Гравитационно-волновая астрономия: в ожидании новых источников

Константин Постнов
ГАИШ МГУ

ГАИШ МГУ 18.02.2019

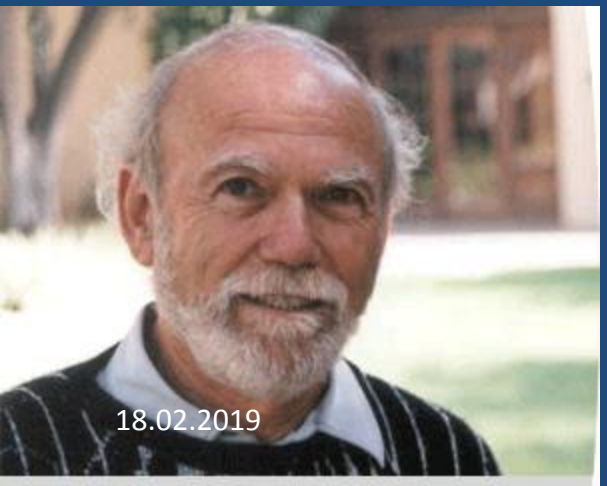
Краткая история

- 1916, А. Эйнштейн
- 1920-е (Эйнштейн, Эддингтон и др.)
- 1962, М.Е.Герценштейн, В.И.Пустовойт – идея лазерных интерферометров
- 1970-е, разработка (Р.Вайс, Р.Дривер и др.)
- Конец 1980-х, начало проекта LIGO
- 2002-2010, LIGO работает
- 2010-2015, модернизация LIGO
- 14 сентября 2015, первое успешное детектирование сливающихся двойных ЧД
- 17 августа 2017, первое успешное детектирование сливающихся двойных НЗ

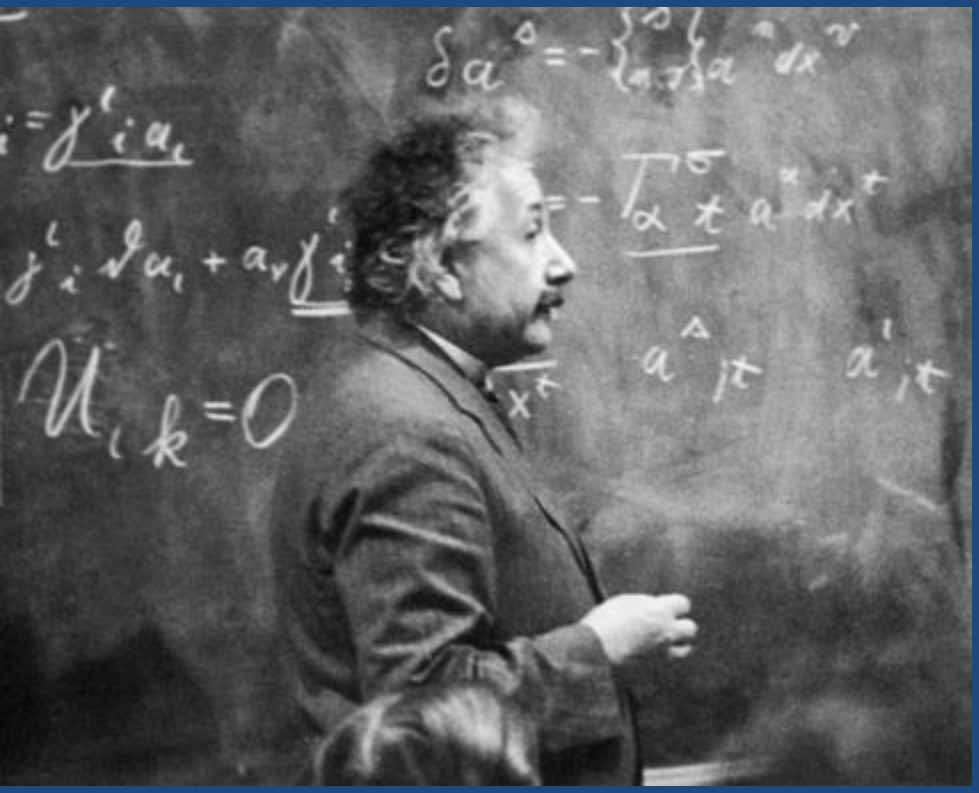
Главные результаты 2015-2017

- 10 надежно зарегистрированных события – слияние двойных черных дыр с массами 10-50 масс Солнца с расстояний 500-1000 Мпк
- Темп слияния ~12-213 Гпк$^{-3}$ год$^{-1}$
- Измеренные свойства ГВ в согласии с ОТО с точностью до неск. процентов
- 1 регистрация слияния системы из двух нейтронных звезд (GW170817) и наблюдения электромагнитных сигналов в гамма-, рентгеновском, оптическом, ИК и радио диапазонах

НП по физике 2017



Общая теория относительности

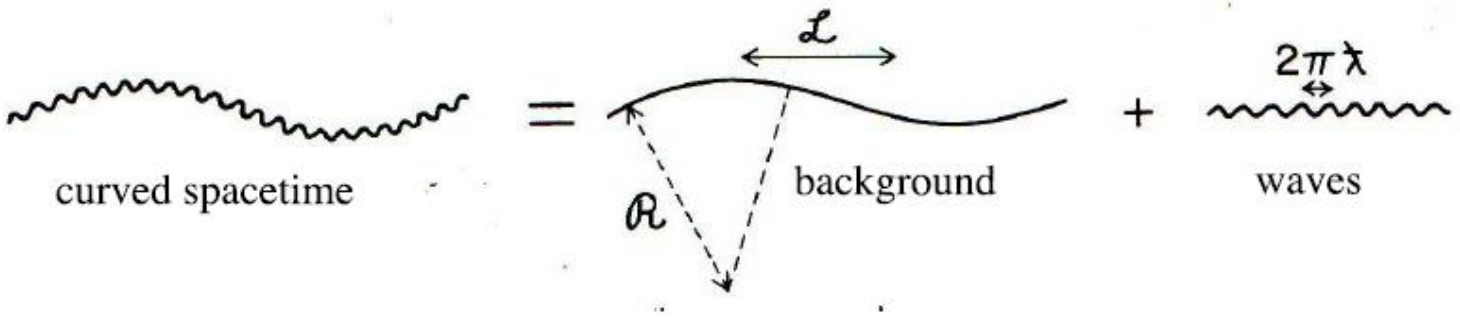


- А. Эйнштейн, 1915
- Тяготение = искривление пространства-времени

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

ГВ «рябь» пространства-времени

$$g_{\alpha\beta} = g^{\mathrm{B}}_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta} \ , \qquad R_{\alpha\beta\gamma\delta} = R^{\mathrm{B}}_{\alpha\beta\gamma\delta}$$



Линеаризованная гравитация

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \qquad |h_{\mu\nu}| \ll 1.$$

$$x^\mu \longrightarrow x'^\mu = x^\mu + \xi^\mu(x)$$

$$h_{\mu\nu}(x) \longrightarrow h'_{\mu\nu}(x') = h_{\mu\nu}(x) - (\partial_\mu \xi_\nu + \partial_\nu \xi_\mu)$$

$$R_{\mu\nu\rho\sigma} = \frac{1}{2}(\partial_\nu\partial_\rho h_{\mu\sigma} + \partial_\mu\partial_\sigma h_{\nu\rho} - \partial_\mu\partial_\rho h_{\nu\sigma} - \partial_\nu\partial_\sigma h_{\mu\rho})$$

Калибровочно-инвариантен!!!

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

$$\bar{h}_{\mu\nu} \longrightarrow \bar{h}'_{\mu\nu} = \bar{h}_{\mu\nu} - (\partial_\mu \xi_\nu + \partial_\nu \xi_\mu - \eta_{\mu\nu}\partial_\rho \xi^\rho)$$

$$\Box \bar{h}_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \qquad \partial^\nu \bar{h}_{\mu\nu} = 0.$$

$$\partial^\nu T_{\mu\nu} = 0$$

Излучение ГВ

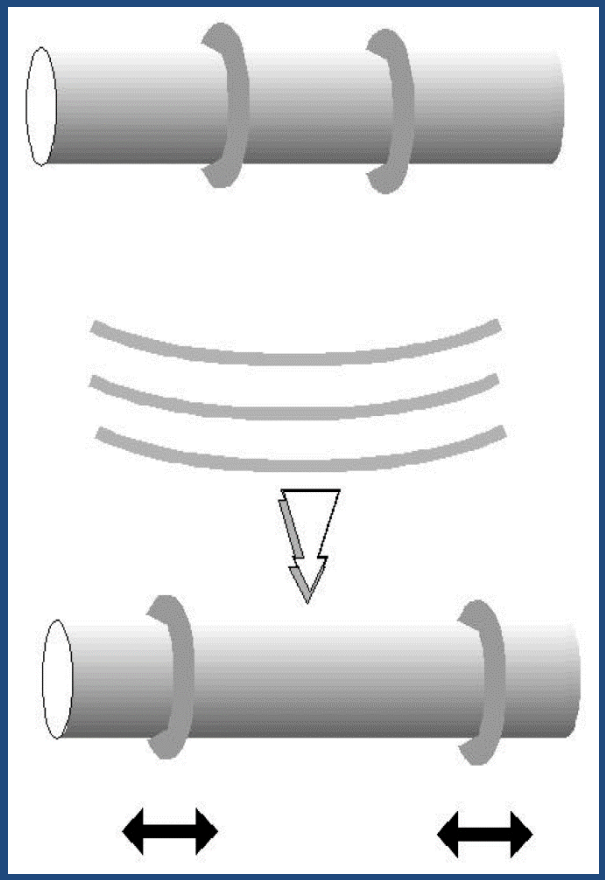
$$\bar{h}_{\mu\nu}(t,\mathbf{x}) = -4\frac{G}{c^2}\int_{\mathcal{V}} \frac{T_{\mu\nu}(t-|\mathbf{x}-\mathbf{x}'|/c,\mathbf{x}')}{|\mathbf{x}-\mathbf{x}'|}d^3\mathbf{x}'$$

- Низший порядок – квадрупольное излучение. Для v/c<<1:

$$h_{jk}^{\mathrm{GW}} = 2G\frac{\ddot{I}_{jk}}{r} \sim G\frac{\omega^2(ML^2)}{r} \sim G\frac{E_{\mathrm{kin}}/c^2}{r}$$

$$h_{jk}^{\mathrm{GW}} \sim h_+ \sim h_\times \sim 10^{-21}\left(\frac{E_{\mathrm{kin}}}{M_\odot c^2}\right)\left(\frac{100\mathrm{Mpc}}{r}\right)$$

Simple argument by R.Feynmann (1957)



- “I was surprised to find that a whole day of the conference was spent on this issue and that ‘experts’ were confused. That’s what happens when one is considering energy conservation tensors, etc. instead of questioning, can waves do work?”

Поток энергии в ГВ

- Плотность энергии в ГВ

$$t^{00} = \frac{c^2}{16\pi G}\langle \dot{h}_+^2 + \dot{h}_\times^2 \rangle$$

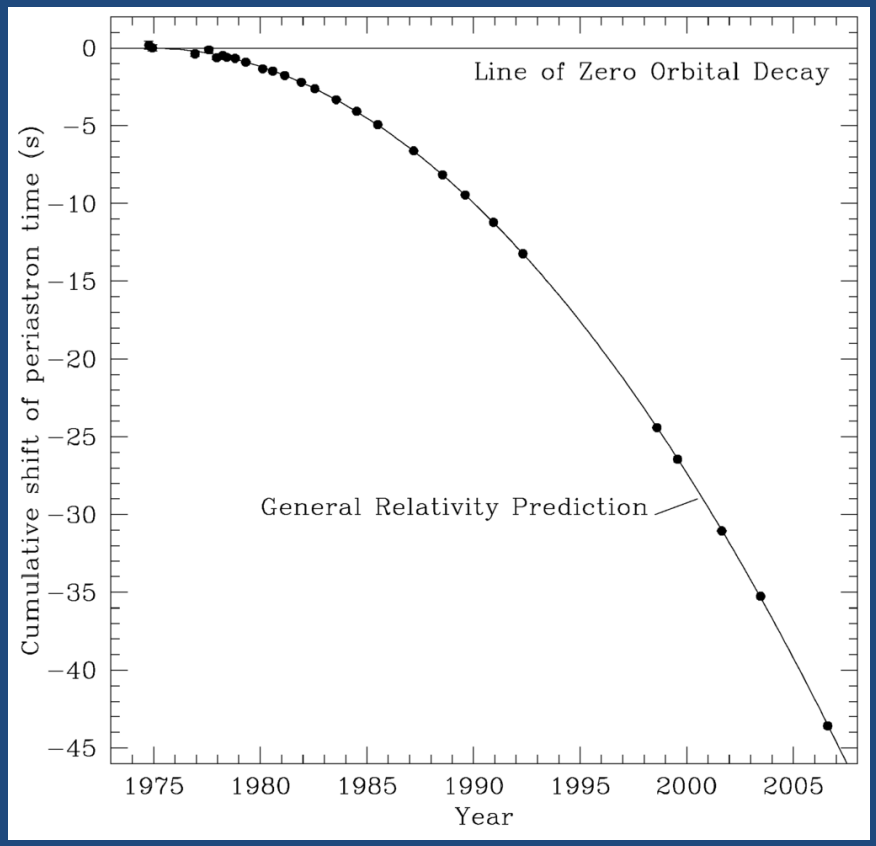
- Поток энергии

$$\frac{dE_{\rm GW}}{dt} = \frac{c^3 r^2}{16\pi G}\int d\Omega \, \langle \dot{h}_+^2 + \dot{h}_\times \rangle .$$

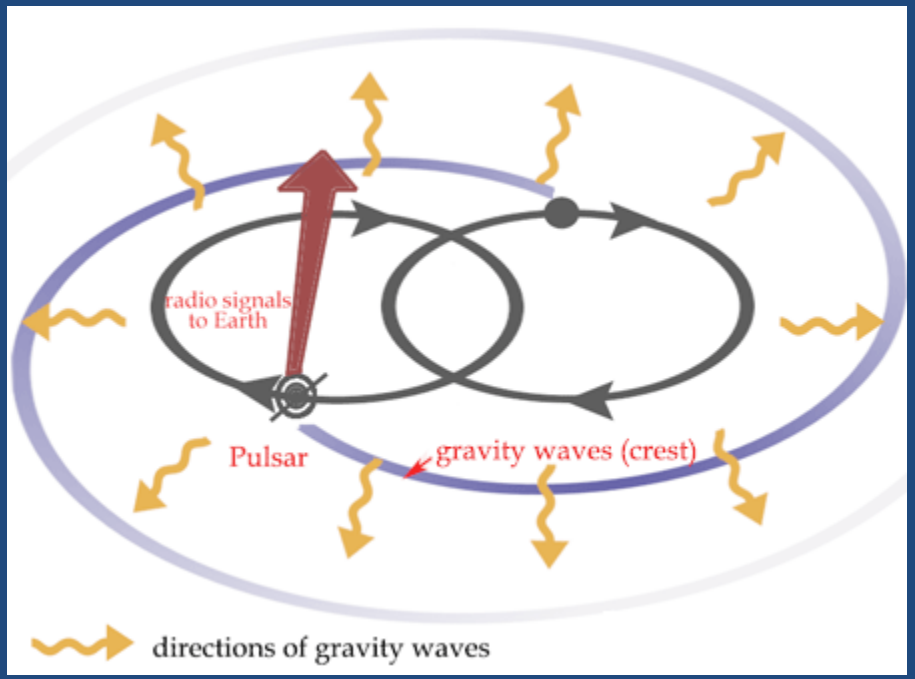
- ГВ несет импульс и энергию, которые могут воздействовать на пробные тела

$$T^{{\rm GW}\,0z} \simeq \frac{\pi}{4}\frac{c^3}{G} f^2 h_{\rm amp}^2 \simeq 300 \frac{\rm ergs}{\rm cm^2\ sec}\left(\frac{f}{1\ {\rm kHz}}\right)^2\left(\frac{h_{\rm amp}}{10^{-21}}\right)^2$$

E pur si existare!



- 1974, двойной пульсар PSR 1913+16 (Халсе, Тейлор)

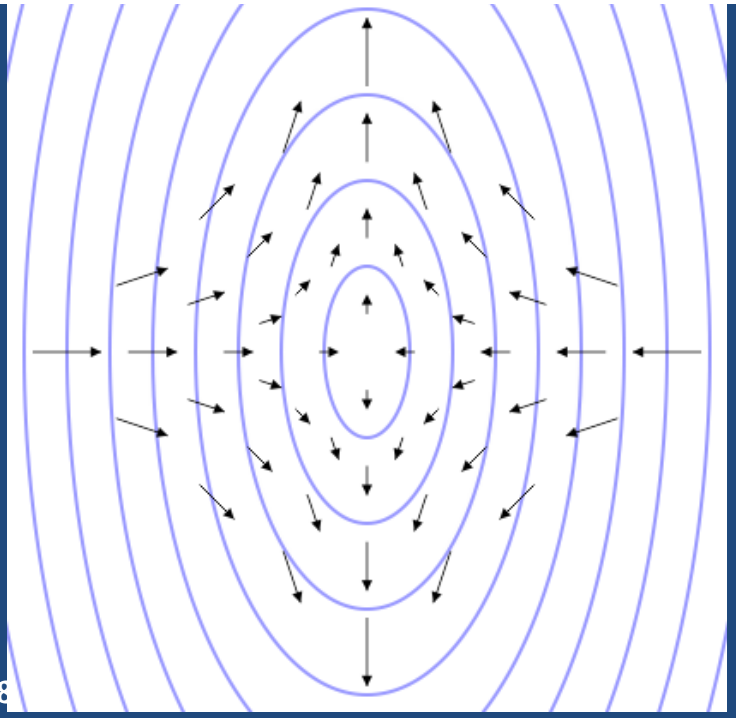


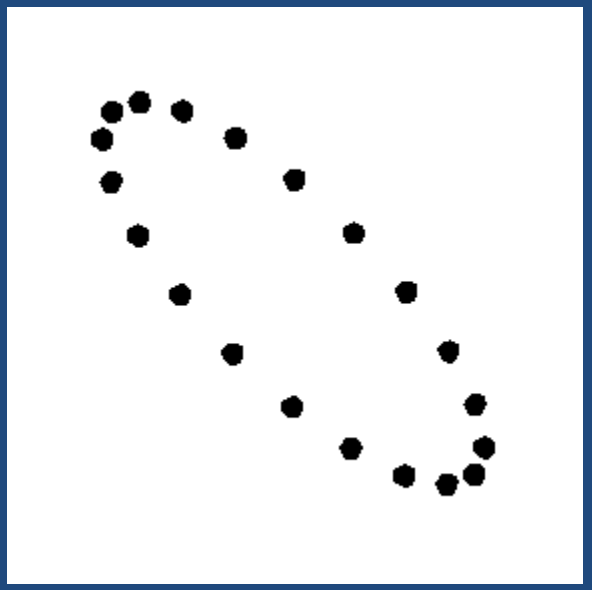
Уменьшение орбитального периода в точном соответствии с ОТО (~0.1%)

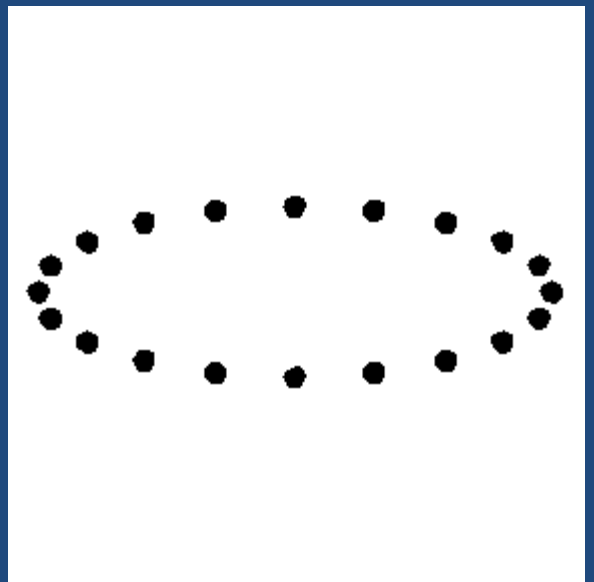
GE creates tidal acceleration field in a freely faling (local Lorents) reference frame

$$\mathcal{E}_{ij} = R_{i0j0} = -\frac{1}{2}\ddot{h}_{ij}^{\mathrm{TT}}$$

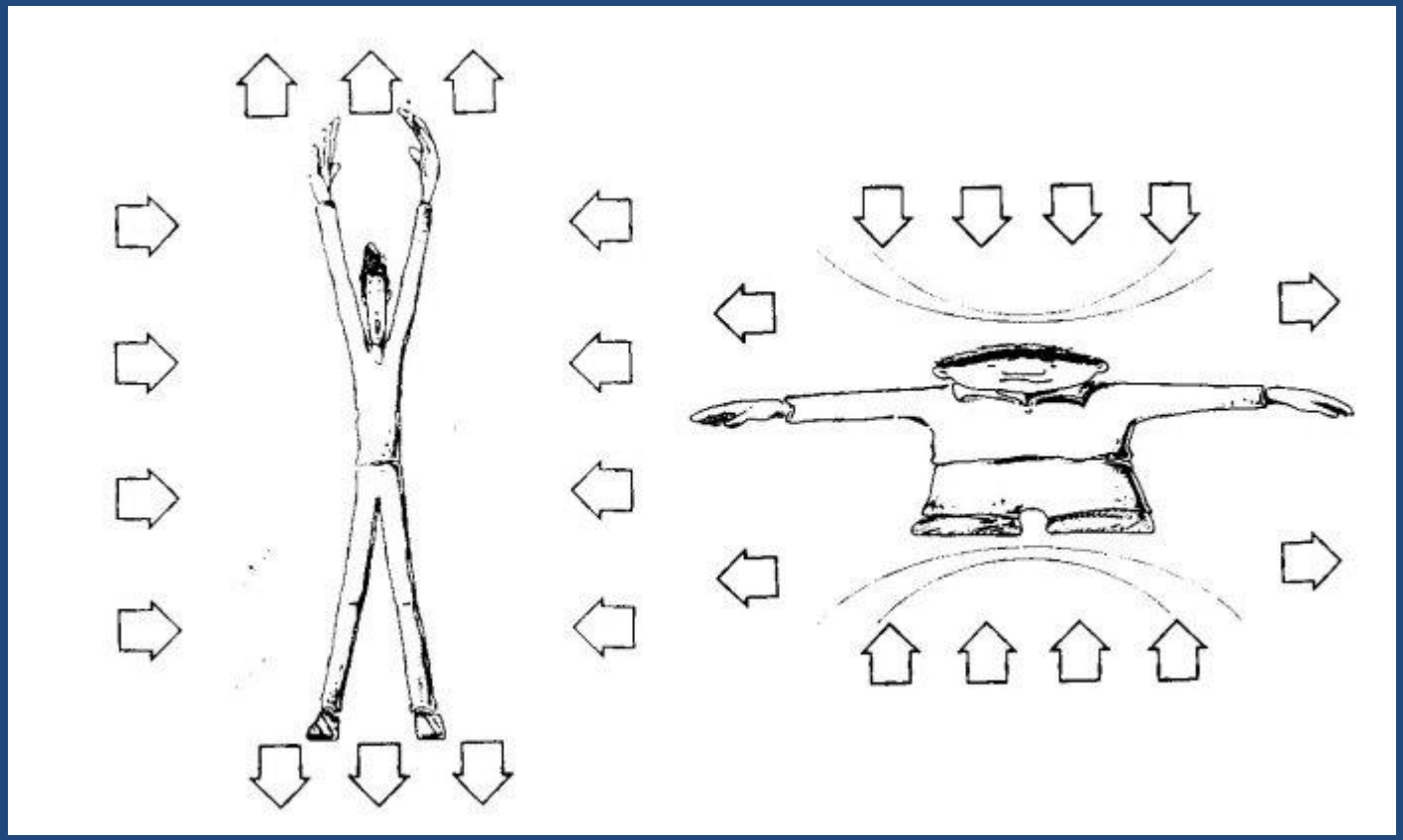
$$h_{ij}^{\mathrm{TT}} \equiv -2\int dt \int dt\, \mathcal{E}_{ij}$$



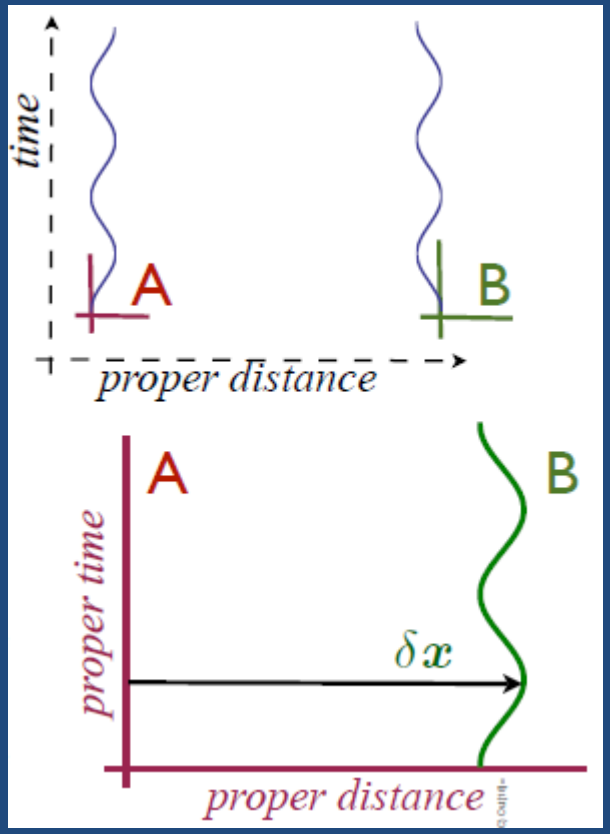


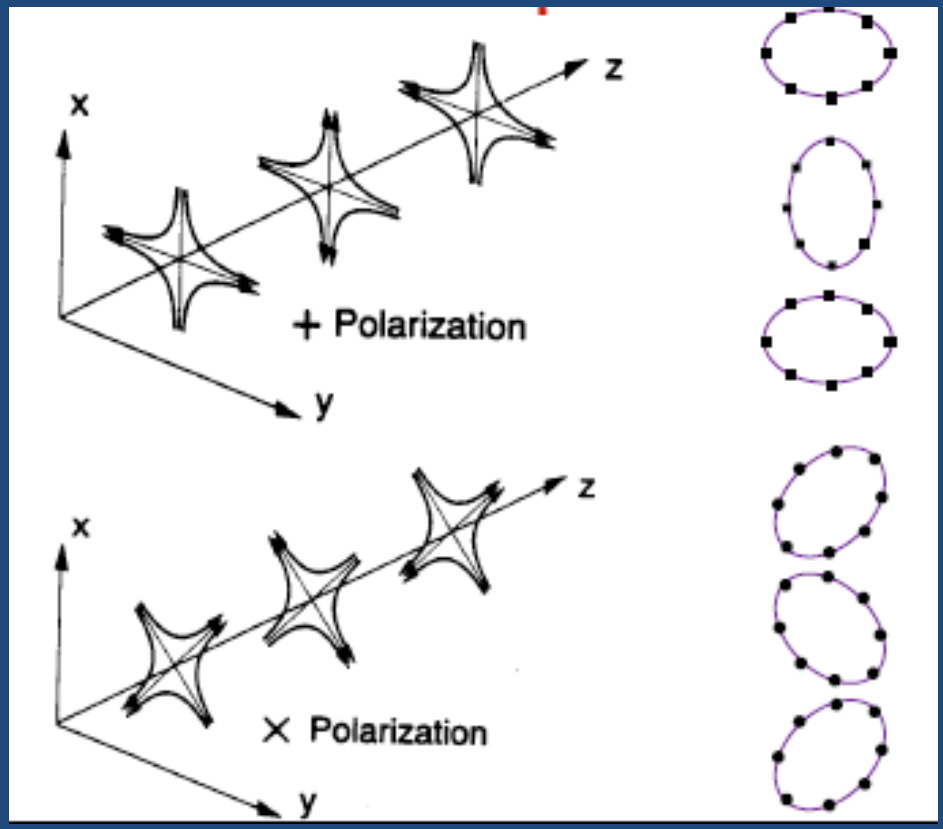


GW amplitude h = relative expansion/compression



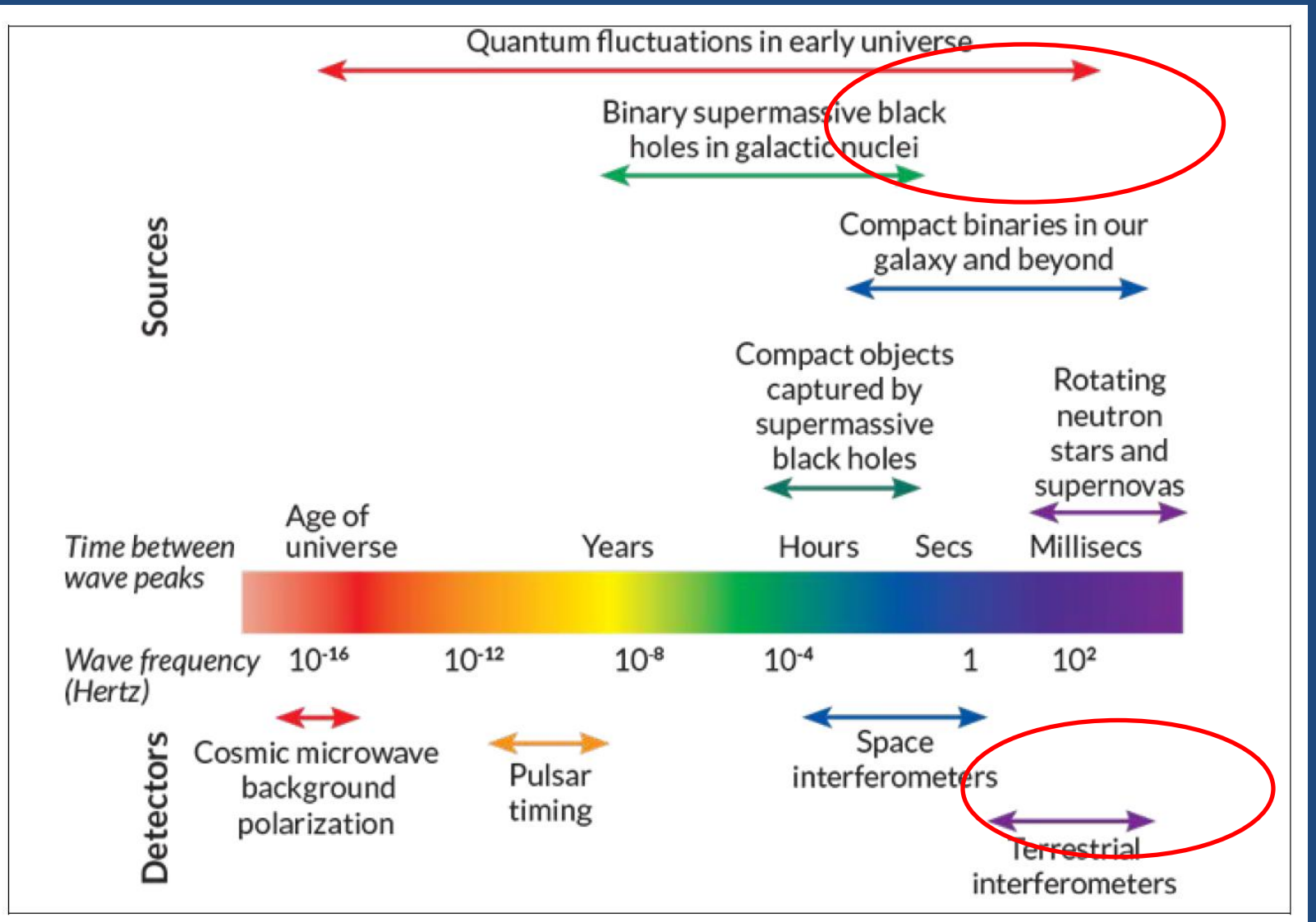
Поле приливных ускорений



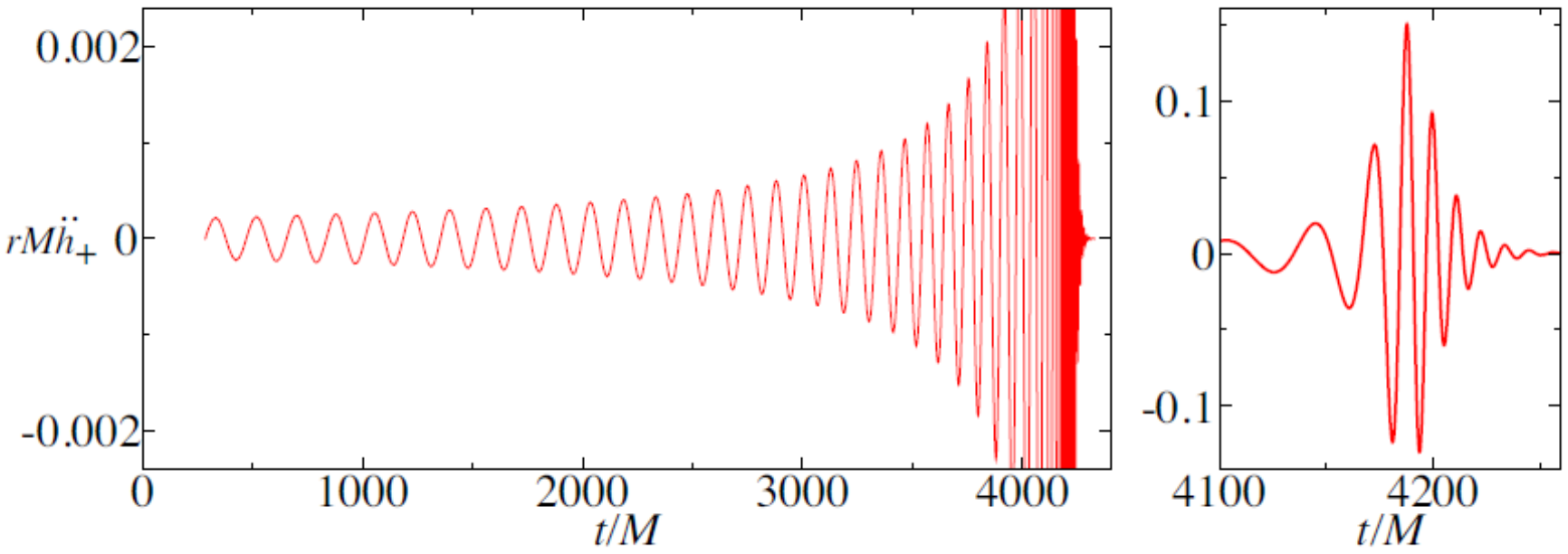


$$\delta x_j = \frac{1}{2} h^{\mathrm{GW}}_{jk} x_k$$

Источники ГВ



Форма сигнала от двойной системы



$$h_+ = h^{\mathrm{TT}}_{\hat{\theta}\hat{\theta}} = \frac{2}{r}[\ddot{I}_{\hat{\theta}\hat{\theta}}(t-r)]^{\mathrm{TT}} = -2(1+\cos^2\theta)\,\frac{\mu(M\Omega)^{2/3}}{r}\cos[2(\Omega t - \Omega r - \phi)]$$

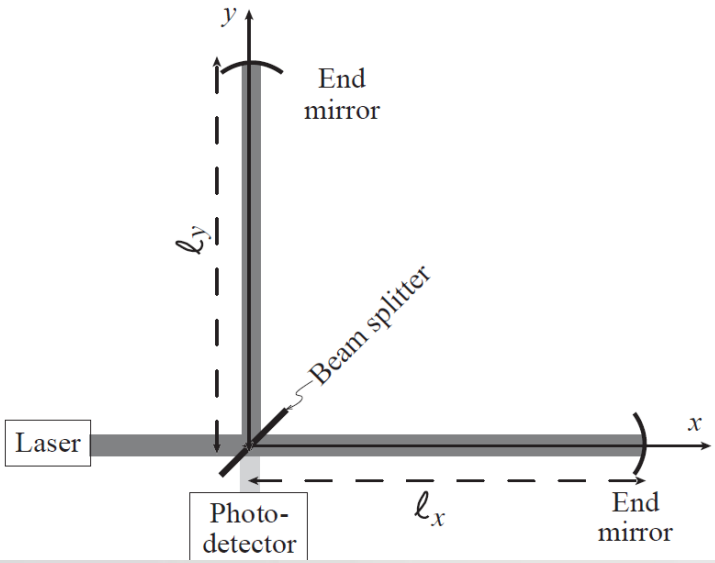
$$h_\times = h^{\mathrm{TT}}_{\hat{\theta}\hat{\phi}} = \frac{2}{r}[\ddot{I}_{\hat{\theta}\hat{\phi}}(t-r)]^{\mathrm{TT}} = -4\cos\theta\,\frac{\mu(M\Omega)^{2/3}}{r}\sin[2(\Omega t - \Omega r - \phi)]\,.$$

- Форма сигнала от двух точечных сливающихся масс определяется только одним параметром – комбинацией масс, называемой «чирп-массой»

$$M_{ch} = (\mu^3 M^2)^{1/5}$$

$$h \sim M_{ch}^{5/3} f^{2/3} / r$$

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}} = \frac{c^3}{G}\left(\frac{5}{96}\pi^{-8/3} f^{-11/3} \dot{f}\right)^{3/5}$$



Лазерный интерферометр

- Герценштейн, Пустовойт 1962

Принцип работы

$$\delta x = \frac{1}{2} h_+ \ell_x \qquad \delta y = -\frac{1}{2} h_+ \ell_y$$

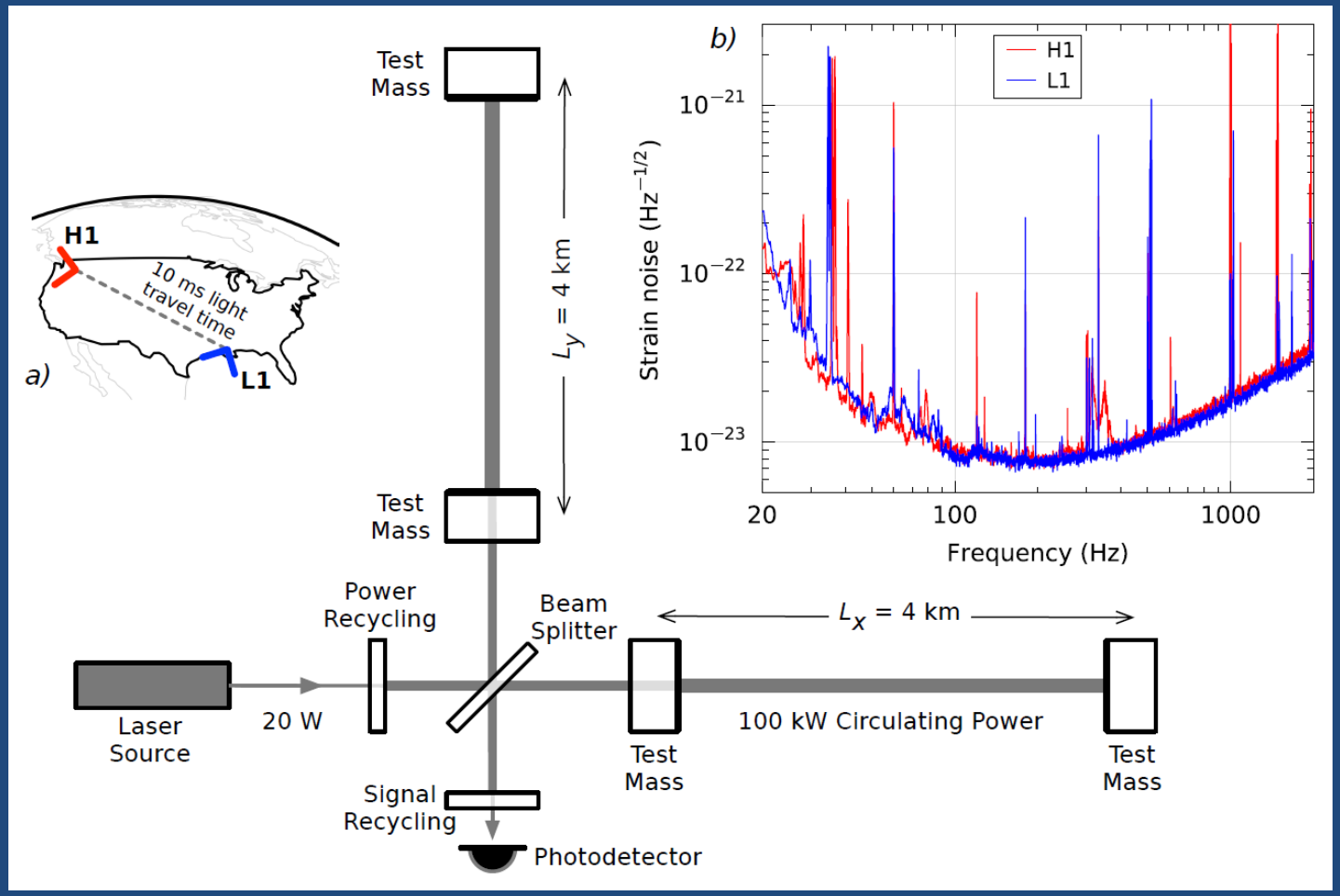
Разность фаз в плечах интерферометра

$$\Delta\varphi(t) = \omega_o(2\delta y - 2\delta x) = \omega_o(\ell_x + \ell_y)h_+(t)$$

Модуляция интенсивности

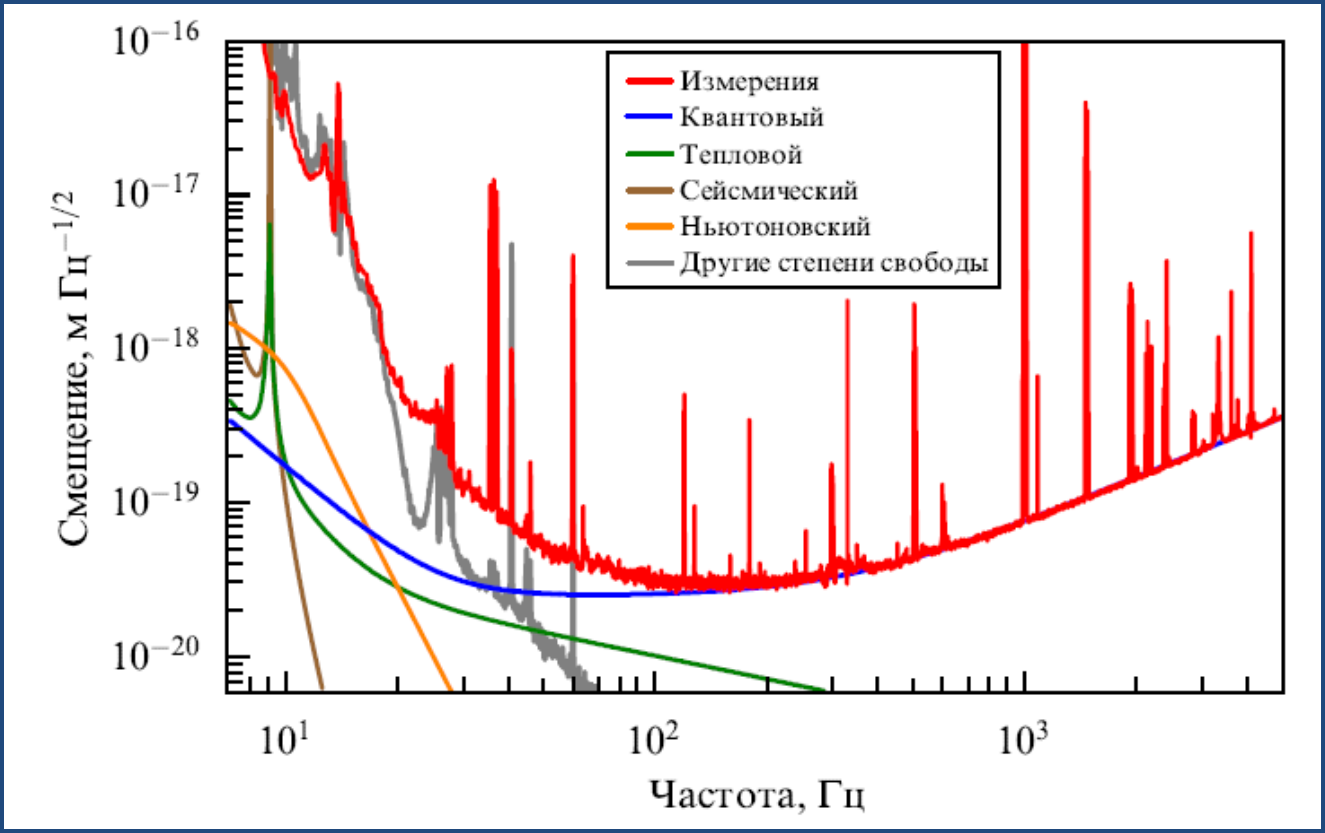
$$\Delta I_{\mathrm{PD}}(t) \propto \Delta\varphi(t) = 2\omega_o \ell h_+(t)$$

Схема интерферометра LIGO

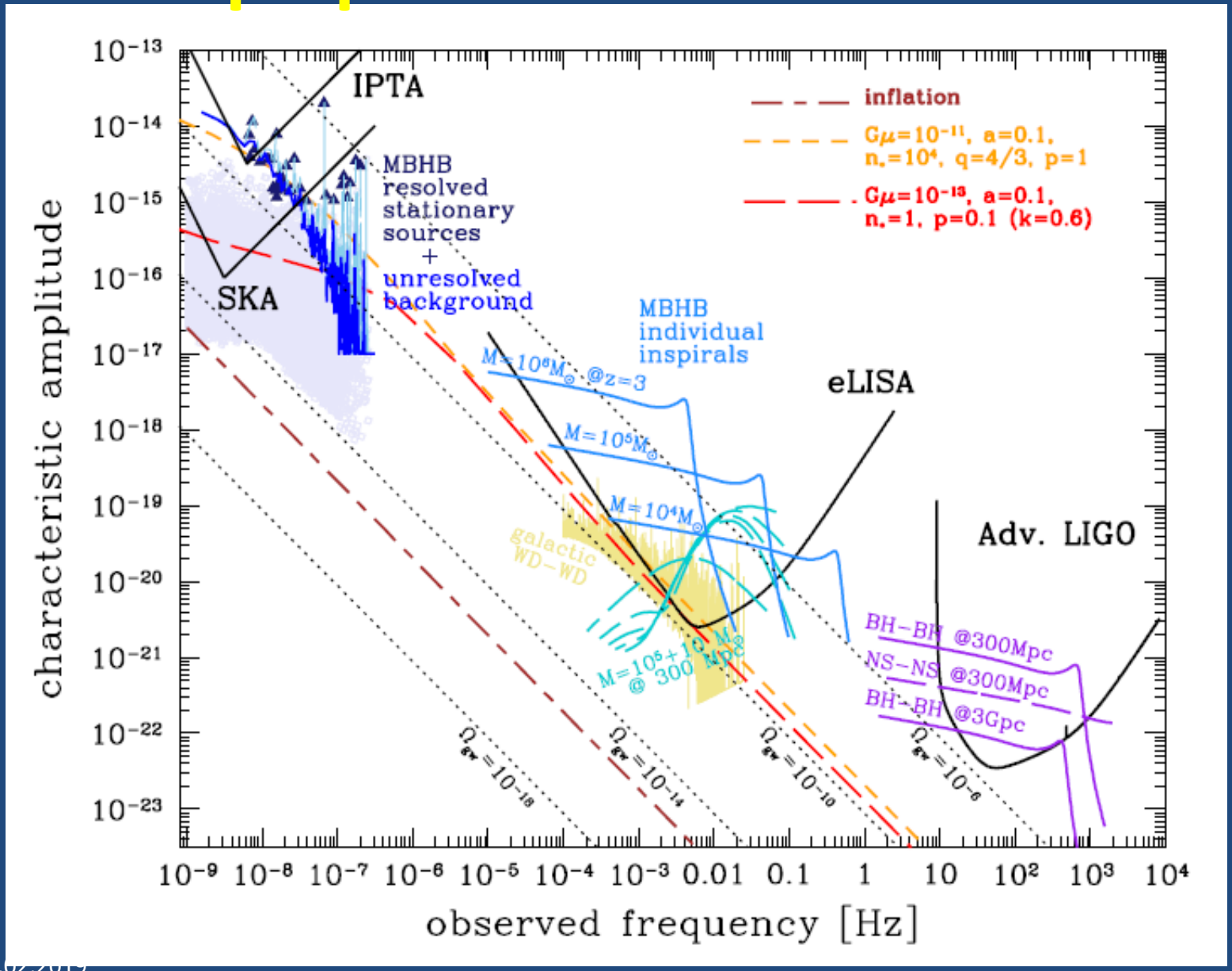


Д. Райтце. УФН 2017

Бюджет шумов



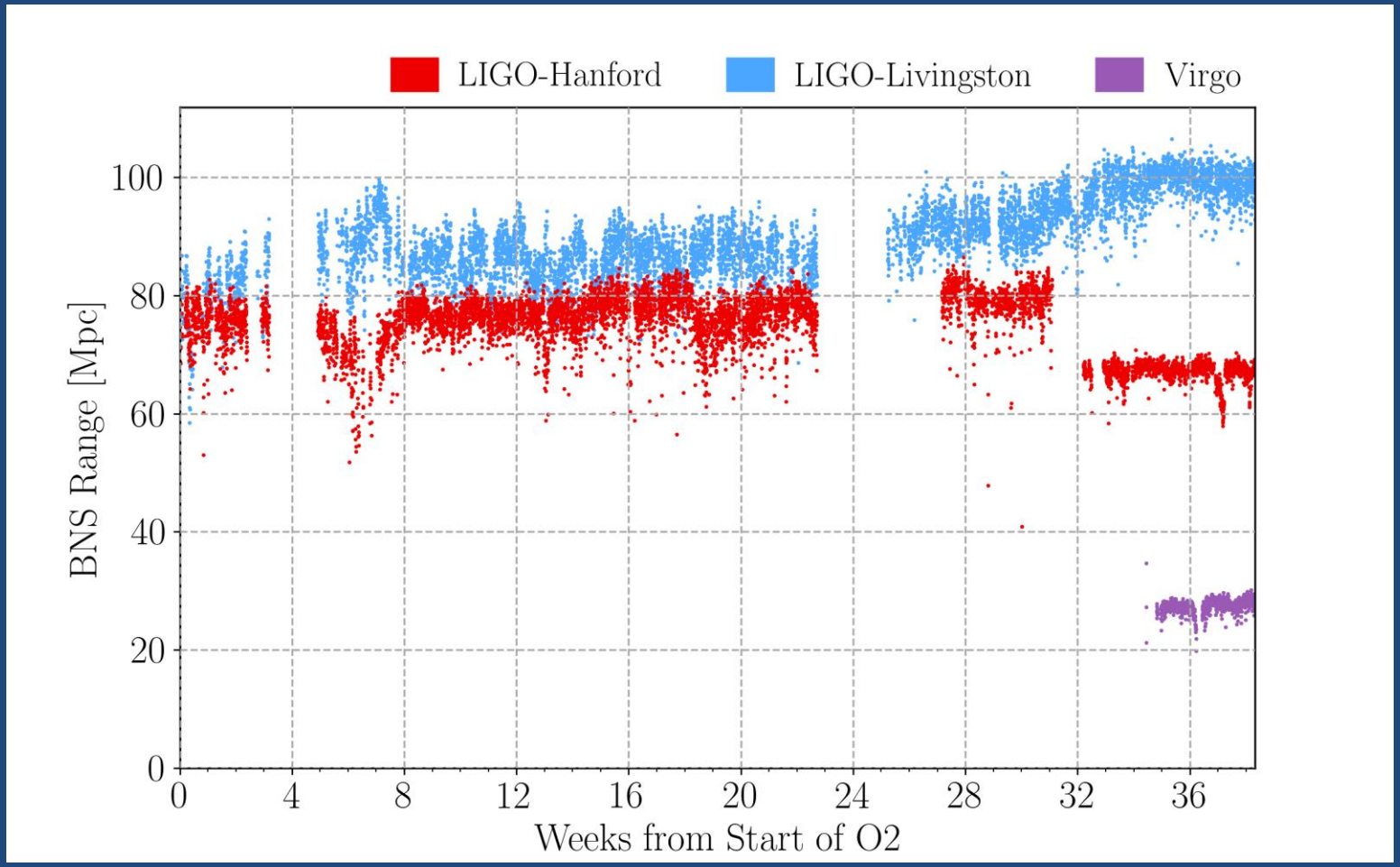
3. Астрофизические источники ГВ

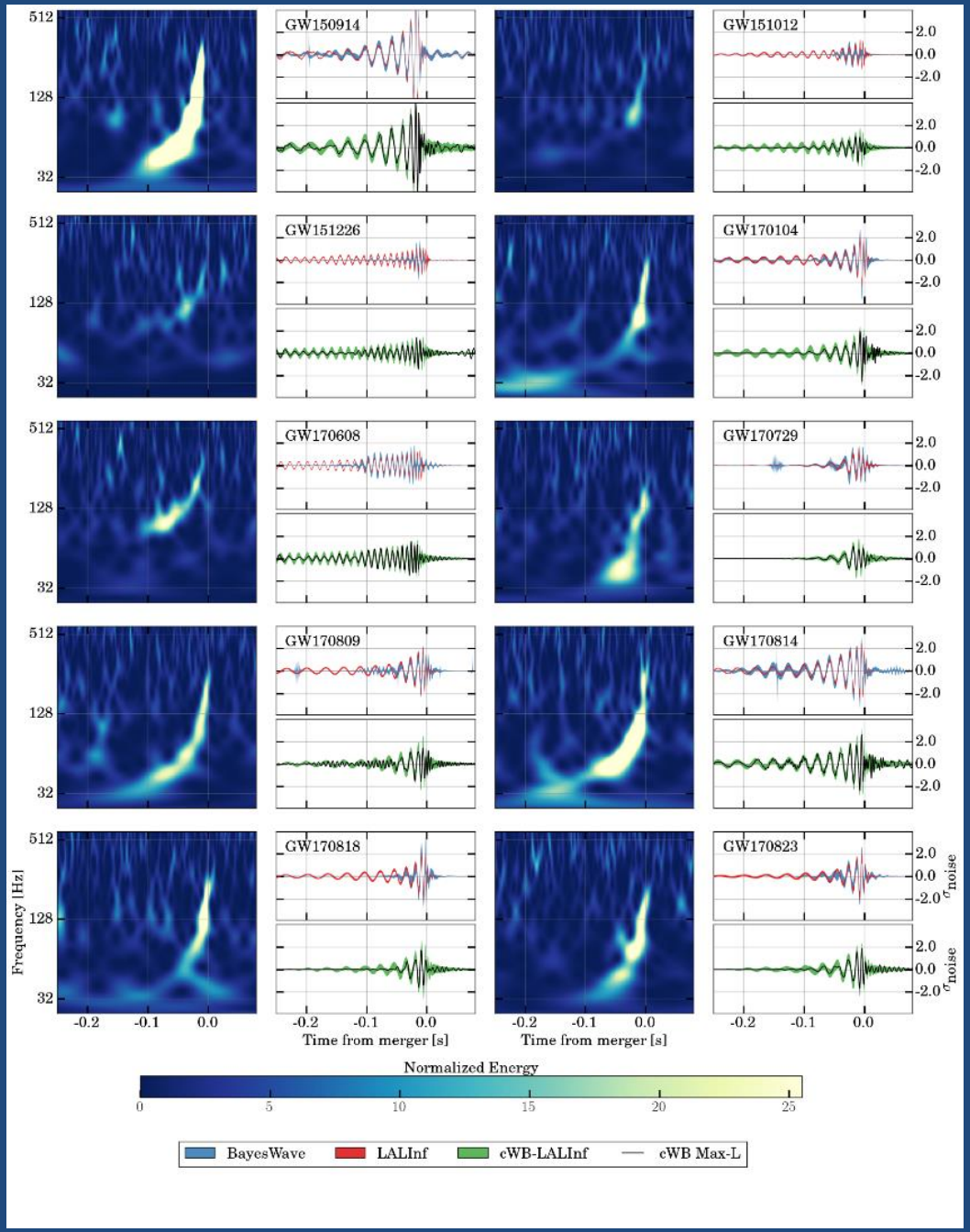


Credit: A. Sesana

- С 1 августа по 25 августа 2017 -- три действующих интерферометра (2 LIGO + VIRGO) работали синхронно. Результат: GW170814 (ЧД+ЧД) и GW170817 (НЗ+НЗ)

LIGO/VIRGO работа в течение O2

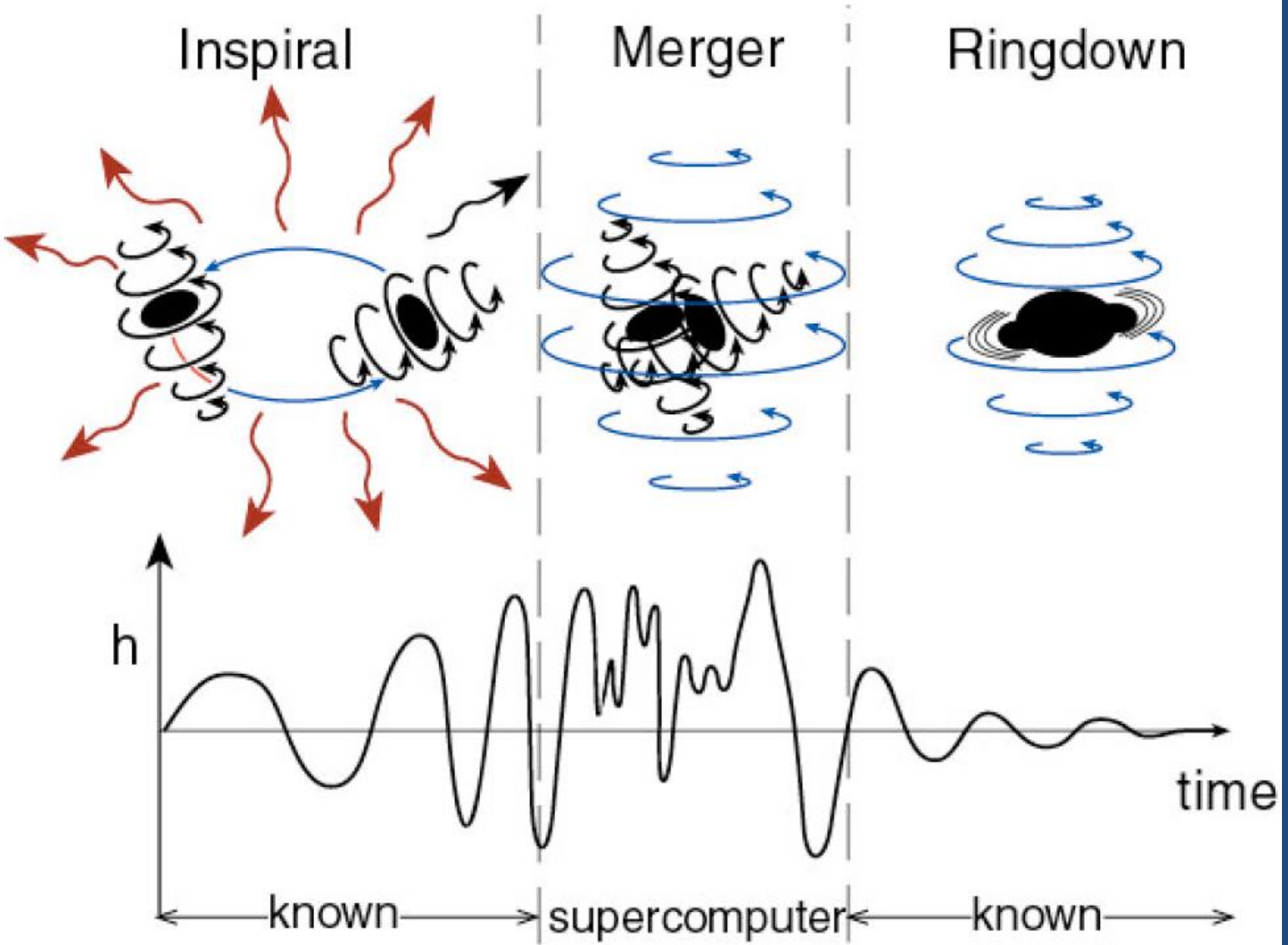




LIGO BHs

GWTC-1 Catalog arXiv:1811.12907

Binary Black Hole Mergers



1) Фаза приближения по спирали

$$h_k = F_k^{(+)} h_+ + F_k^{(\times)} h_\times$$

$$h_+(t) = A_{\rm GW}(t)\left(1+\cos^2\iota\right)\cos\phi_{\rm GW}(t)\,,$$
$$h_\times(t) = -2A_{\rm GW}(t)\cos\iota\sin\phi_{\rm GW}(t)\,,$$

- Зависит только от чирп-массы (в главном порядке по v/c) (0.2-0.5 для GW150914

$$\mathcal{M} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{M^{1/5}} \simeq \frac{c^3}{G}\left[\frac{5}{96}\pi^{-8/3} f^{-11/3}\dot{f}\right]^{3/5}$$

Определяем чирп массу

2) Фаза слияния

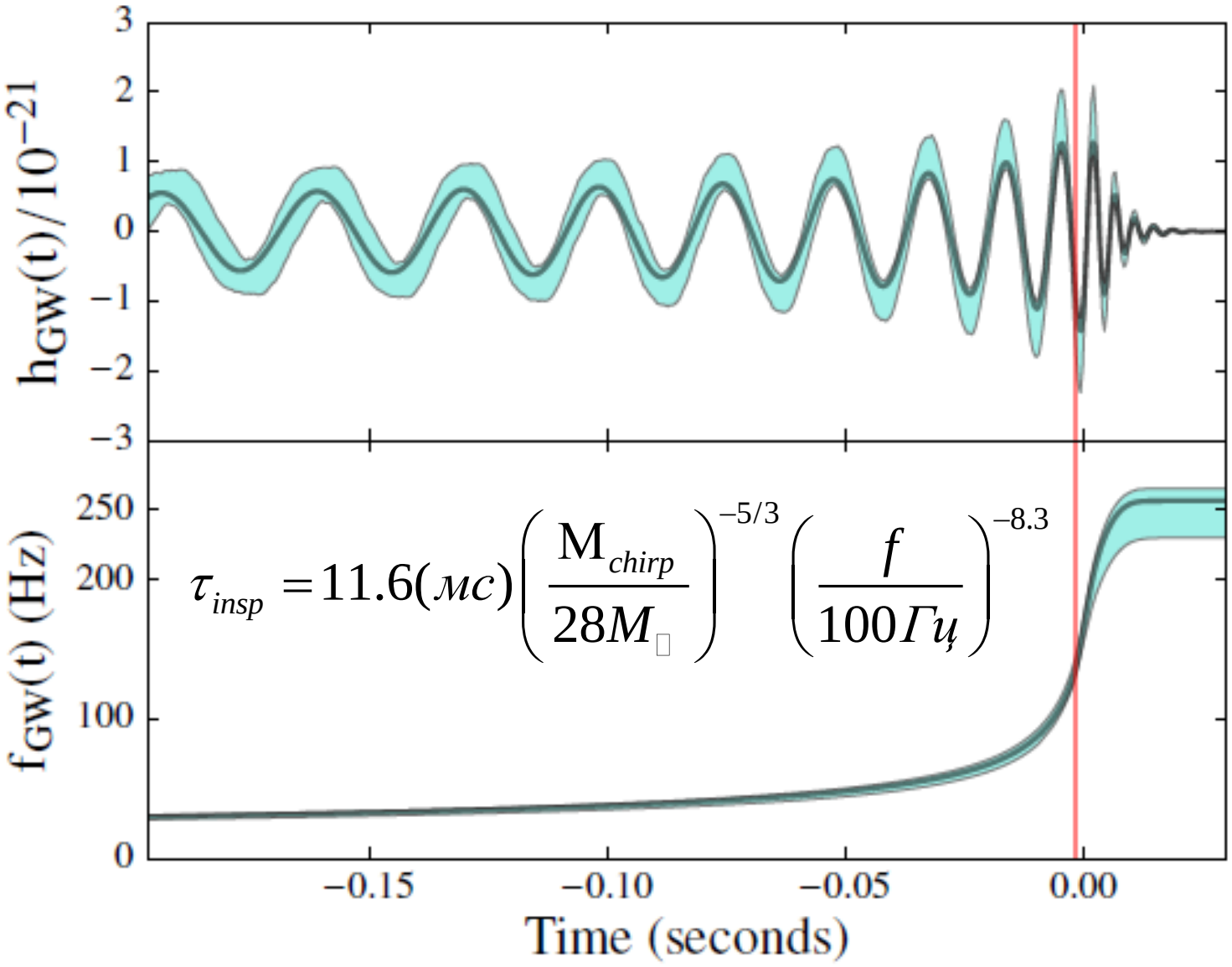
- Из конечной частоты определяем полную массу: f_lim~1/M
- Из полной массы и чирп-массы определяем отношение масс
- Амплитуда ГВ ~ Массе

$$h(f,\mathcal{M},r) = (\langle h_+^2\rangle + \langle h_\times^2\rangle)^{1/2} = \left(\frac{32}{5}\right)^{1/2} \frac{G^{5/3}}{c^4}\frac{\mathcal{M}^{5/3}}{r}(\pi f)^{2/3}$$

- Частота сигнала ~ 1/M (т.к. fGM/c^3) ➔ красное смещение (1+z) для частоты ⇔ перешкалированию массы ➔

  h~m_s/d_m=m/(1+z)d_m=m/d_l ➔ d_l!

132 Гц


3
2
1
0
−1
−2
−3
$h_{GW}(t)/10^{-21}$
250
200
100
0
$f_{GW}(t)$ (Hz)
$\tau_{insp} = 11.6(мс)\left(\frac{M_{chirp}}{28M_{\odot}}\right)^{-5/3}\left(\frac{f}{100Гц}\right)^{-8.3}$
−0.15
−0.10
−0.05
0.00
Time (seconds)

3) Фаза «звона» (ring-down)

- Собственные частоты осцилляций горизонта (Старобинский, Чандрасекар) ➔ информация о массе ЧД ➔ проверка согласия с ОТО
- Отклонения от ОТО <4%

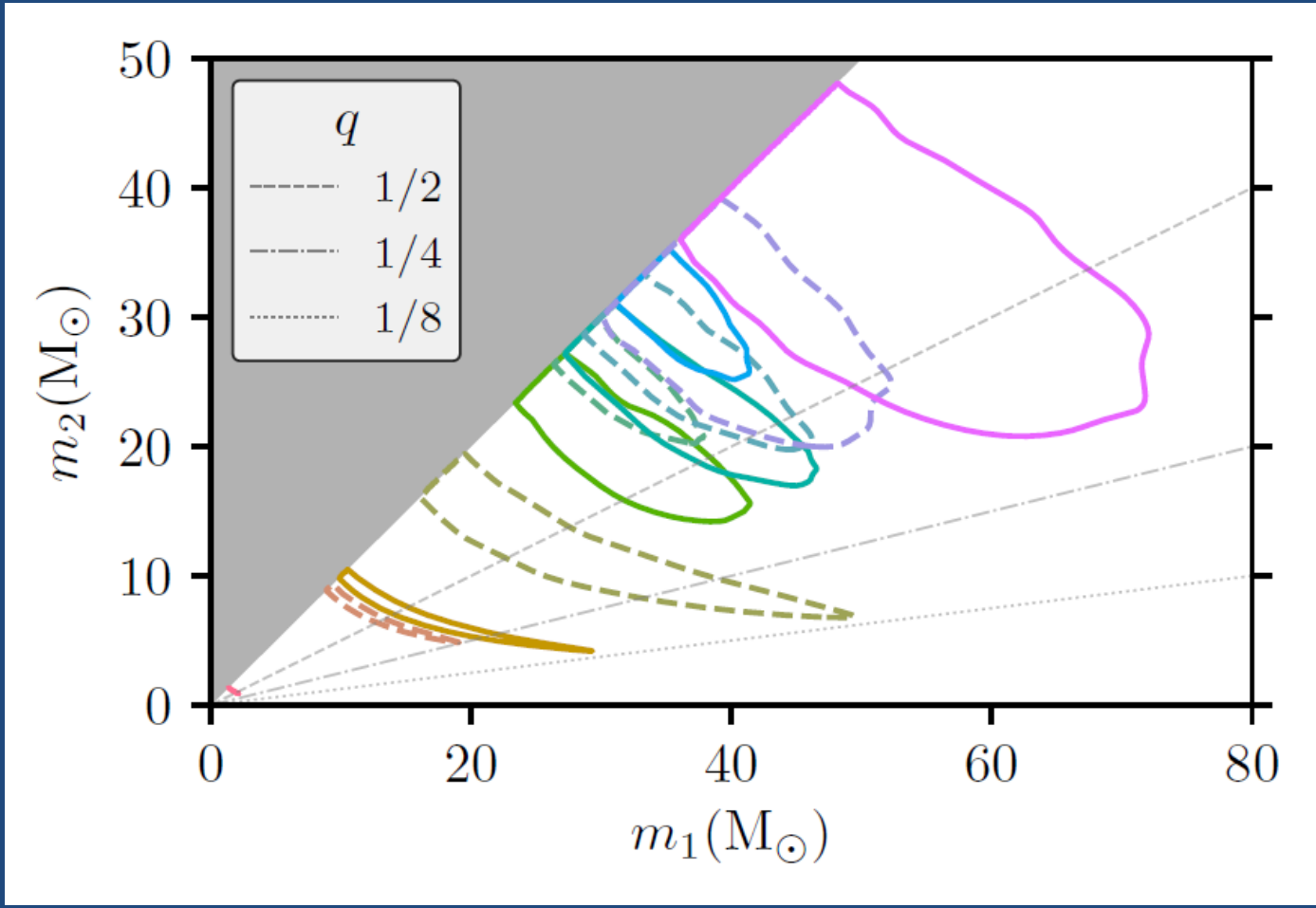
Сводная таблица источников

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

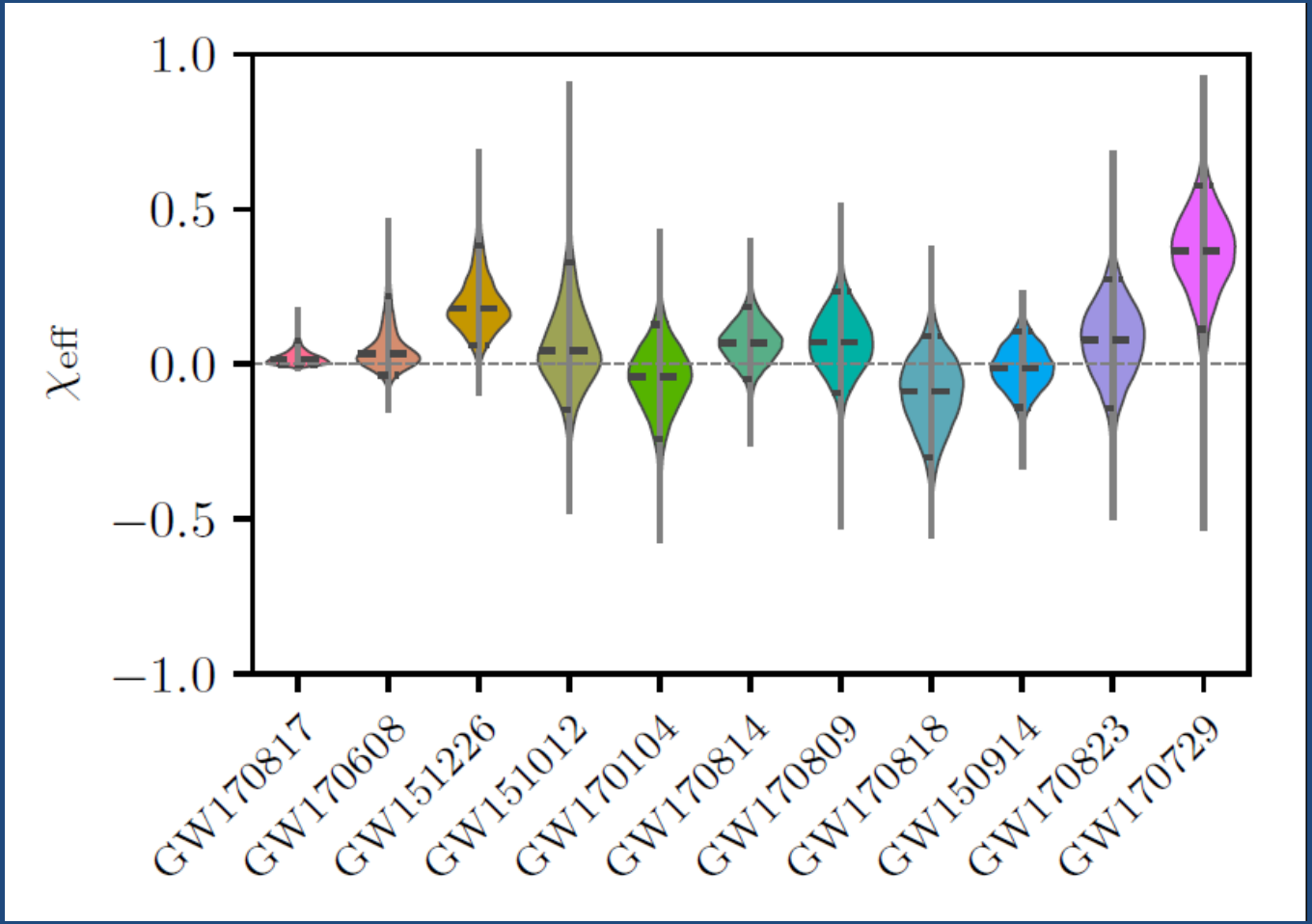
$$\chi_{\rm eff} = \frac{(m_1 \vec{\chi}_1 + m_2 \vec{\chi}_2) \cdot \hat{L}_N}{M}$$

Event	$m_1/M_\odot$	$m_2/M_\odot$	$\mathcal{M}/M_\odot$	$\chi_{\rm eff}$	$M_{\rm f}/M_\odot$	$a_{\rm f}$	$E_{\rm rad}/(M_\odot c^2)$	$\ell_{\rm peak}/({\rm erg\,s^{-1}})$	$d_L/{\rm Mpc}$	z	$\Delta\Omega/{\rm deg}^2$
GW150914	$35.6^{+4.8}_{-3.0}$	$30.6^{+3.0}_{-4.4}$	$28.6^{+1.6}_{-1.5}$	$-0.01^{+0.12}_{-0.13}$	$63.1^{+3.3}_{-3.0}$	$0.69^{+0.05}_{-0.04}$	$3.1^{+0.4}_{-0.4}$	$3.6^{+0.4}_{-0.4}\times10^{56}$	430^{+150}_{-170}	$0.09^{+0.03}_{-0.03}$	180
GW151012	$23.3^{+14.0}_{-5.5}$	$13.6^{+4.1}_{-4.8}$	$15.2^{+2.0}_{-1.1}$	$0.04^{+0.28}_{-0.19}$	$35.7^{+9.9}_{-3.8}$	$0.67^{+0.13}_{-0.11}$	$1.5^{+0.5}_{-0.5}$	$3.2^{+0.8}_{-1.7}\times10^{56}$	1060^{+540}_{-480}	$0.21^{+0.09}_{-0.09}$	1555
GW151226	$13.7^{+8.8}_{-3.2}$	$7.7^{+2.2}_{-2.6}$	$8.9^{+0.3}_{-0.3}$	$0.18^{+0.20}_{-0.12}$	$20.5^{+6.4}_{-1.5}$	$0.74^{+0.07}_{-0.05}$	$1.0^{+0.1}_{-0.2}$	$3.4^{+0.7}_{-1.7}\times10^{56}$	440^{+180}_{-190}	$0.09^{+0.04}_{-0.04}$	1033
GW170104	$31.0^{+7.2}_{-5.6}$	$20.1^{+4.9}_{-4.5}$	$21.5^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.04^{+0.17}_{-0.20}$	$49.1^{+5.2}_{-3.9}$	$0.66^{+0.08}_{-0.10}$	$2.2^{+0.5}_{-0.5}$	$3.3^{+0.6}_{-0.9}\times10^{56}$	960^{+430}_{-410}	$0.19^{+0.07}_{-0.08}$	924
GW170608	$10.9^{+5.3}_{-1.7}$	$7.6^{+1.3}_{-2.1}$	$7.9^{+0.2}_{-0.2}$	$0.03^{+0.19}_{-0.07}$	$17.8^{+3.2}_{-0.7}$	$0.69^{+0.04}_{-0.04}$	$0.9^{+0.05}_{-0.1}$	$3.5^{+0.4}_{-1.3}\times10^{56}$	320^{+120}_{-110}	$0.07^{+0.02}_{-0.02}$	396
GW170729	$50.6^{+16.6}_{-10.2}$	$34.3^{+9.1}_{-10.1}$	$35.7^{+6.5}_{-4.7}$	$0.36^{+0.21}_{-0.25}$	$80.3^{+14.6}_{-10.2}$	$0.81^{+0.07}_{-0.13}$	$4.8^{+1.7}_{-1.7}$	$4.2^{+0.9}_{-1.5}\times10^{56}$	2750^{+1350}_{-1320}	$0.48^{+0.19}_{-0.20}$	1033
GW170809	$35.2^{+8.3}_{-6.0}$	$23.8^{+5.2}_{-5.1}$	$25.0^{+2.1}_{-1.6}$	$0.07^{+0.16}_{-0.16}$	$56.4^{+5.2}_{-3.7}$	$0.70^{+0.08}_{-0.09}$	$2.7^{+0.6}_{-0.6}$	$3.5^{+0.6}_{-0.9}\times10^{56}$	990^{+320}_{-380}	$0.20^{+0.05}_{-0.07}$	340
GW170814	$30.7^{+5.7}_{-3.0}$	$25.3^{+2.9}_{-4.1}$	$24.2^{+1.4}_{-1.1}$	$0.07^{+0.12}_{-0.11}$	$53.4^{+3.2}_{-2.4}$	$0.72^{+0.07}_{-0.05}$	$2.7^{+0.4}_{-0.3}$	$3.7^{+0.4}_{-0.5}\times10^{56}$	580^{+160}_{-210}	$0.12^{+0.03}_{-0.04}$	87
GW170817	$1.46^{+0.12}_{-0.10}$	$1.27^{+0.09}_{-0.09}$	$1.186^{+0.001}_{-0.001}$	$0.00^{+0.02}_{-0.01}$	≤ 2.8	≤ 0.89	≥ 0.04	$\geq 0.1\times10^{56}$	40^{+10}_{-10}	$0.01^{+0.00}_{-0.00}$	16
GW170818	$35.5^{+7.5}_{-4.7}$	$26.8^{+4.3}_{-5.2}$	$26.7^{+2.1}_{-1.7}$	$-0.09^{+0.18}_{-0.21}$	$59.8^{+4.8}_{-3.8}$	$0.67^{+0.07}_{-0.08}$	$2.7^{+0.5}_{-0.5}$	$3.4^{+0.5}_{-0.7}\times10^{56}$	1020^{+430}_{-360}	$0.20^{+0.07}_{-0.07}$	39
GW170823	$39.6^{+10.0}_{-6.6}$	$29.4^{+6.3}_{-7.1}$	$29.3^{+4.2}_{-3.2}$	$0.08^{+0.20}_{-0.22}$	$65.6^{+9.4}_{-6.6}$	$0.71^{+0.08}_{-0.10}$	$3.3^{+0.9}_{-0.8}$	$3.6^{+0.6}_{-0.9}\times10^{56}$	1850^{+840}_{-840}	$0.34^{+0.13}_{-0.14}$	1651

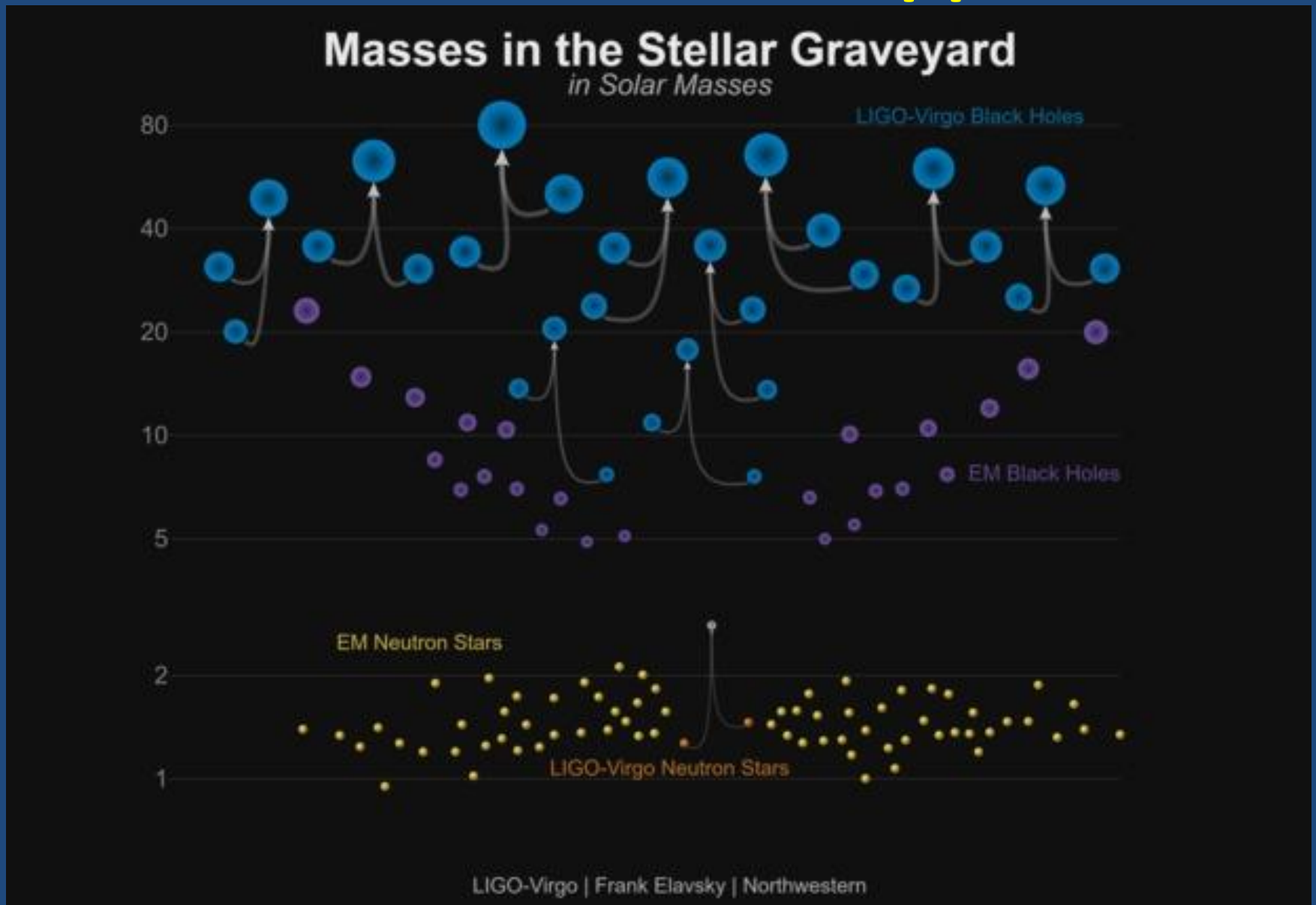
LIGO ЧД: массы



LIGO ЧД: эффективные спины

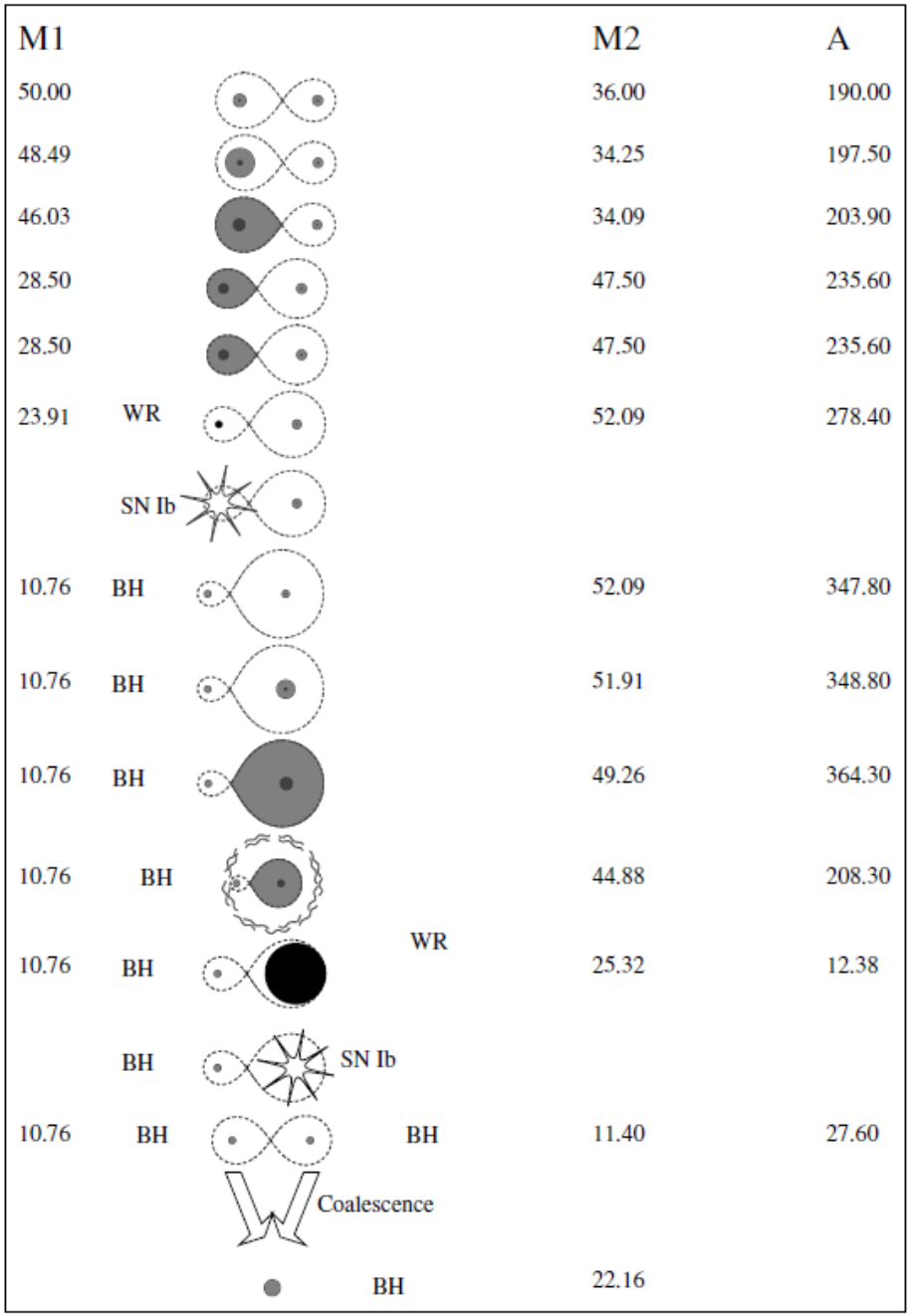


Массы НЗ и ЧД


Masses in the Stellar Graveyard
in Solar Masses
80
40
20
10
5
2
1
LIGO-Virgo Black Holes
EM Black Holes
EM Neutron Stars
LIGO-Virgo Neutron Stars
LIGO-Virgo | Frank Elavsky | Northwestern

Астрофизика

- 2 канала образования:
  - из эволюции массивных двойных систем (Тутуков, Юнгельсон 1973, Липунов. ПК. Прохоров 1987…)
  - Динамические захваты в плотных звездных скоплениях с последующим выбросом из скоплений (Sigurdsson, Hernquist 1993)
- Как различить? ➔ Если кик небольшой, то по ориентации спинов ЧД (в случае захватов угол может быть произвольным



- Параметры образования ЧД: масса звезды ГП, начиная которой образуется ЧД
- Доля массы, коллапсирующая в ЧД

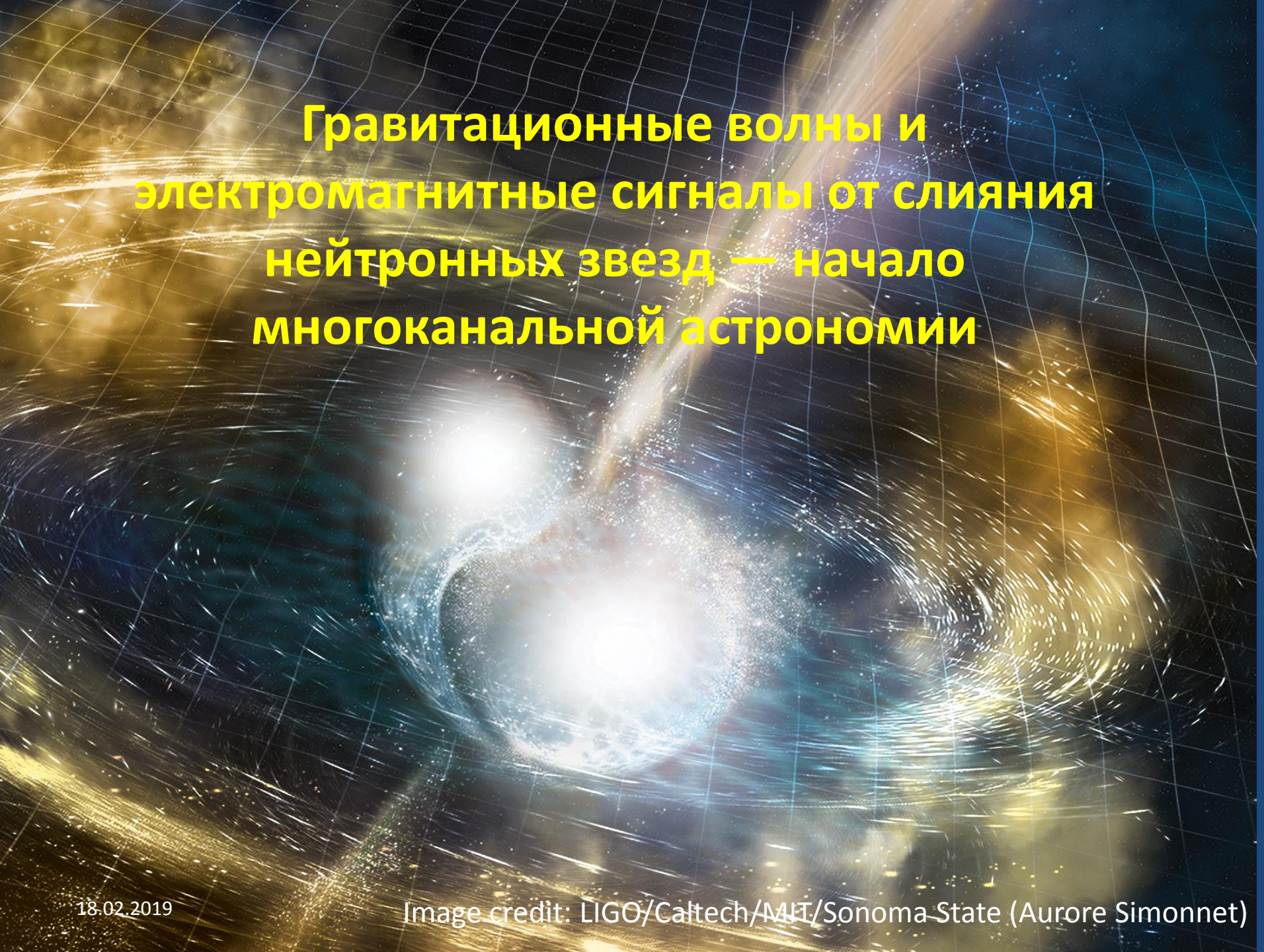
$$k_{BH} = M_{BH}/M_*$$

- Возможный кик

$$\frac{w_{BH}}{w_{NS}} = \frac{M_* - M_{BH}}{M_* - M_{OV}} = \frac{1 - k_{BH}}{1 - M_{OV}/M_*}$$

Липунов, ПК, Прохоров 1987 MNRAS)

Гравитационные волны и электромагнитные сигналы от слияния нейтронных звезд — начало многоканальной астрономии



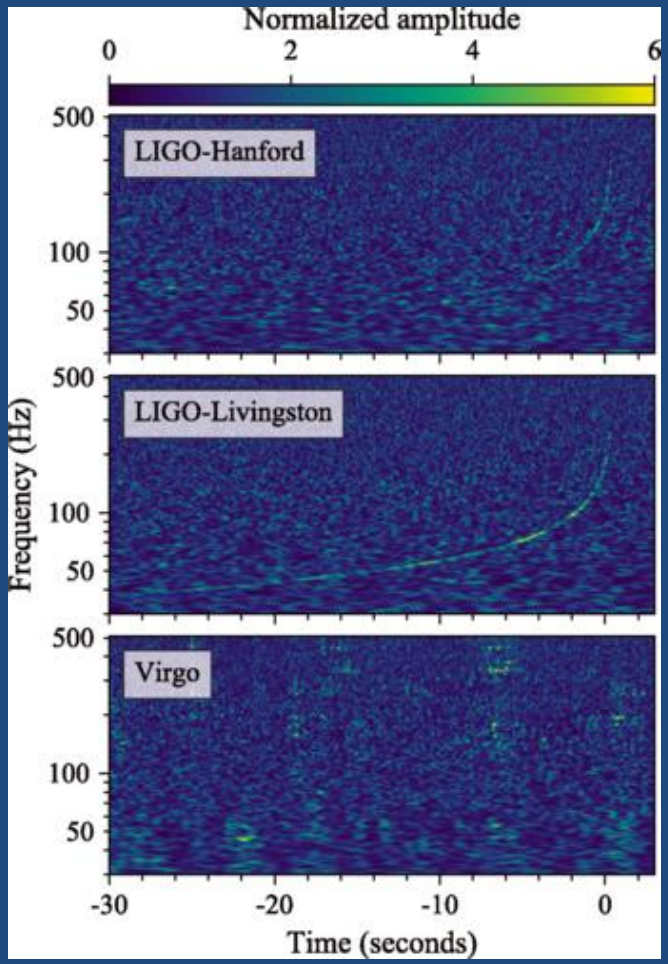
18.02.2019

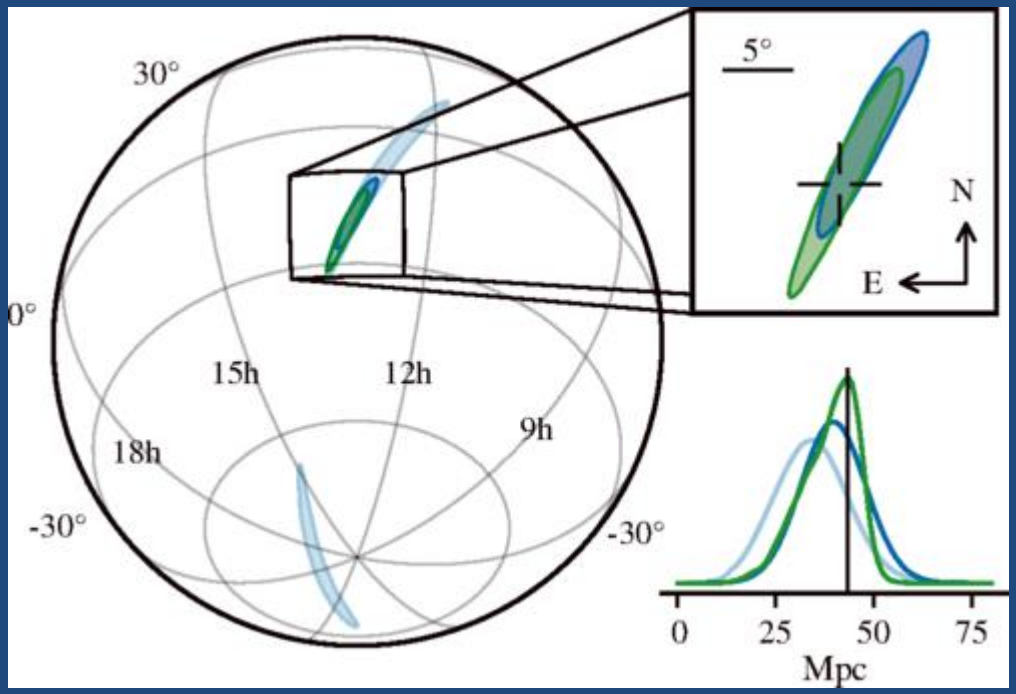
Image credit: LIGO/Caltech/MIT/Sonoma State (Aurore Simonnet)

Двойные нейтронные звезды

- Горизонт «видимости» LIGO (2017) для ДНЗ ~80 Мпк
- GW170817 – совпадение по времени с коротким гамма-всплеском GRB170817A
- Гамма-излучение впервые предсказано в работе С.И.Блинникова,И.Д.Новикова, Т.Переводчиковой и А.Г.Полнарева в 1984 г. (ПАЖ 10, 422)
- Локализация оптического источника в галактике NGC4993 (~40 Мпк)
- Первое событие от сливающихся двойных НЗ – 17 августа 2017 г. (GW170817)

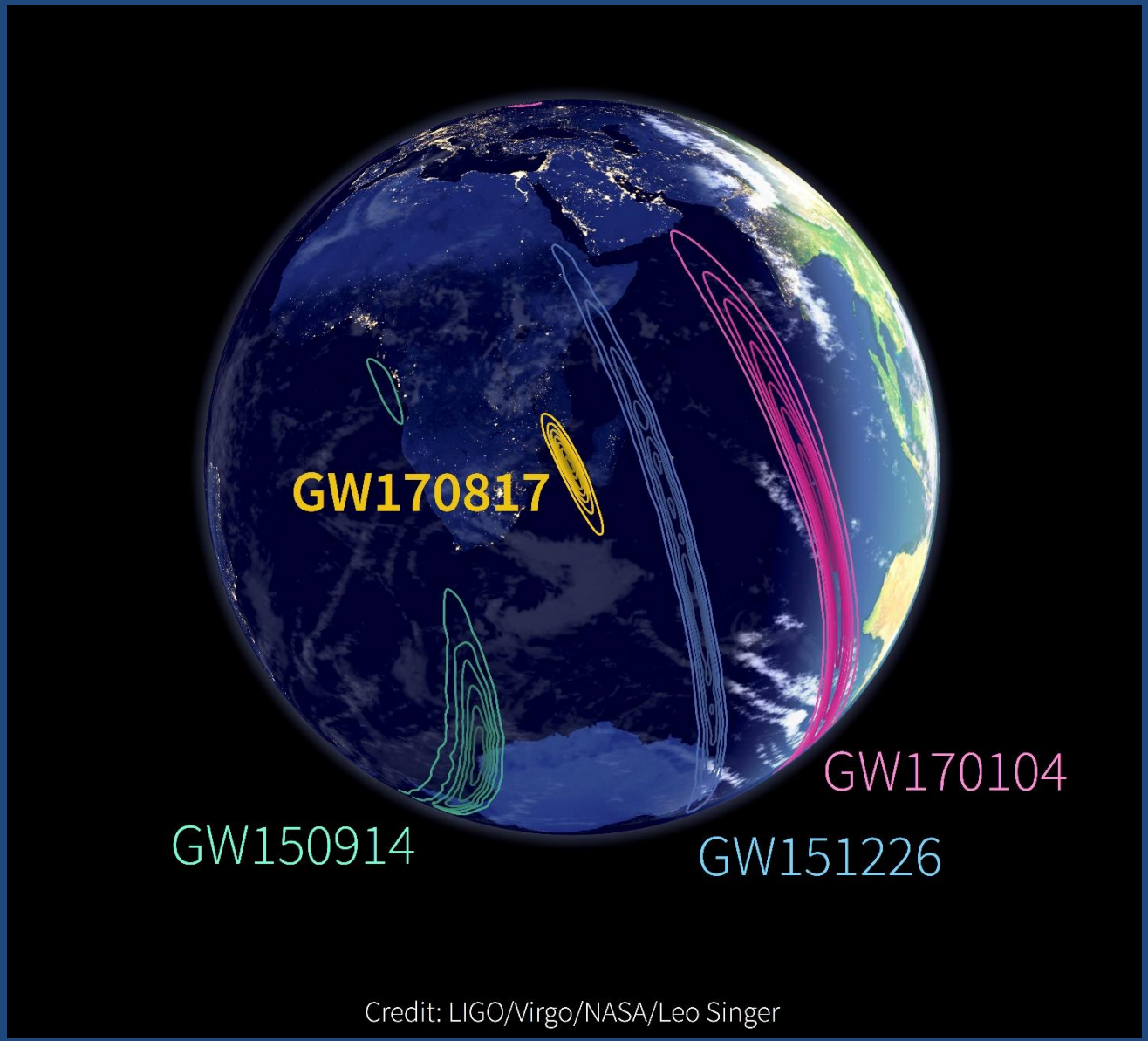
GW170817





PRL 119, 161101 (2017)

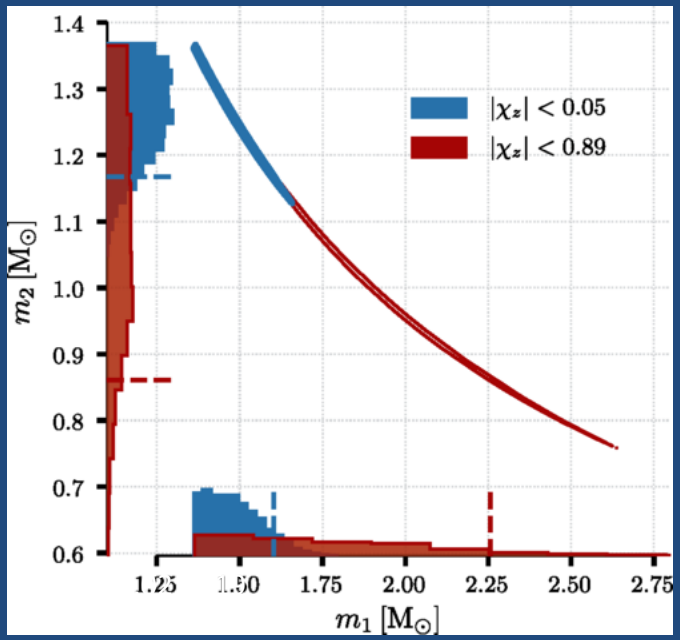
Локализация 2LIGO+VIRGO



Credit: LIGO/Virgo/NASA/Leo Singer

Параметры системы из анализа ГВ сигнала

	Low-spin priors ($\lvert\chi\rvert \leq 0.05$)	High-spin priors ($\lvert\chi\rvert \leq 0.89$)
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 $m_{\rm tot}$	$2.74^{+0.04}_{-0.01} M_\odot$	$2.82^{+0.47}_{-0.09} M_\odot$
Radiated energy $E_{\rm rad}$	$> 0.025 M_\odot c^2$	$> 0.025 M_\odot c^2$
Luminosity distance $D_{\rm L}$	40^{+8}_{-14} Mpc	40^{+8}_{-14} Mpc
Viewing angle Θ	$\leq 55°$	$\leq 56°$
Using NGC 4993 location	$\leq 28°$	$\leq 28°$
Combined dimensionless tidal deformability $\tilde{\Lambda}$	≤ 800	≤ 700
Dimensionless tidal deformability $\Lambda(1.4M_\odot)$	≤ 800	≤ 1400



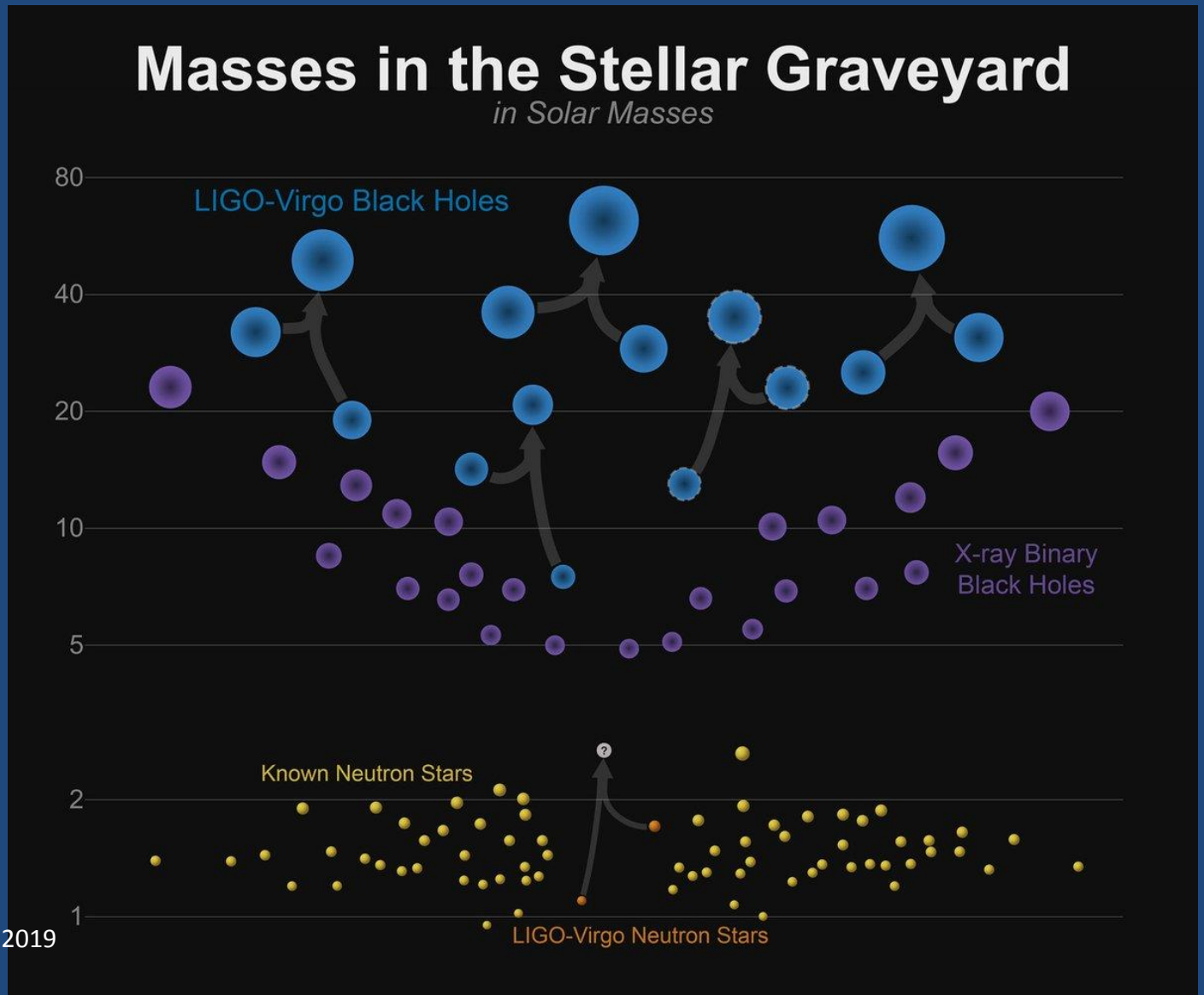
$$\tilde{\Lambda} = \frac{16}{13}\frac{(m_1 + 12m_2)m_1^4\Lambda_1 + (m_2 + 12m_1)m_2^4\Lambda_2}{(m_1 + m_2)^5}$$

$$H_0 = 70^{+12}_{-8}\ \mathrm{km\,s^{-1}\,Mpc^{-1}}$$

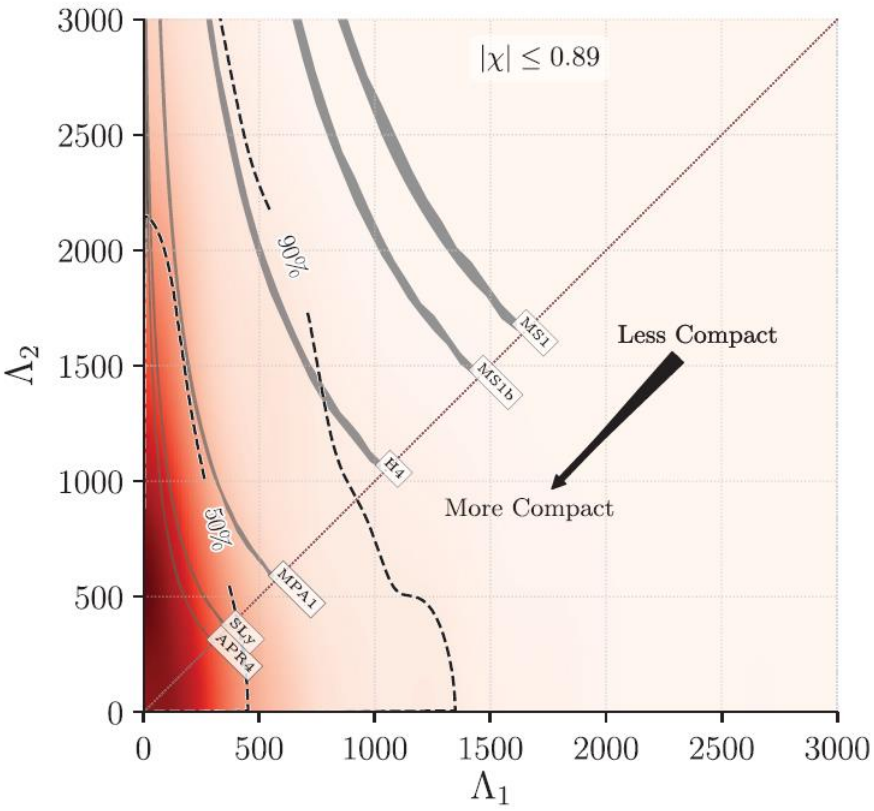
Merging rate $1540^{+3200}_{-1220}\ \mathrm{Gpc^{-3}yr^{-1}}$

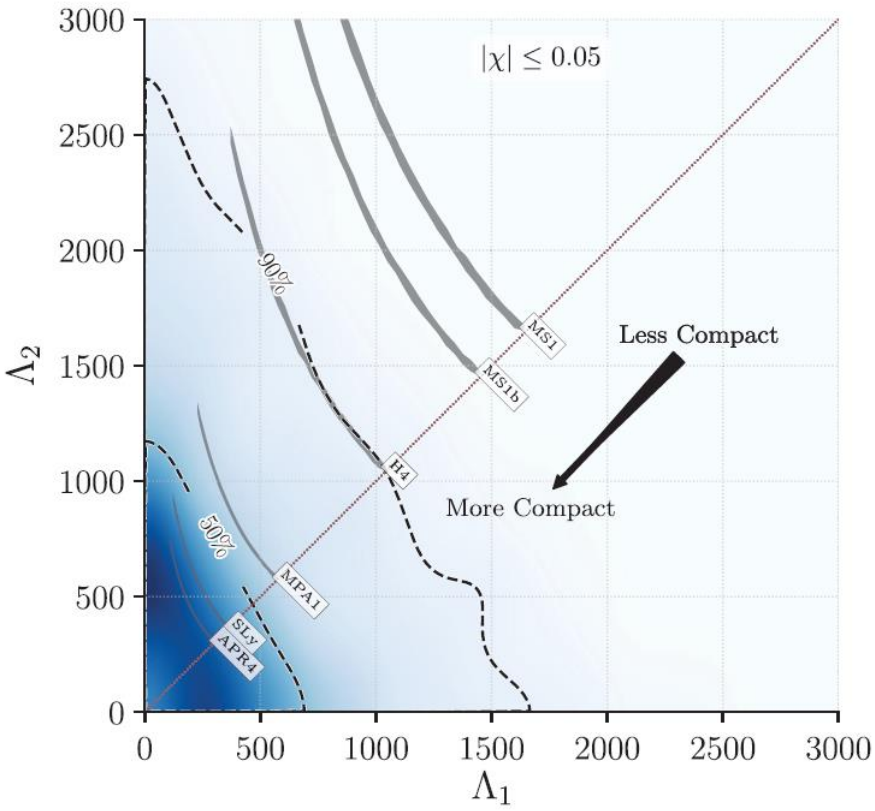
PRL 119, 161101 (2017)

Массы НЗ и ЧД


Masses in the Stellar Graveyard
in Solar Masses
80
40
20
10
5
2
1
LIGO-Virgo Black Holes
X-ray Binary
Black Holes
Known Neutron Stars
?
LIGO-Virgo Neutron Stars

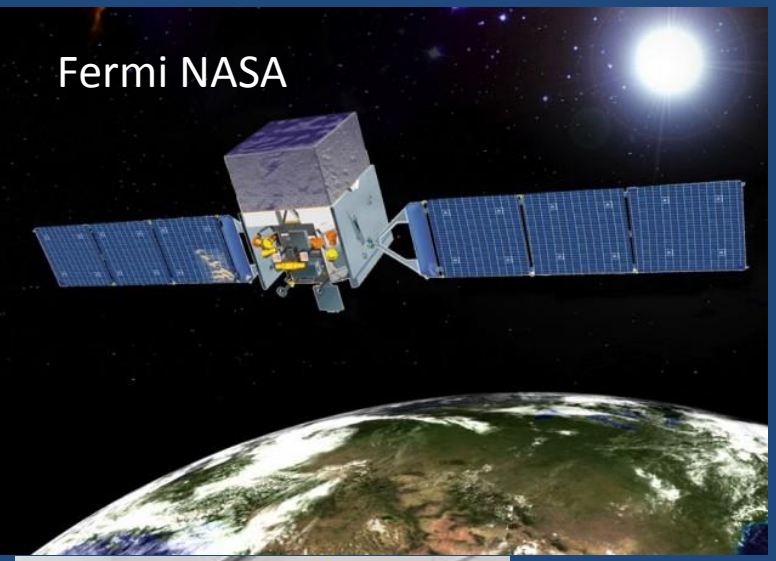
Приливная деформация

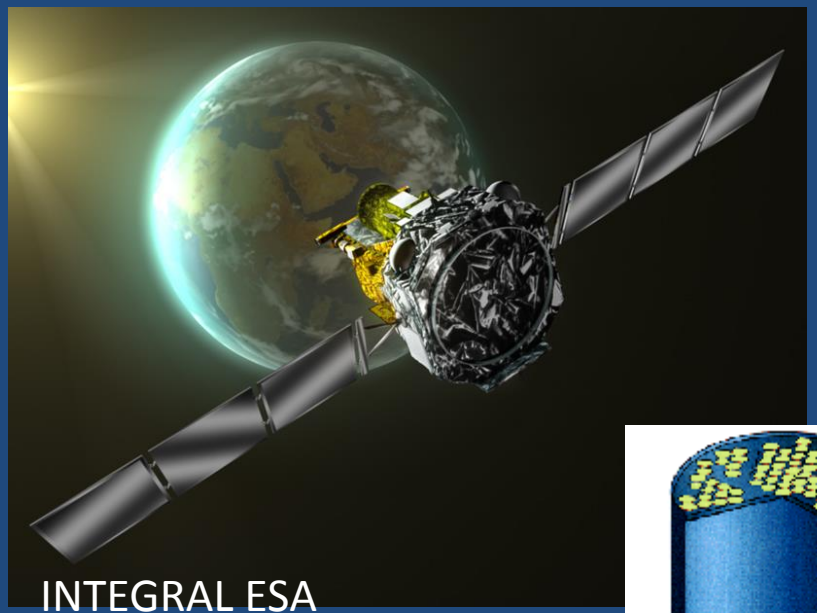




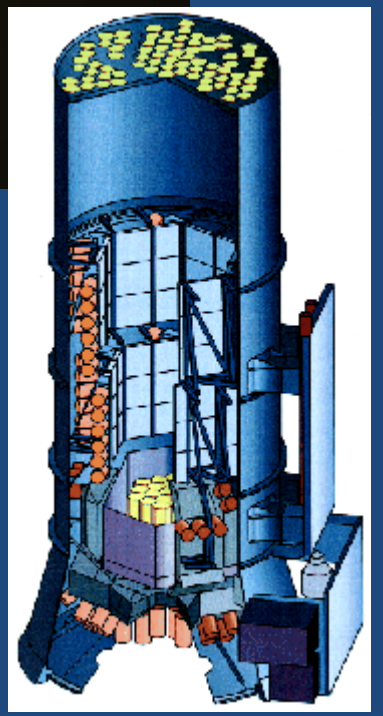
$$k_2(R/m)^5$$

Открытие гамма-излучения: GRB170817A



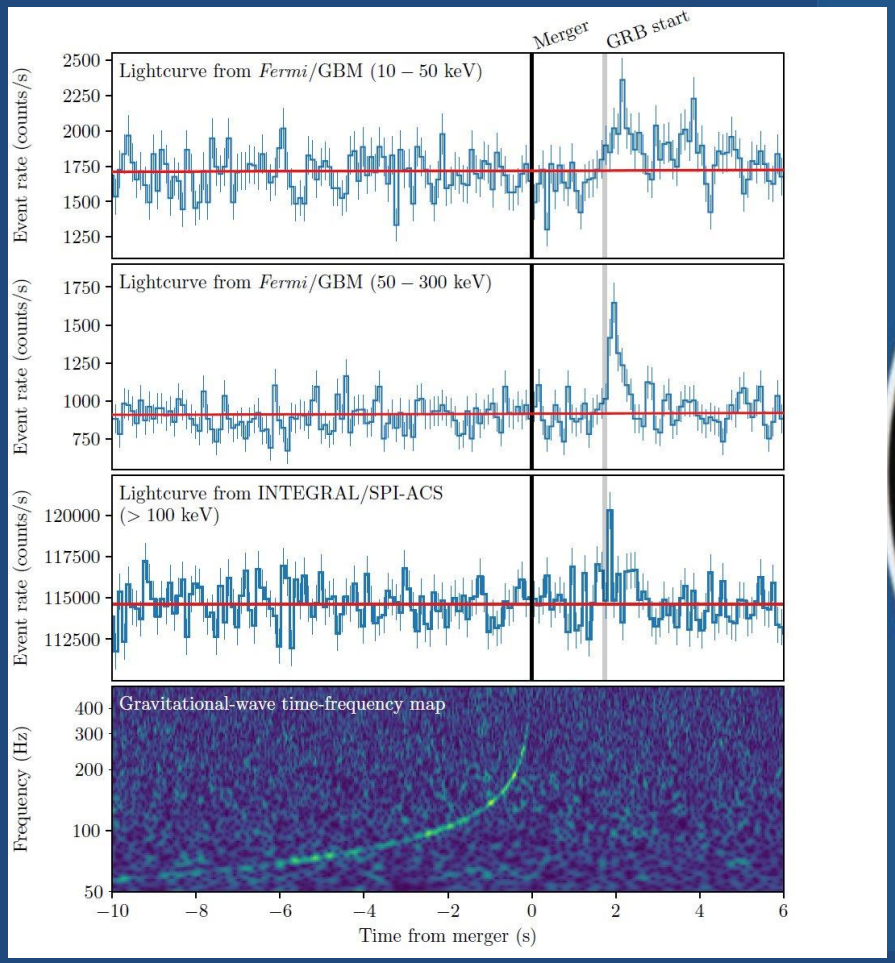


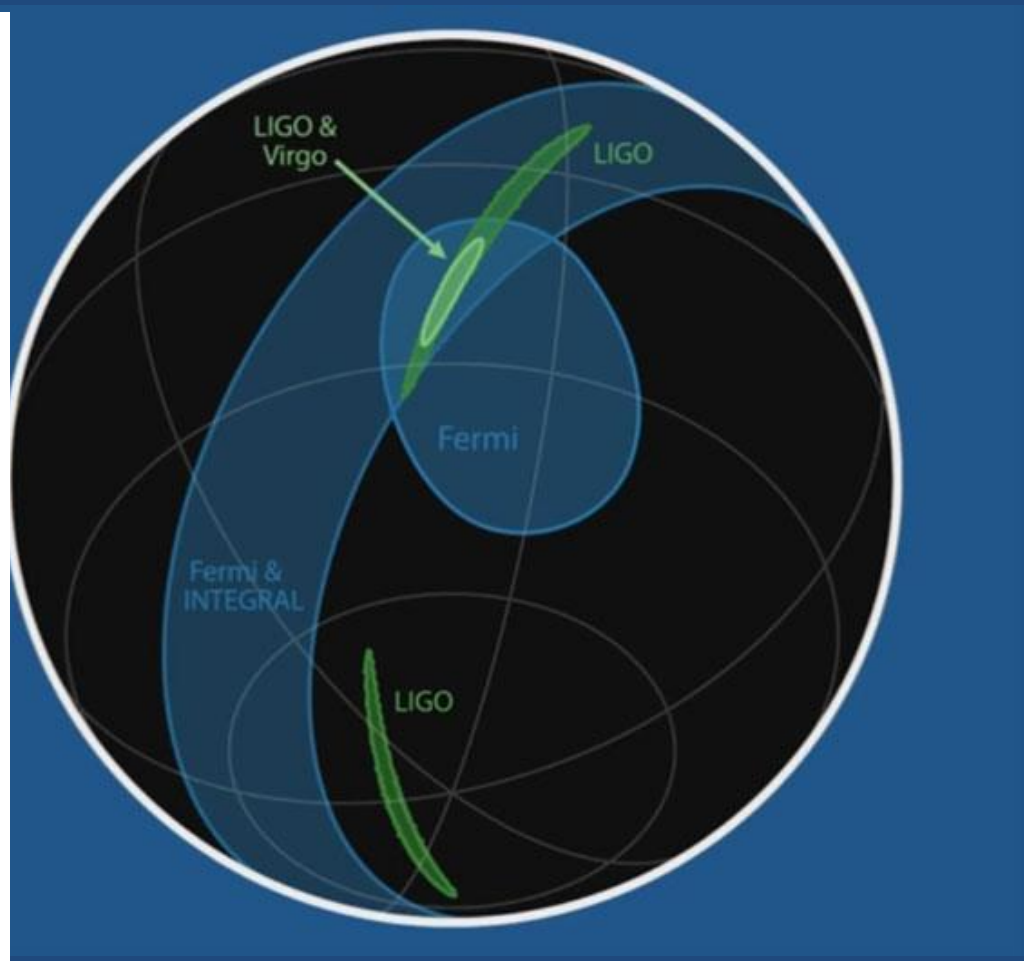
Fermi GBM



INTEGRAL SPI-ACS

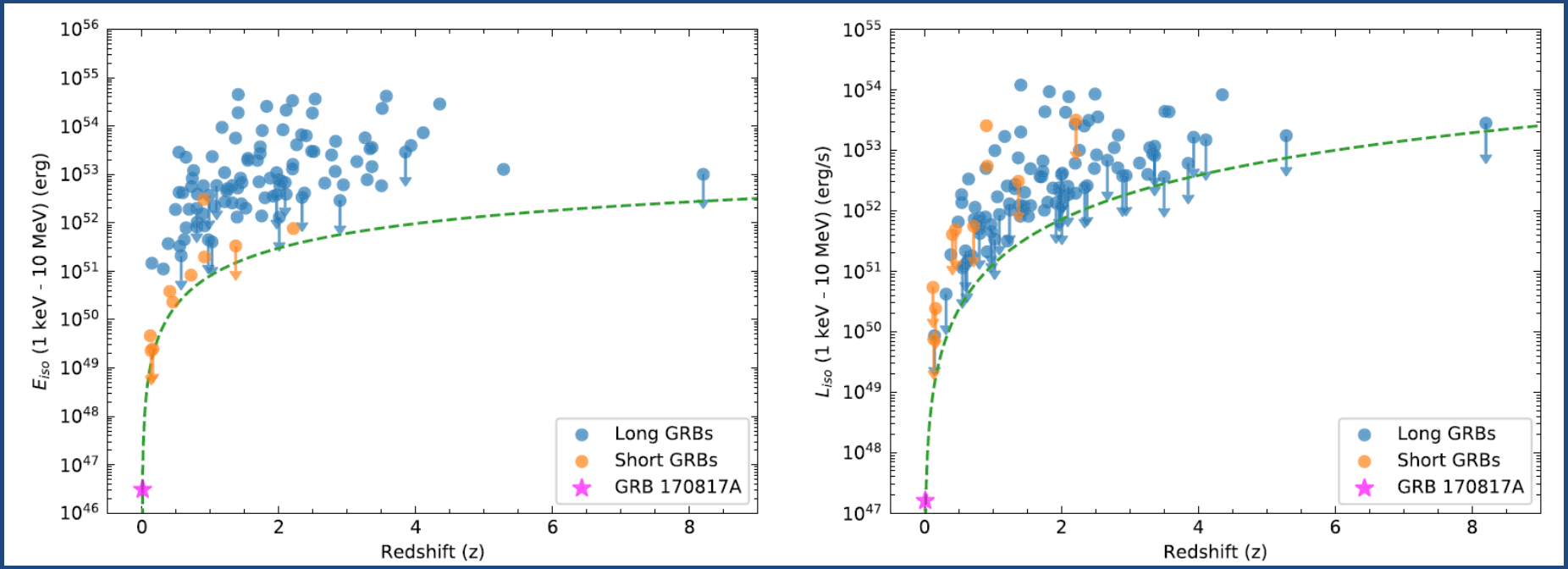
GRB170817A и GW170817





$$L_{\rm iso} = (1.6 \pm 0.6) \times 10^{47}\,{\rm erg\,s^{-1}}$$

GRB170817A


E_{iso} (1 keV - 10 MeV) (erg)
Redshift (z)
Long GRBs
Short GRBs
GRB 170817A
L_{iso} (1 keV - 10 MeV) (erg/s)
Redshift (z)
Long GRBs
Short GRBs
GRB 170817A

Фундаментальные выводы

- 1) Скорость GW и EM: $\Delta v/v_{\rm EM} \approx v_{\rm EM}\,\Delta t/D$

Задержка EM 10 с $-3 \times 10^{-15} \leqslant \dfrac{\Delta v}{v_{\rm EM}} \leqslant +7 \times 10^{-16}$ Мгнов., D>26 Мпк

- 2) Принцип эквивалентности

Задержка Шапиро $\delta t_{\rm S} = -\dfrac{1+\gamma}{c^3}\displaystyle\int_{r_{\rm e}}^{r_{\rm o}} U(\boldsymbol{r}(l))\,dl$

MW: M=2.5x10^{11}M$_\odot$
R<100 кпк

$-2.6 \times 10^{-7} \leqslant \gamma_{\rm GW} - \gamma_{\rm EM} \leqslant 1.2 \times 10^{-6}$

Ср. Кассини: 2.1+/-2.3 x 10^{-5}

ApJL, 848, L13, 2017

- 3) Число дополнительных измерений

$$h \propto \frac{1}{d_L^{\gamma}} \qquad \gamma = \frac{D-2}{2}$$

H_0 prior km s^{-1} Mpc^{-1}	γ	D
$H_0 = 73.24 \pm 1.74$ [22]	$1.01^{+0.04}_{-0.05}$	$4.02^{+0.07}_{-0.10}$
$H_0 = 67.74 \pm 0.46$ [21]	$0.99^{+0.03}_{-0.05}$	$3.98^{+0.07}_{-0.09}$

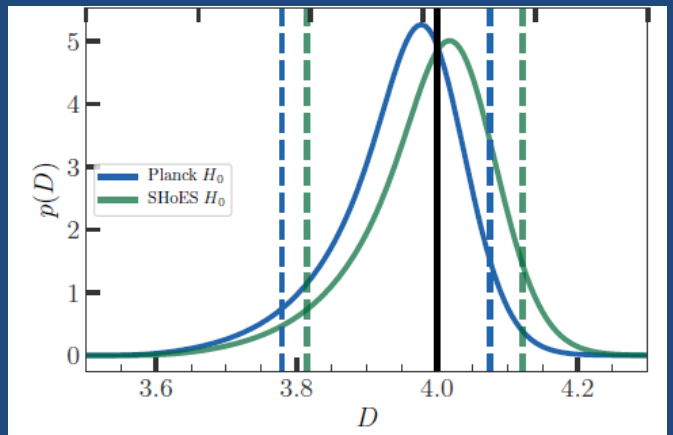
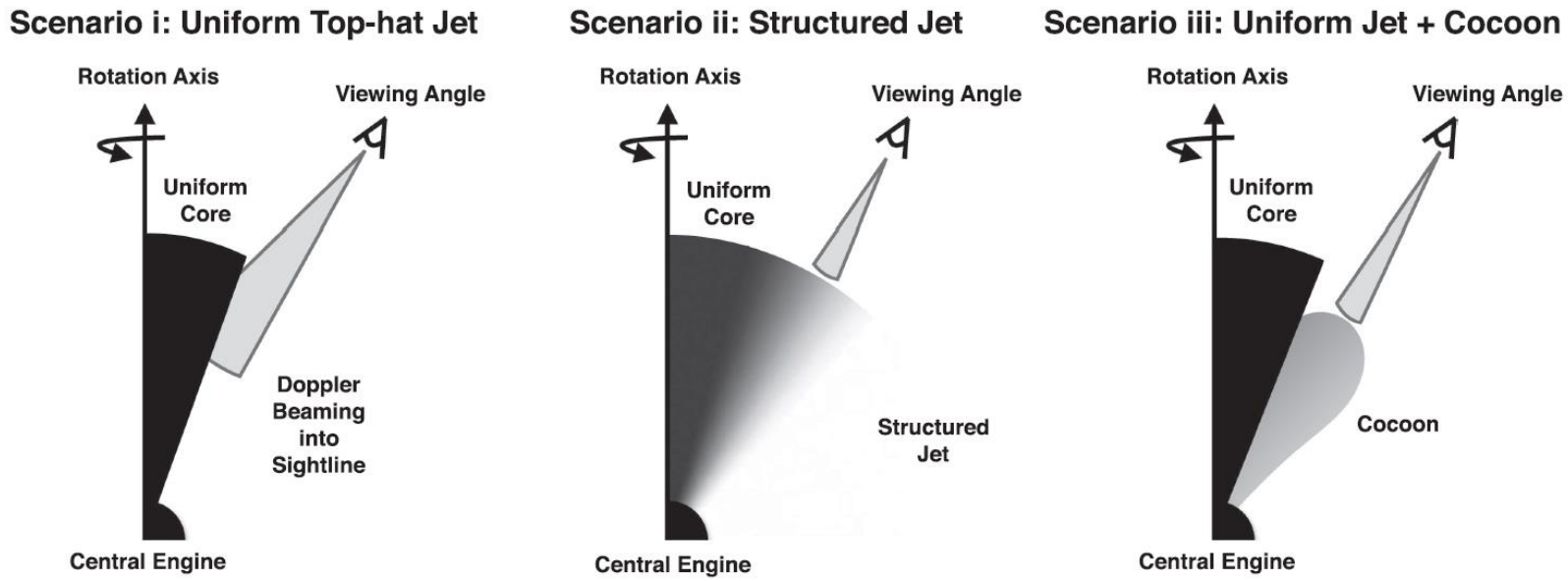


FIG. 1. Posterior probability distribution for the number of spacetime dimensions, D, using the GW distance posterior to GW170817 and the measured Hubble velocity to its host galaxy, NGC 4993, assuming the H_0 measurements from [21] (blue curve) and [22] (green curve). The dotted lines show

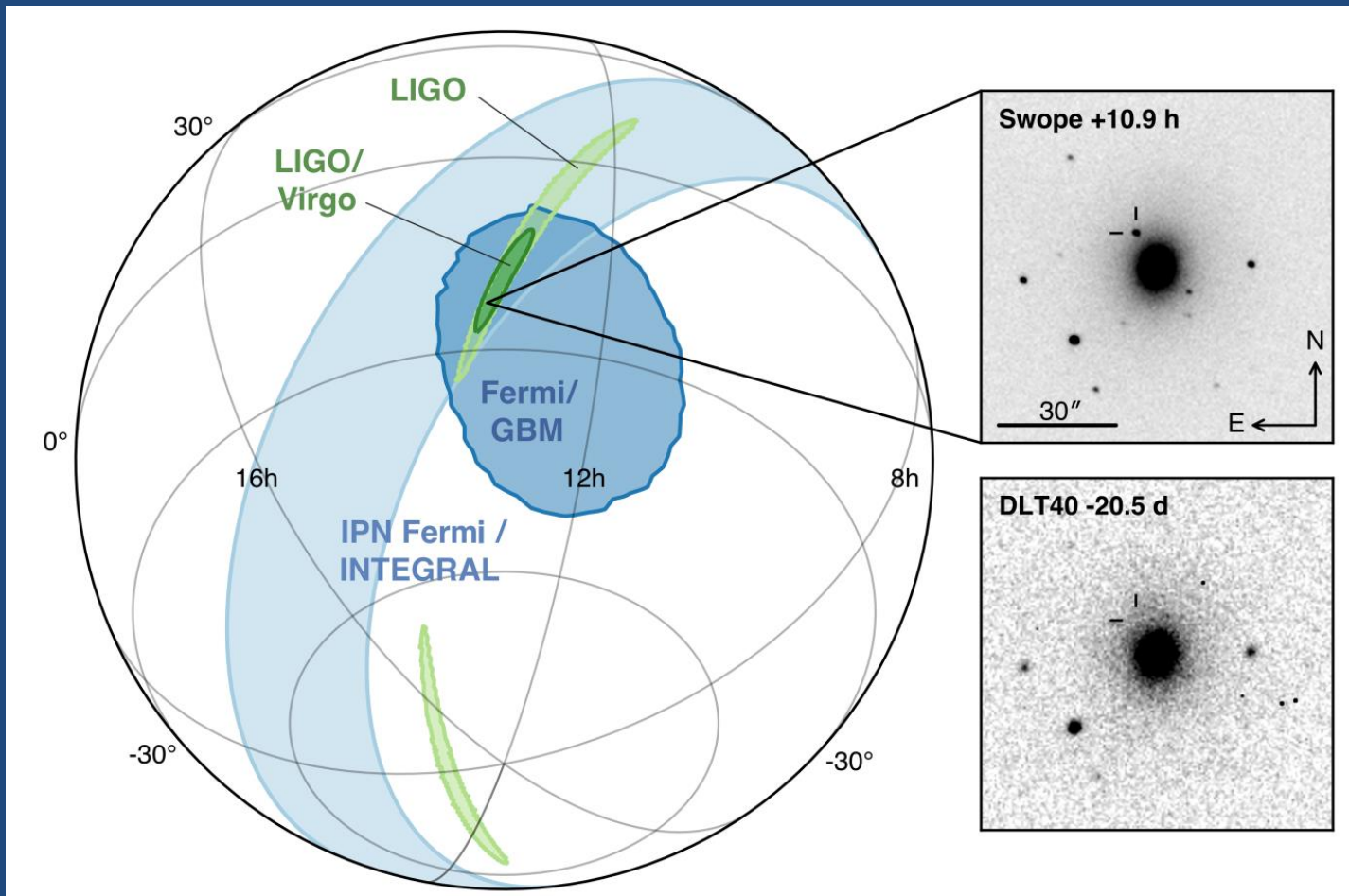
arXiv:1801.08160

Физика Гамма-всплесков

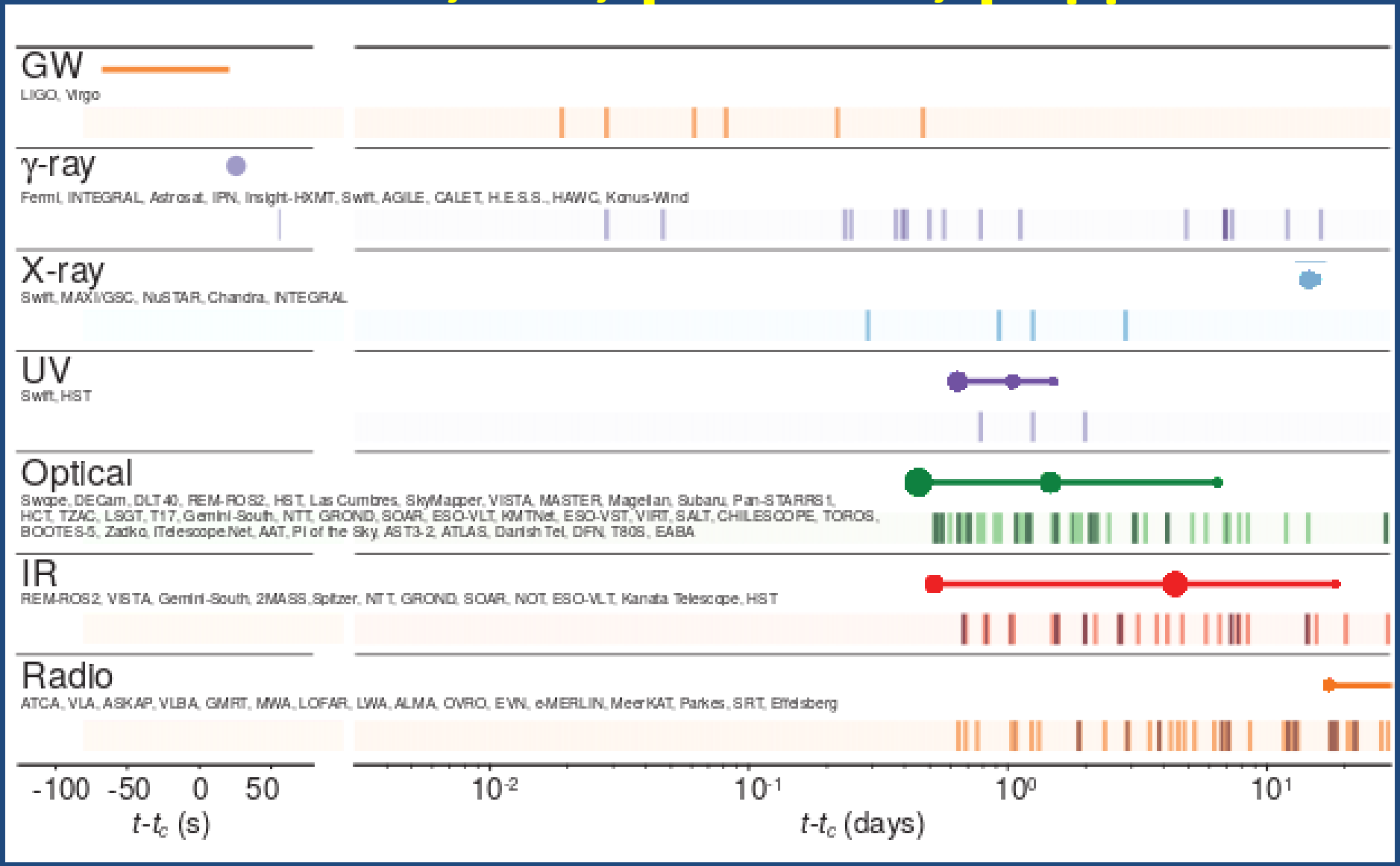
The Astrophysical Journal Letters, 848:L13 (27pp), 2017 October 20 Abbott et al.

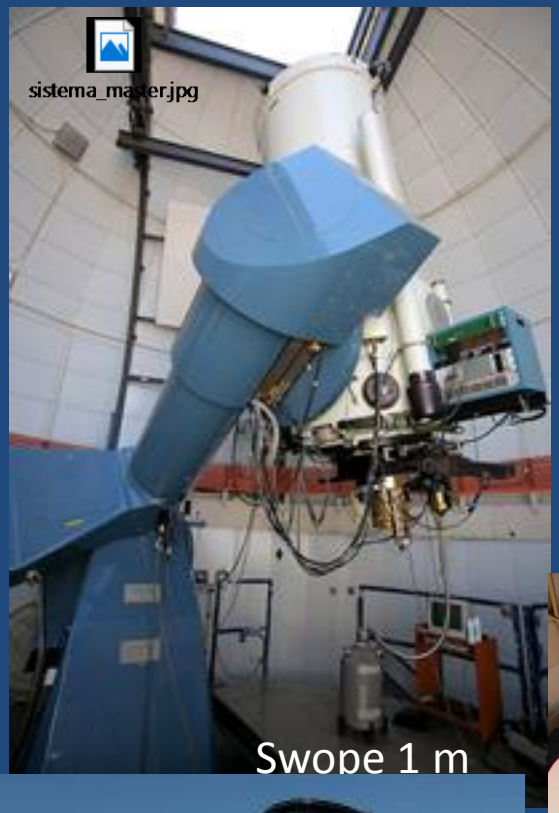


Многоволновые наблюдения

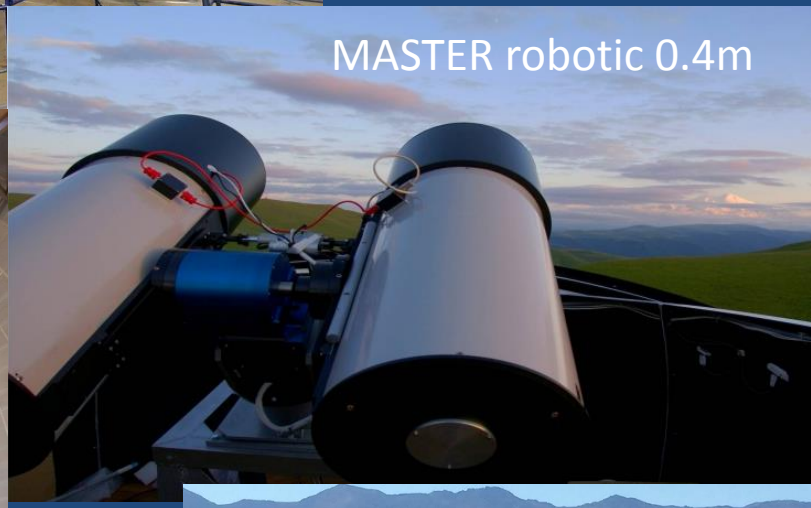


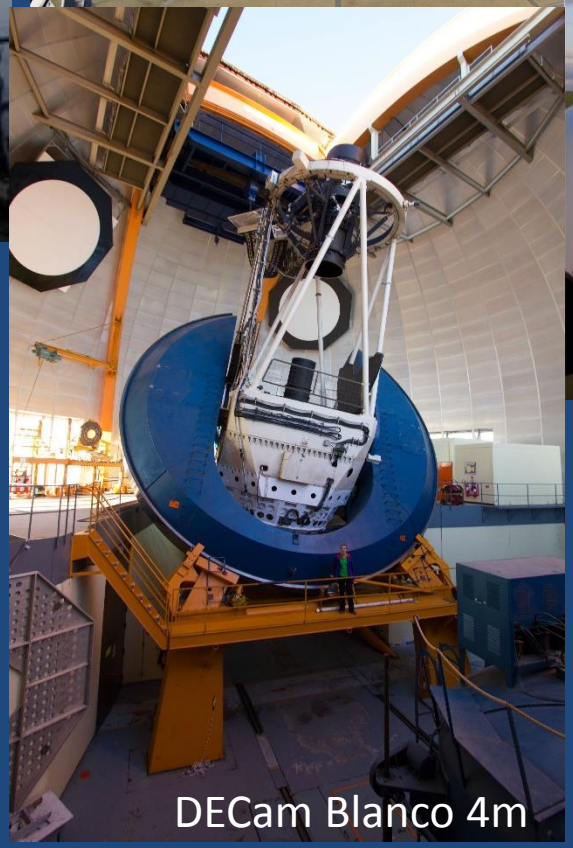
Оптика, ИК, рентген, радио




sistema_master.jpg
Swope 1 m

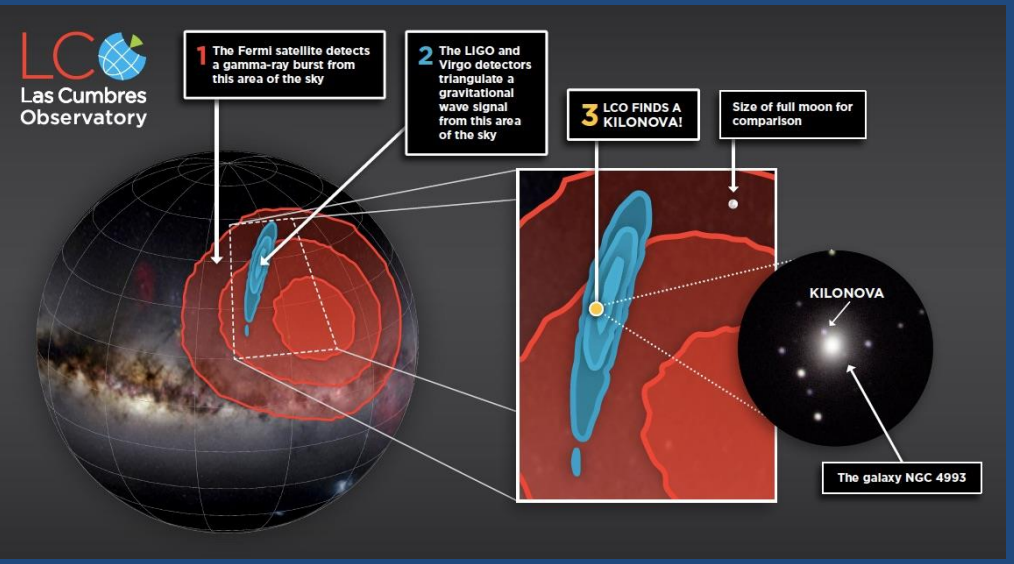
VISTA 4.1 m

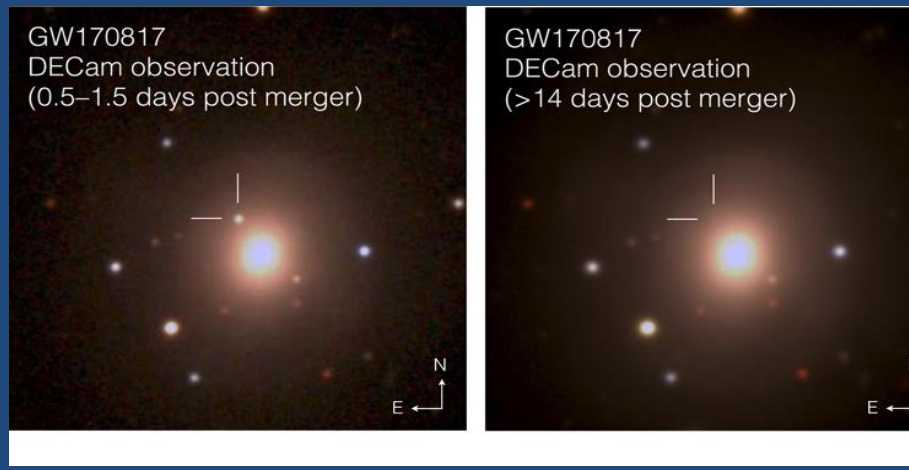

MASTER robotic 0.4m

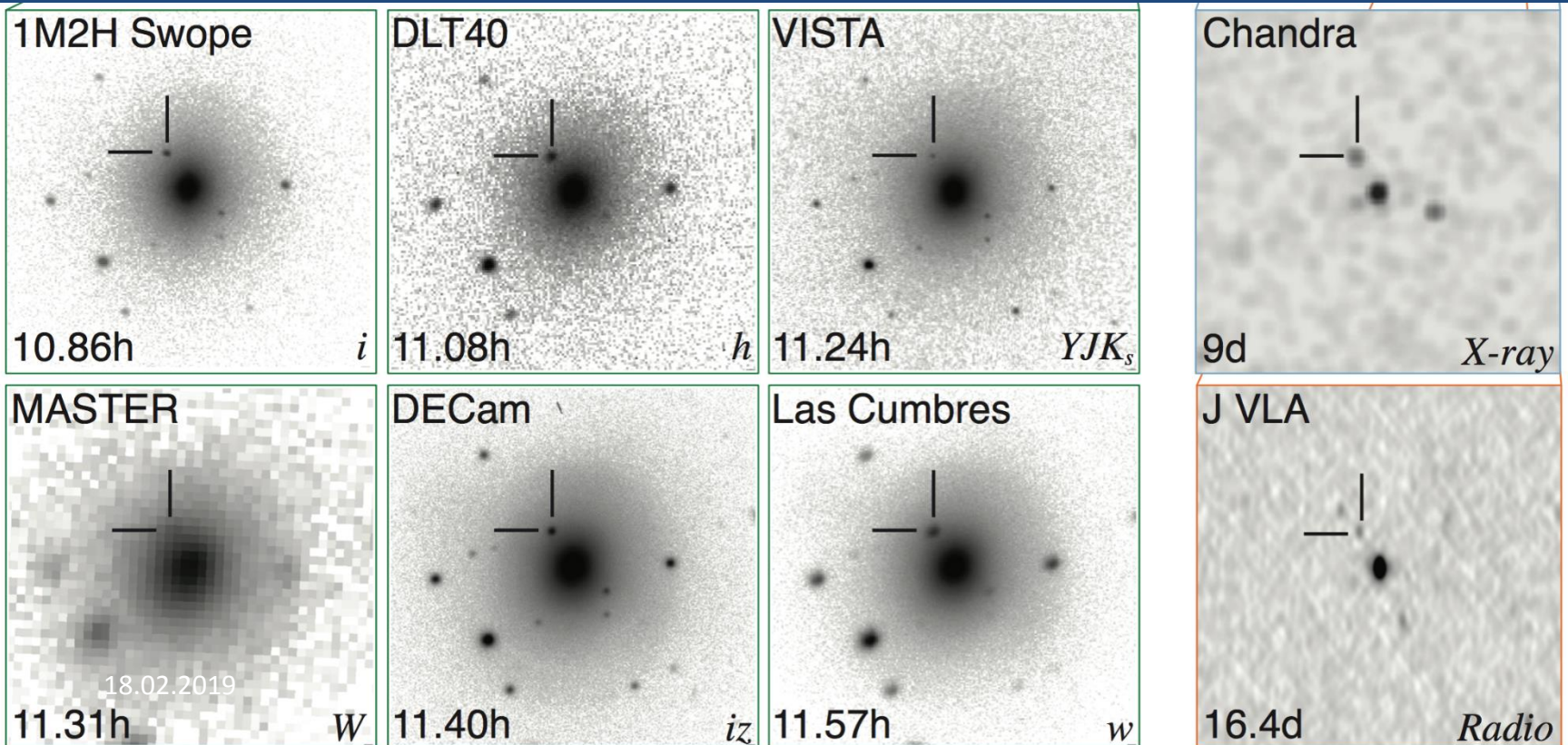

DECam Blanco 4m

18.02.2019
PROMPT 0.41 m

Las Cumbres Chile 0.4m


LCO
Las Cumbres Observatory
1 The Fermi satellite detects a gamma-ray burst from this area of the sky
2 The LIGO and Virgo detectors triangulate a gravitational wave signal from this area of the sky
3 LCO FINDS A KILONOVA!
Size of full moon for comparison
KILONOVA
The galaxy NGC 4993

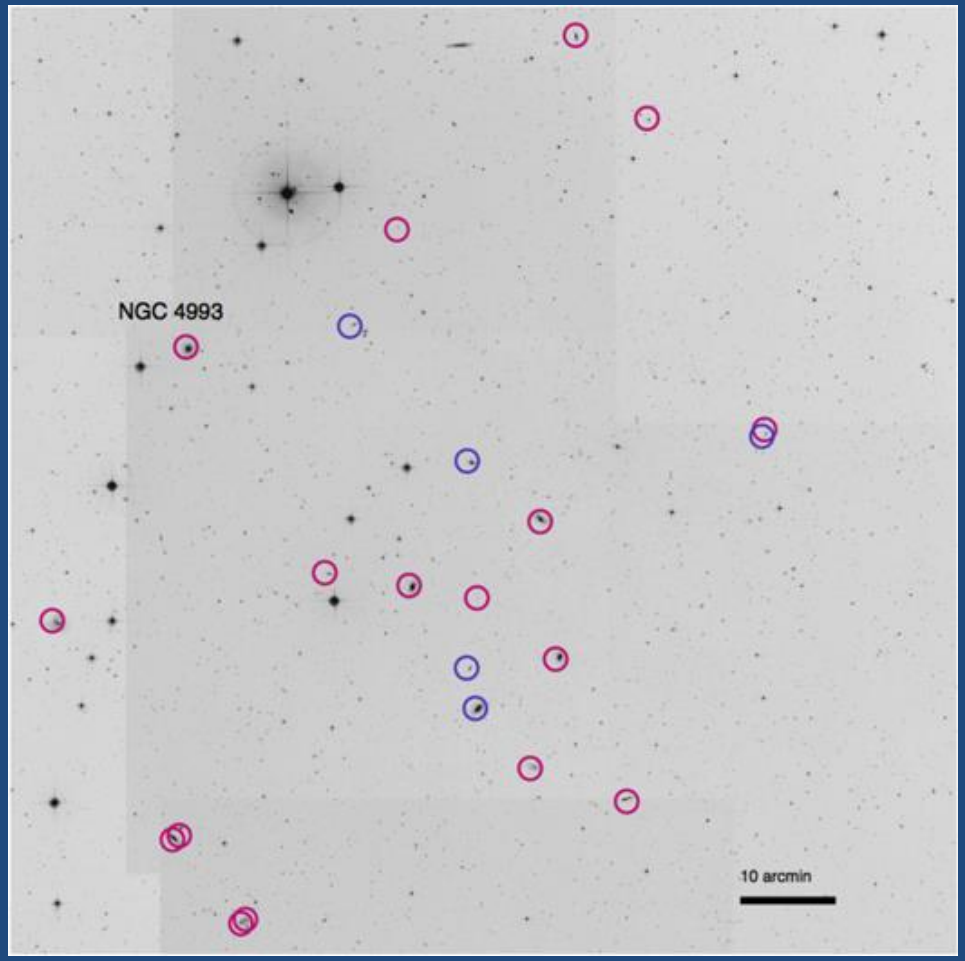

GW170817
DECam observation
(0.5–1.5 days post merger)
N
E
GW170817
DECam observation
(>14 days post merger)
E


1M2H Swope
10.86h
i
DLT40
11.08h
h
VISTA
11.24h
YJK_s
Chandra
9d
X-ray
MASTER
11.31h
W
DECam
11.40h
iz
Las Cumbres
11.57h
w
J VLA
16.4d
Radio

NGC 4993

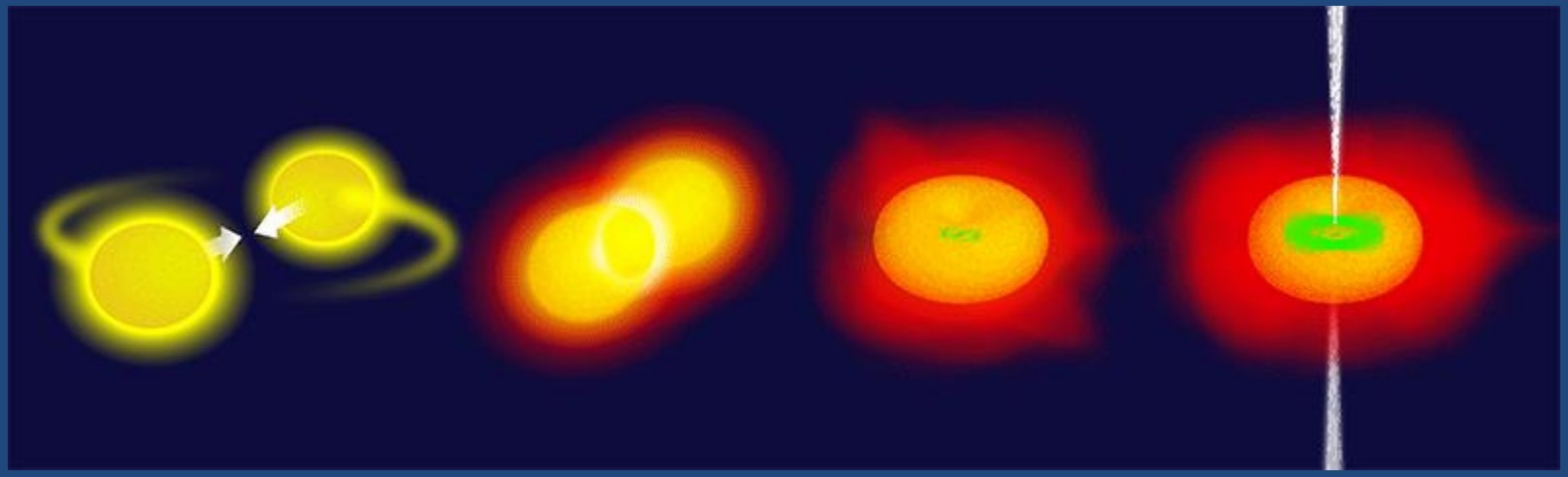
NGC 4993 -- Galaxy in Group of Galaxies (46 gal)

- 40 Мпк, E/S0

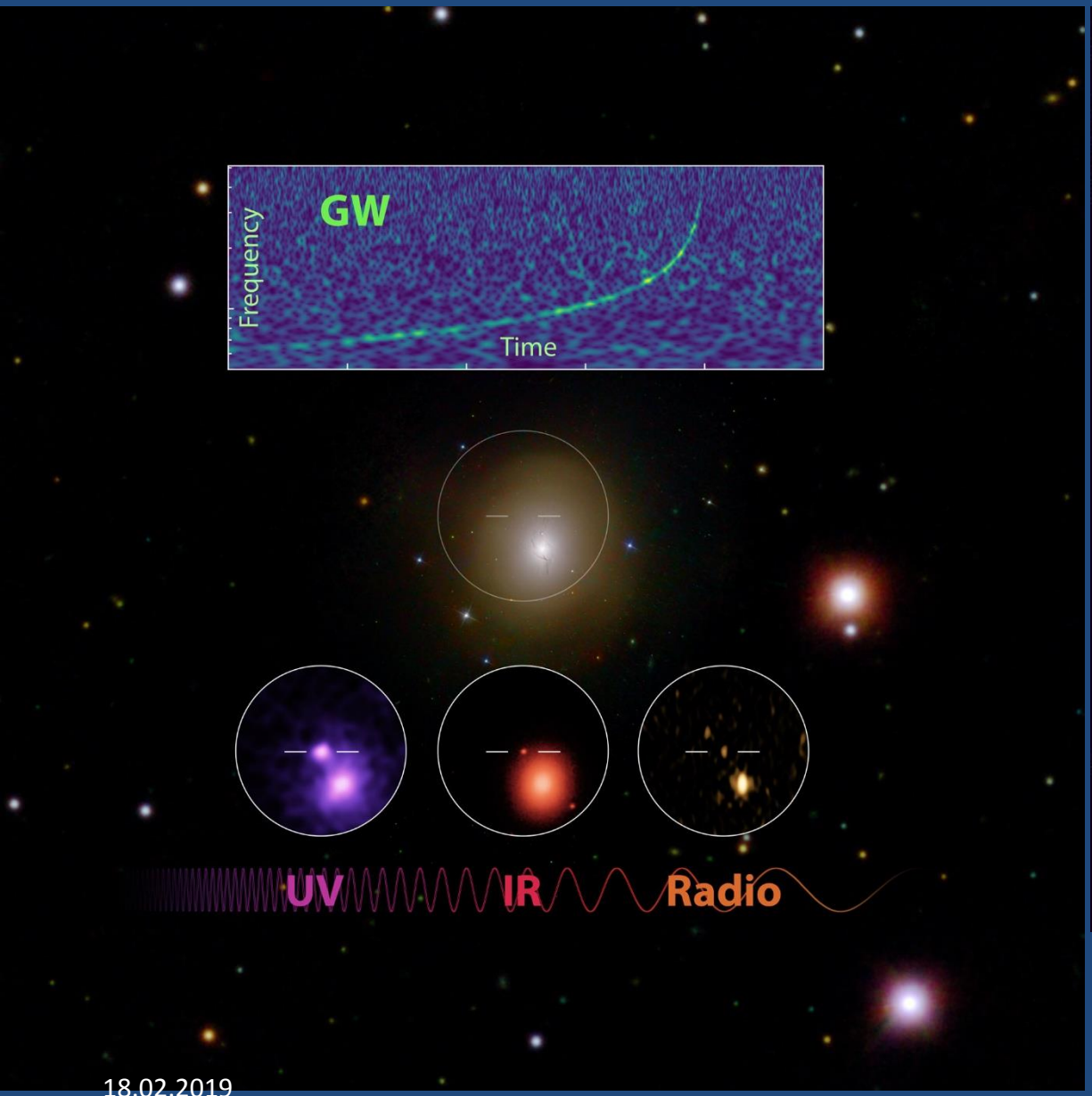


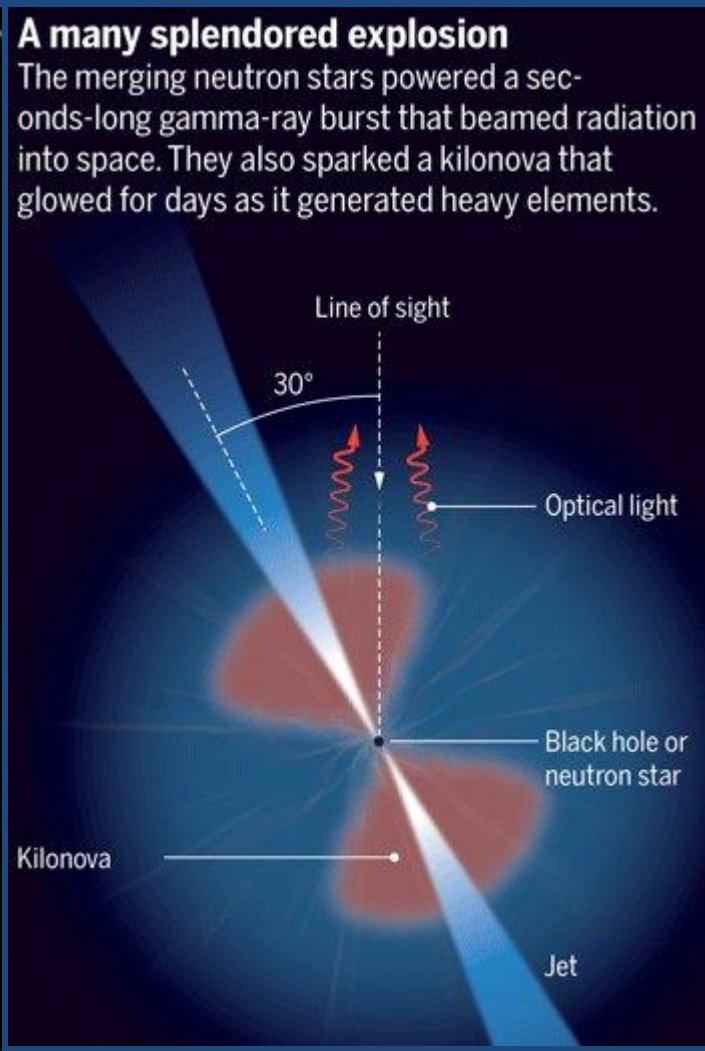
18.02.2019

Модель: слияние двойных НЗ

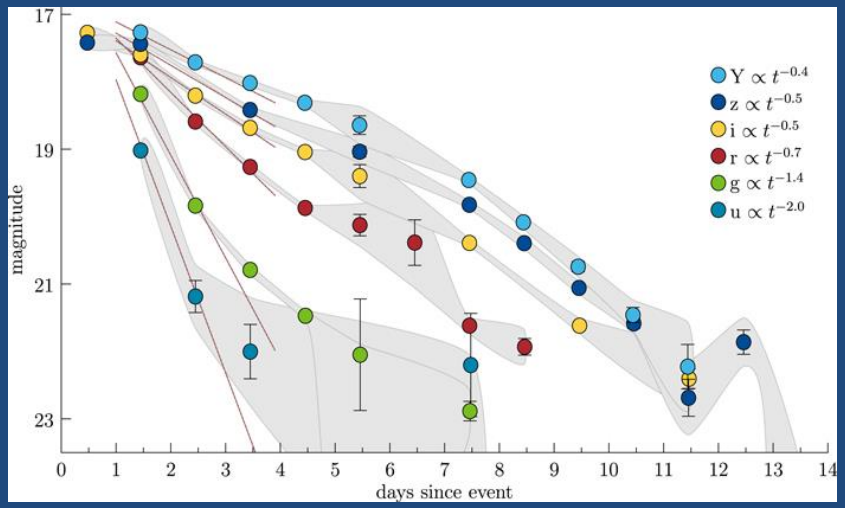


[Credit: APS/Alan Stonebraker, adapted from simulations by NASA/AEI/ZIB/M. Koppitz and L. Rezzolla]

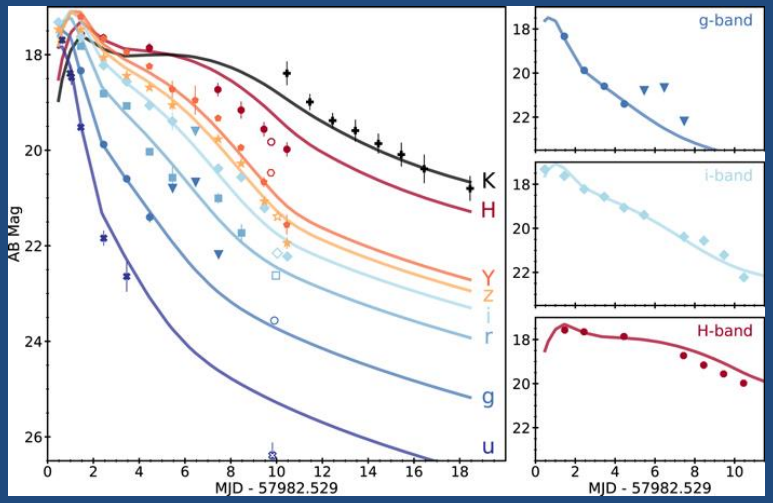

GW
Frequency
Time
UV
IR
Radio

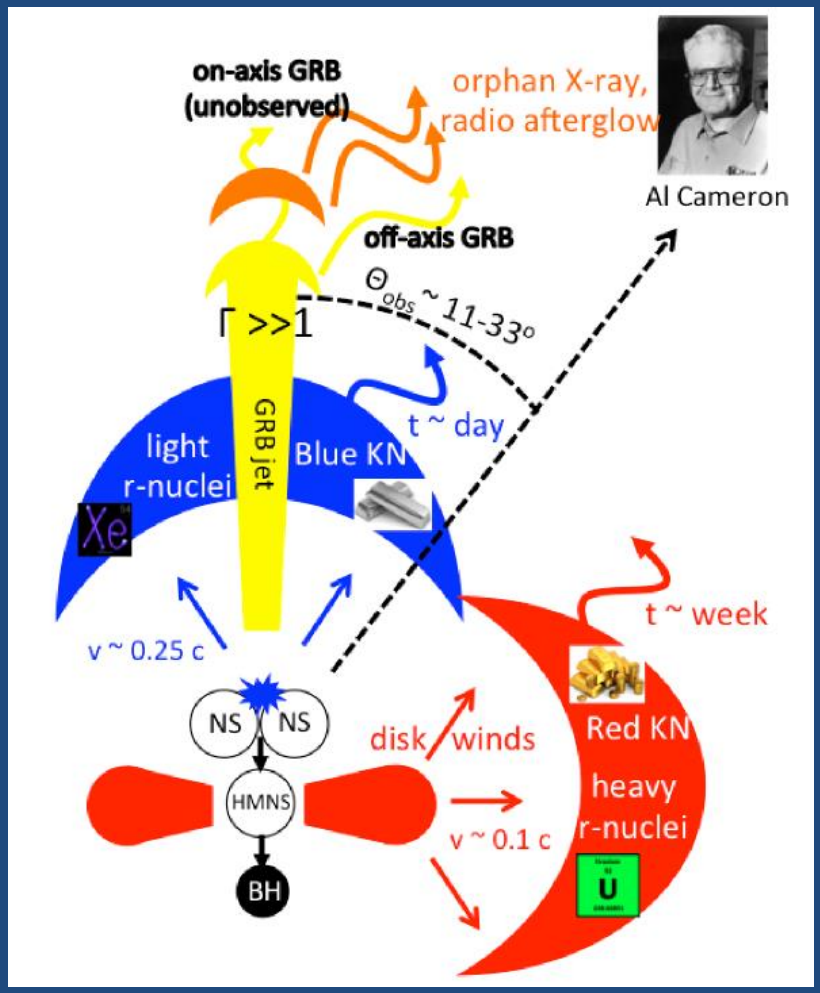

A many splendored explosion
The merging neutron stars powered a seconds-long gamma-ray burst that beamed radiation into space. They also sparked a kilonova that glowed for days as it generated heavy elements.
Line of sight
30°
Optical light
Black hole or neutron star
Kilonova
Jet

Килоновая (x1000 новая)



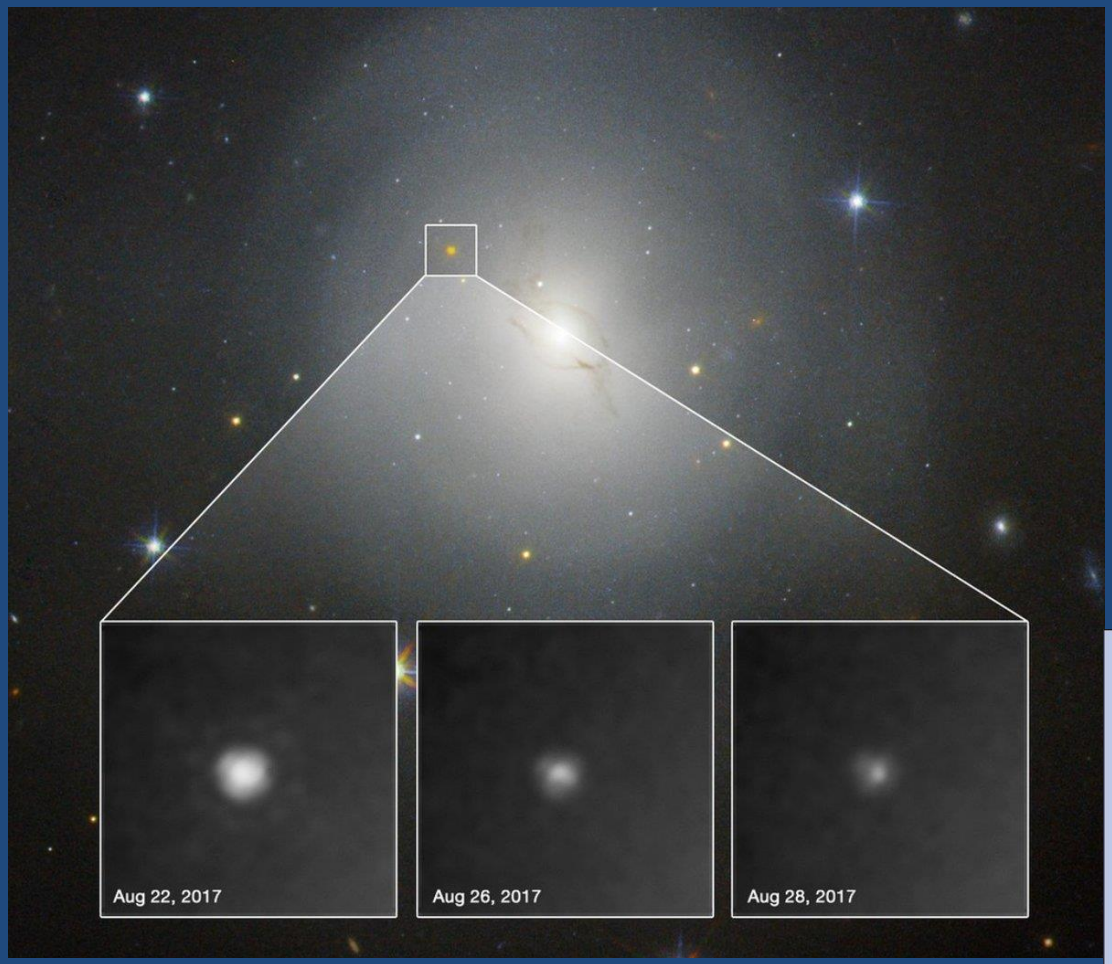
M. Soares-Santos et al. 2017

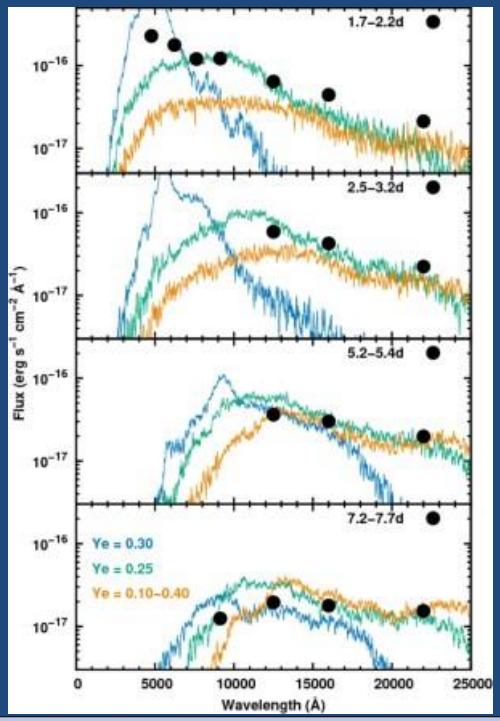


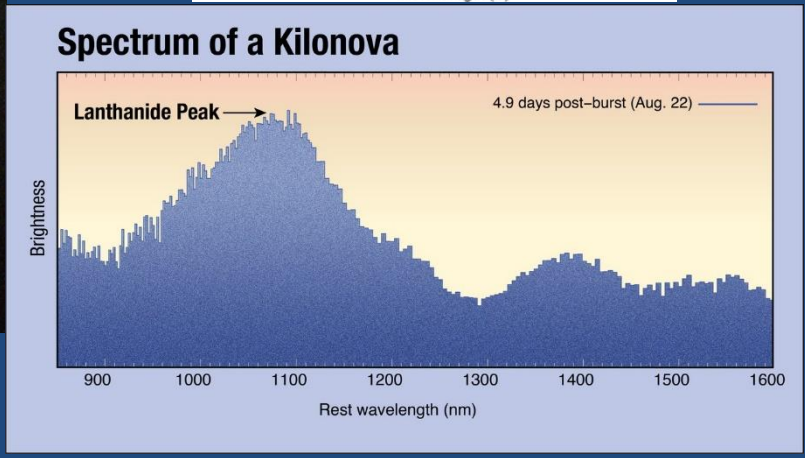


Metzger 2017

Оптические и ИК наблюдения килоновой

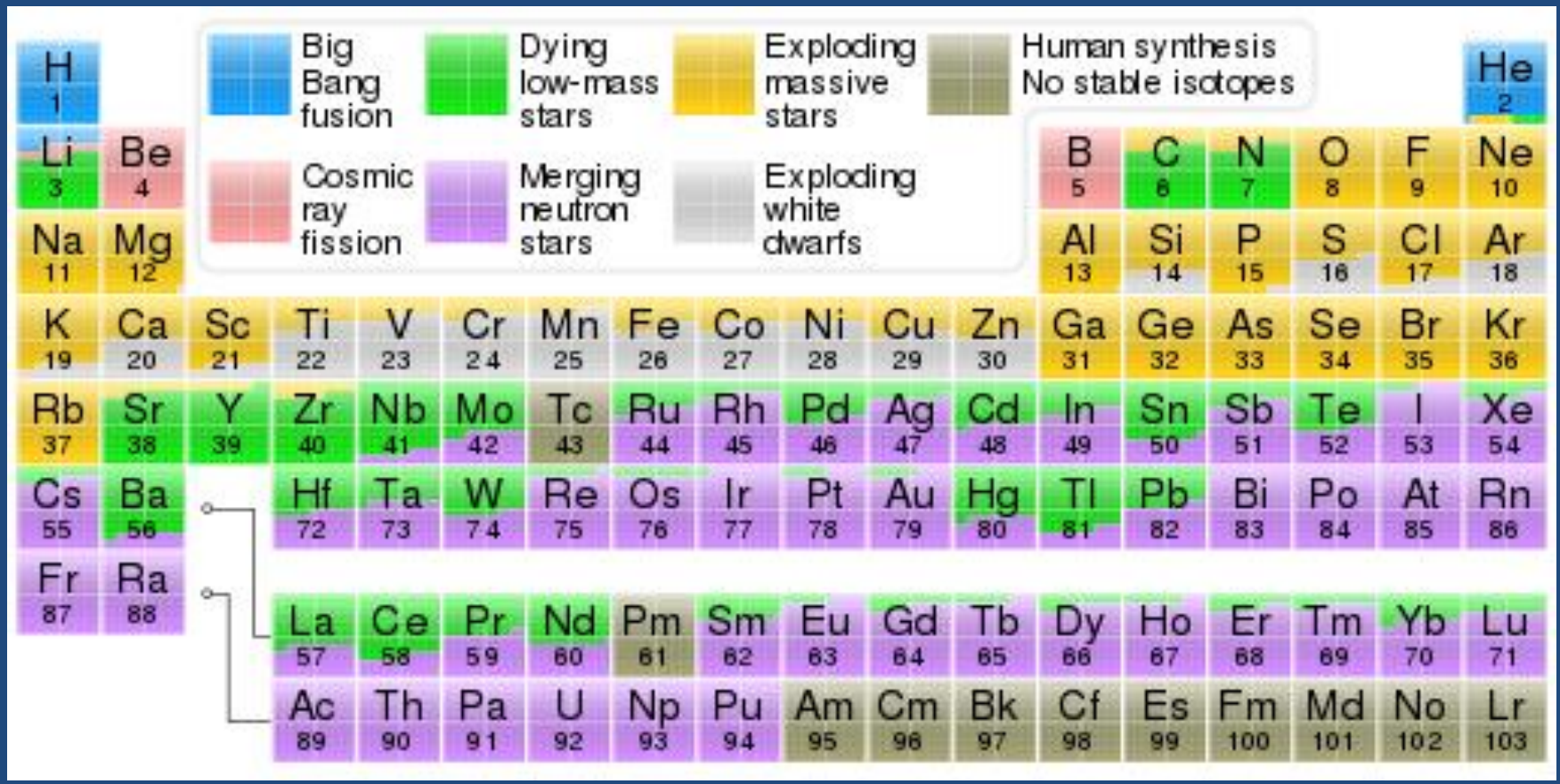






http://arxiv.org/abs/1710.05850

Двойные НЗ -- источники тяжелых r-элементов в природе



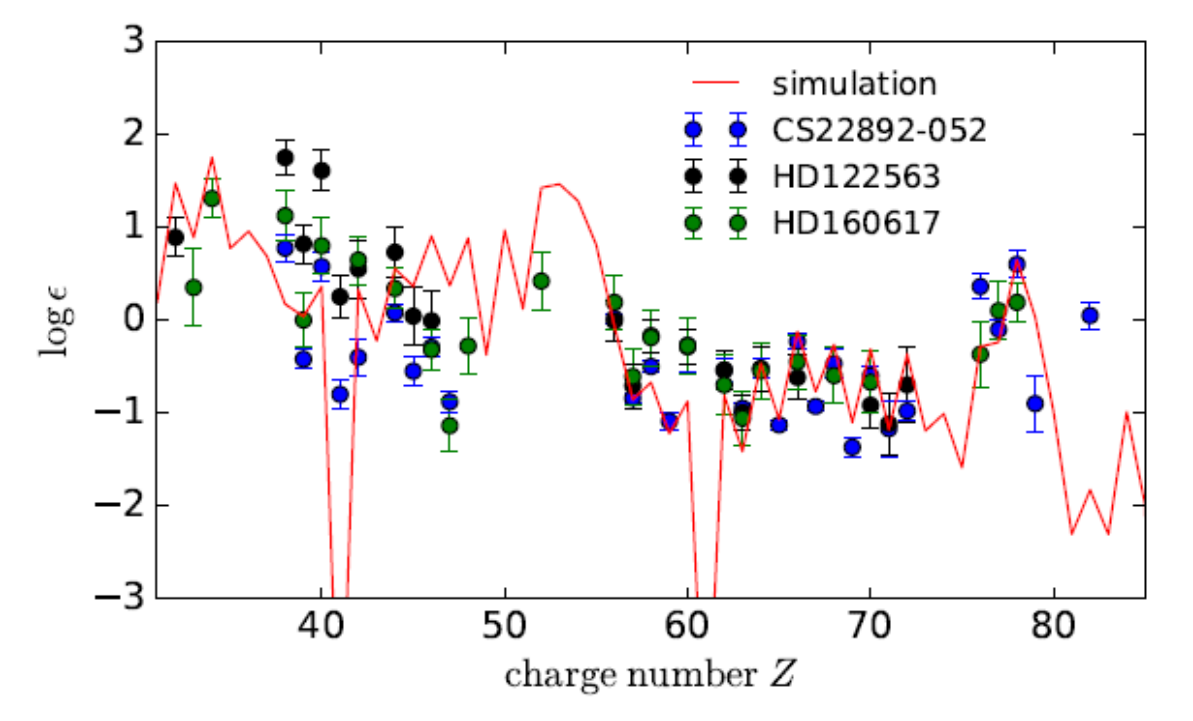
Результаты анализа ГВ+килоновой

Table 1: Key Properties of GW170817

Property	Value	Reference
Chirp mass, $\mathcal{M}$ (rest frame)	$1.188^{+0.004}_{-0.002} M_\odot$	1
First NS mass, M_1	$1.36 - 1.60 M_\odot$ (90%, low spin prior)	1
Second NS mass, M_2	$1.17 - 1.36 M_\odot$ (90%, low spin prior)	1
Total binary mass, $M_{\rm tot} = M_1 + M_2$	$\approx 2.74^{0.04}_{-0.01} M_\odot$	1
Observer angle relative to binary axis, $\theta_{\rm obs}$	$11 - 33^\circ$ (68.3%)	2
Blue KN ejecta ($A_{\rm max} \lesssim 140$)	$\approx 0.01 - 0.02 M_\odot$	e.g., 3,4,5
Red KN ejecta ($A_{\rm max} \gtrsim 140$)	$\approx 0.04 M_\odot$	e.g., 3,5,6
Light r-process yield ($A \lesssim 140$)	$\approx 0.05 - 0.06 M_\odot$	
Heavy r-process yield ($A \gtrsim 140$)	$\approx 0.01 M_\odot$	
Gold yield	$\sim 100 - 200 M_\oplus$	8
Uranium yield	$\sim 30 - 60 M_\oplus$	8
Kinetic energy of off-axis GRB jet	$10^{49} - 10^{50}$ erg	e.g., 9, 10, 11, 12
ISM density	$10^{-4} - 10^{-2}$ cm^{-3}	e.g., 9, 10, 11, 12

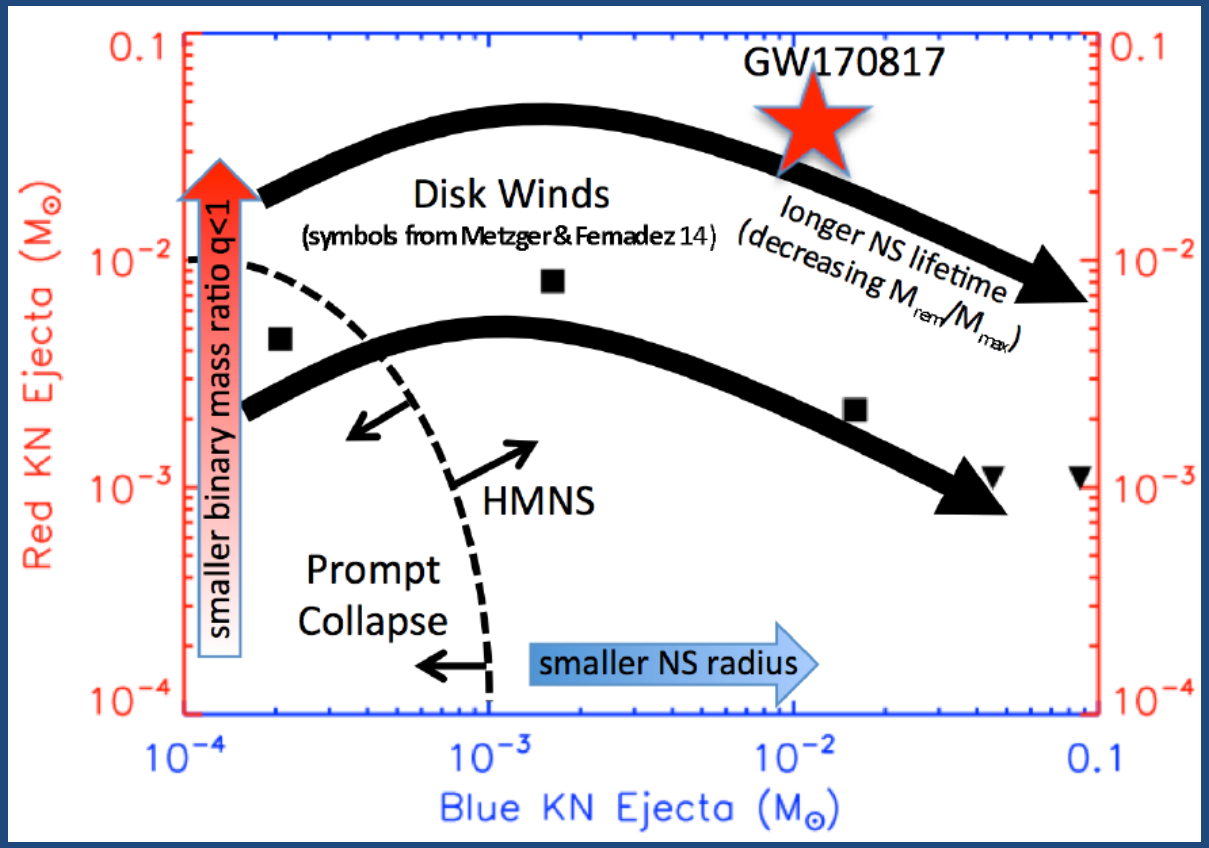
(1) LIGO Scientific Collaboration et al. 2017c; (2) depends on Hubble Constant, LIGO Scientific Collaboration et al. 2017d; (3) Cowperthwaite et al. 2017; (4) Nicholl et al. 2017; (5) Kasen et al. 2017; (6) Chornock et al. 2017; (8) assuming heavy r-process ($A > 140$) yields distributed as solar abundances (Arnould et al., 2007); (9)Margutti et al. 2017; (10) Troja et al. 2017; (11) Fong et al. 2017; (12) Hallinan et al. 2017

B.Metzger 1710.05931


simulation
CS22892-052
HD122563
HD160617
log ϵ
charge number Z
3
2
1
0
−1
−2
−3
40
50
60
70
80

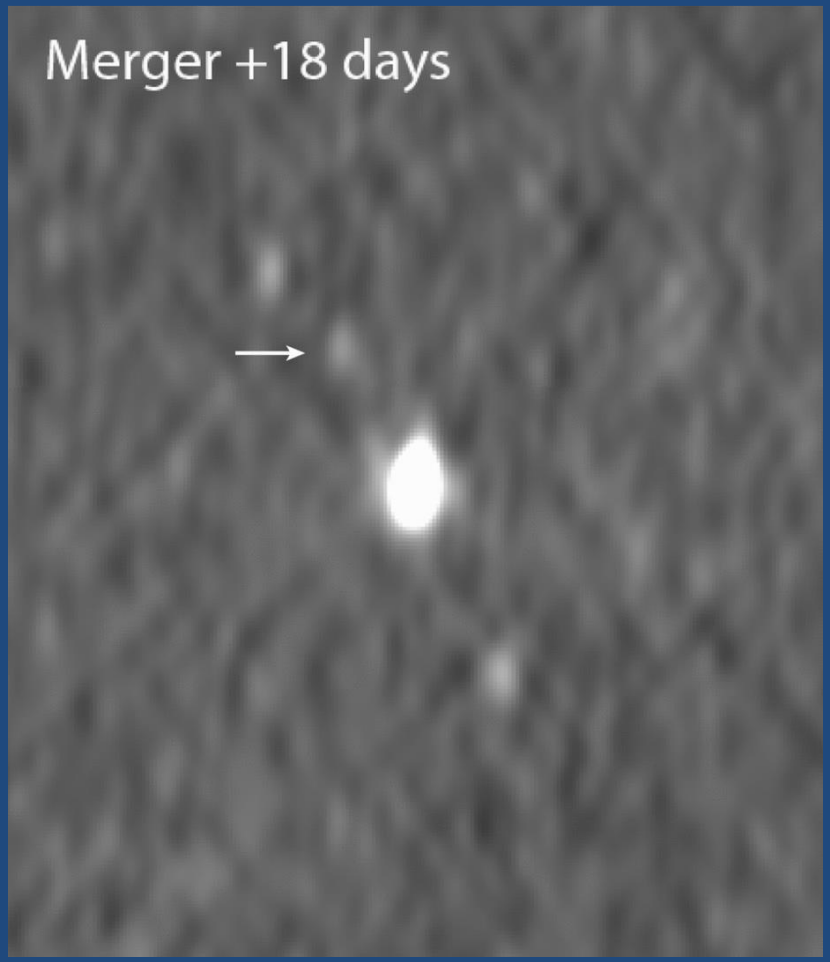
1711.00868

Ограничения на физику слияния из кривых блеска килоновых

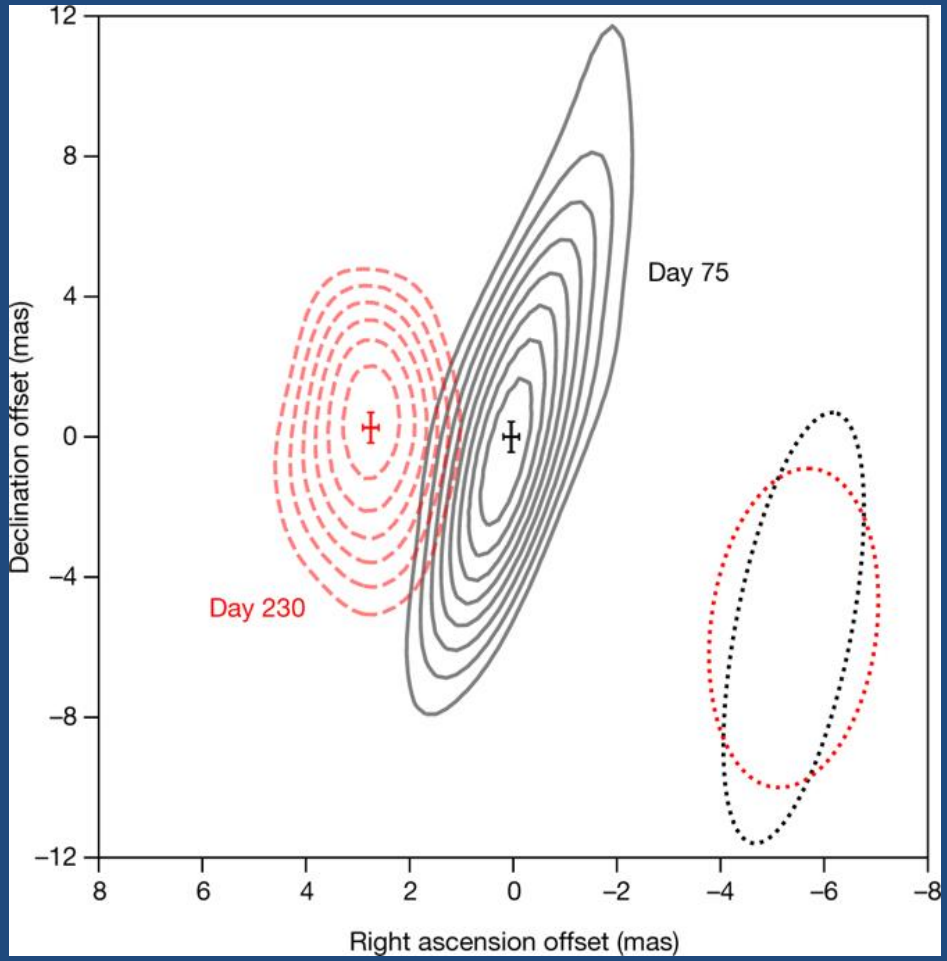


B.Metzger 1710.05931

Радионаблюдения JVLA



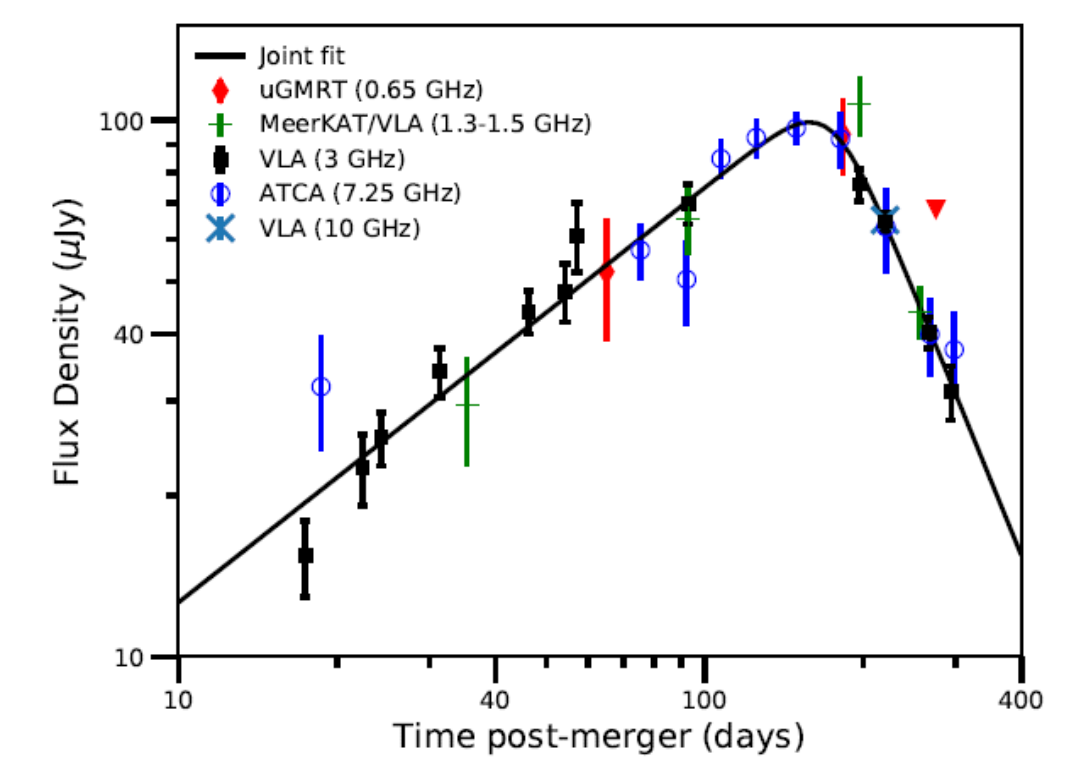
Сверхсветовое движение радиоисточника – релятивистский джет



$\Gamma \approx \beta_{app} \approx 4.$

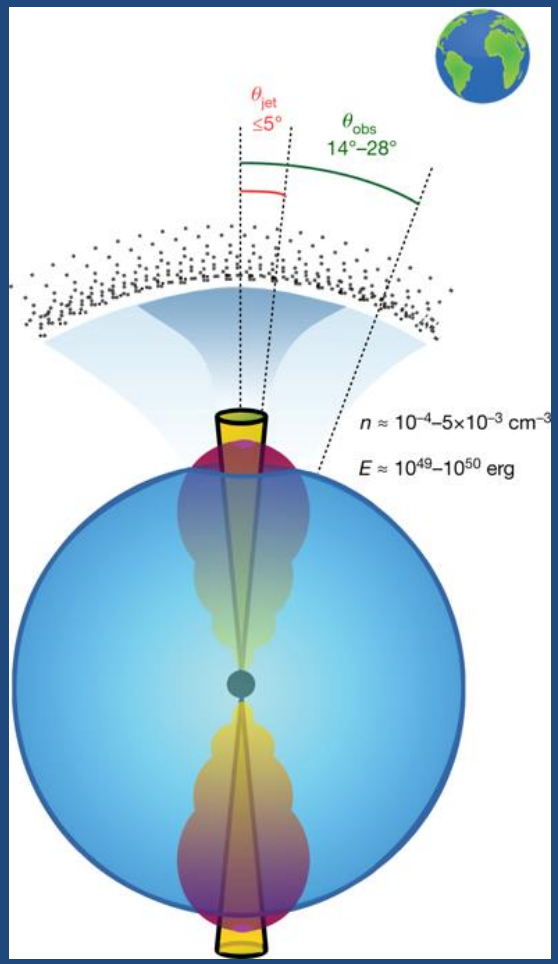
Mooley + 18, Nature 561, 355

Релятивистский джет в радио

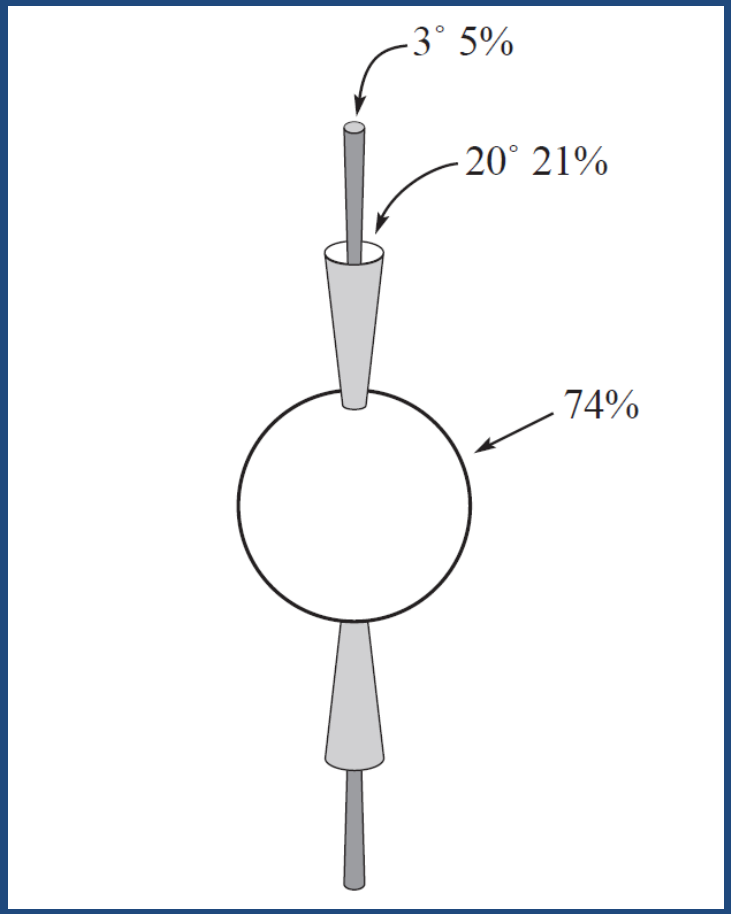


1810.12927

Модель – структурированный джет

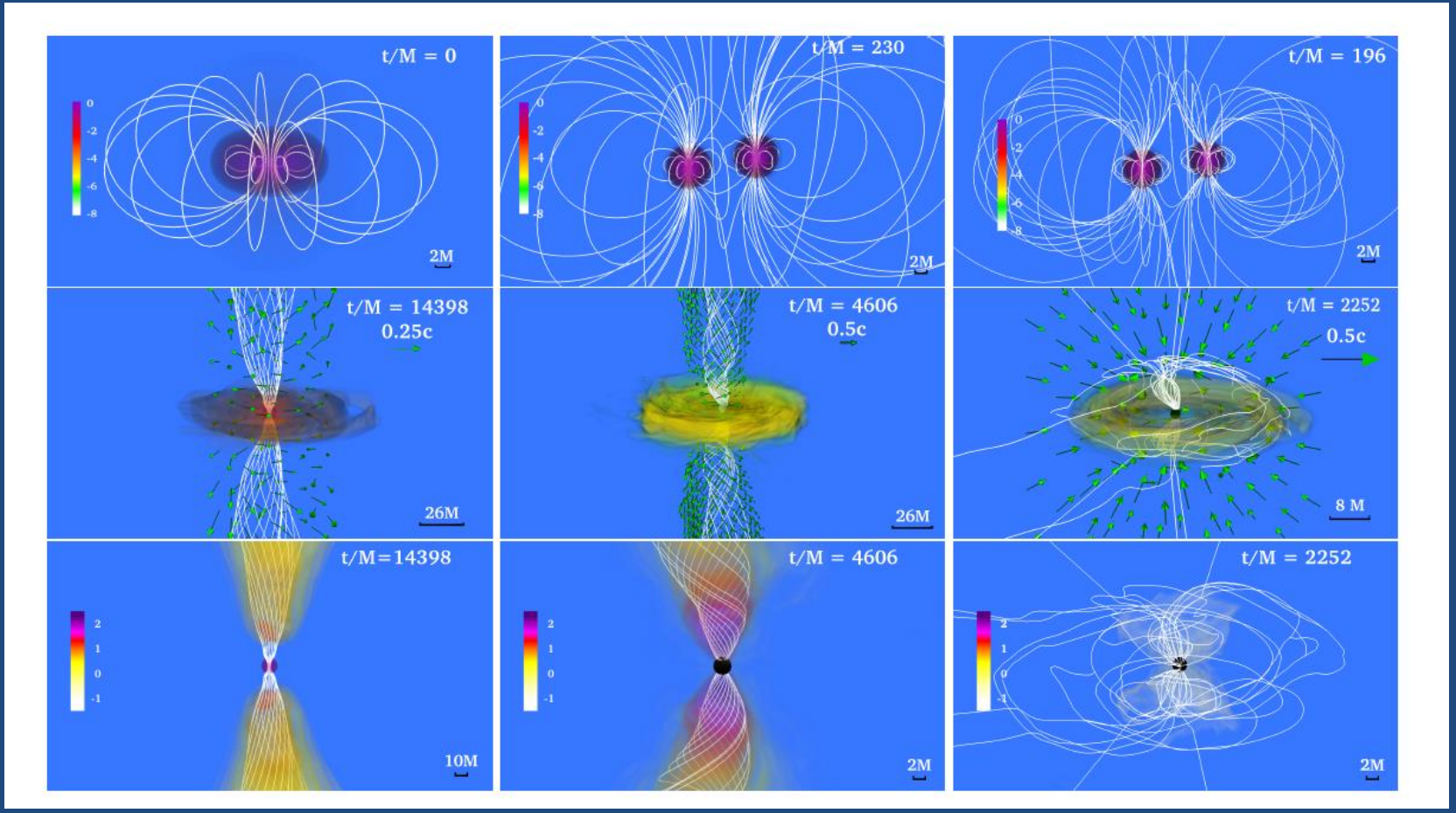


Mooley + 18, Nature 561, 355



PK+ 1999, arXiv:astro-ph.9908136

Ограничение на уравнения состояния НЗ – из GRMD расчетов



$$M_{\max}^{\mathrm{sph}} \lesssim 2.16$$

18.02.2019

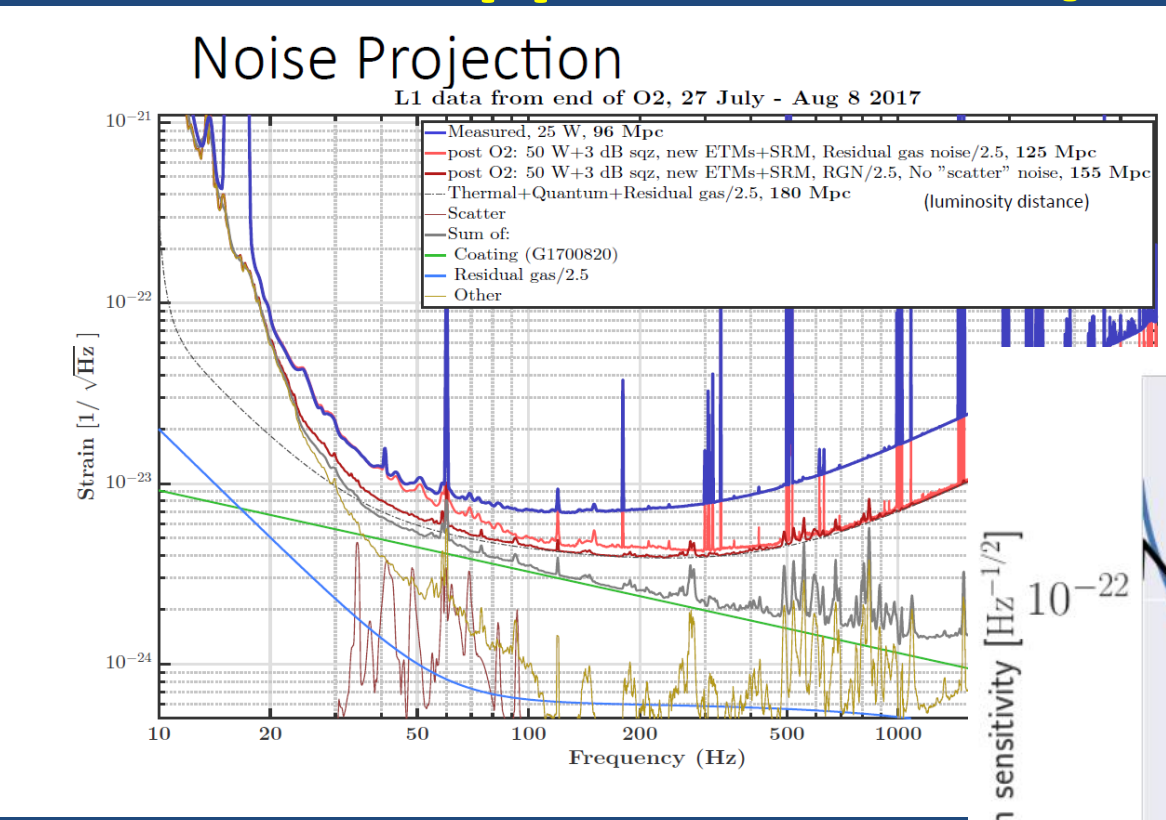
1711.00473

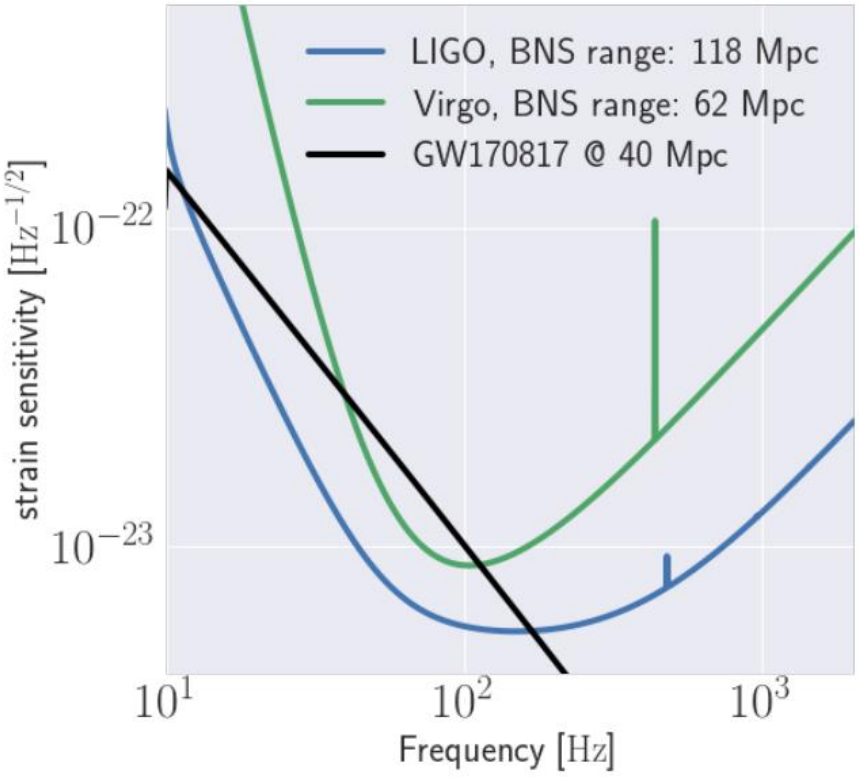
Главные результаты

- Триумф теории
- Темп слияния в согласии с астрофизикой
- Слияния двойных – основной источник r-элементов
- Физика слияния нейтронных звезд
- Еще не открыты: НЗ+ЧД (2019?)

Перспективы: ближние

В ожидании LIGO/VIRGO O3





Ожидаемый темп регистрации

Source Summary

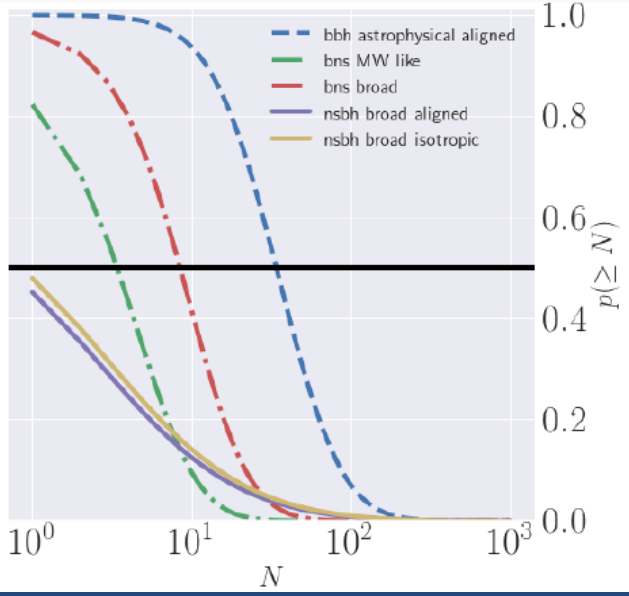
Take Aways

BBH rate will **dominate**, possibly by more than an order of magnitude, up to **~few/wk., at least ~few/mo.**

1-10 BNS, possibly up to **~1/mo.**

VT has **strong mass dependence** but **very mild dependence** on assumed spin distribution

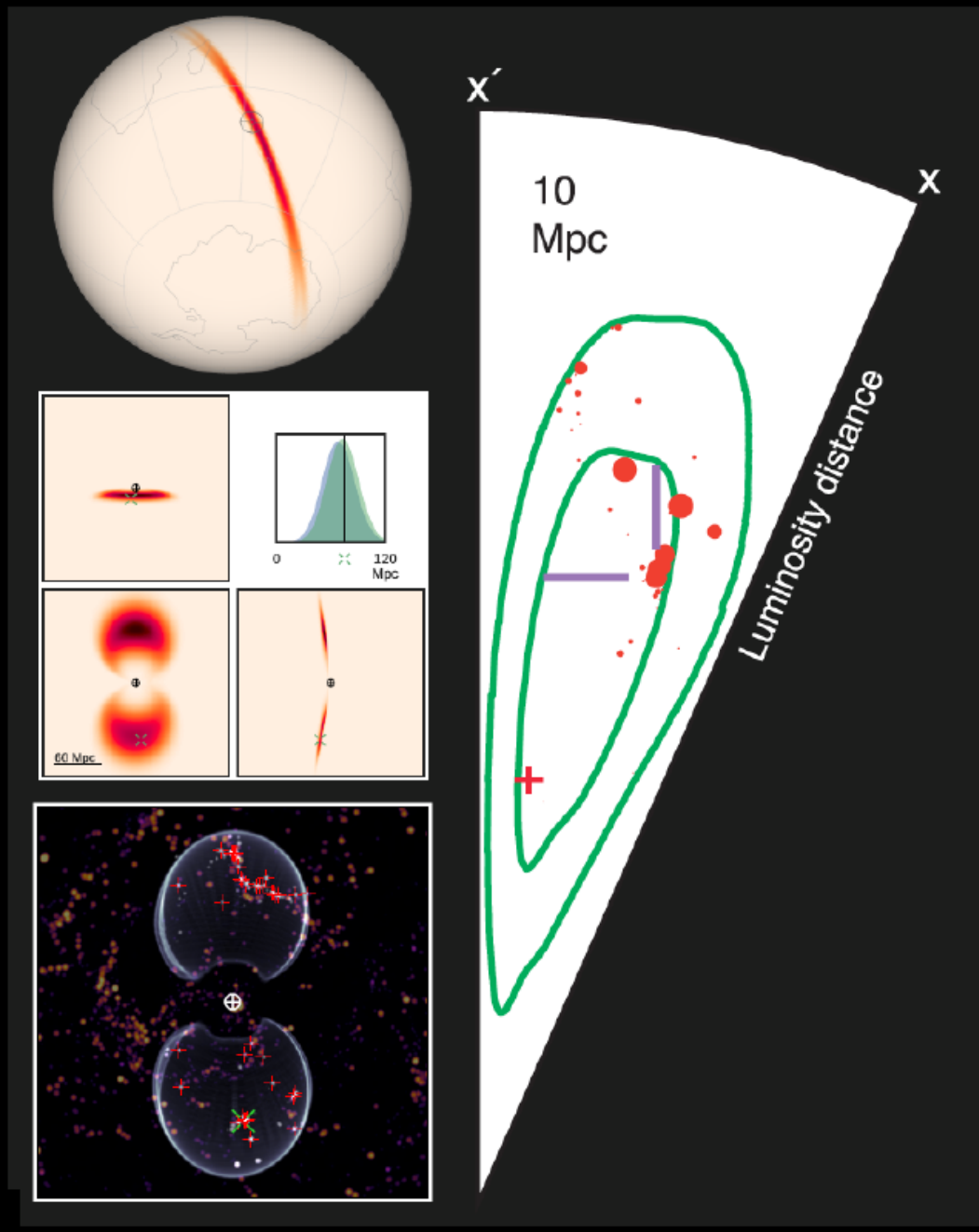
NSBH: N=0 not ruled out in any scenario, most give **~50% N>0**



source category	full year VT	N_d
BBH / bbh_astrophysical_aligned	6.8×10^8 Mpc^3 yr	35^{+78}_{-26}
BNS / bns_mw_like	3.2×10^6 Mpc^3 yr	4^{+9}_{-4}
BNS / bns_broad	7.3×10^6 Mpc^3 yr	9^{+19}_{-7}
NSBH / nsbh_broad_aligned	4.9×10^7 Mpc^3 yr	1^{+24}_{-1}
NSBH / nsbh_broad_isotropic	5.7×10^7 Mpc^3 yr	1^{+28}_{-1}

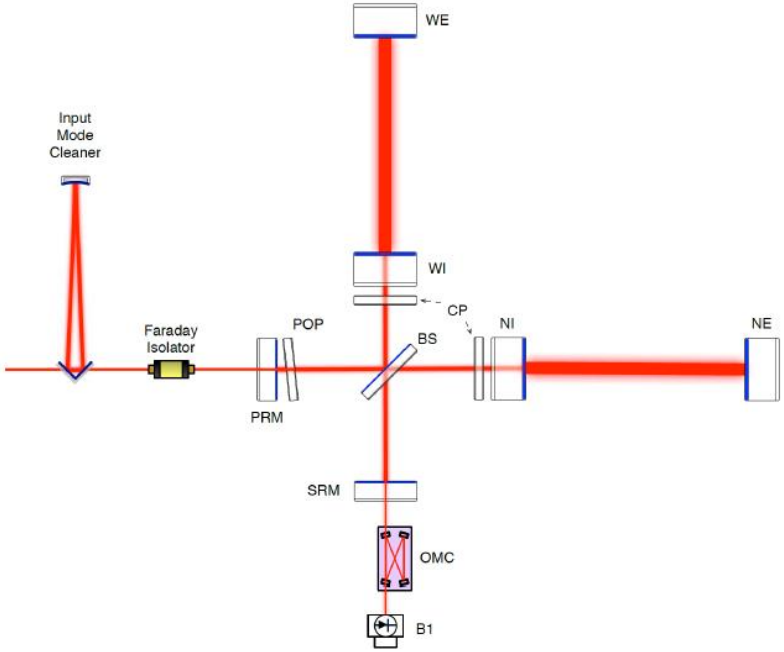
Localizations

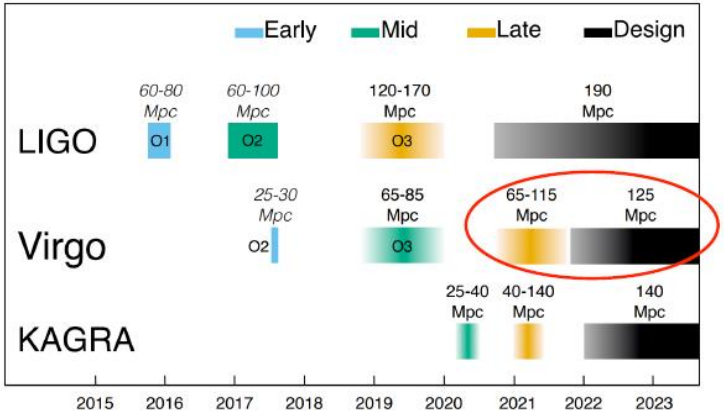
- Gzip-compressed HEALPix images in FITS
- Sky probability sampled in equal-area pixels
- (CBC only) Distance: location, scale, and normalization of an r^2 weighted Gaussian conditional distance distribution
- New for O3:
  - error ellipses for well-localized events
  - multi-resolution HEALPix files for faster manipulation

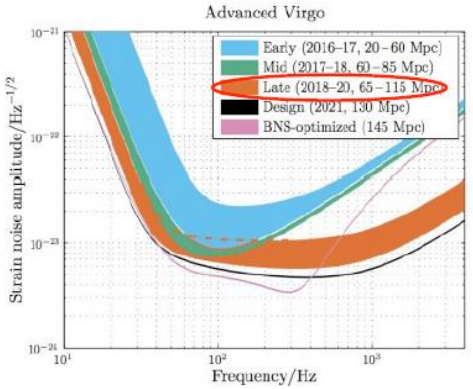


Plans for O4 (2021)

- Install further upgrades:
  - Signal recycling mirror;
  - Input power increase to 125 W;
- Expected range for BNS in the range 100's Mpc;







Локализация: ~ 10 кв. град

Перспективы: дальние

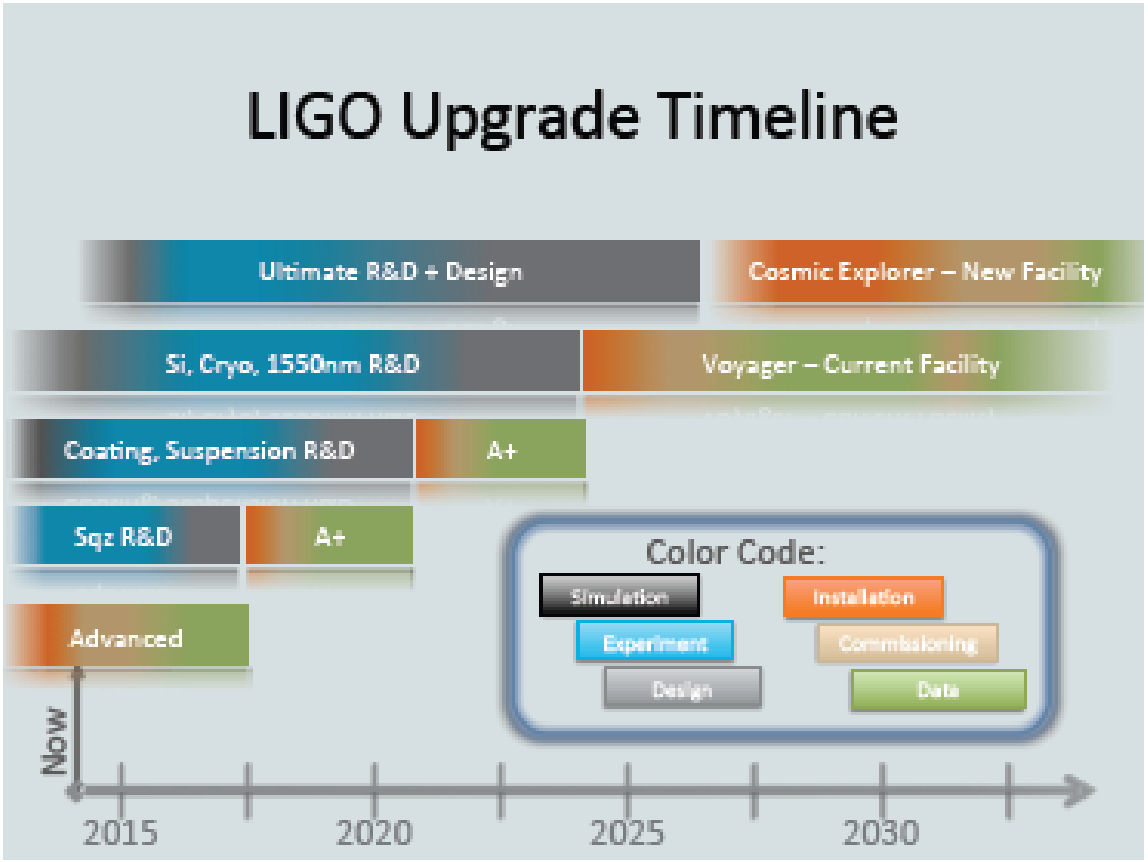
Expanded IFO network 2020+

Credit: B. Schutz

ГВ-астрономия полной сетью интерферометров

- ДНЗ ~100 в год, ДЧД ~ 1000 в год. ДЧД @ z>1.
- ДНЗ → ограничения на УС НЗ, физика GRB
- Тесты ОТО: горизонт ЧД от измерения хвостов фазы звона. Отклонения от ОТО
- Статистические измерения M, J для НЗ и ЧД в двойных системах → механизмы формирования (стандартные, в шаровых скоплениях, первичные ЧД).
- …

План будущего развития LIGO

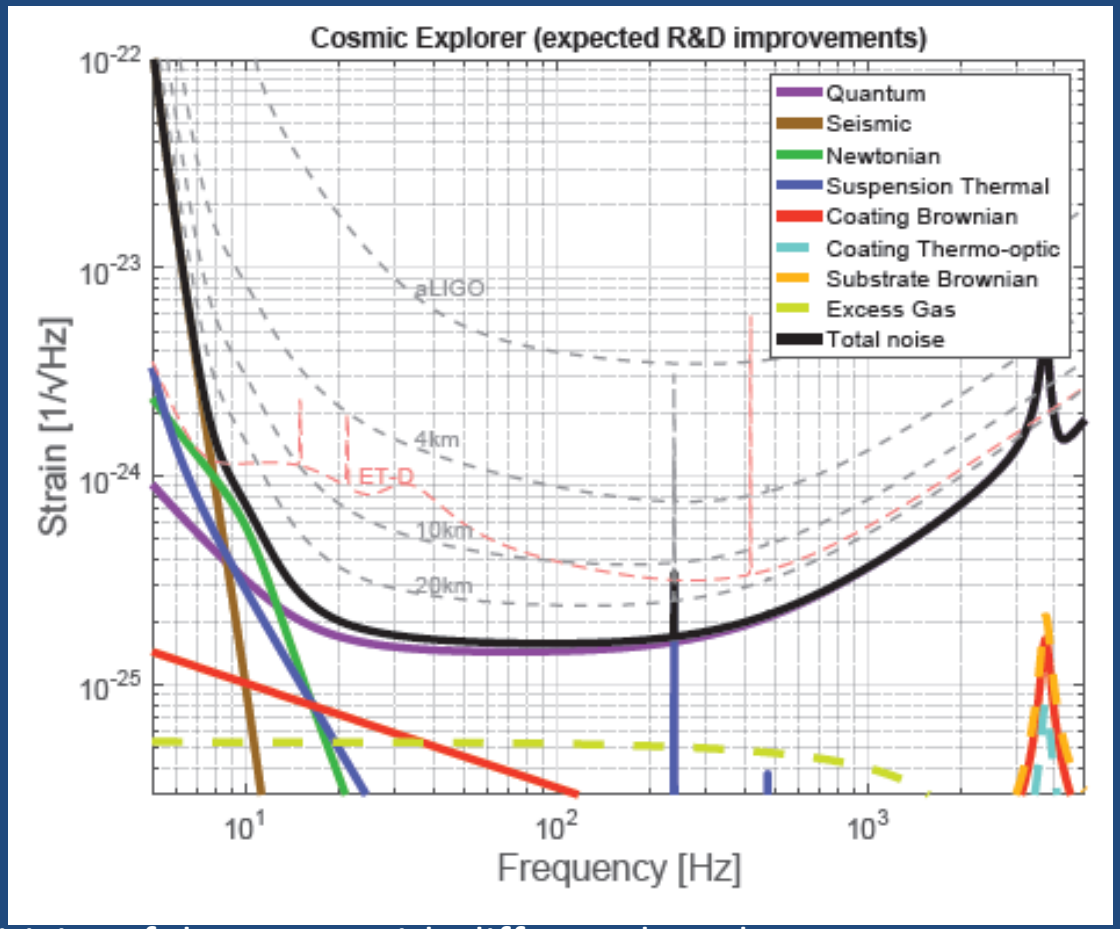


3 Projects of future LIGO detectors:

A+
Voyager
Cosmic Explorer

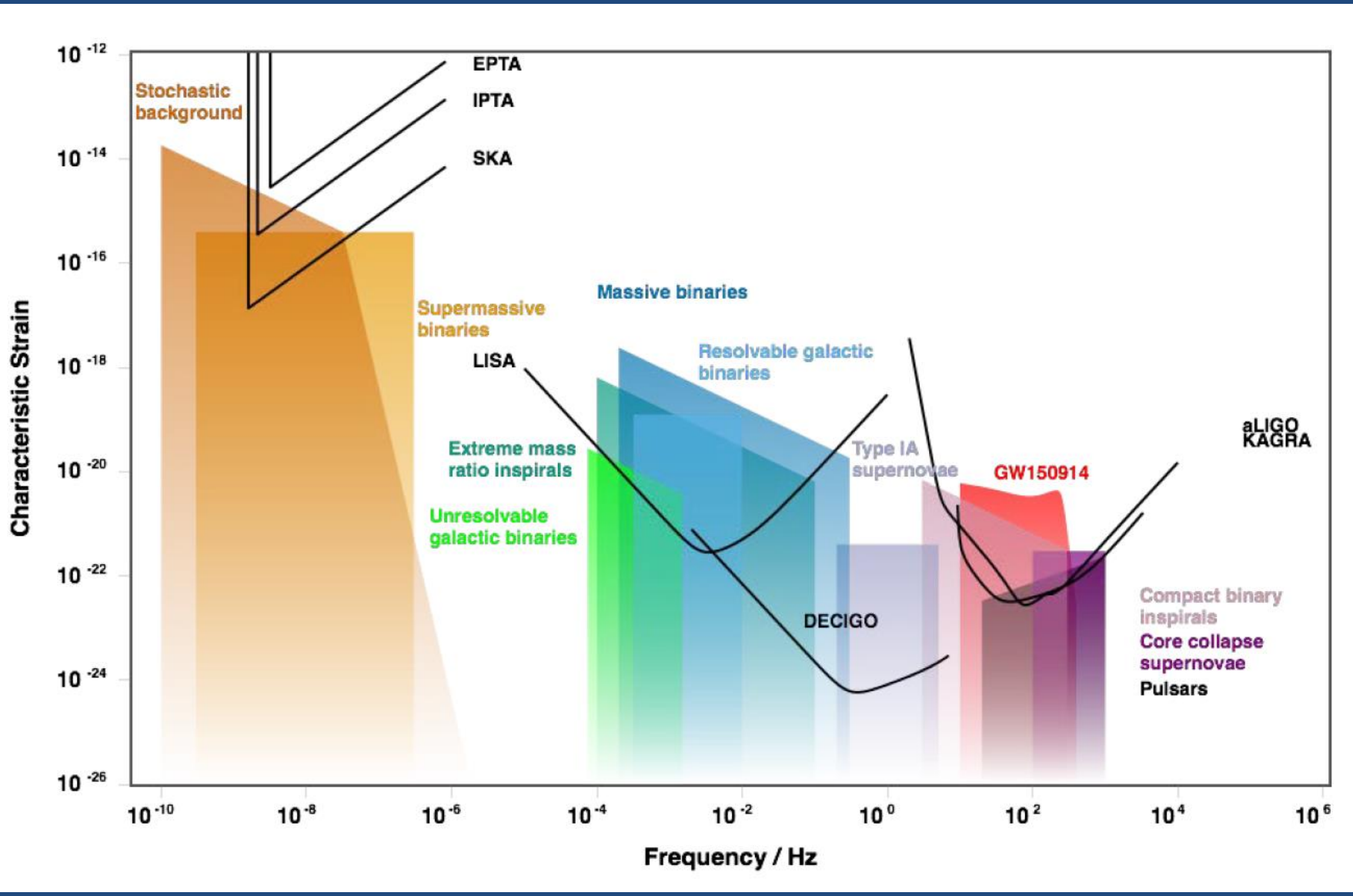
https://dcc.ligo.org/LIGO-T1500290/public

40-км LIGO Cosmic Explorer (2035)

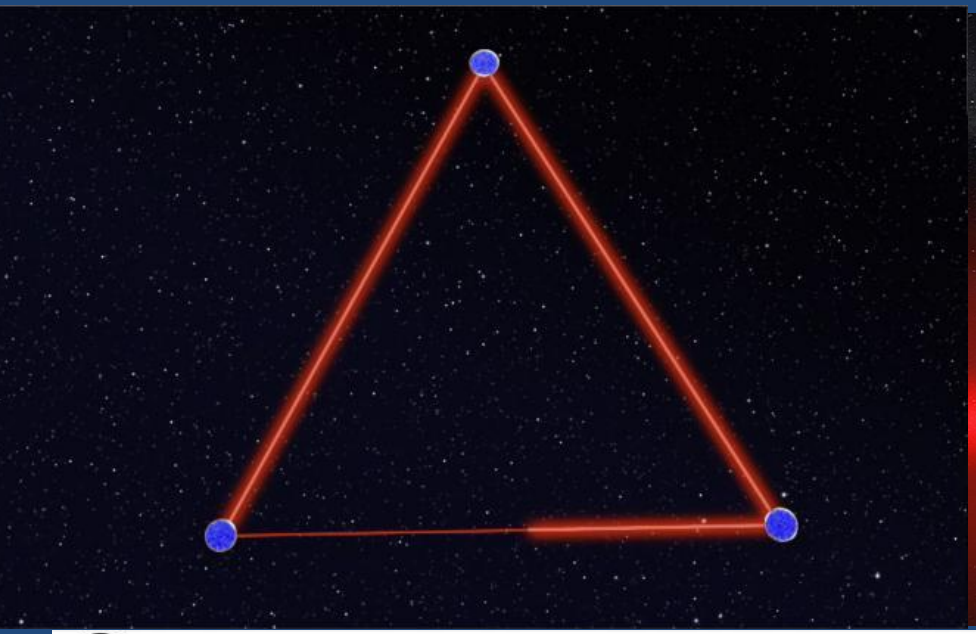


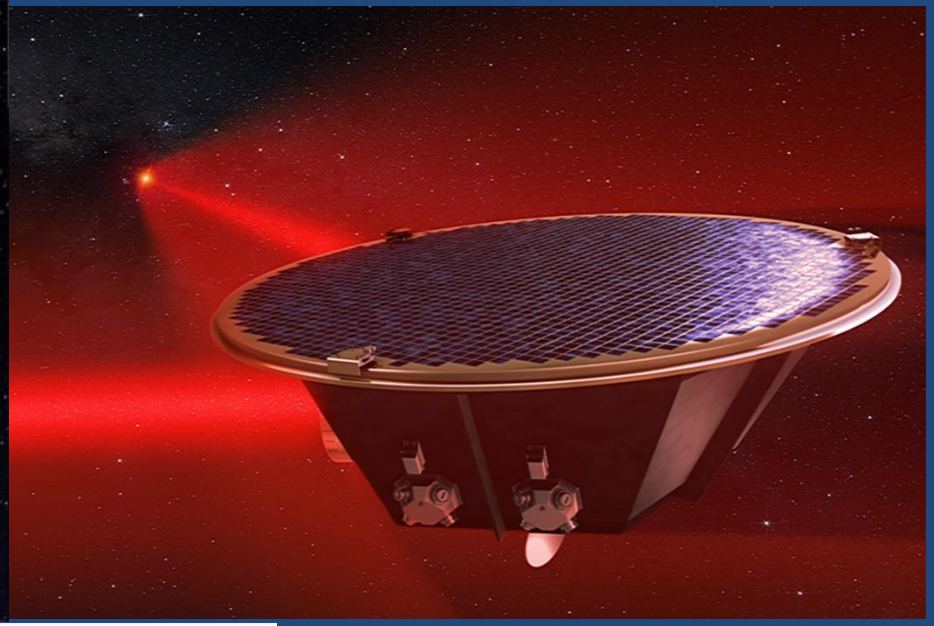
Sensitivity of detectors with different lengths.
Solid curves are for a 40km long detector

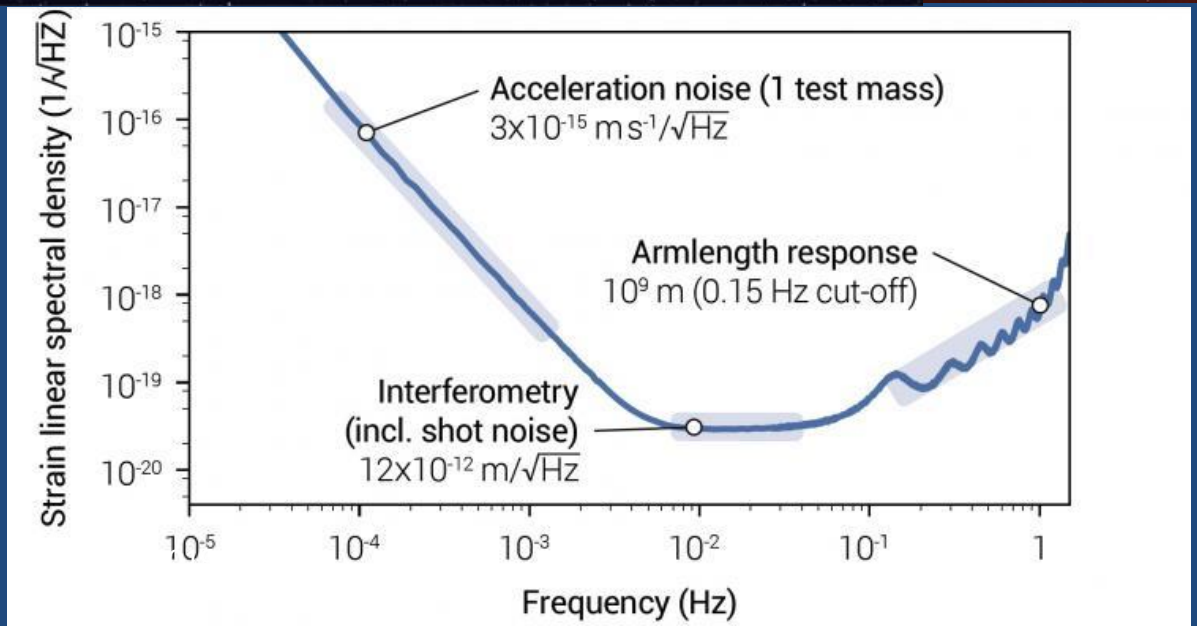
LIGO Scientific Collaboration,arXiv:1607.08697 [astro-ph.IM]


Characteristic Strain
Frequency / Hz
Stochastic background
EPTA
IPTA
SKA
Supermassive binaries
LISA
Massive binaries
Resolvable galactic binaries
Extreme mass ratio inspirals
Unresolvable galactic binaries
Type IA supernovae
GW150914
aLIGO
KAGRA
DECIGO
Compact binary inspirals
Core collapse supernovae
Pulsars

8. Космический интерферометр LISA (ESA+, 2034)



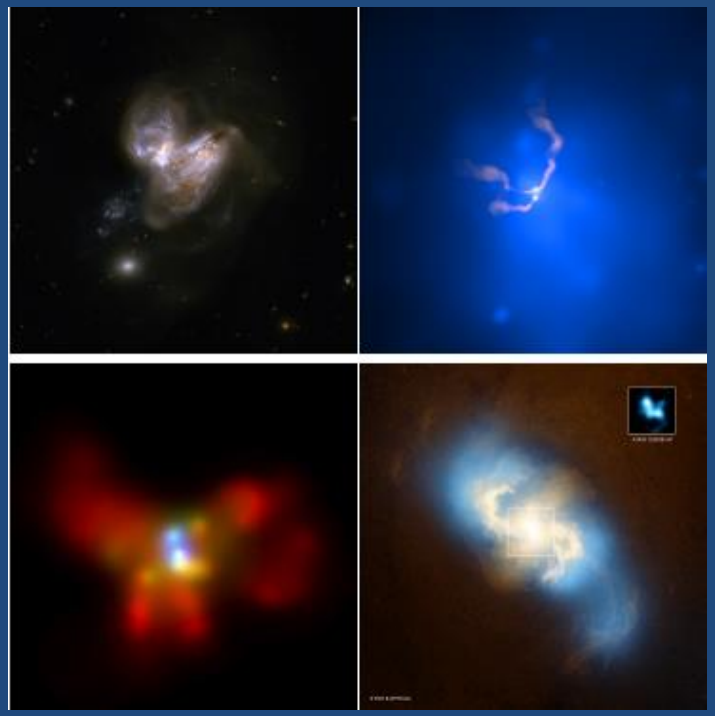




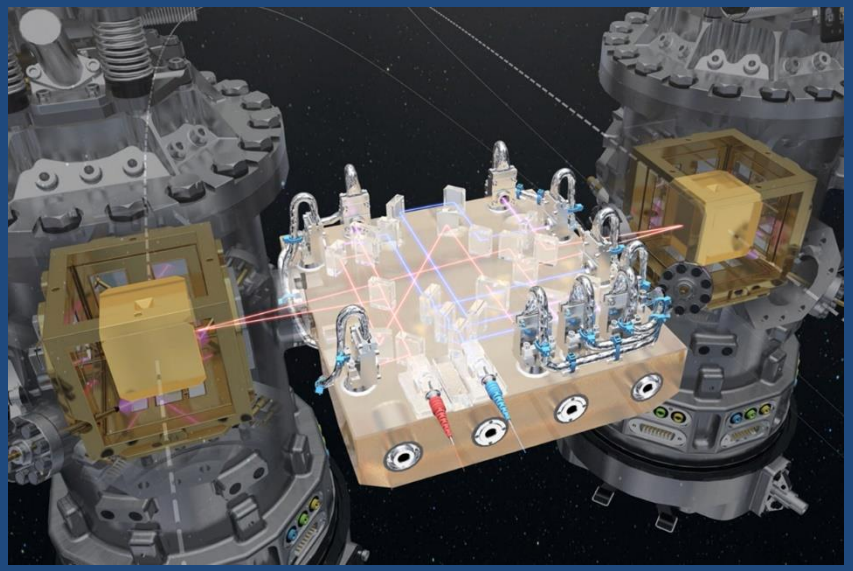
www.elisascience.org

Главные источники – слияния массивных двойных ЧД в галактиках

- Все галактики имеют центральную СМЧД
- Галактики сливаются → образование двойных СМЧД
- Двойные СМЧД могут слиться за Хаббловское время



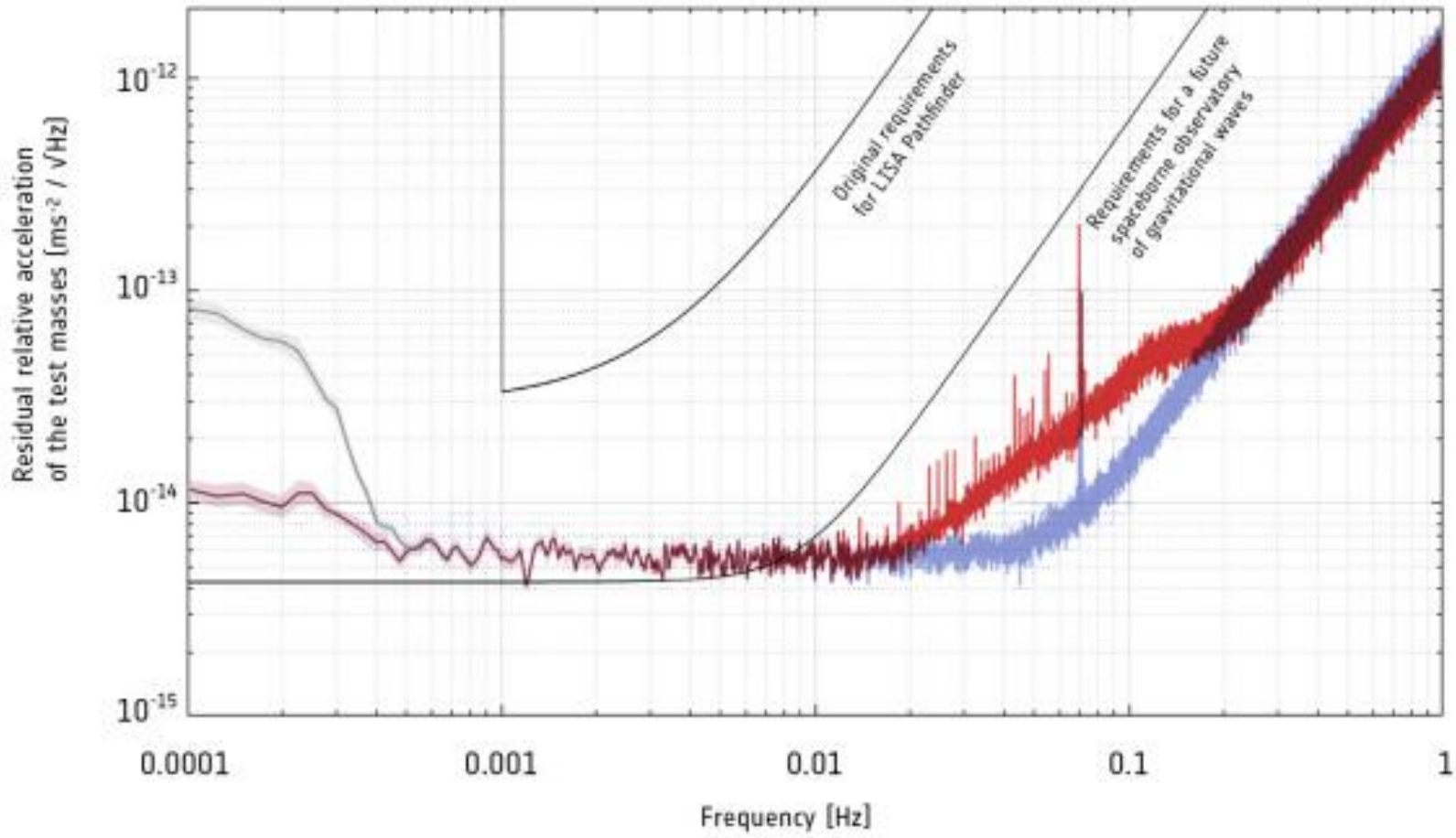
Успешная работа LISA Pathfinder



2015-2016

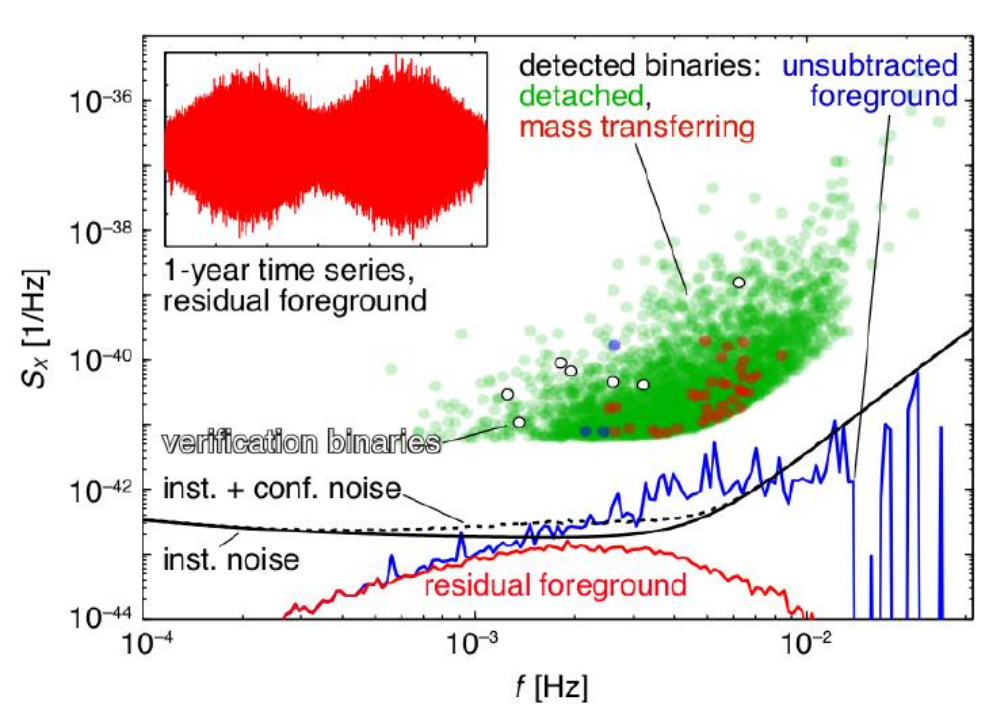
2 46-мм Au-Pt 2 кг массы

Проверка технологии свободного от сноса движения


Residual relative acceleration
of the test masses [ms⁻² / √Hz]
10⁻¹²
10⁻¹³
10⁻¹⁴
10⁻¹⁵
0.0001
0.001
0.01
0.1
1
Frequency [Hz]
Original requirements
for LISA Pathfinder
Requirements for a future
spaceborne observatory
of gravitational waves

Галактические двойные БК

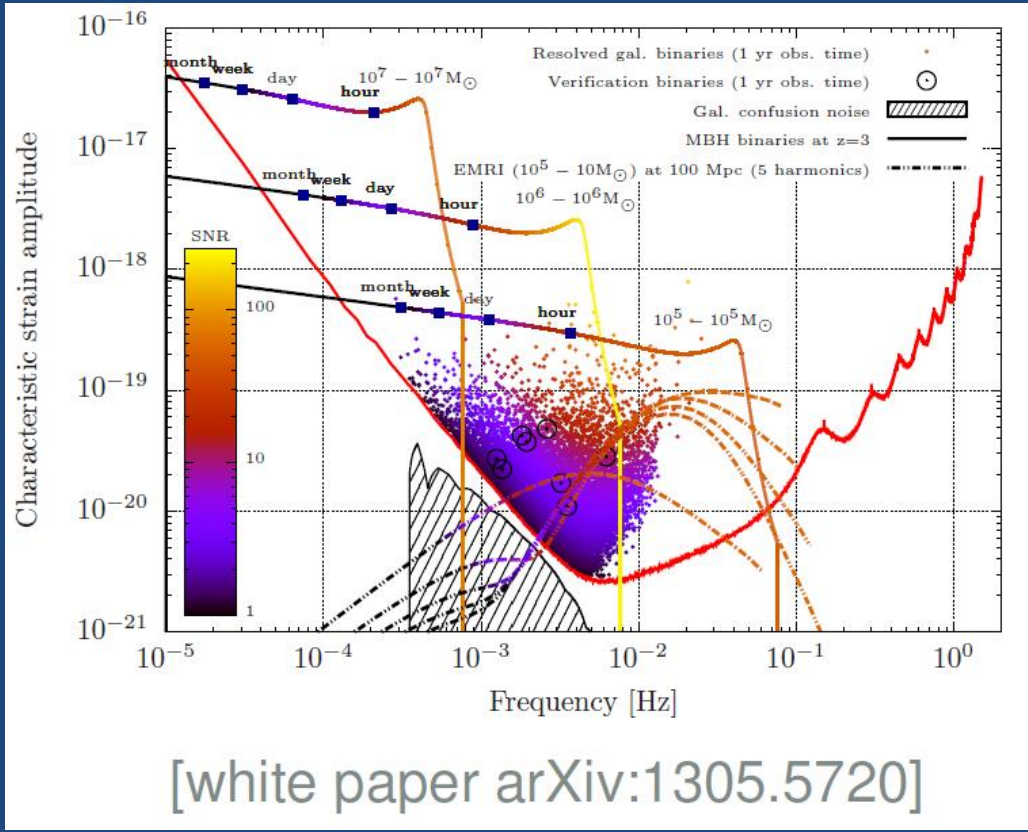
- ~10^7 в Галактике; проверочные источники: GAIA, LSST
- ГВ сигнал почти монохроматический



[CQG 29 124016,(2012)]

Анализ данных LISA

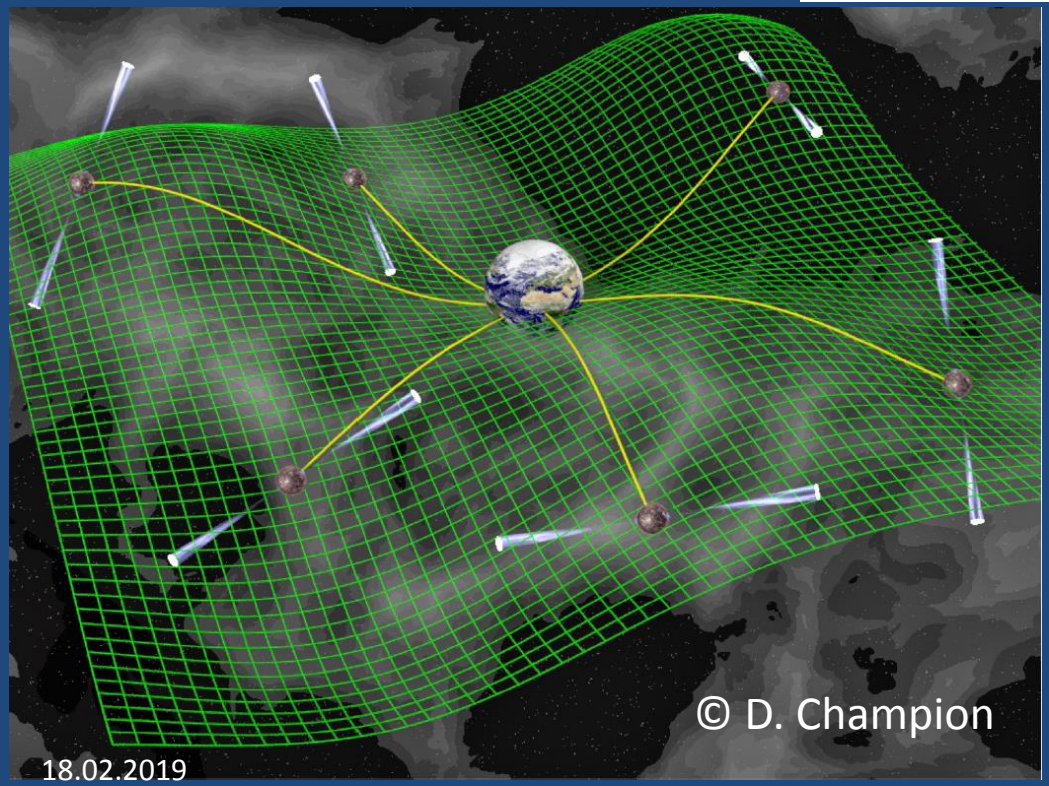
- Главная трудность: сигнал доминирован многими источниками



9. Пульсарный тайминг (Сажин 1978, Detweiler 1979)

- Используются стабильные мс пульсары для детектирования КВ в диапазоне (10^{-9} – 10^{-7} Hz).

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

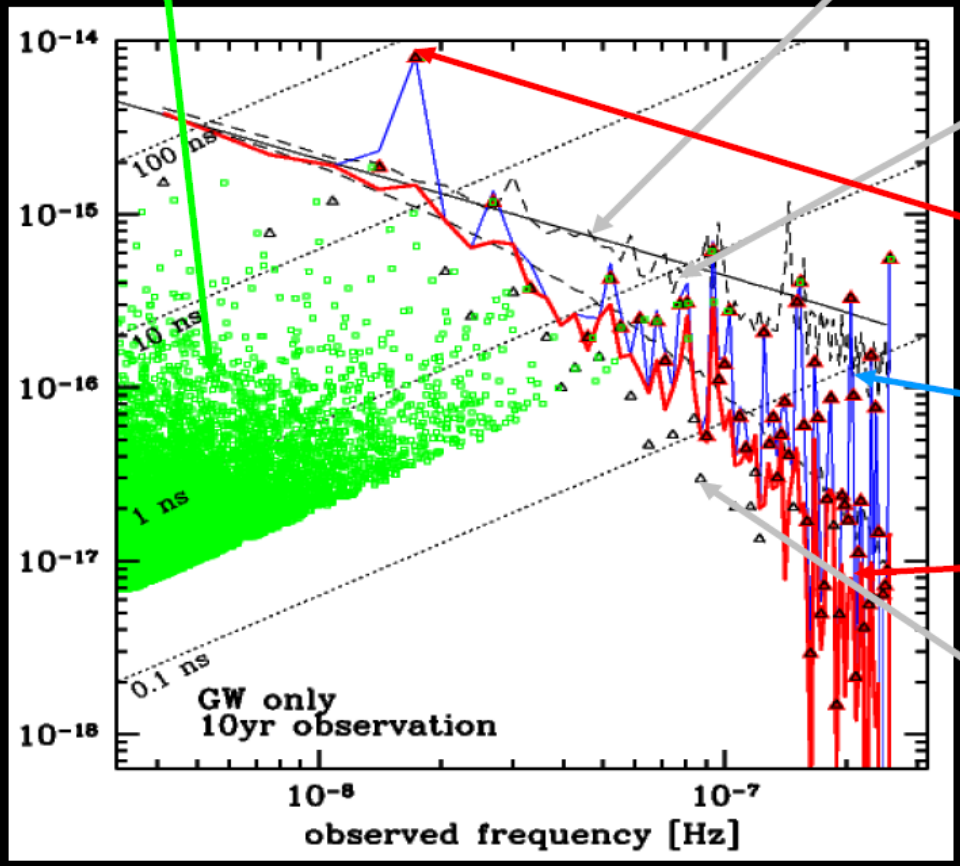


$$dt = t^p_{toa} - t^o_{toa} = dt_{errors} + \delta\tau_{GW} + noise$$

*** Источники – двойные СМЧД (10^7 – 10^{10}M☉) в ядрах галактик**

- **Сигнал почти монохроматический**
- **Специфическая корреляция остаточных уклонений в тайминге разных пульсаров**

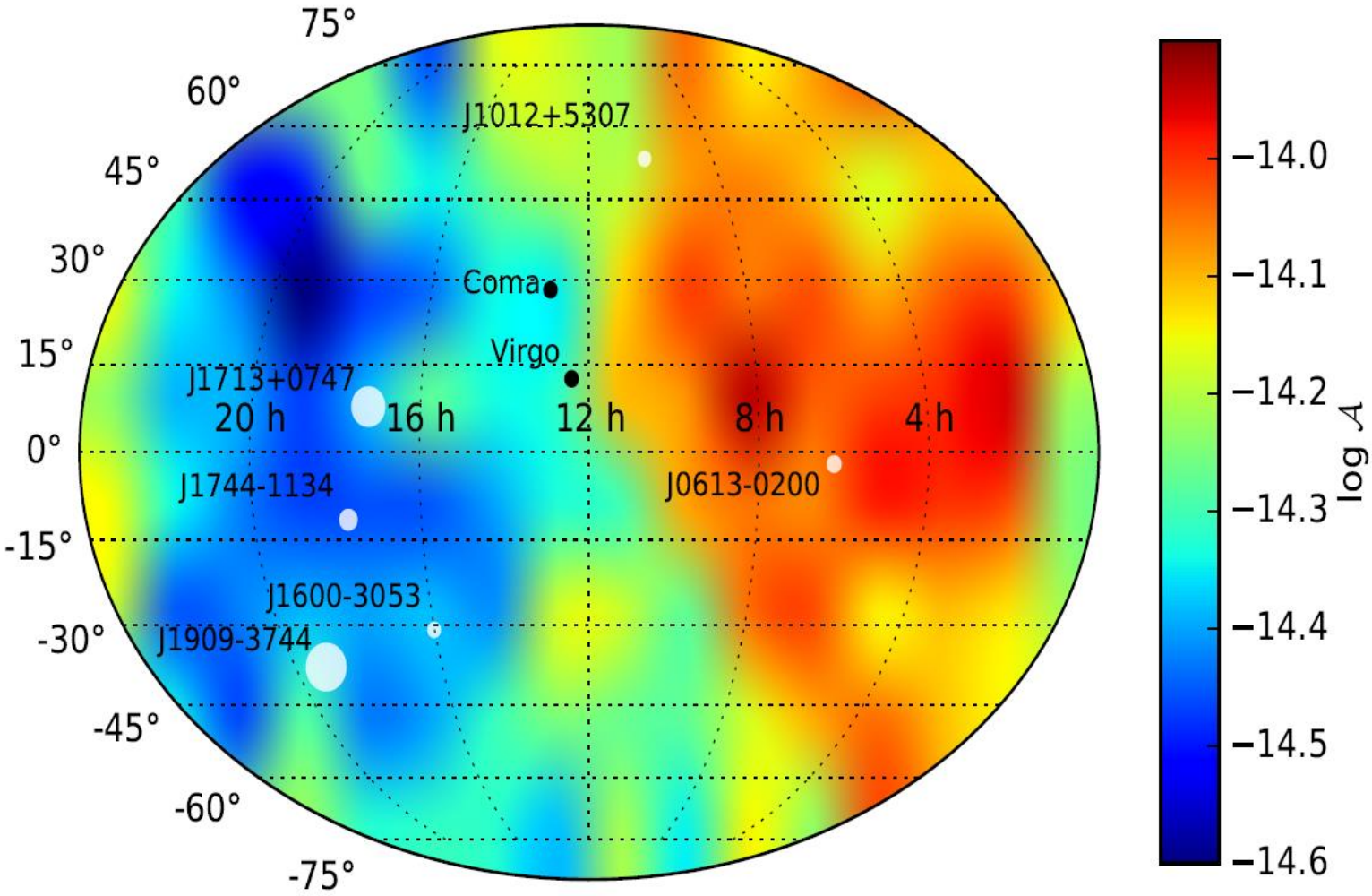
Signal from a MBHB population



[credits: A. Sesana]

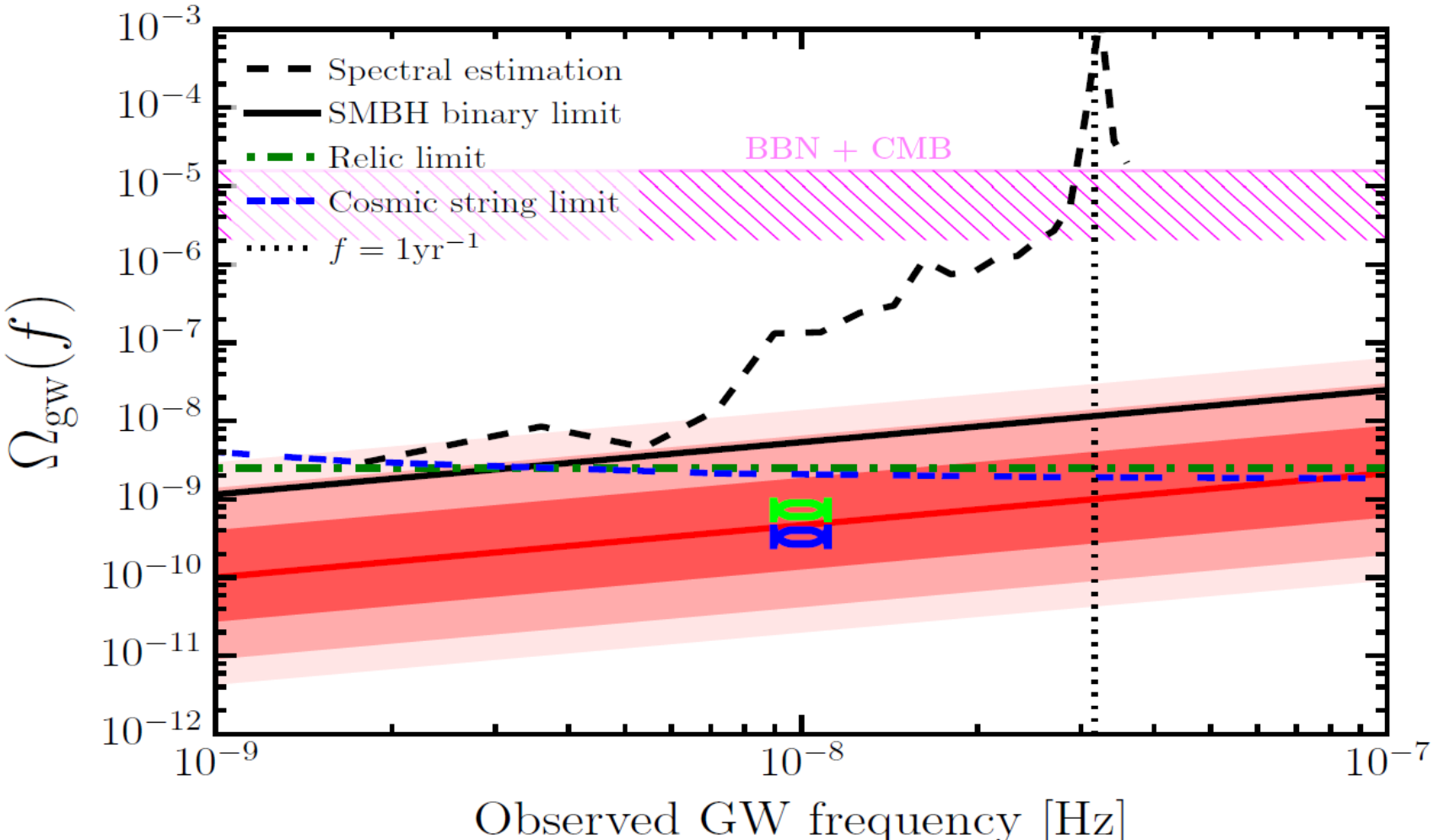
The upper limit on the strain of continuous GW signal with EPTA data. [Babak+ 2015]

Directional dependence of the upper limit (at 7nHz)



Upper limit on GWB with EPTA pulsars & astrophysical implication. [Lentati+ 2015]

Results in terms of $\Omega_{gw}(f)$ as a function of GW frequency, with $H_0 = 70 kms^{-1} Mpc^{-1}$



Заключение

- Первые события LIGO подтвердили существование двойных ЧД и двойных НЗ как источников коротких гамма-ввсплесков
- Массы и темп слияния ДЧД могут быть получены в стандартном сценарии эволюции массивных двойных систем, однако каналы динамического образования в плотных скоплениях ил из первичных ЧД тоже возможны.
- В ближайшие годы сеть интерферометров LIGO-Virgo-KAGRA сможет значительно увеличить статистику зарегистрированных ДЧД и ДНЗ
- Космический проект ESA LISA получил поддержку (2034)

Российские проекты

- Полноправный участник LIGO-Virgo collaboration (МГУ физ. Ф-т, ИПФ РАН)
- Российские астрономы (MASTER и др) участвуют в поисках возможных ЭМ и нейтринных сигналов
- Собственный проект – ОГРАН в БНО (ГАИШ, ИЯИ РАН, ИЛФ РАН)

Литература

- Многоканальная астрономия (под ред. А.М. Черепащука) (Фрязино, Век-2, 2019) – есть в библиотеке ГАИШ
- А.М. Черепащук «Открытие гравитационных волн: новый этап в исследованиях чёрных дыр» **186** 1001–1010 (2016)
- Д. Райтце «**Первые детектирования гравитационных волн, излучаемых при слияниях двойных чёрных дыр**» УФН **187** 884–891 (2017)

Backup slides

Линеаризованная гравитация

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu}, \qquad |h_{\mu\nu}| \ll 1.$$

$$x^\mu \longrightarrow x'^\mu = x^\mu + \xi^\mu(x)$$

$$h_{\mu\nu}(x) \longrightarrow h'_{\mu\nu}(x') = h_{\mu\nu}(x) - (\partial_\mu \xi_\nu + \partial_\nu \xi_\mu)$$

$$R_{\mu\nu\rho\sigma} = \frac{1}{2}(\partial_\nu\partial_\rho h_{\mu\sigma} + \partial_\mu\partial_\sigma h_{\nu\rho} - \partial_\mu\partial_\rho h_{\nu\sigma} - \partial_\nu\partial_\sigma h_{\mu\rho})$$

Калибровочно-инвариантен!!!

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

$$\bar{h}_{\mu\nu} \longrightarrow \bar{h}'_{\mu\nu} = \bar{h}_{\mu\nu} - (\partial_\mu \xi_\nu + \partial_\nu \xi_\mu - \eta_{\mu\nu}\partial_\rho \xi^\rho)$$

$$\Box \bar{h}_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \qquad \partial^\nu \bar{h}_{\mu\nu} = 0.$$

$$\partial^\nu T_{\mu\nu} = 0$$

Гравитационные волны

$$c^2\bar{h}^{00} = -4\phi \qquad c^2 h_{00} = -2\phi \qquad \Delta\phi = 4\pi G\rho$$

- Удобная калибровка

$$\Box\xi_\mu = 0. \qquad \Box\xi_{\mu\nu} = 0$$

$$\xi_{\mu\nu} = \partial_\mu\xi_\nu + \partial_\nu\xi_\mu - \eta_{\mu\nu}\partial_\rho\xi^\rho$$

- Не нарушает вида линеаризованных уравнений и гармоническую (Лоренцеву) калибровку $\partial^\nu \bar{h}_{\mu\nu} = 0.$
- Можно использовать 4 функции □ для зануления 4 компонент ➔ остается только 2 независимые компоненты (поляризации)

TT-калибровка (поперечно-бесследовая)

$$1)\,\textit{Убираем след}: \xi_0(x): \bar{h} = 0 \Rightarrow \bar{h}_{\mu\nu} = h_{\mu\nu}$$

$$2)\,\textit{Делаем поперечными}: \xi_i(x): h_{0\mu} = 0: \quad \partial^i h_{ij} = 0$$

$$h_{0\mu} = 0, \quad h^i{}_i = 0, \quad \partial^j h_{ij} = 0$$

$$h_{ij}^{\mathrm{TT}} = e_{ij}(\mathbf{k})\,\cos(k_\mu x^\mu)$$

$$k_\mu = (\omega/c, \mathbf{k}) \quad \omega = c|\mathbf{k}|$$

$$\partial^j h_{ij} = 0 \Rightarrow \mathbf{k}^j h_{ij}^{\mathrm{TT}} = 0 \quad n^j h_{ij}^{\mathrm{TT}} = 0 \quad \hat{\mathbf{n}} = \mathbf{k}/|\mathbf{k}|$$

$$h_{ij}^{\mathrm{TT}} = \begin{pmatrix} h_+ & h_\times & 0 \\ h_\times & -h_+ & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}_{ij} \cos\left[\omega(t - z/c)\right]$$

Переход к TT-калибровке

$$h_{\alpha\beta} = h_{\alpha\beta}(t - \mathbf{n}\cdot\mathbf{x}) \qquad \bar{h}_{\alpha\beta} = \bar{h}_{\alpha\beta}(t - \mathbf{n}\cdot\mathbf{x})$$

$$P^{jk} \equiv \delta^{jk} - n^j\, n^k$$

$$h^{\mathrm{TT}}_{jk} = (\bar{h}_{jk})^{\mathrm{TT}} = P_j{}^l P_k{}^m \bar{h}_{lm} - \frac{1}{2} P_{jk} P^{lm} \bar{h}_{lm}$$

- Например, для волны вдоль оси z:

$$h_+ = h^{\mathrm{TT}}_{xx} = \bar{h}_{xx} - \frac{1}{2}(\bar{h}_{xx} + \bar{h}_{yy}) = \frac{1}{2}(h_{xx} - h_{yy}) \ , \quad h_\times = h^{\mathrm{TT}}_{xy} = \bar{h}_{xy}$$

Действие ГВ на пробные массы в ТТ-калибровке

$$\frac{d^2x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma^\mu_{\nu\rho}(x)\frac{dx^\nu}{d\tau}\frac{dx^\rho}{d\tau} = 0.$$

$$\frac{d^2(x^\mu+\zeta^\mu)}{d\tau^2} + \Gamma^\mu_{\nu\rho}(x+\zeta)\frac{d(x^\nu+\zeta^\nu)}{d\tau}\frac{d(x^\rho+\zeta^\rho)}{d\tau} = 0$$

$$\frac{d^2\zeta^\mu}{d\tau^2} + 2\Gamma^\mu_{\nu\rho}\frac{dx^\nu}{d\tau}\frac{d\zeta^\rho}{d\tau} + \zeta^\sigma\partial_\sigma\Gamma^\mu_{\nu\rho}(x)\frac{dx^\nu}{d\tau}\frac{dx^\rho}{d\tau} = 0.$$

$$\frac{DV^\mu}{D\tau} = \frac{dV^\mu}{d\tau} + \Gamma^\mu_{\nu\rho}V^\nu\frac{dx^\rho}{d\tau}$$

$$\frac{D^2\zeta^\mu}{D\tau^2} = -R^\mu{}_{\nu\rho\sigma}\zeta^\rho\frac{dx^\nu}{d\tau}\frac{dx^\sigma}{d\tau}$$

- В локально-лоренцевой СО : $\Gamma^{\mu}_{\nu\rho}(P) = 0.$

$$\frac{d^2\zeta^i}{d\tau^2} = -R^i{}_{0j0}\zeta^j \left(\frac{dx^0}{d\tau}\right)^2$$

- Нерелятивистские движения масс: $dx^0/d\tau \simeq c$

$$\ddot{\zeta}^i = -c^2 R^i{}_{0j0}\zeta^j \qquad R^i{}_{0j0} = R_{i0j0} = -\frac{1}{c^2}\ddot{h}^{\mathrm{TT}}_{ij}$$

$$R_{\alpha\beta\gamma\delta} = \frac{1}{2}h^{\mathrm{TT}}_{\{\alpha\beta,\gamma\delta\}} \equiv \frac{1}{2}(h^{\mathrm{TT}}_{\alpha\delta,\beta\gamma} + h^{\mathrm{TT}}_{\beta\gamma,\alpha\delta} - h^{\mathrm{TT}}_{\alpha\gamma,\beta\delta} - h^{\mathrm{TT}}_{\beta\delta,\alpha\gamma})$$

$$\ddot{\zeta}^i = \frac{1}{2}\ddot{h}^{\mathrm{TT}}_{ij}\zeta^j.$$

$$\delta x^j = \frac{1}{2}h^{\mathrm{TT}}_{jk}x^k$$

850 m w.e.
BUST
Tunnel entrance
The Baksan Neutrino Observatory of Institute for Nuclear Research of RAS

Камера подземного сцинтилляционного телескопа
Вспомогательная штольня
Главная штольня
Камера ГАИШ
400 м
2100 м
500 м
Вентиляторная
3000 м
Камера лаборатории НФИ
Камера лаборатории НФИ
1500 м
1320 м
Камера гравитационной антенны
Камера геофизических исследований
Камера геофизических исследований
OGRAN chamber
3400м
3900 м
Камера галлий-германиевого нейтринного телескопа
3700 м
4300 м