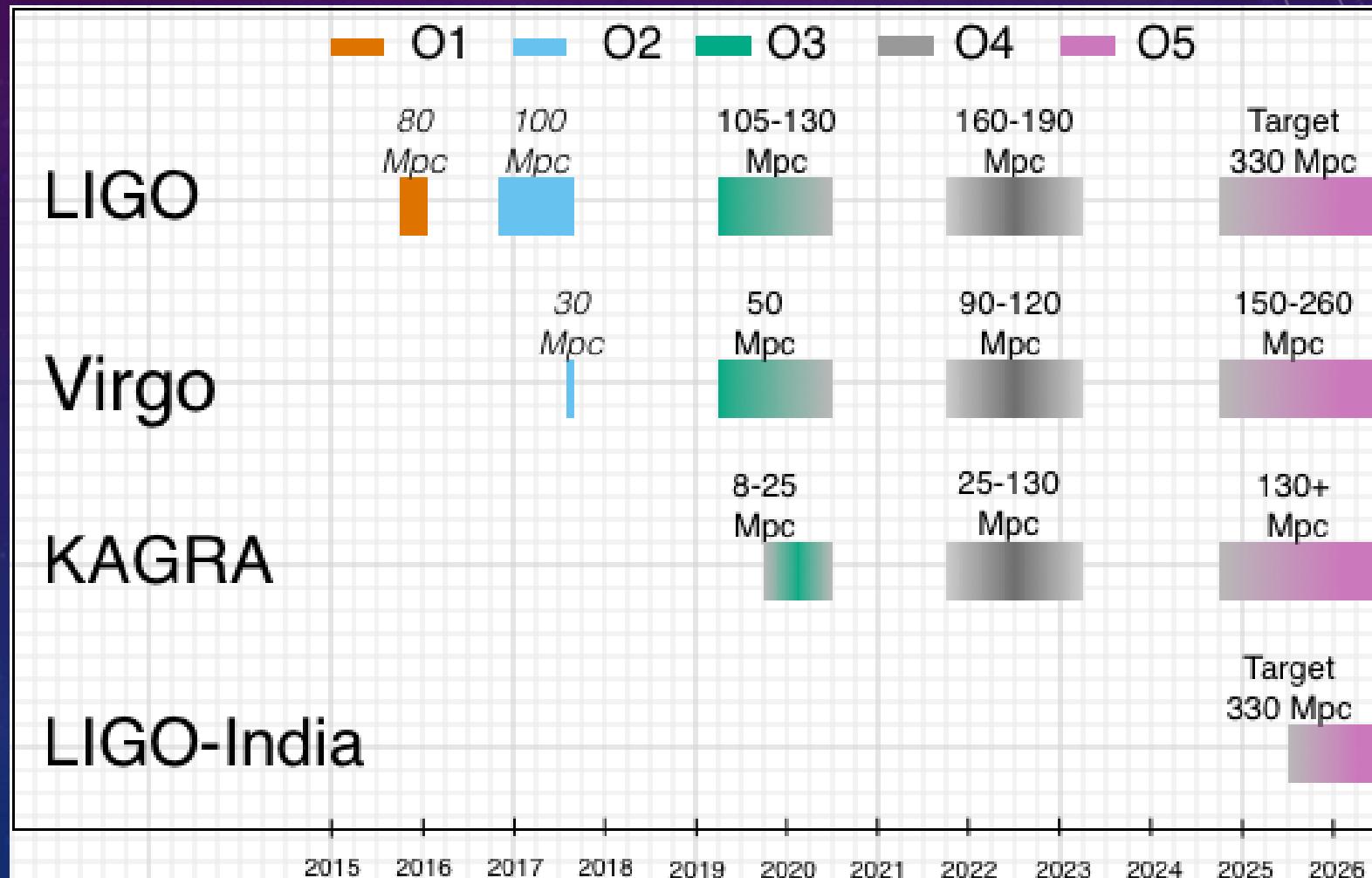
Kamioka Gravitational Wave Detector
Работы начались в апреле 2012 г.

Наблюдения начались 25 февраля 2020 г.

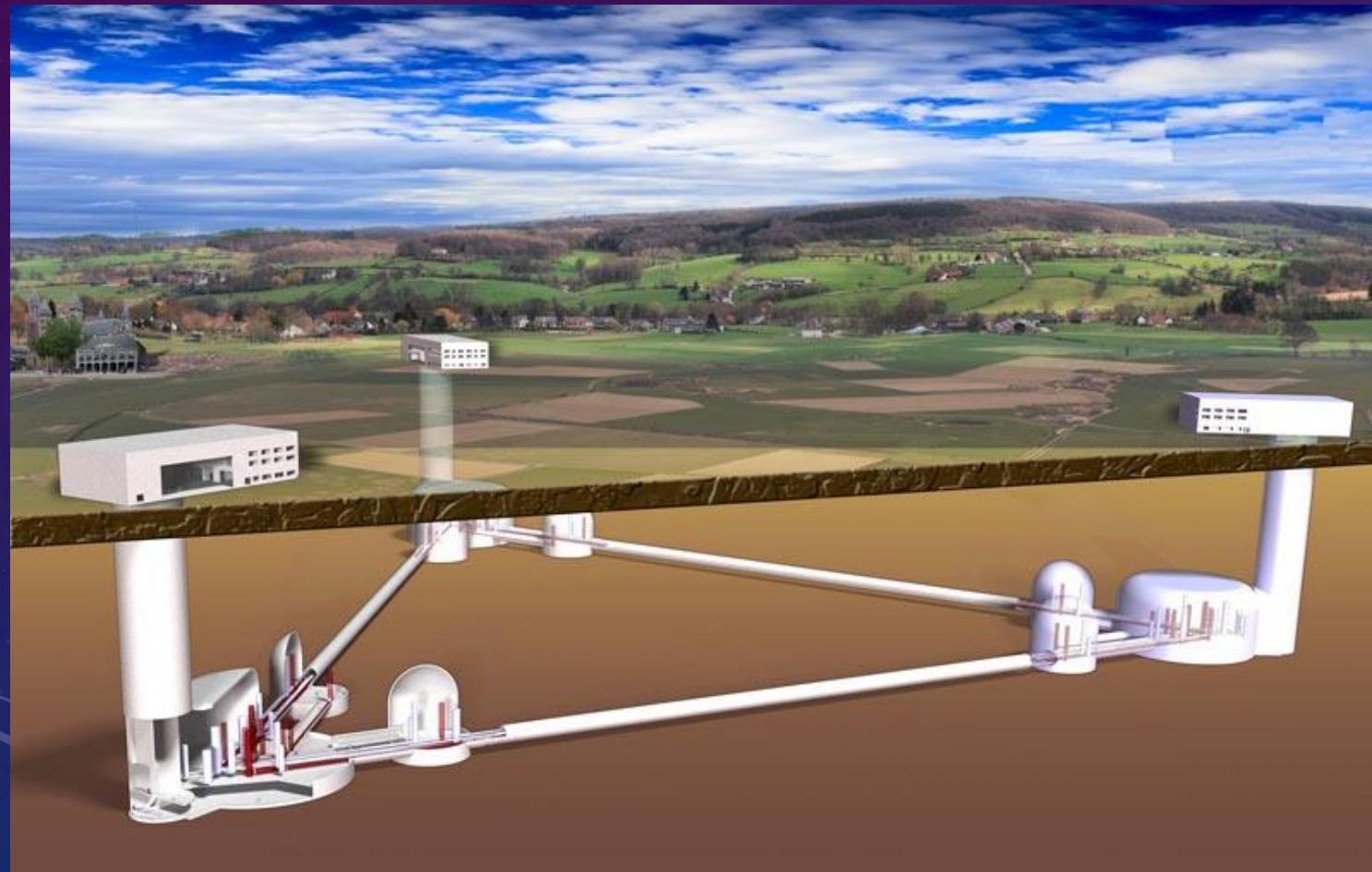
Пока по чувствительности она
сильно уступает Virgo.

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

СОВМЕСТНЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ В БЛИЖАЙШЕМ БУДУЩЕМ



EINSTEIN TELESCOPE



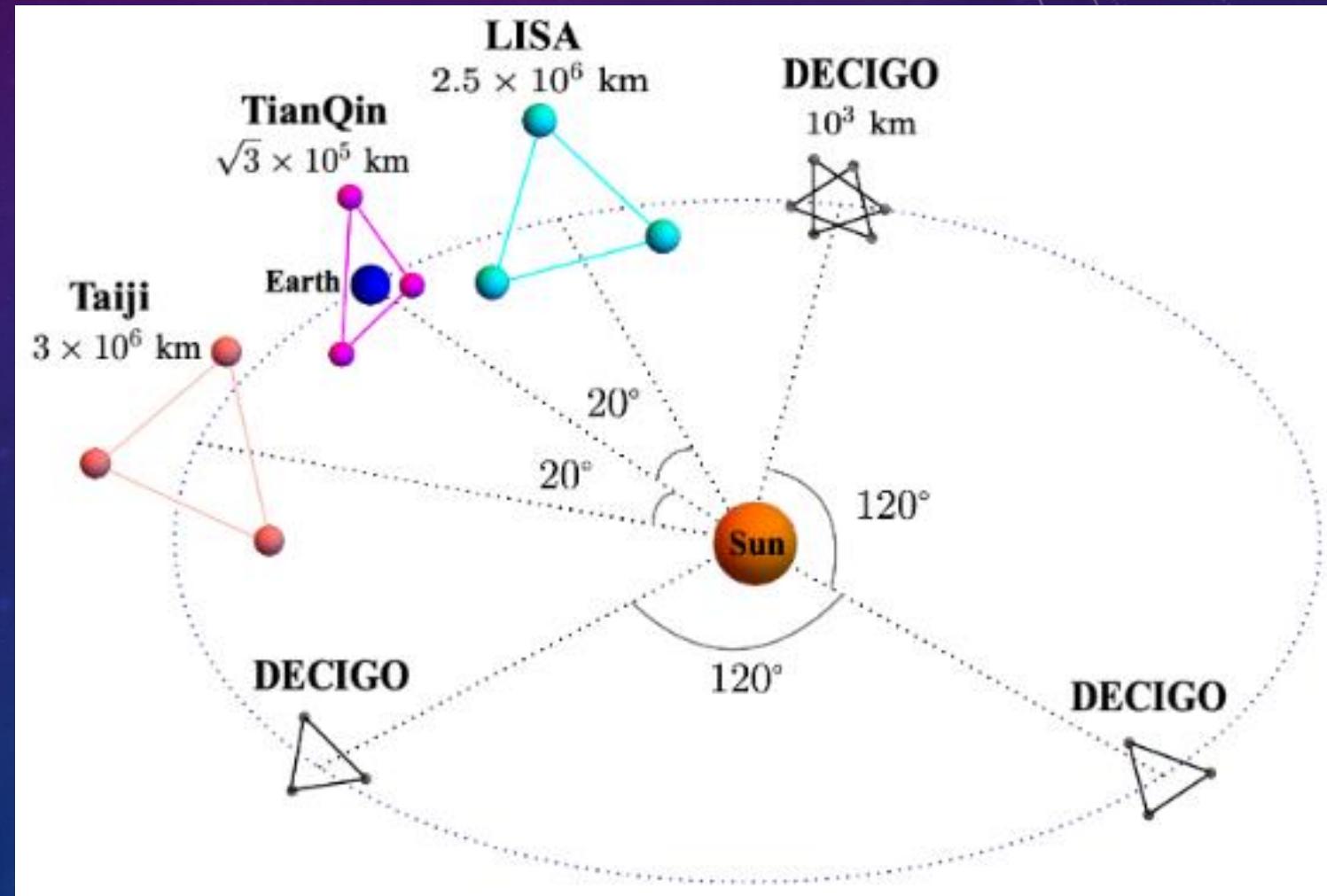
Установка третьего поколения.
В 2017 г. закончился этап
технической разработки проекта.

Широкая полоса 1Hz- 10 kHz.
Высокая чувствительность.

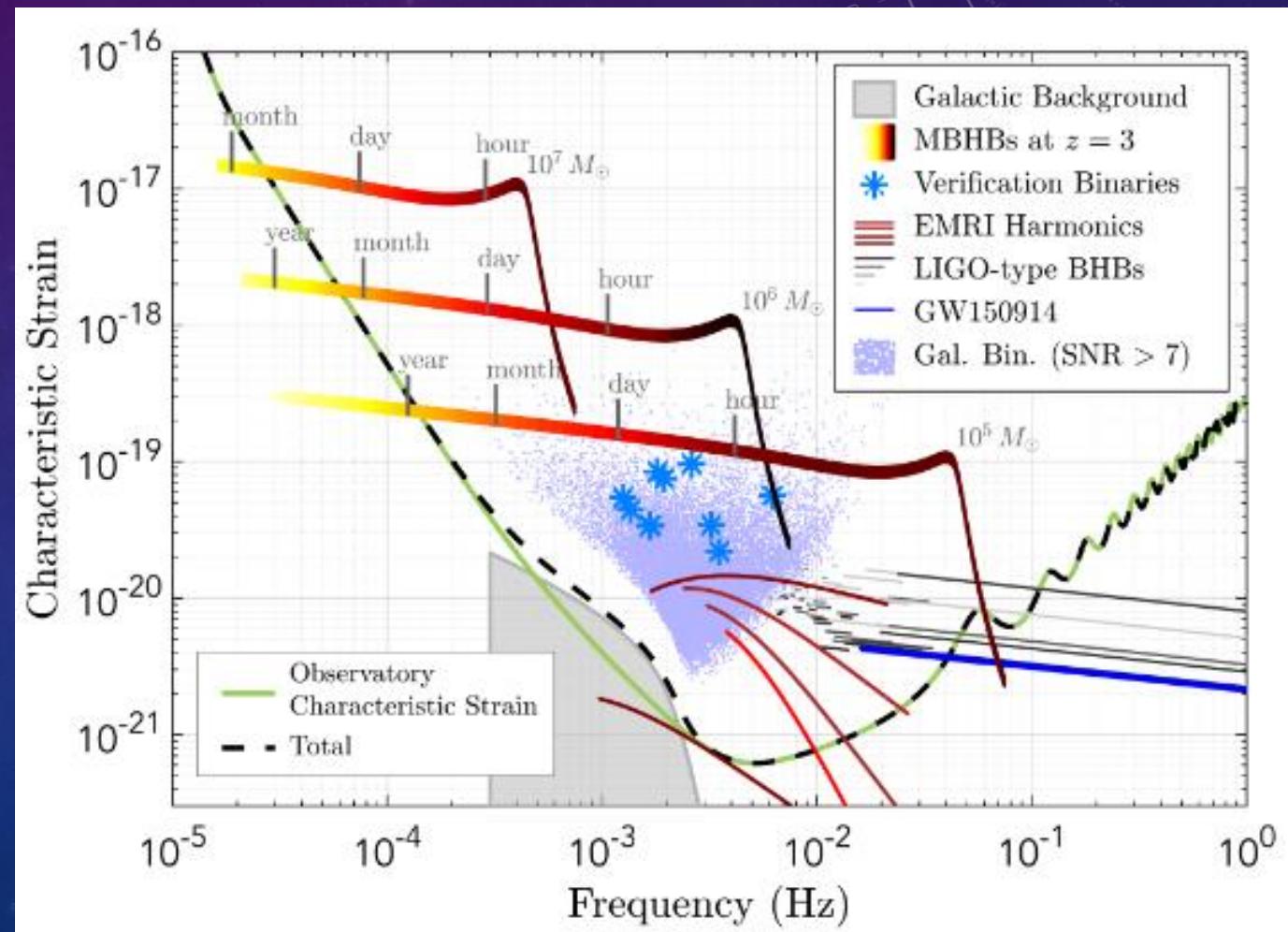
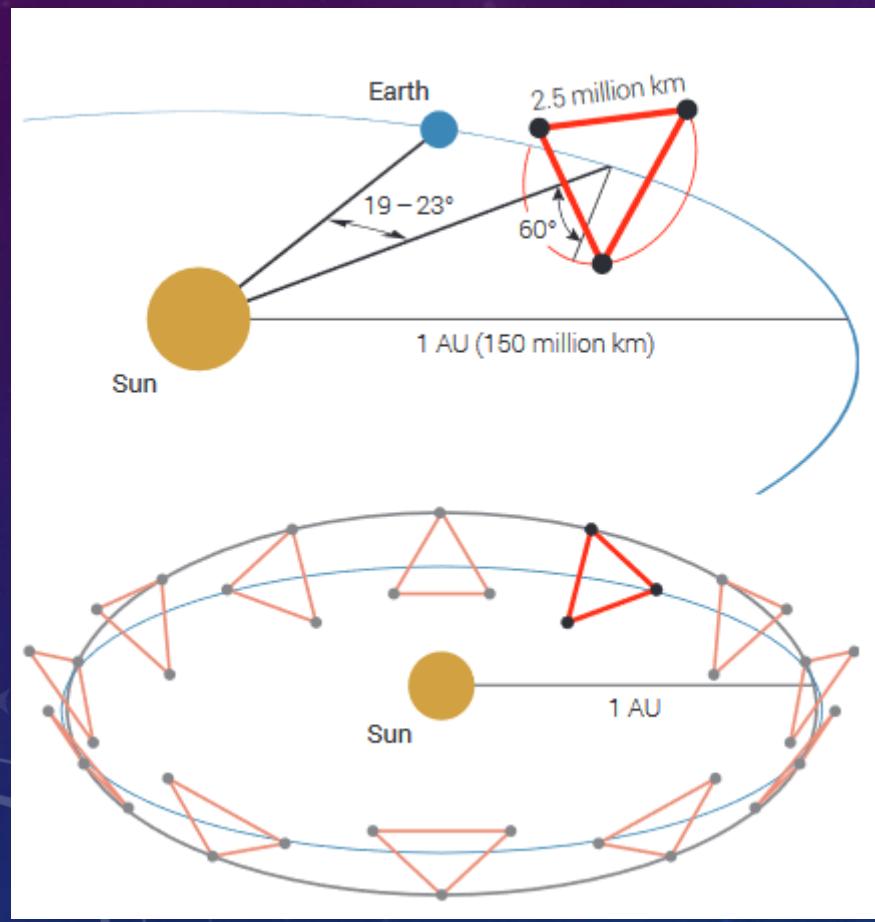
SPACE PROJECTS

All instruments are expected to be launched in 2030s

Slightly different design and length, so different sensitivity ans scientific tasks



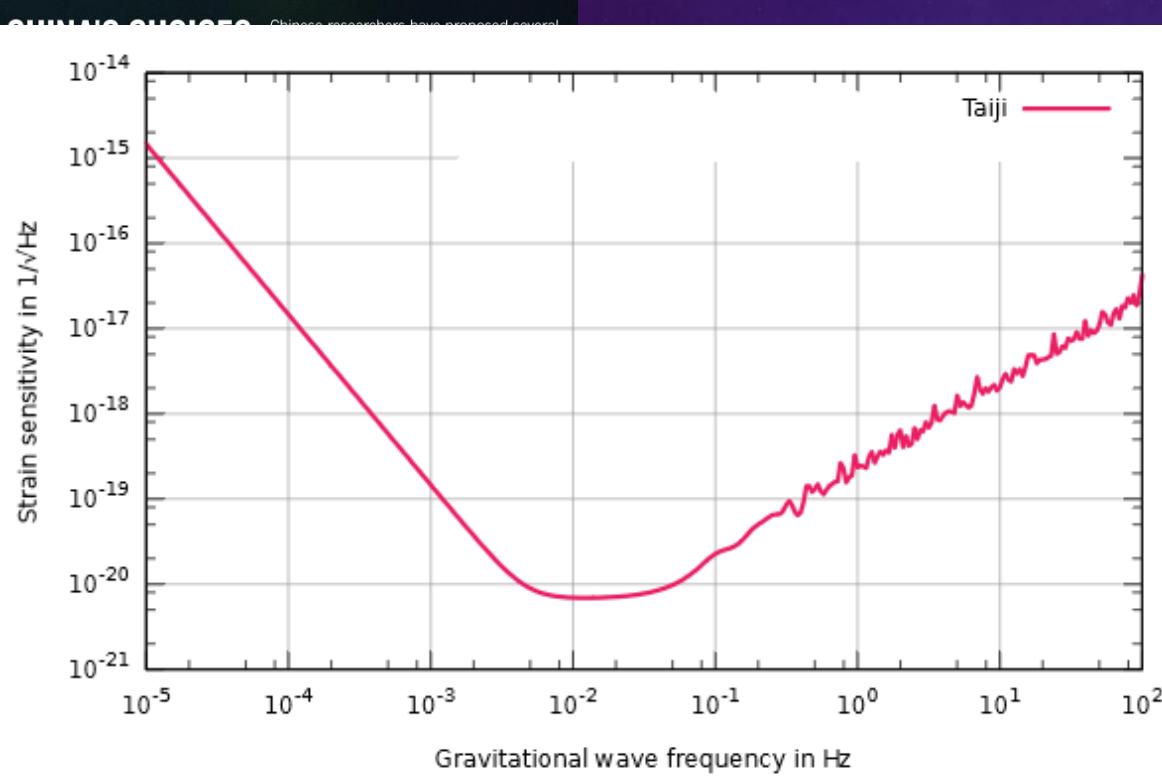
ELISA



TAIJI, TIANQIN И DECIGO

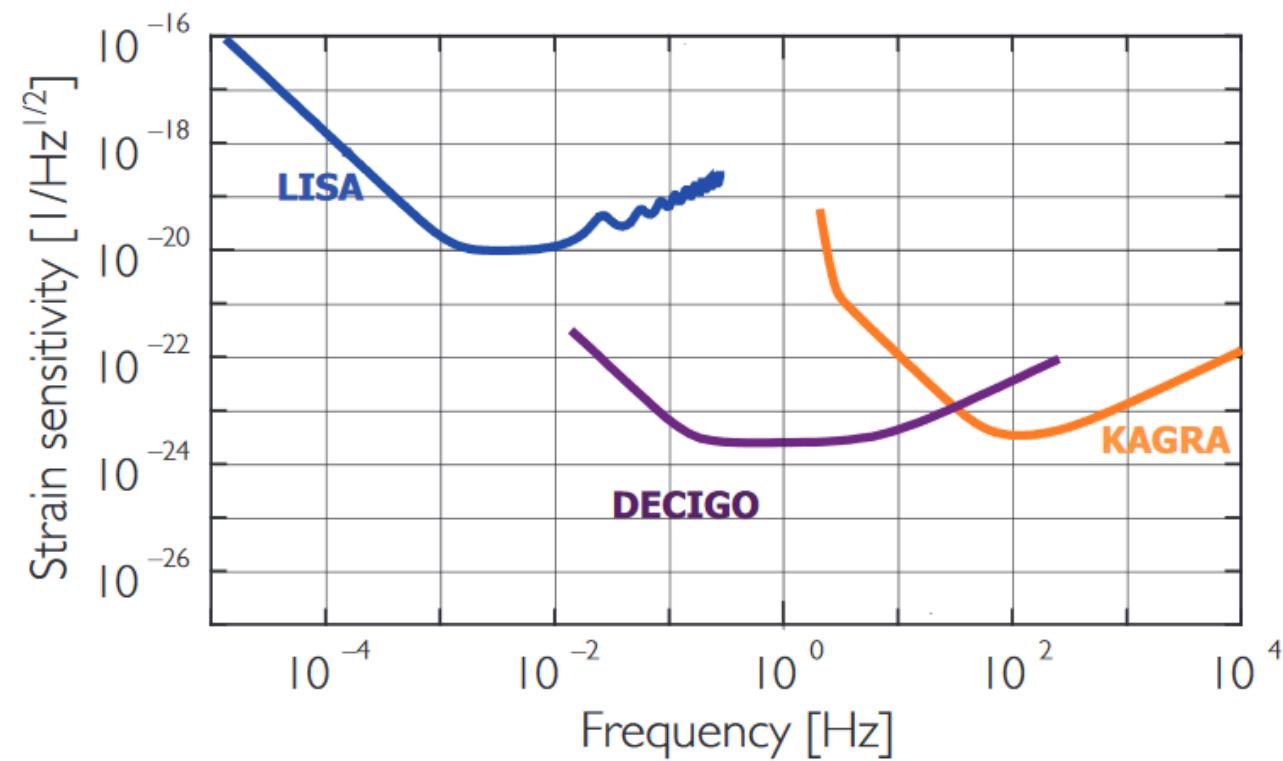
TAIJI и TIANQIN – китайские проекты

1807.09495, 1902.04423, 2109.07442



DECIGO, Pre-DECIGO – японские проекты

1802.06977, 1607.00897



ПУЛЬСАРЫ И ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ

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

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

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

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

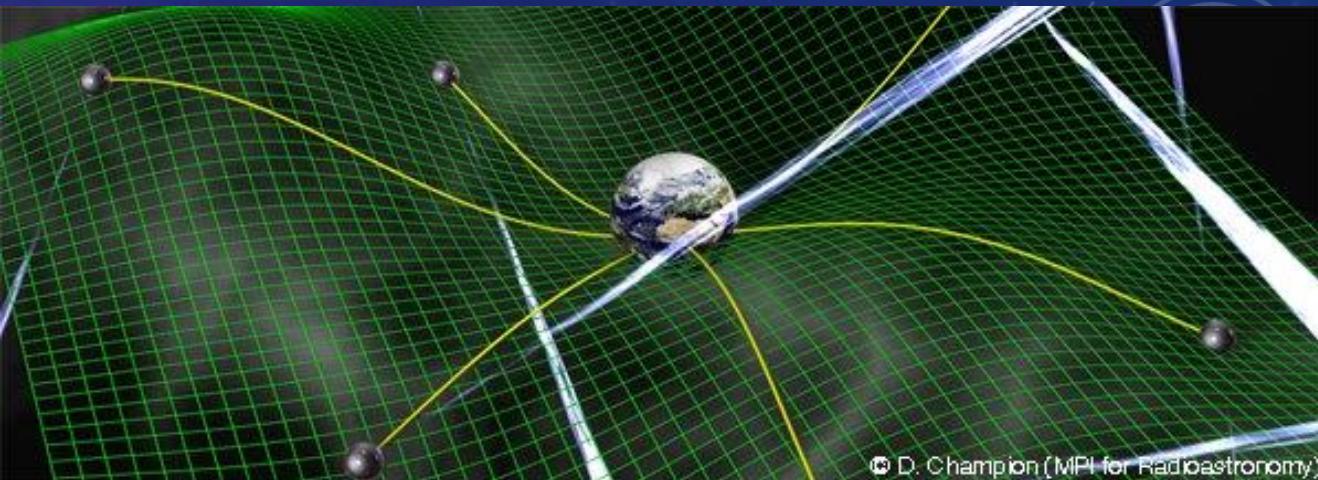
$$\Delta t \sim 10\text{ns} \left(\frac{1\text{Gpc}}{d} \right) \left(\frac{M}{10^9 M_\odot} \right)^{5/3} \left(\frac{10^{-7}\text{Hz}}{f} \right)^{1/3}$$

1707.01615, см. также 2112.08064

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:

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

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

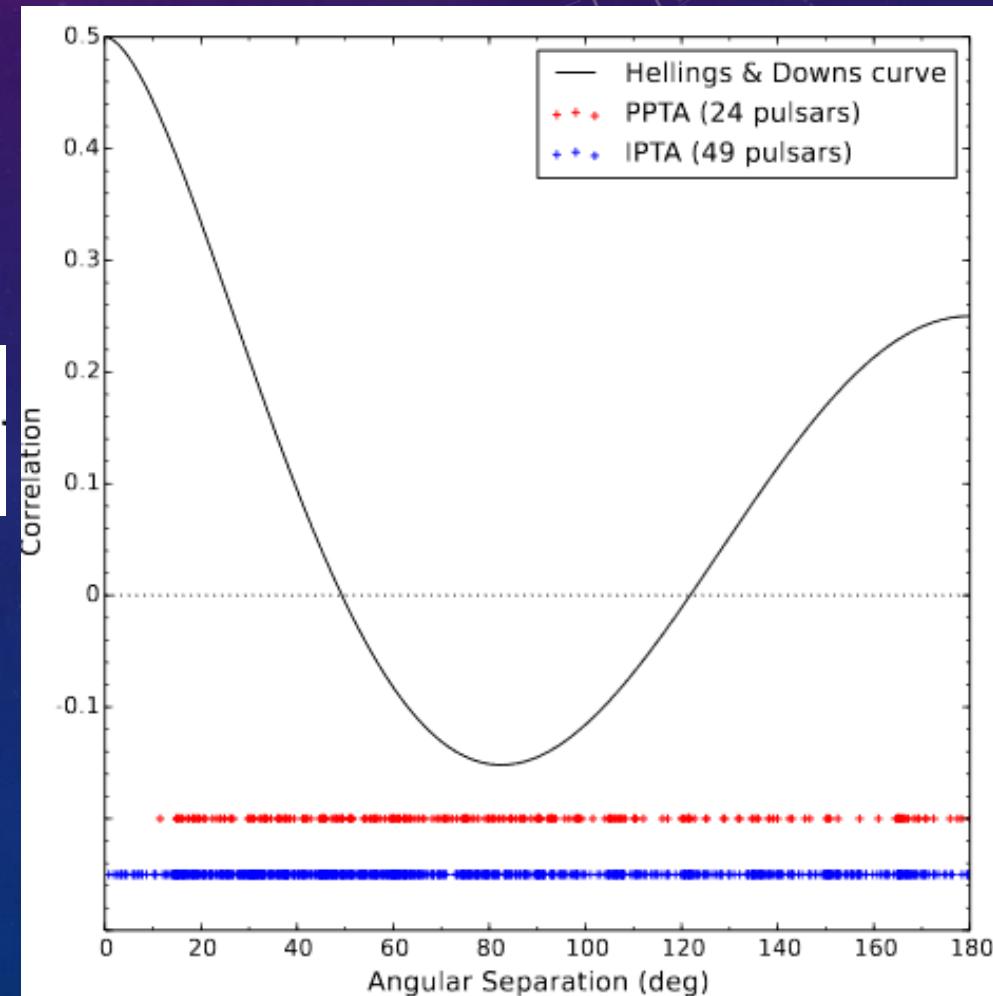
$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n X_t, \bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n Y_t$$

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

Θ – угол между пульсарами

См. детали в 1412.1142

Подробный обзор см. в 2112.08064



ТРИ ПРОЕКТА И ИХ ОБЪЕДИНЕНИЕ

IPTA=PPTA+EPTA+NANOGrav
<http://ipta4gw.org/>



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

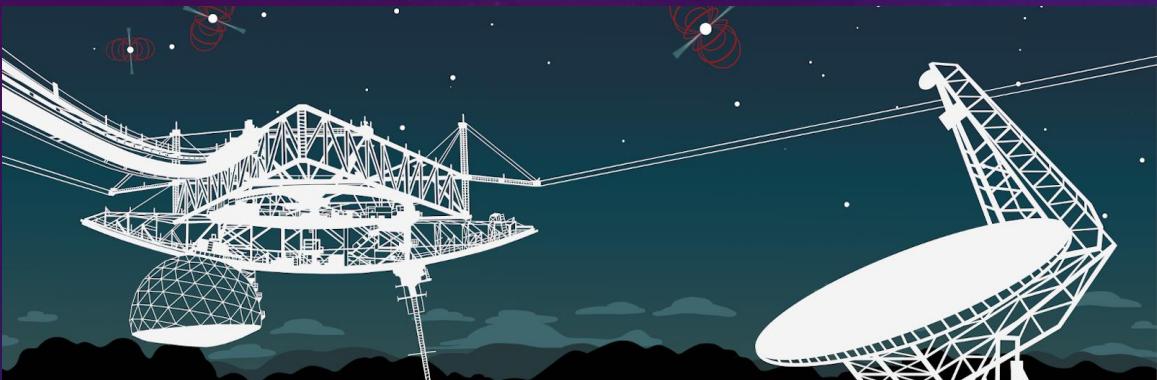


PPTA – Телескоп в Парксе

NANOGrav – GBT и Аресибо

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

NANOGRAV: 12.5 ЛЕТ НАБЛЮДЕНИЙ

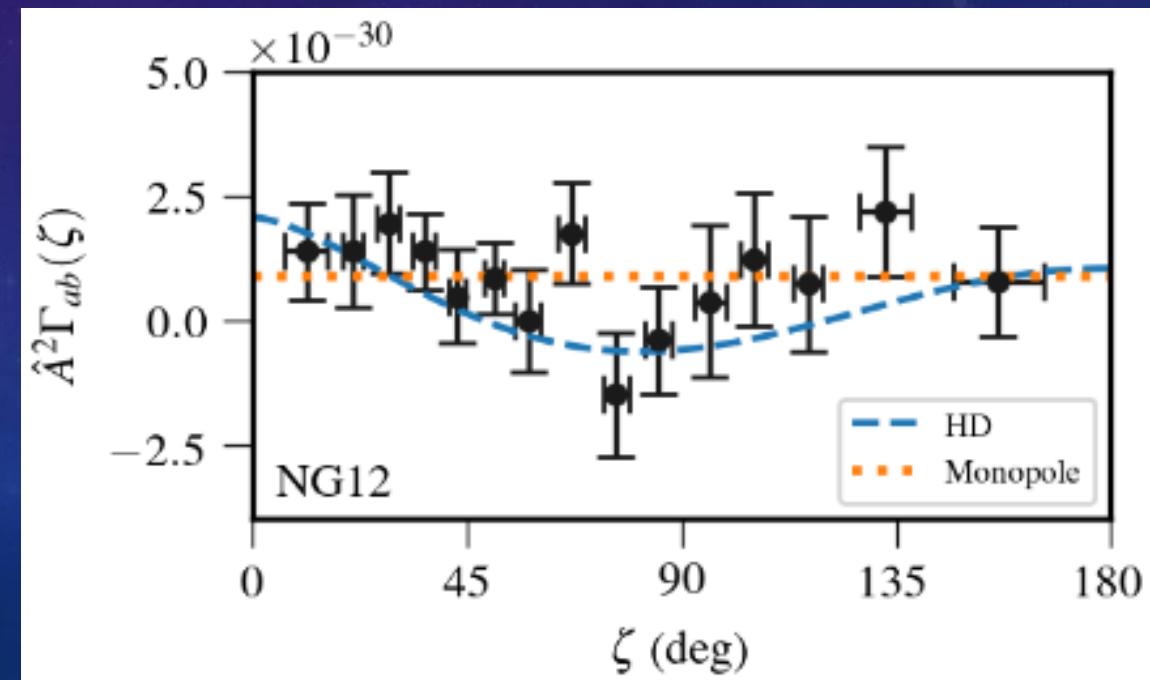


Впервые РТА заявляет о каком-либо сигнале.
Правда, что это за сигнал – непонятно.

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.



ЧТО ПОЧИТАТЬ И ПОСМОТРЕТЬ

- “Gravitational wave astronomy: the current status”. Blair et al. 1602.02872
- “A common misconception about LIGO detectors of gravitational waves”. Faraoni. gr-qc/0702079
- “The basics of gravitational wave theory”. Flanagan & Hughes, gr-qc/0501041
- Эта же лекция в исполнении Сергея Попова:
 - <https://www.youtube.com/watch?v=nyxV5oj0ueA> (часть 1)
 - <https://www.youtube.com/watch?v=SPK8idCPryA> (часть 2)