

Гравитационные волны и их открытие

Постнов К.А

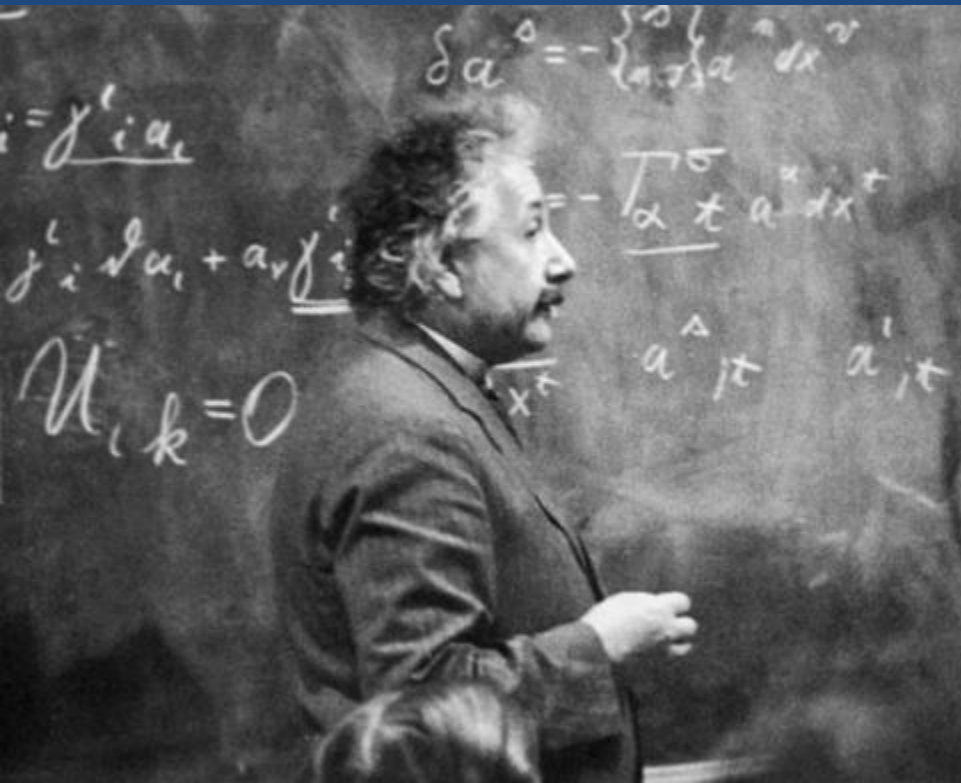
Физический факультет МГУ,

ГАИШ МГУ, ИТЭФ

Нелинейные Волны – 2016, 28 февраля 2016 г.

Нижний Новгород

Общая теория относительности



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

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

Einstein develops new theory of relativity

Professor Albert Einstein of the Kaiser Wilhelm Institute in Berlin has proposed a theory about the nature of time, space and gravity that will dramatically alter mankind's view of the universe if it is accepted. The new theory is an extension of Einstein's Special Theory of Relativity, which he published in 1905, and which gets its name from the thesis that there is no absolute time and absolute space. Instead, all motion is relative, and the rate at which time passes depends on the velocity of a body in motion.

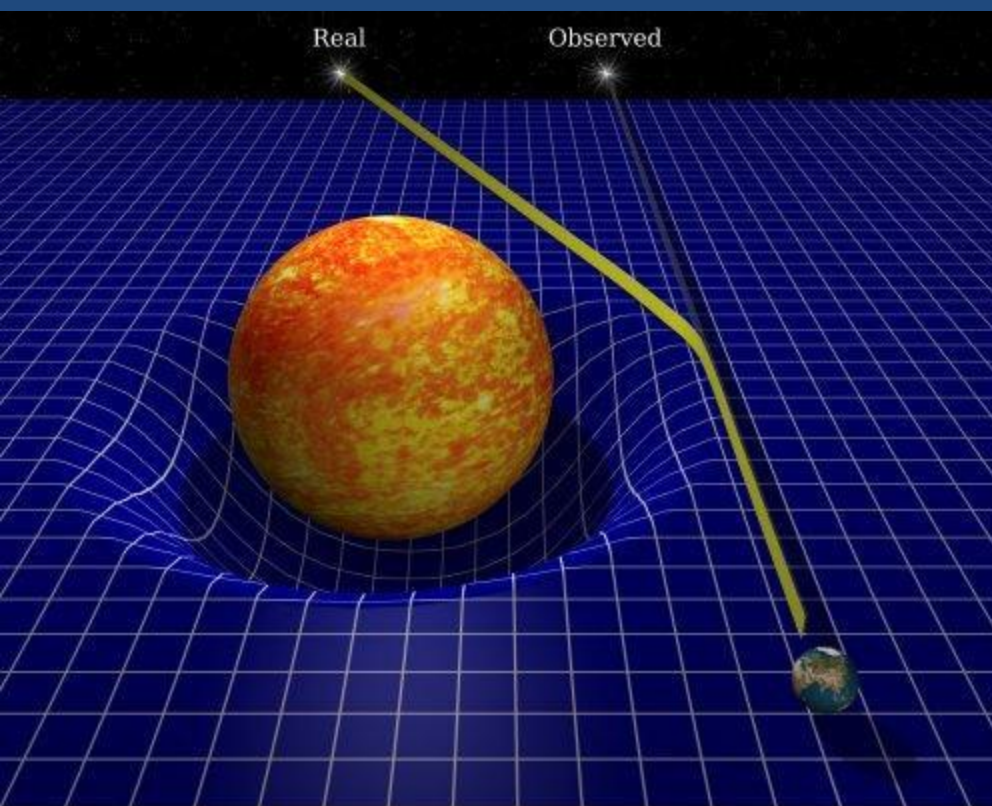
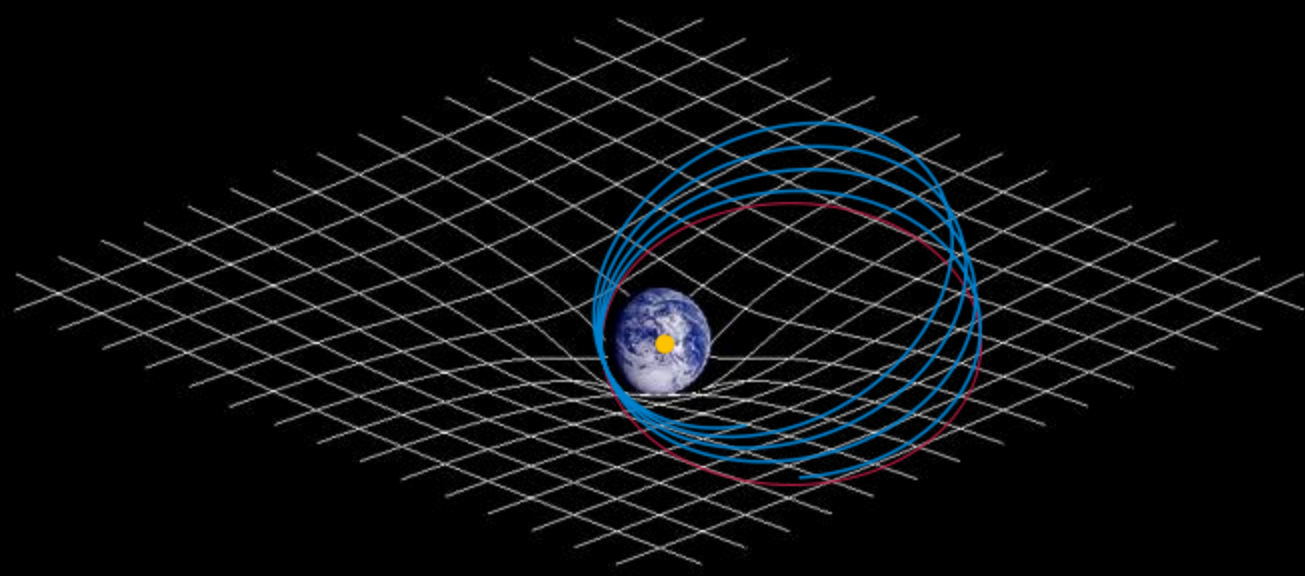
The new General Theory of Relativity alters the view of gravity proposed by Sir Isaac Newton more than two centuries ago. Newton viewed gravity as a force exerted by one body on another. According to Einstein, gravity is a property of space that is induced by the presence of matter. Because the effects predicted by Einstein are subtle and occur only in intense gravitational fields, scientists will not be able to test relativity against Newtonian physics until the war in Europe has ended and peaceful research resumes.



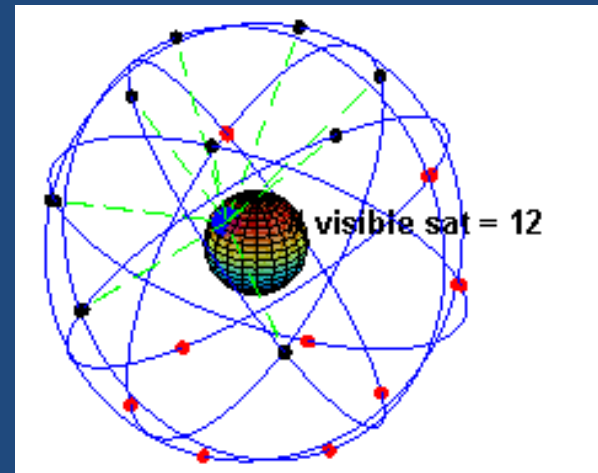
Professor Einstein in Berlin.

Предсказания

- Аномальное движения перигелия Меркурия 43"/100 лет (1915)
- Отклонение лучей вблизи массивных тел (1919, Эддингтон)
- Гравитационные волны (1992, 2016)



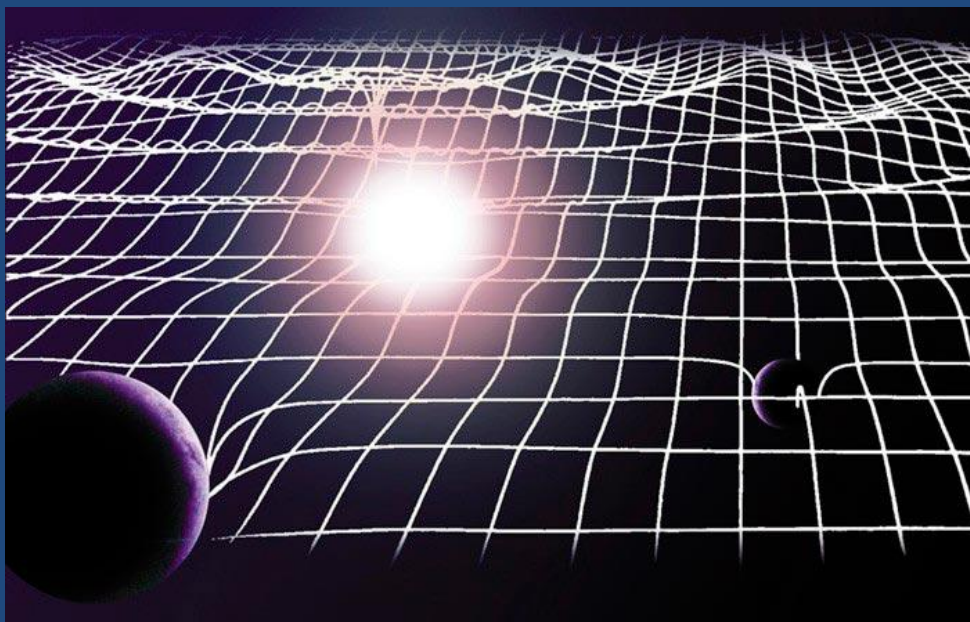
На практике – GPS-навигация



Свойства гравитационных волн



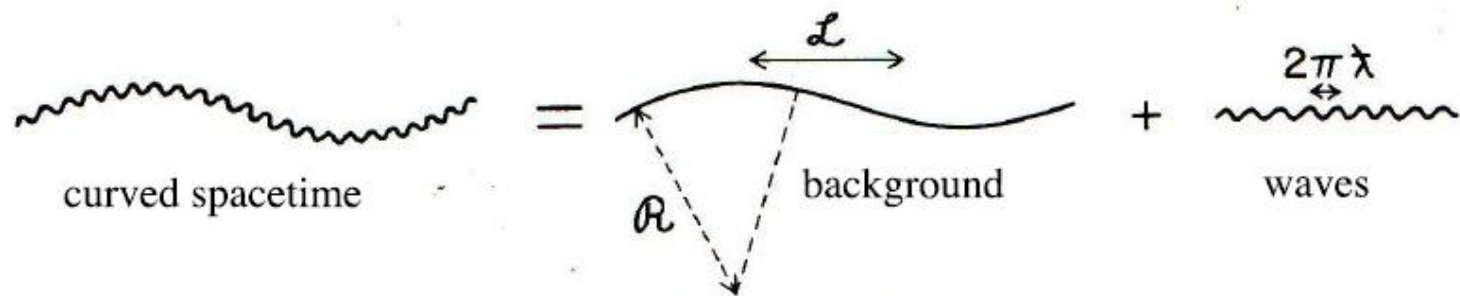
- Обычные волны – «рябь» на поверхности



- Гравитационные волны – «складки» пространства-времени

ГВ «рябь» пространства-времени

$$g_{\alpha\beta} = g_{\alpha\beta}^B + h_{\alpha\beta}, \quad R_{\alpha\beta\gamma\delta} = R_{\alpha\beta\gamma\delta}^B$$



Линеаризованная гравитация

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

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

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

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

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

Калибровочно-инвариантен!!!

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

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

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

Гравитационные волны

$$c^2 \bar{h}^{00} = -4\phi$$

$$c^2 h_{00} = -2\phi$$

$$\Delta\phi = 4\pi G\rho$$

- Удобная калибровка

$$\square \xi_\mu = 0.$$

$$\square \xi_{\mu\nu} = 0$$

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

- Не нарушает вида линеаризованных уравнений и гармоническую (Лоренцеву) калибровку

$$\partial^\nu \bar{h}_{\mu\nu} = 0.$$

- Можно использовать 4 функции ξ для зануления 4 компонент \rightarrow остается только 2 независимые компоненты (поляризации)

ТТ-калибровка (поперечно-бесследовая)

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

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

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

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

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

$$\partial^j h_{ij} = 0$$



$$\mathbf{k}^j h_{ij}^{\text{TT}} = 0$$

$$n^j h_{ij}^{\text{TT}} = 0$$

$$\hat{\mathbf{n}} = \mathbf{k}/|\mathbf{k}|$$

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

Переход к ТТ-калибровке

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

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

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

- Например, для волны вдоль оси z:

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

Действие ГВ на пробные массы в ТТ-калибровке

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

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

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

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

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

- В локально-лоренцевой СО :

$$\Gamma_{\nu\rho}^{\mu}(P) = 0.$$

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

- Нерелятивистские движения масс:

$$dx^0/d\tau \simeq c$$

$$\ddot{\zeta}^i = -c^2 R^i{}_{0j0}\zeta^j$$

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

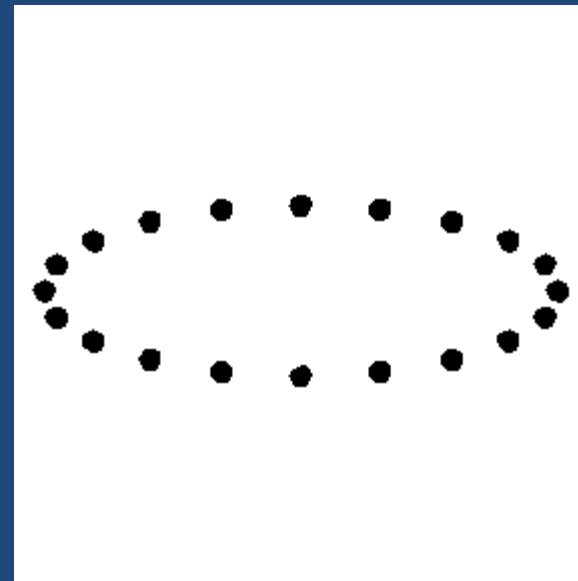
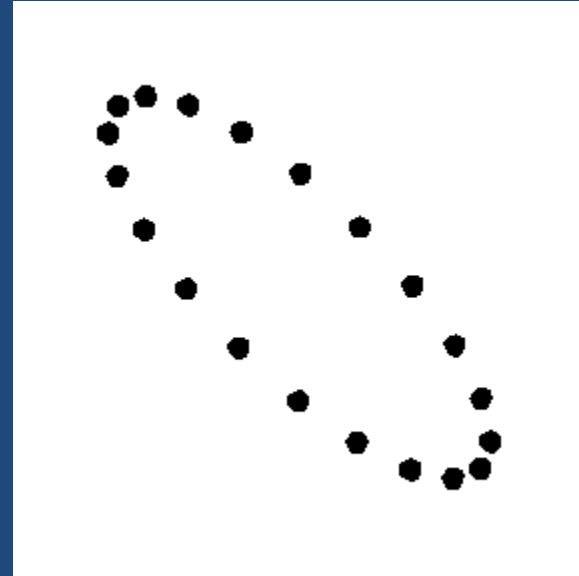
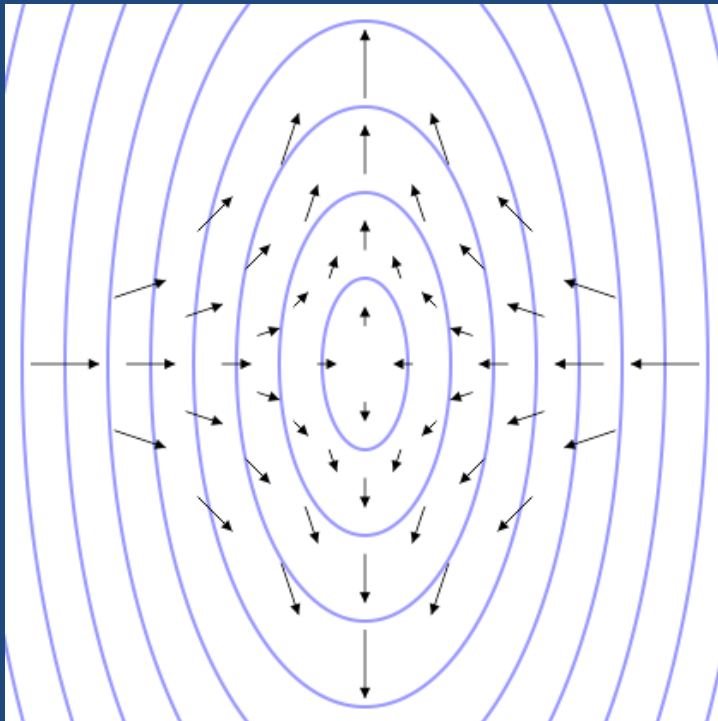
$$R_{\alpha\beta\gamma\delta} = \frac{1}{2}h_{\{\alpha\beta,\gamma\delta\}}^{\text{TT}} \equiv \frac{1}{2}(h_{\alpha\delta,\beta\gamma}^{\text{TT}} + h_{\beta\gamma,\alpha\delta}^{\text{TT}} - h_{\alpha\gamma,\beta\delta}^{\text{TT}} - h_{\beta\delta,\alpha\gamma}^{\text{TT}})$$

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

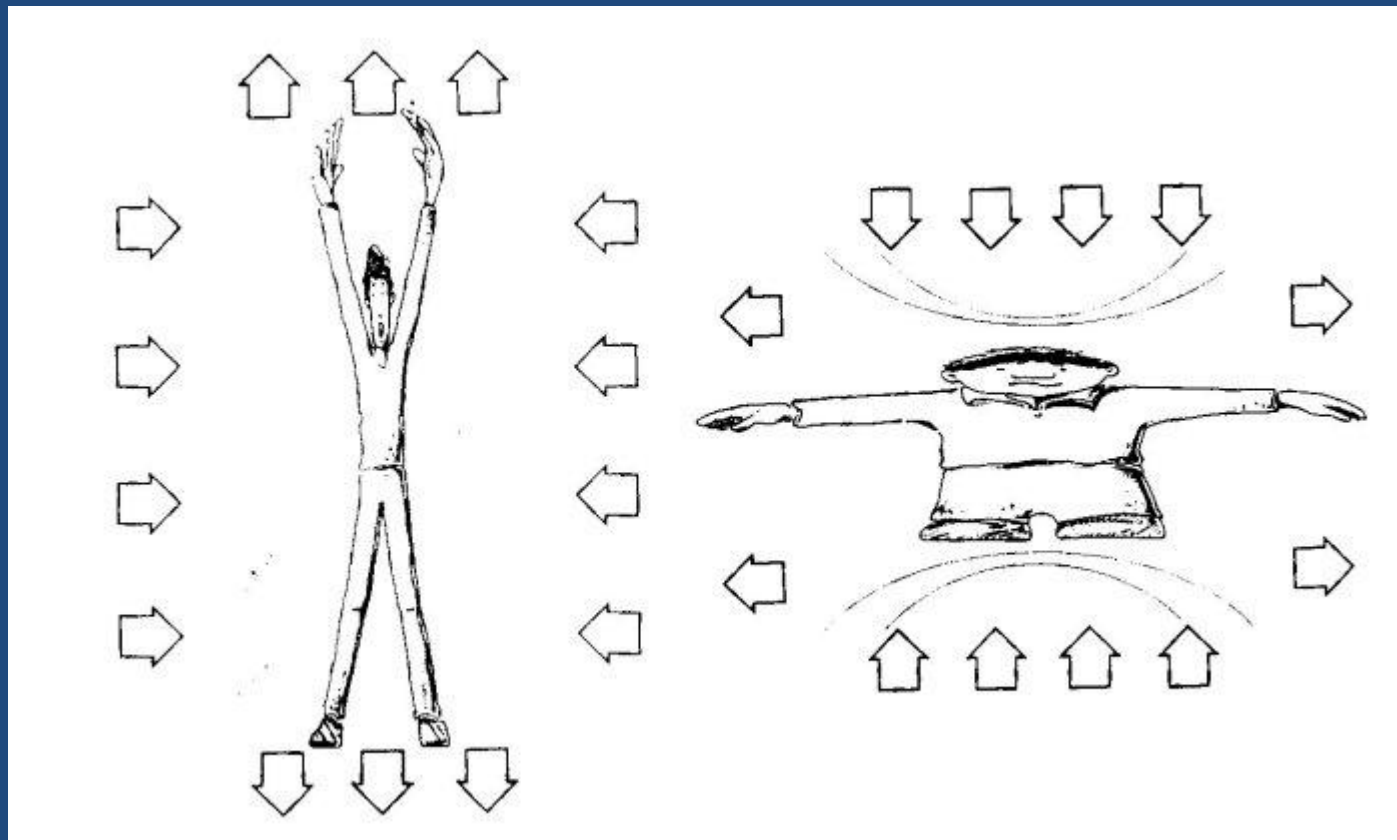
$$\delta x^j = \frac{1}{2}h_{jk}^{\text{TT}}x^k$$

ГВ создает поле приливных ускорений

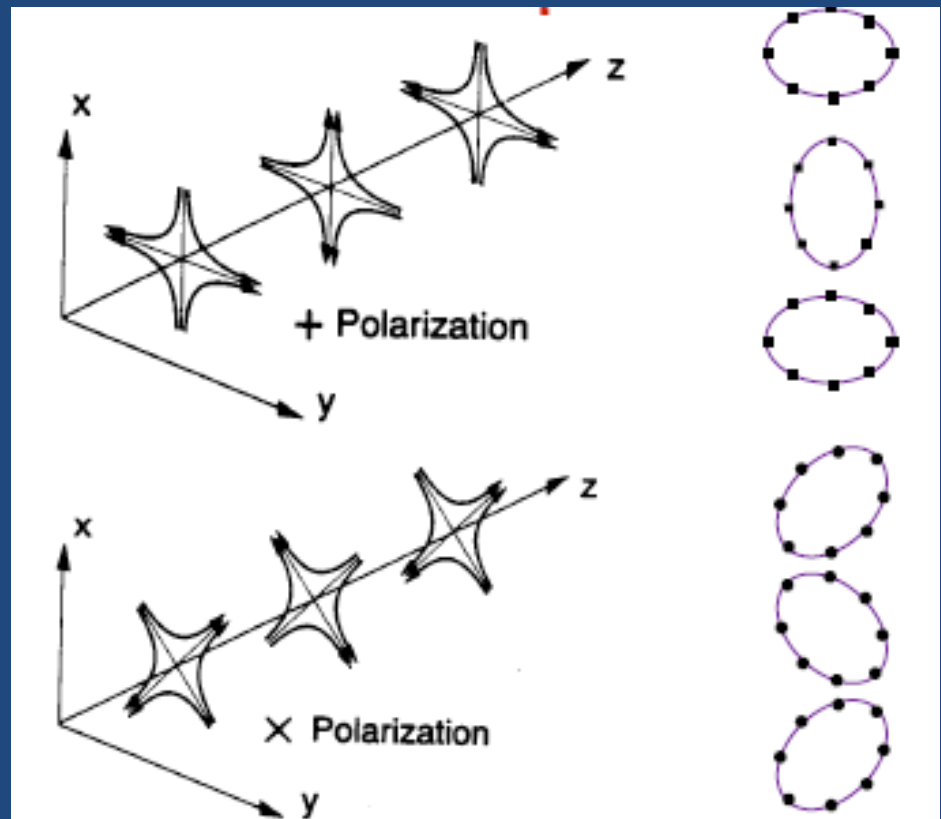
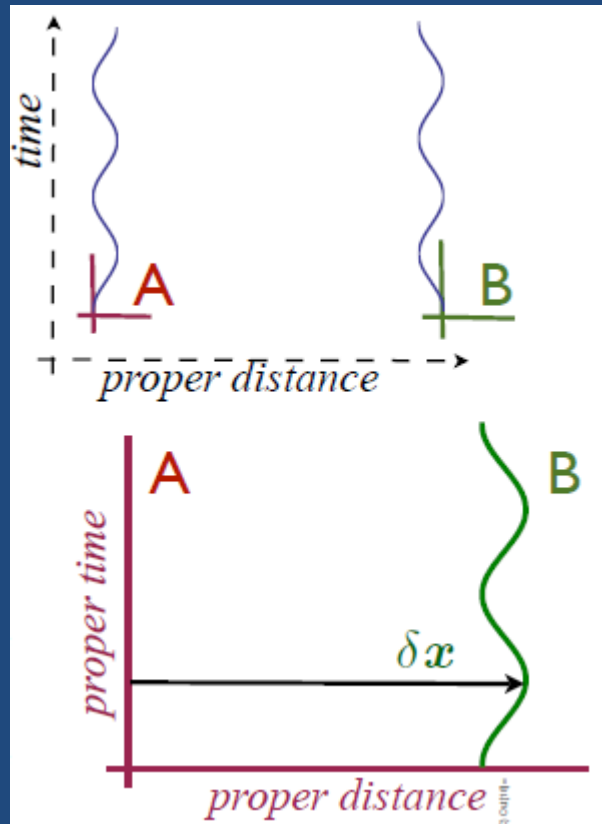
$$\mathcal{E}_{ij} = R_{i0j0} = -\frac{1}{2}\ddot{h}_{ij}^{\text{TT}}$$



Амплитуда волны h = относительное растяжение/сжатие



Поле приливных ускорений



$$\delta x_j = \frac{1}{2} h_{jk}^{GW} x_k$$

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

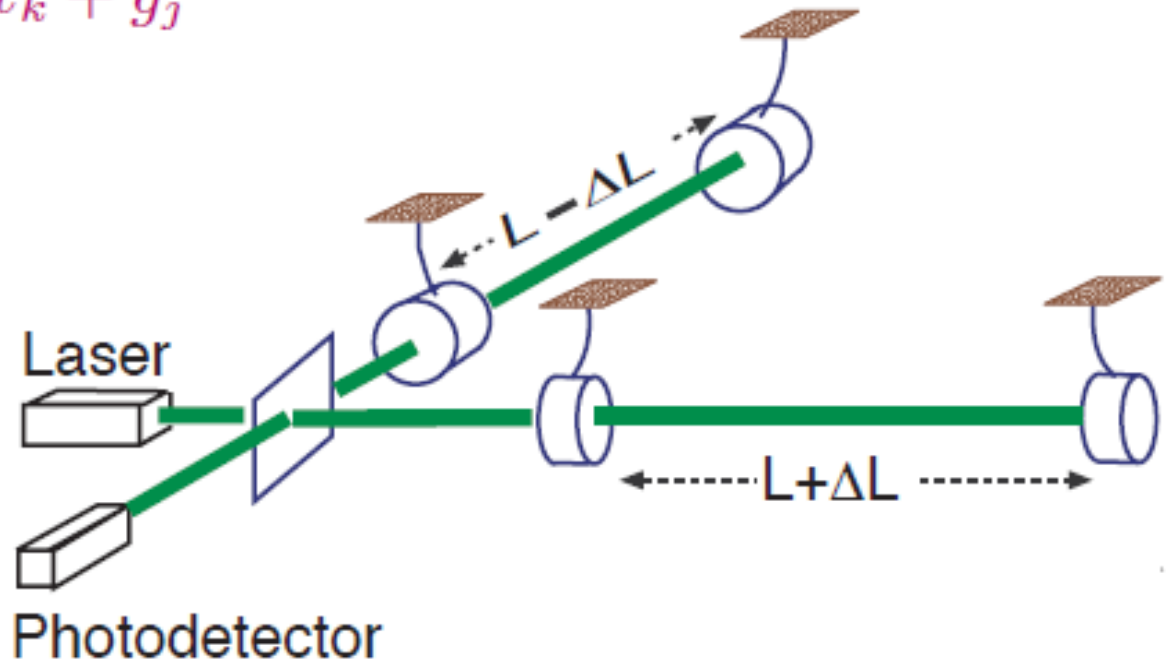
$$\frac{dE_{\text{GW}}}{dt} = \frac{c^3 r^2}{16\pi G} \int d\Omega \langle \dot{h}_+^2 + \dot{h}_\times^2 \rangle.$$

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

В локальной (лоренцевой) СО

- Полная сила, действующая на свободные массы

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



Излучение ГВ

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

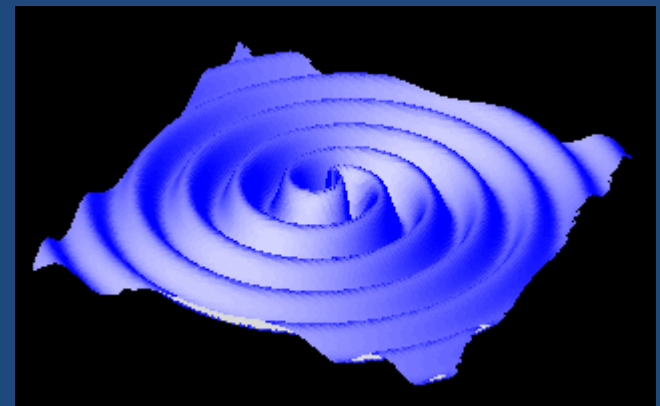
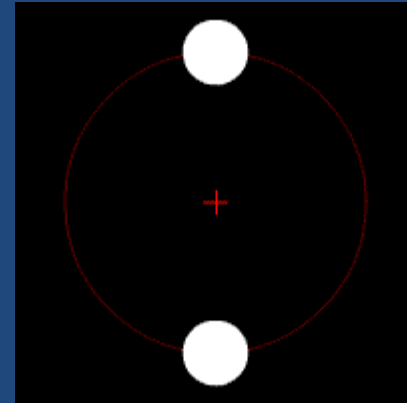
- Низший порядок – квадрупольное излучение. Для $v/c \ll 1$:

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

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

Астрофизические источники

- Несимметричные движения больших масс с большими скоростями
- Тесные двойные компактные звезды (белые карлики, нейтронные звезды, черные дыры)
- $h \sim r_g / D \sim 10^{-22}$



Квадрупольная формула в НЬЮТОНОВСКОМ ПРИБЛИЖЕНИИ

Binary star: M_1, M_2, a . Assume circular orbit.

$M_1 a_1 = M_2 a_2$, $a = a_1 + a_2 = const$ in Newtonian case.

Kepler's 3d law: $\omega^2 \equiv \left(\frac{2\pi}{T}\right)^2 = \frac{G(M_1 + M_2)}{a^3}$

Gravitational radiation is due to variable quadrupole moment of the system. Q.m. is the same twice the orbital period \Rightarrow

$$\omega_{GW} = 2\omega, \quad \lambda_{GW} = \frac{2\pi c}{2\omega} = \frac{cT}{2}$$

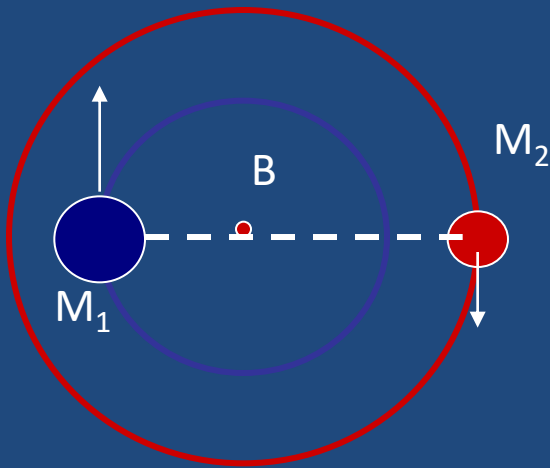
Wave zone: $r > R_l \sim \frac{c}{\omega}$ Field $\sim 1/r$ for radiation

Inside W.z. ($r < R_l$) the field is just variable tidal accelerations:

$$\text{mass 1: } \sim \frac{GM_1}{r^3} a_1 \sim \frac{G\mu}{r^3} a$$

$$\text{mass 2: } \sim \frac{GM_2}{r^3} a_2 \sim \frac{G\mu}{r^3} a,$$

where $\mu \equiv \frac{M_1 M_2}{M}$ is reduced mass, $M \equiv M_1 + M_2$ is the total mass



Волновая зона

$$r \gg \lambda$$

$$A \sim 1/r$$

Статическая зона

$$A \sim 1/r^2$$

Radiation of **any field** outside the wave zone:

$$\text{Field: } A \sim 1/r$$

$$\text{Energy flux: } S \sim A^2$$

$$\text{Energy loss: } dE/dt \sim r^2 S$$

$$\text{GW from a binary: } A_{\text{GW}} \sim A_1 - A_2,$$

$$A_1 \sim \frac{G}{c^2} \frac{\mu \omega^2 a}{r} e^{i2\omega t} \sim \frac{\mu \omega^2 a}{r} e^{i2\omega t} \quad (\text{to sew at } R=R_1 !)$$

$$A_2 \sim \frac{\mu \omega^2 a}{r} e^{i(2\omega t - \Delta\phi)}, \quad \text{phase delay } \Delta\phi \sim (a_1 + a_2)\omega \sim \frac{a}{\lambda_{\text{GW}}}$$

$$\text{In the w.z. } r \gg \lambda_{\text{GW}} \gg a$$

$$A_{\text{GW}} \sim \frac{\mu \omega^2 a}{r} \Delta\phi \sim \frac{\mu \omega^3 a^2}{r}$$

$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle_{\text{GW}} \sim A_{\text{GW}}^2 r^2 \sim \mu^2 \omega^6 a^4 \sim \frac{\mu^2 M^3}{a^5} = - \frac{G^4}{c^5} \frac{\mu^2 M^3}{a^5}$$

Exact expression reads:

$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle_{\text{GW}} = - \frac{32G^4}{5c^5} \frac{\mu^2 M^3}{a^5}$$

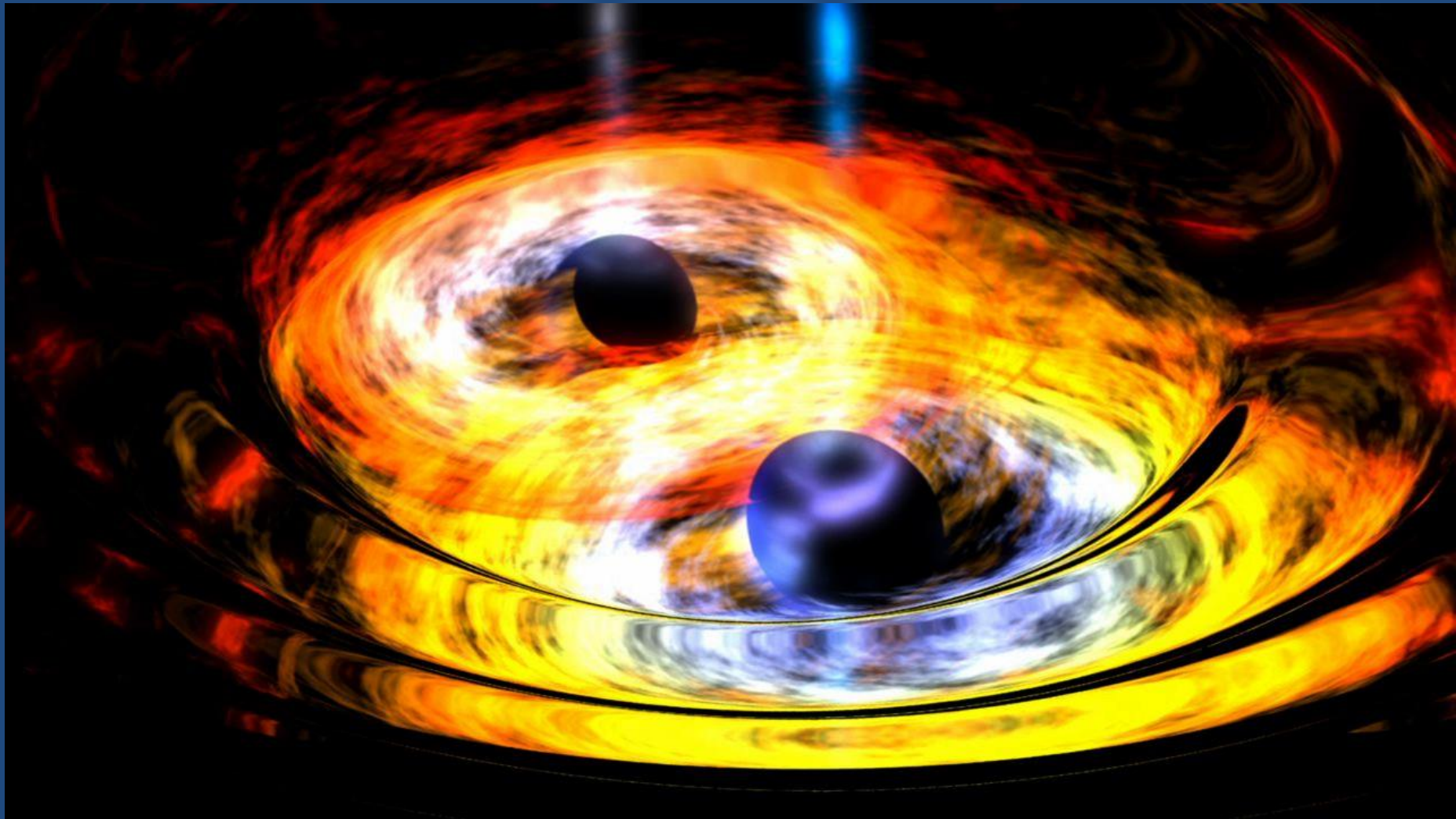
Слияние НЗ

- Приводит к мощному выделению ЭМ энергии (космические гамма-всплески)



binary_crash_sm.mpg

Слияние черных дыр



Самое мощное излучение ГВ

- Сверхмассивные ЧД
в ядрах галактик



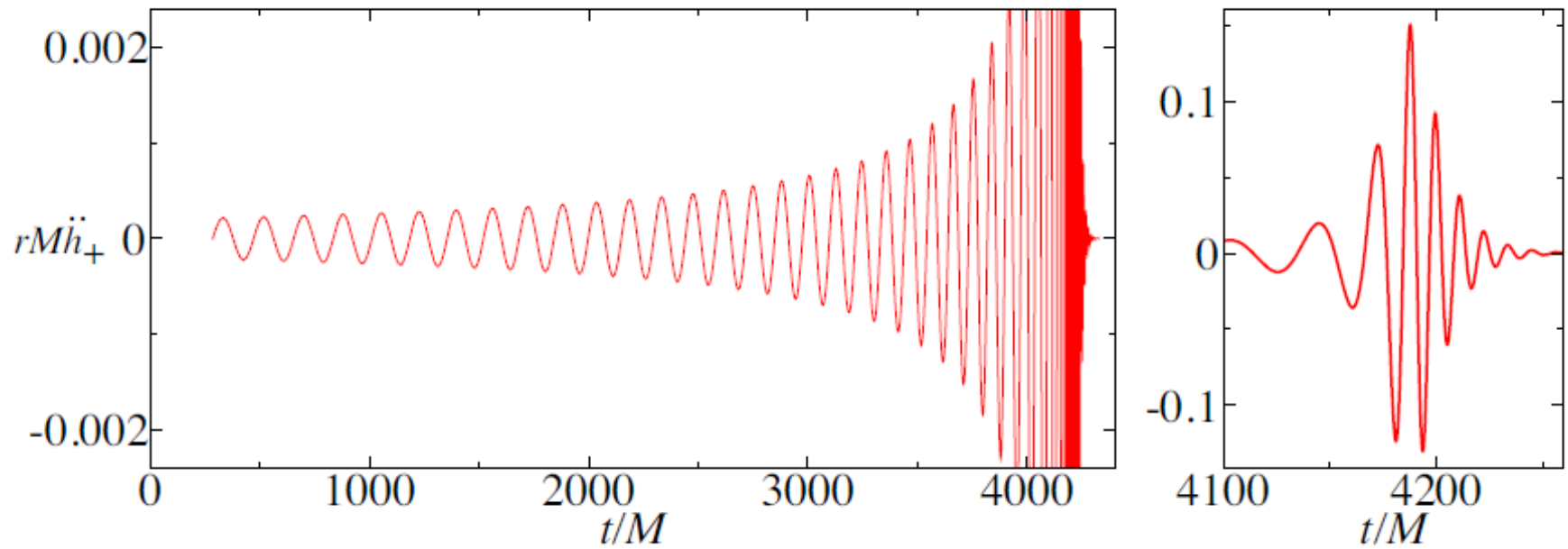
11086_BH_Merger_H264_Good_1280x720_29.97.mov



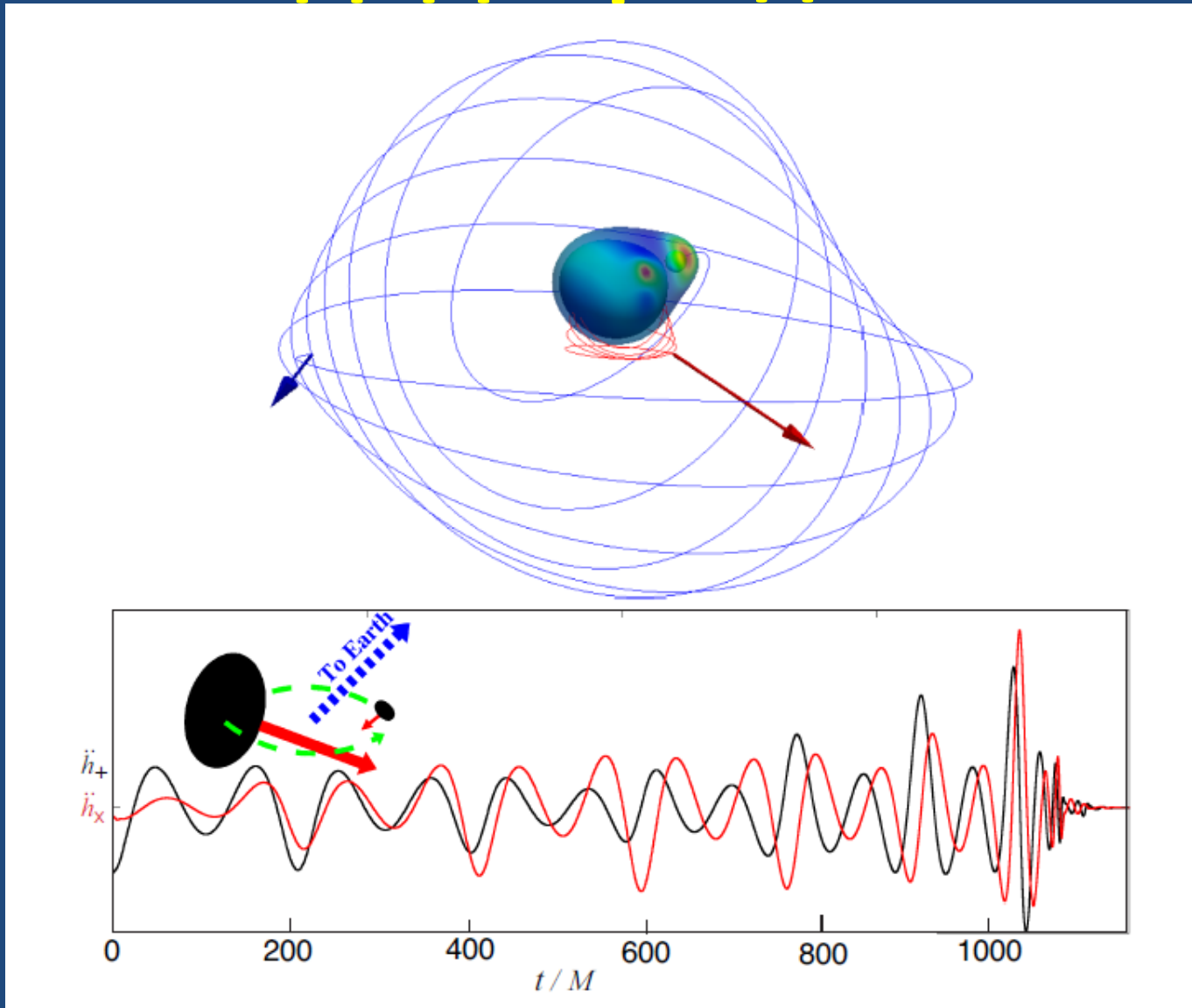
$$\bullet h \sim r_g / D \sim 10^{-22}$$

HST

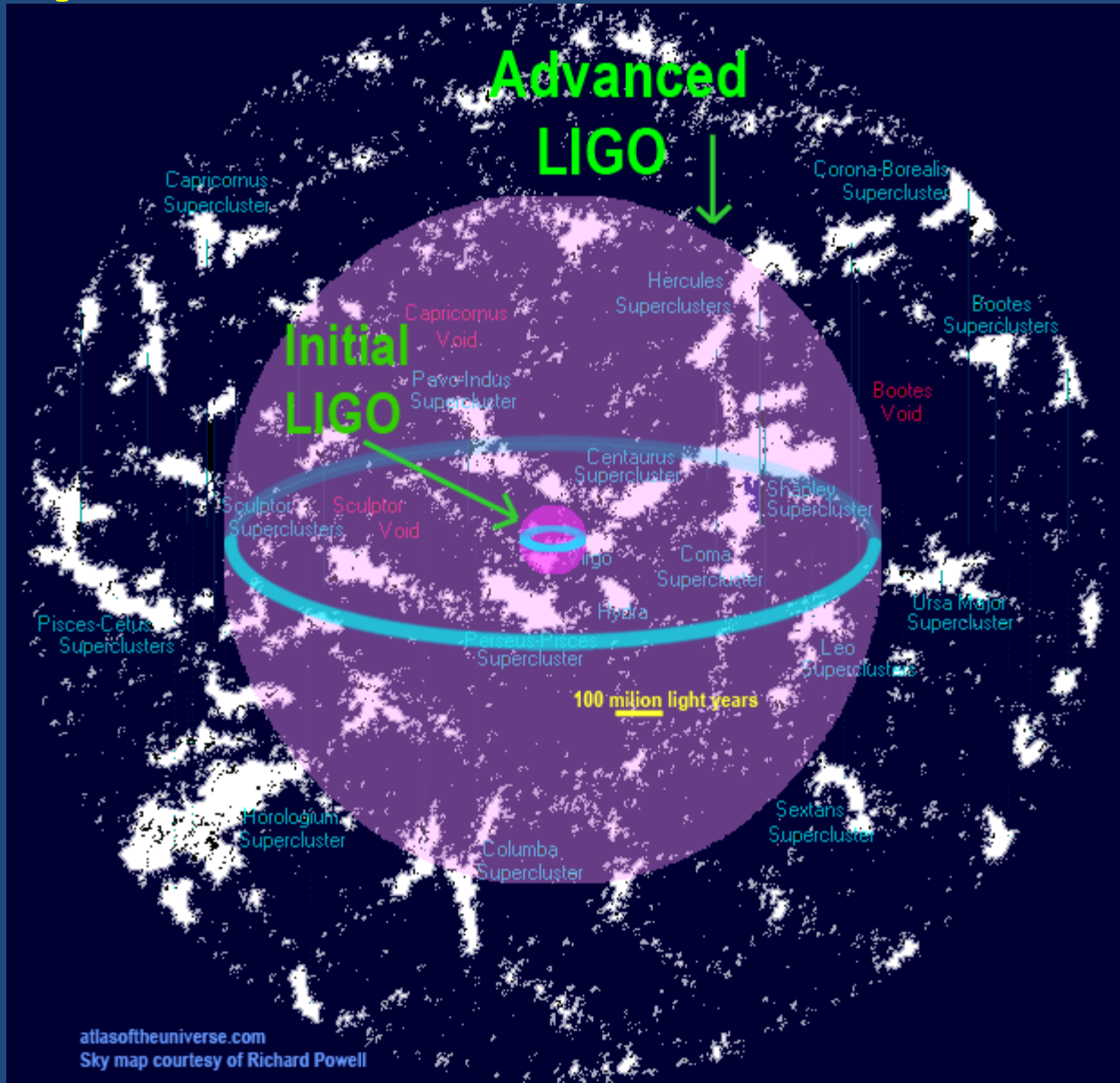
Форма сигнала



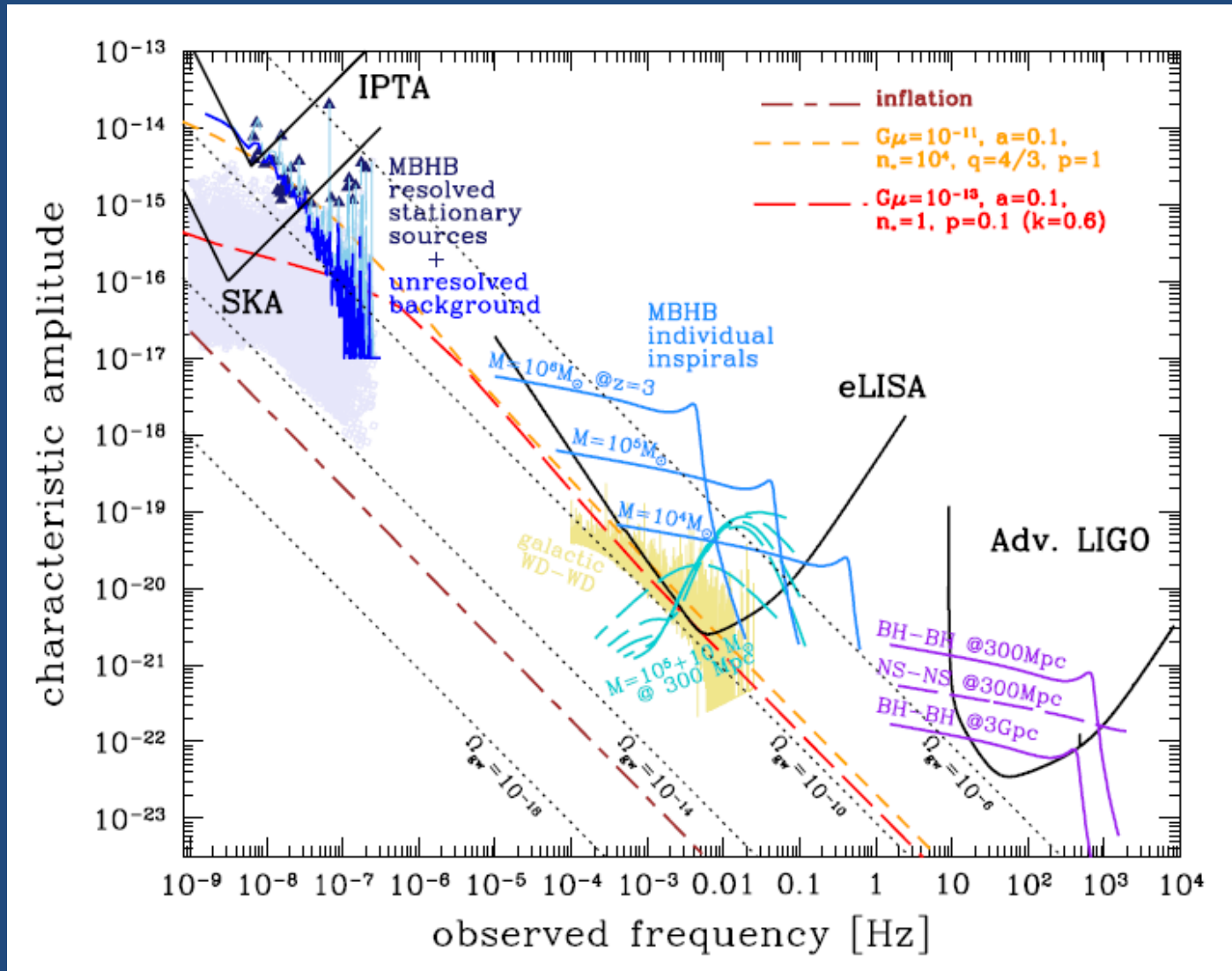
Сигнал от ДЧД гораздо сложнее



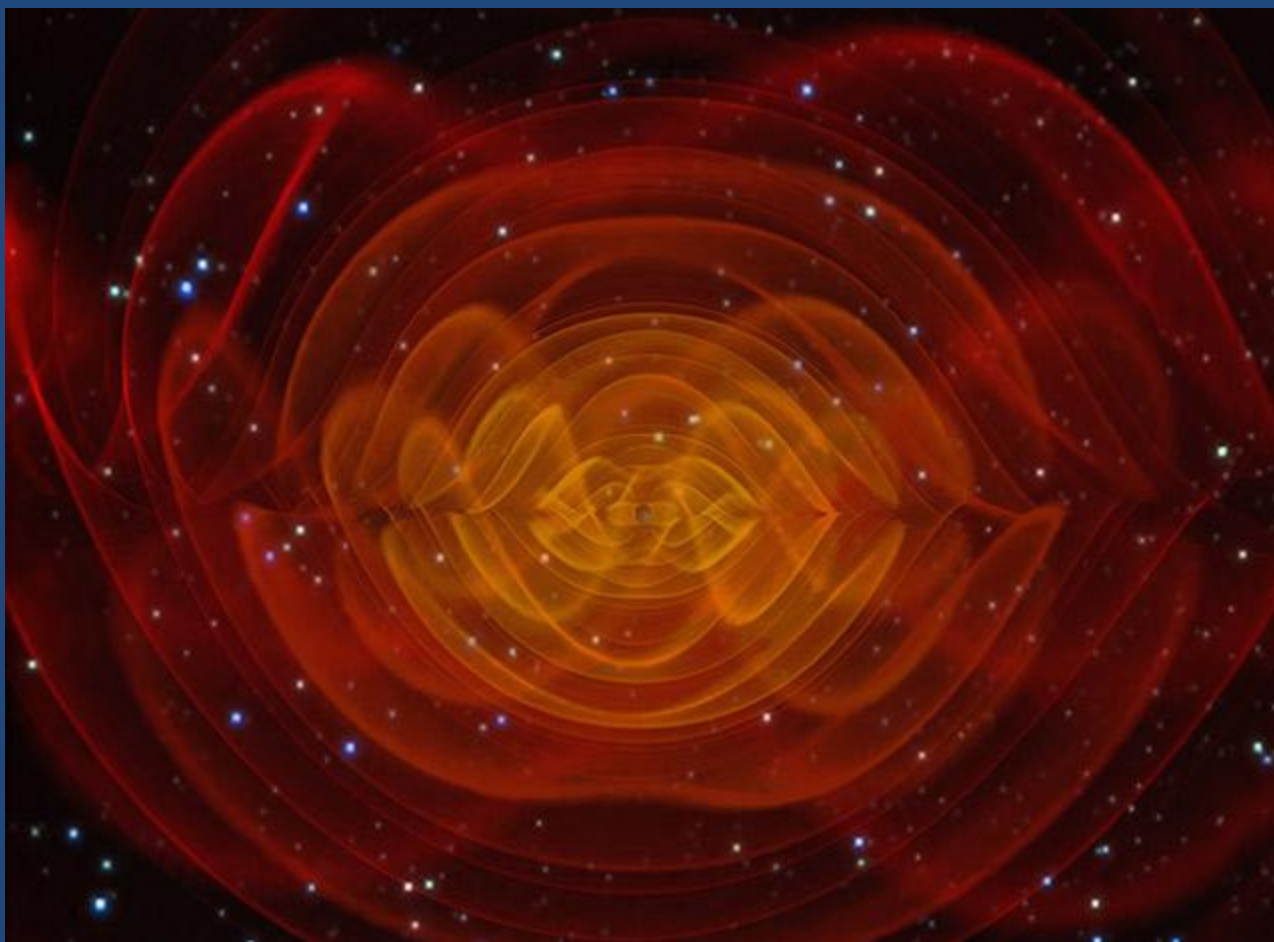
«Горизонт» ~200 Мпк для NSNS



Астрофизические источники

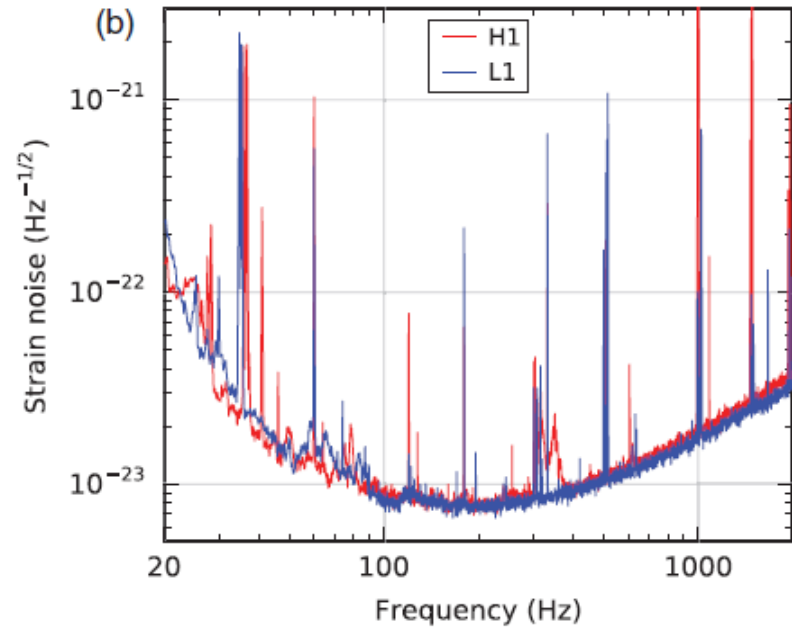
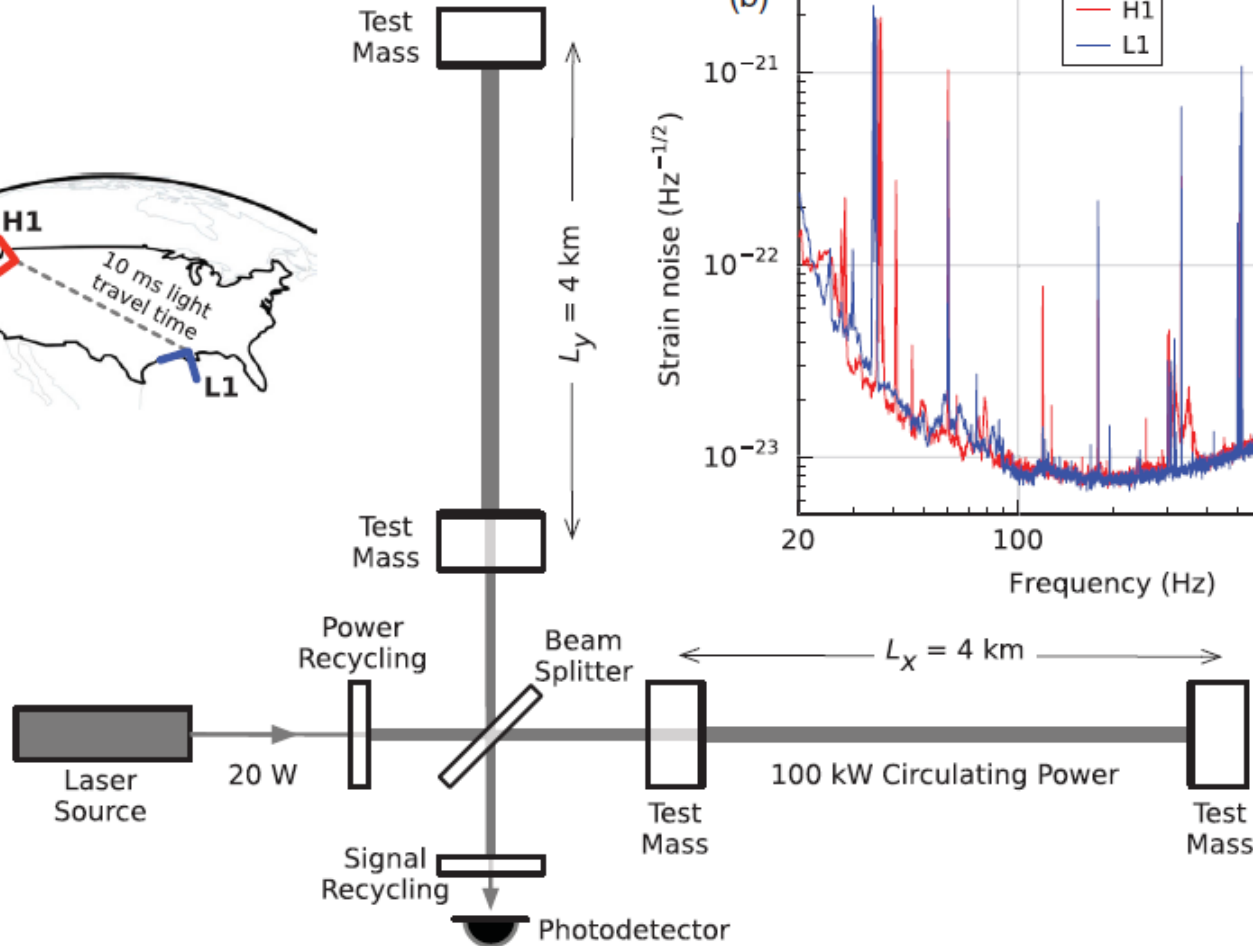
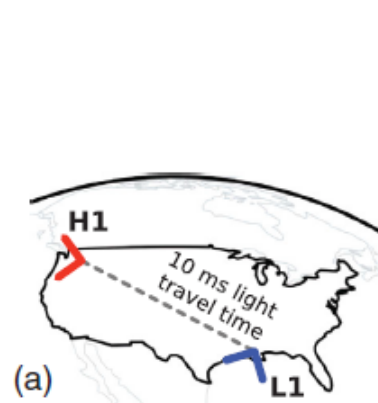


Гравитационные волны LIGO



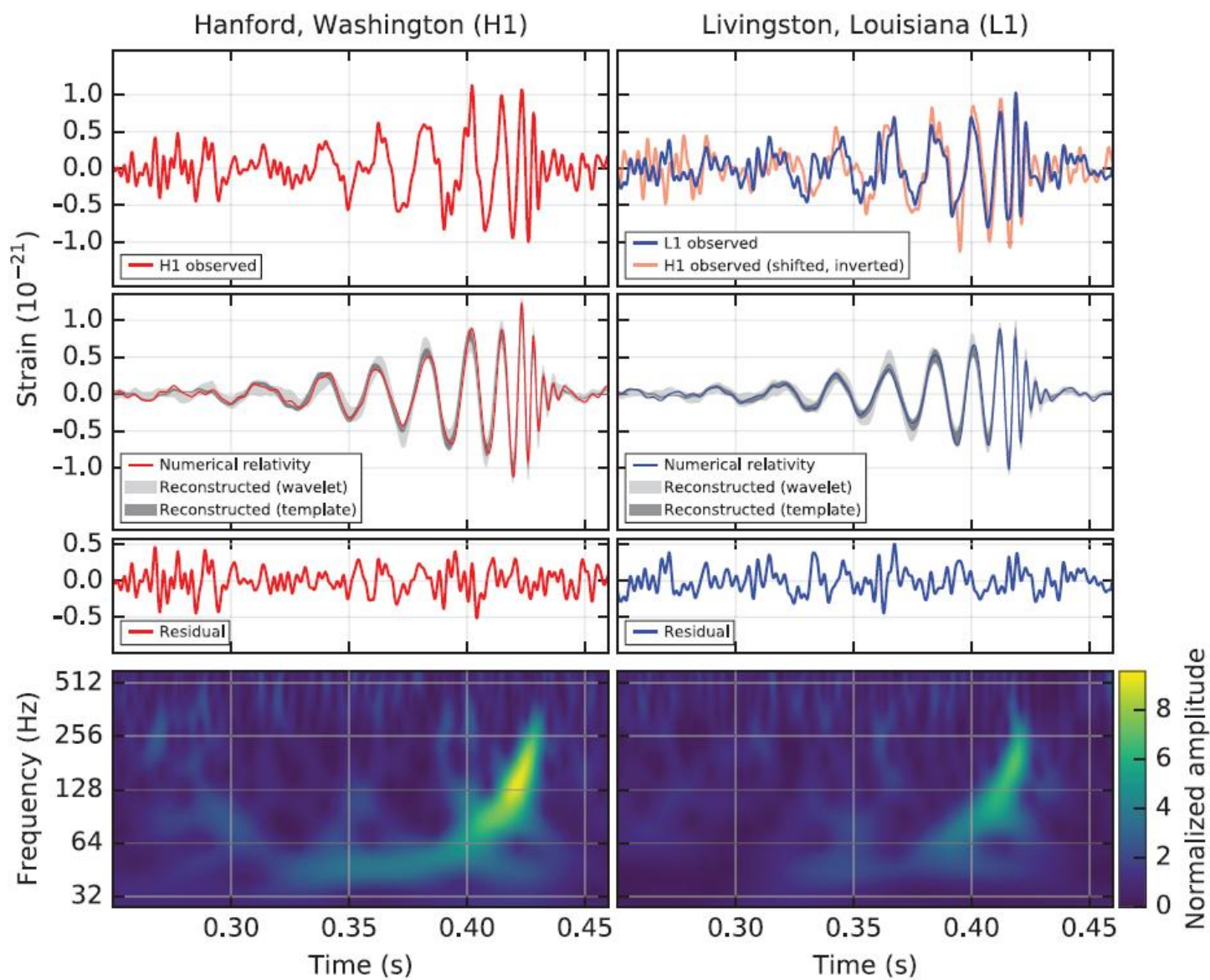
Объявление о первой регистрации коллаборацией LIGO 11/02/2016

Детекторы LIGO



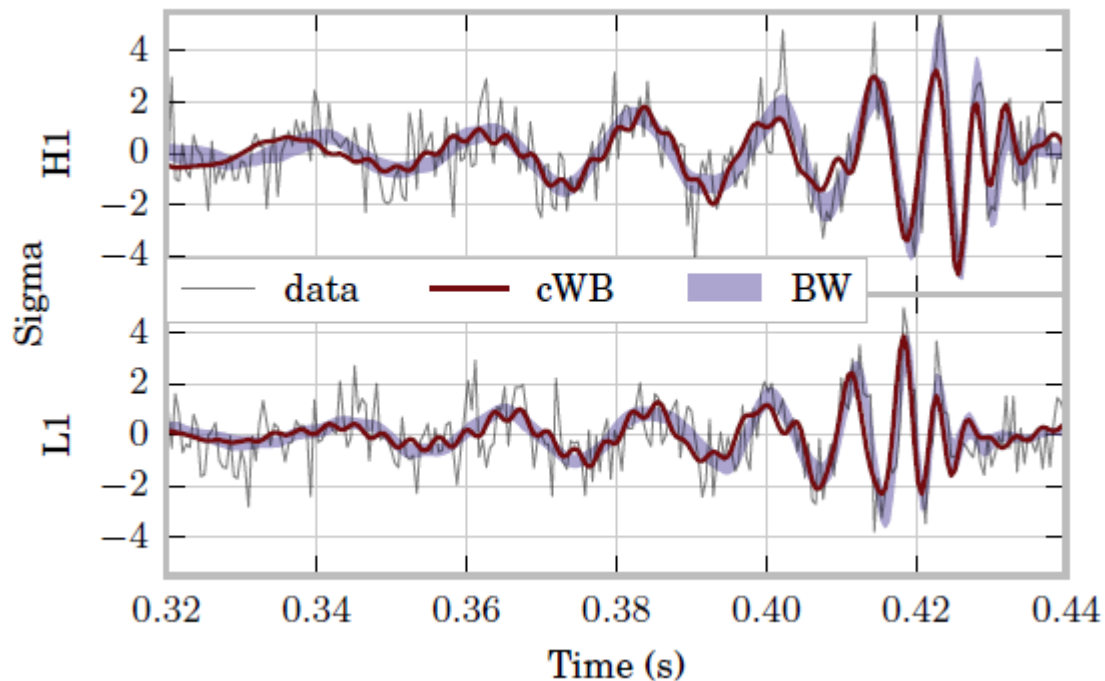
Сигнал

[Phys. Rev. Lett. 116, 061102 \(2016\)](https://arxiv.org/abs/1602.03837)



Восстановление формы сигнала различными методами

- Байесовский метод через ф. макс. правдоподобия, не предполагая форму

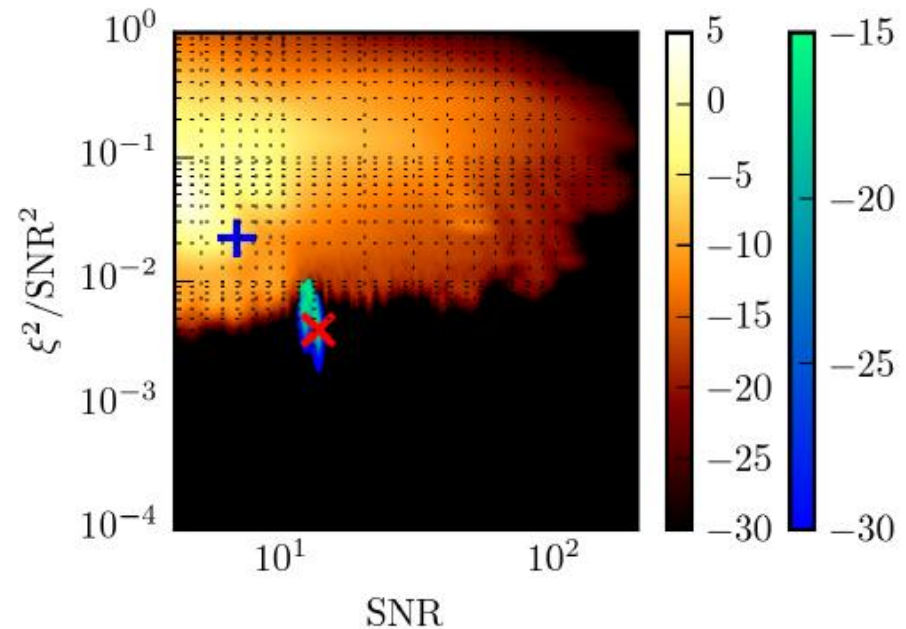
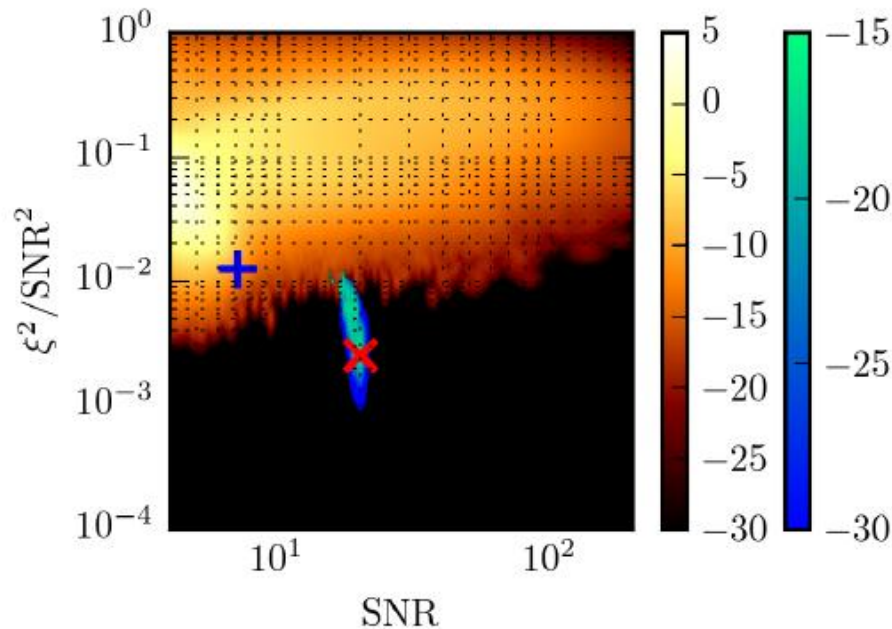


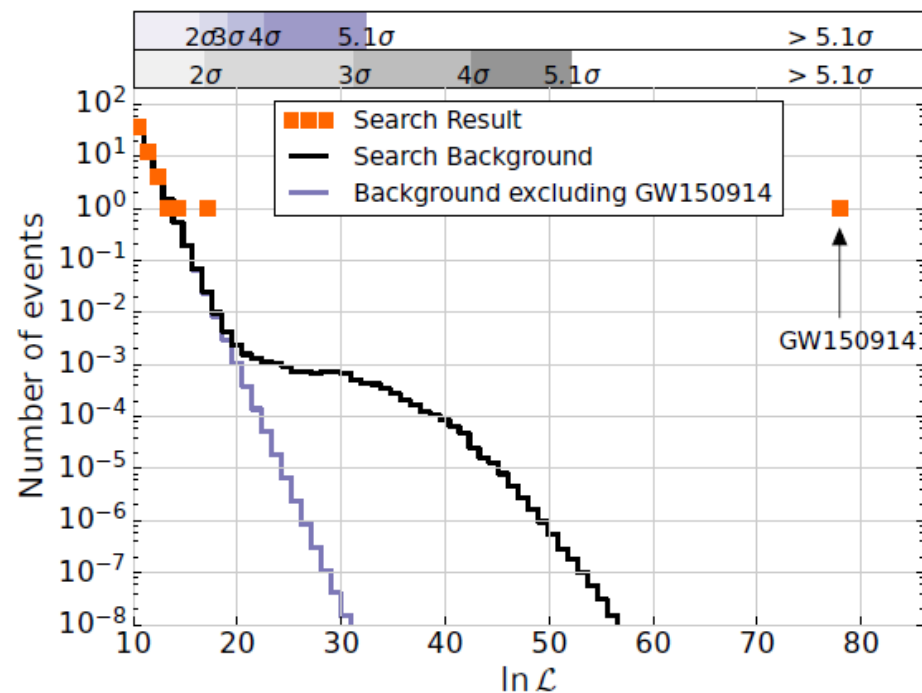
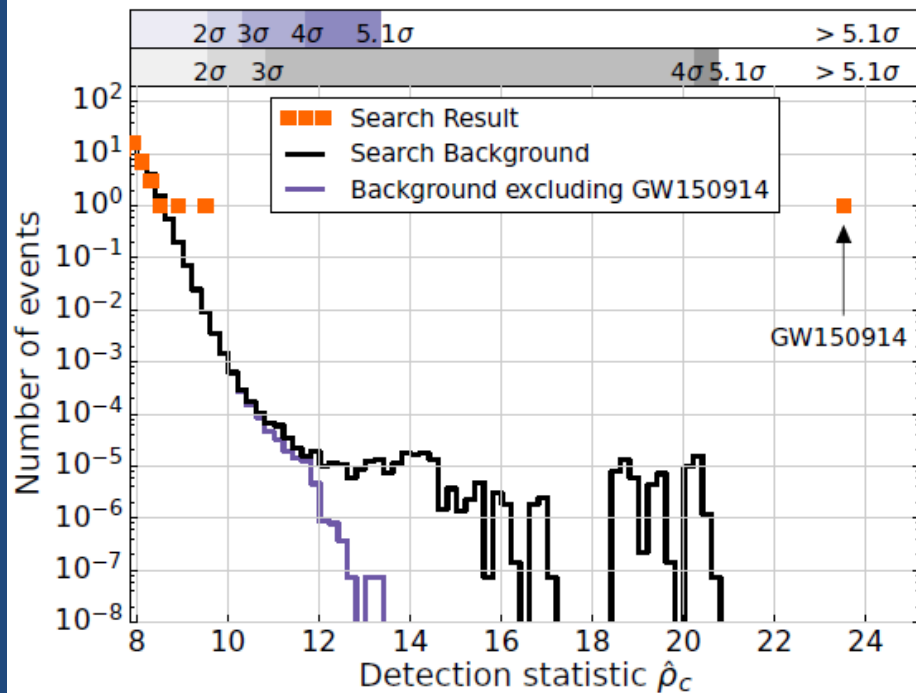
[arXiv:1602.03840](https://arxiv.org/abs/1602.03840)

- Метод темплейтов. Триггер при $\text{SNR} > 4$
- Оптимальное отношение сигнал/шум при оптимальной фильтрации
- 2 события: GW150914 и LVT151012

$$\begin{aligned} \frac{S}{N} &= (h|h)^{1/2} \\ &= 4 \int_0^\infty \frac{|h(f)|^2}{S_n(f)}. \end{aligned}$$

[arXiv:1602.03840](https://arxiv.org/abs/1602.03840)



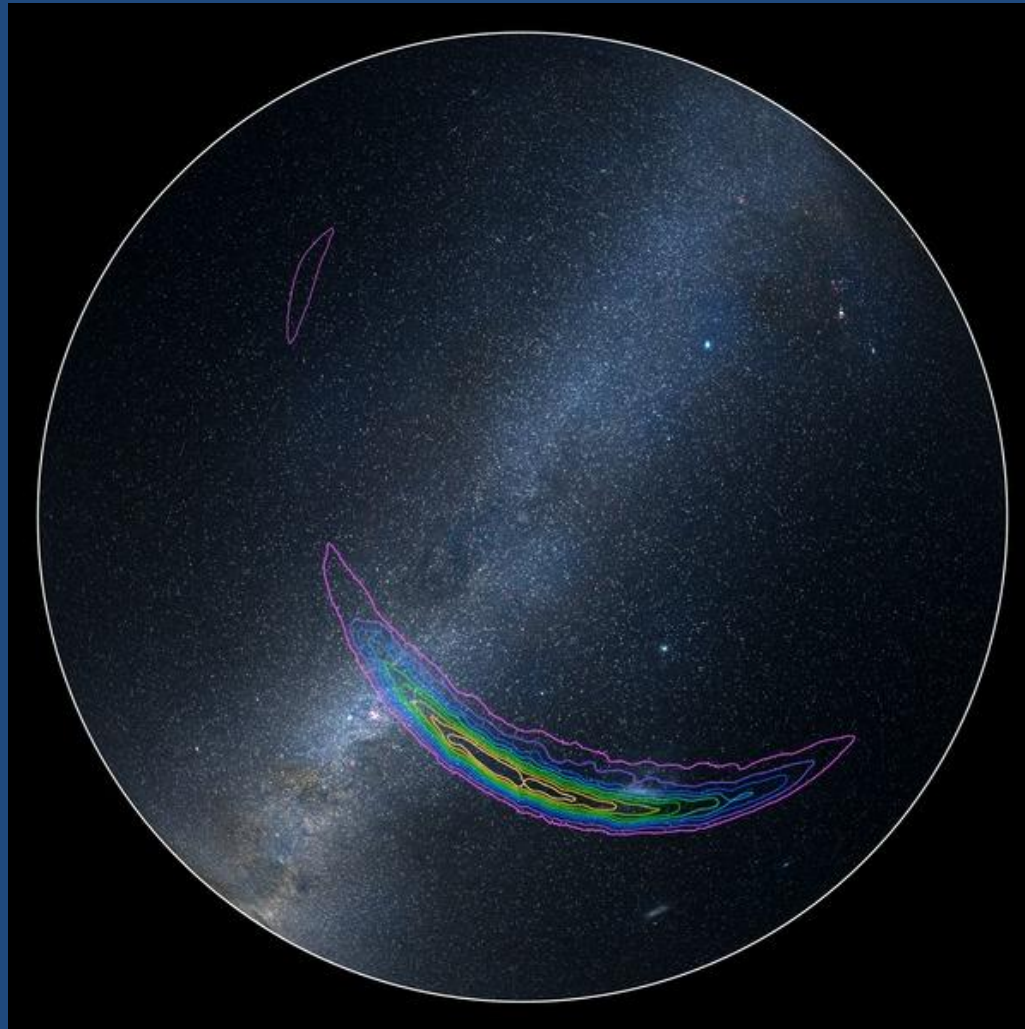


LVC: arXiv:1602.03839

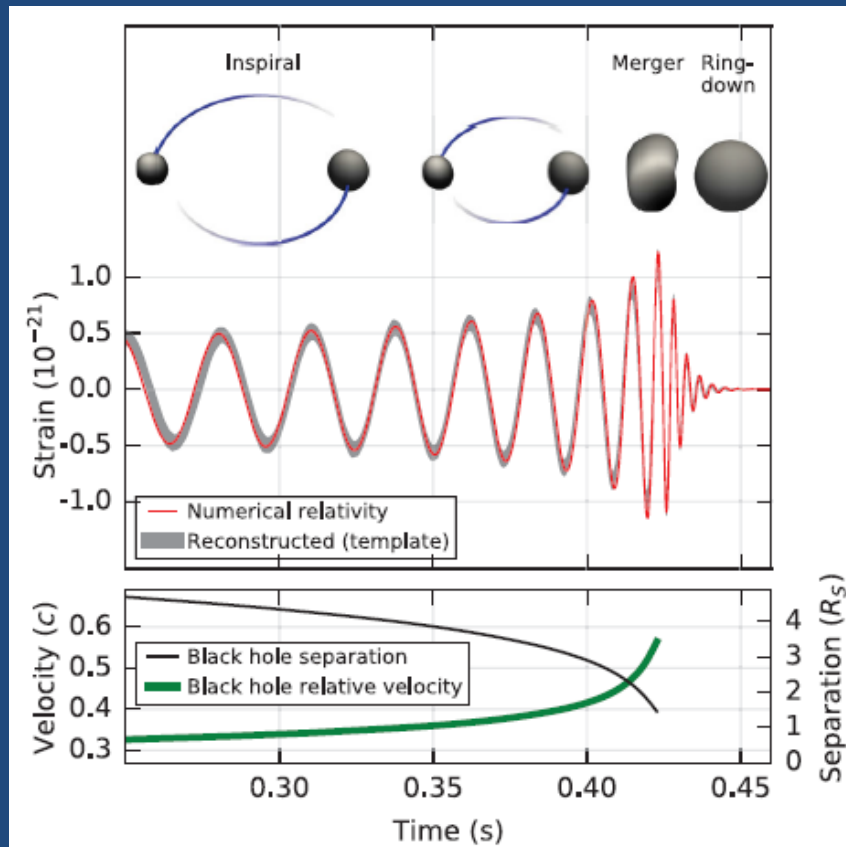
Event	Time (UTC)	FAR (yr ⁻¹)	\mathcal{F}	\mathcal{M} (M _⊙)	m_1 (M _⊙)	m_2 (M _⊙)	χ_{eff}	D_L (Mpc)
GW150914	14 September 2015 09:50:45	$< 5 \times 10^{-6}$	$< 2 \times 10^{-7}$ ($> 5.1\sigma$)	28^{+2}_{-2}	36^{+5}_{-4}	29^{+4}_{-4}	$-0.06^{+0.17}_{-0.18}$	410^{+160}_{-180}
LVT151012	12 October 2015 09:54:43	0.44	0.02 (2.1σ)	15^{+1}_{-1}	23^{+18}_{-5}	13^{+4}_{-5}	$0.0^{+0.3}_{-0.2}$	1100^{+500}_{-500}

$$\chi_{\text{eff}} = (c/G)(\mathbf{S}_1/m_1 + \mathbf{S}_2/m_2) \cdot (\hat{\mathbf{L}}/M)$$

**Локализация – пока плохая (2
детектора, ~ 600 кв град)**



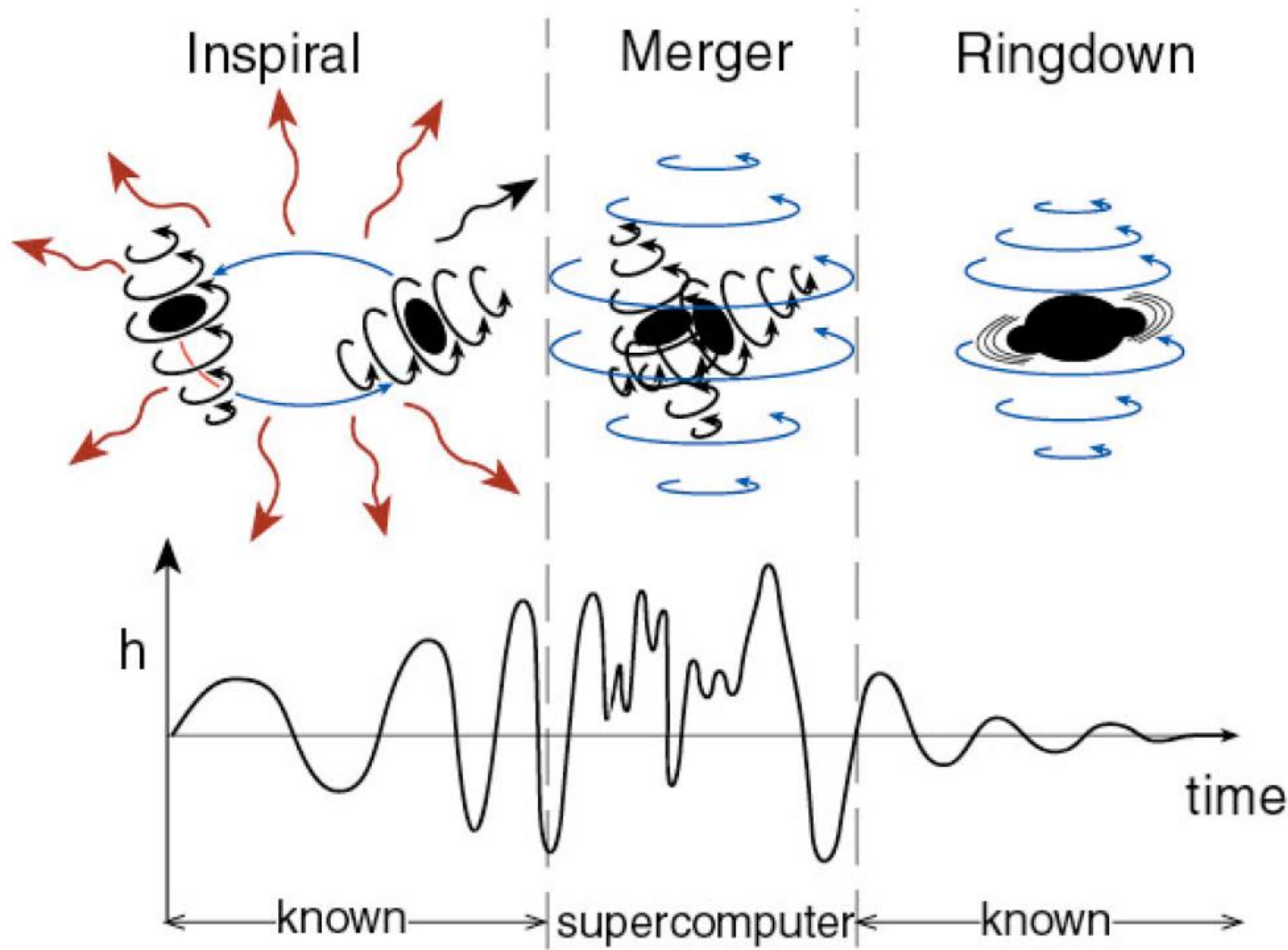
Источник -- сливающаяся двойная черная дыра GW150914



- $M_1=36 M_0$, $M_2=29 M_0$
- $M_f=62 M_0$
- $D=410$ Мпк
- $dE/dt(\text{GW})\sim 200 M_0 c^2/s$
- Нет отклонений от предсказаний ОТО

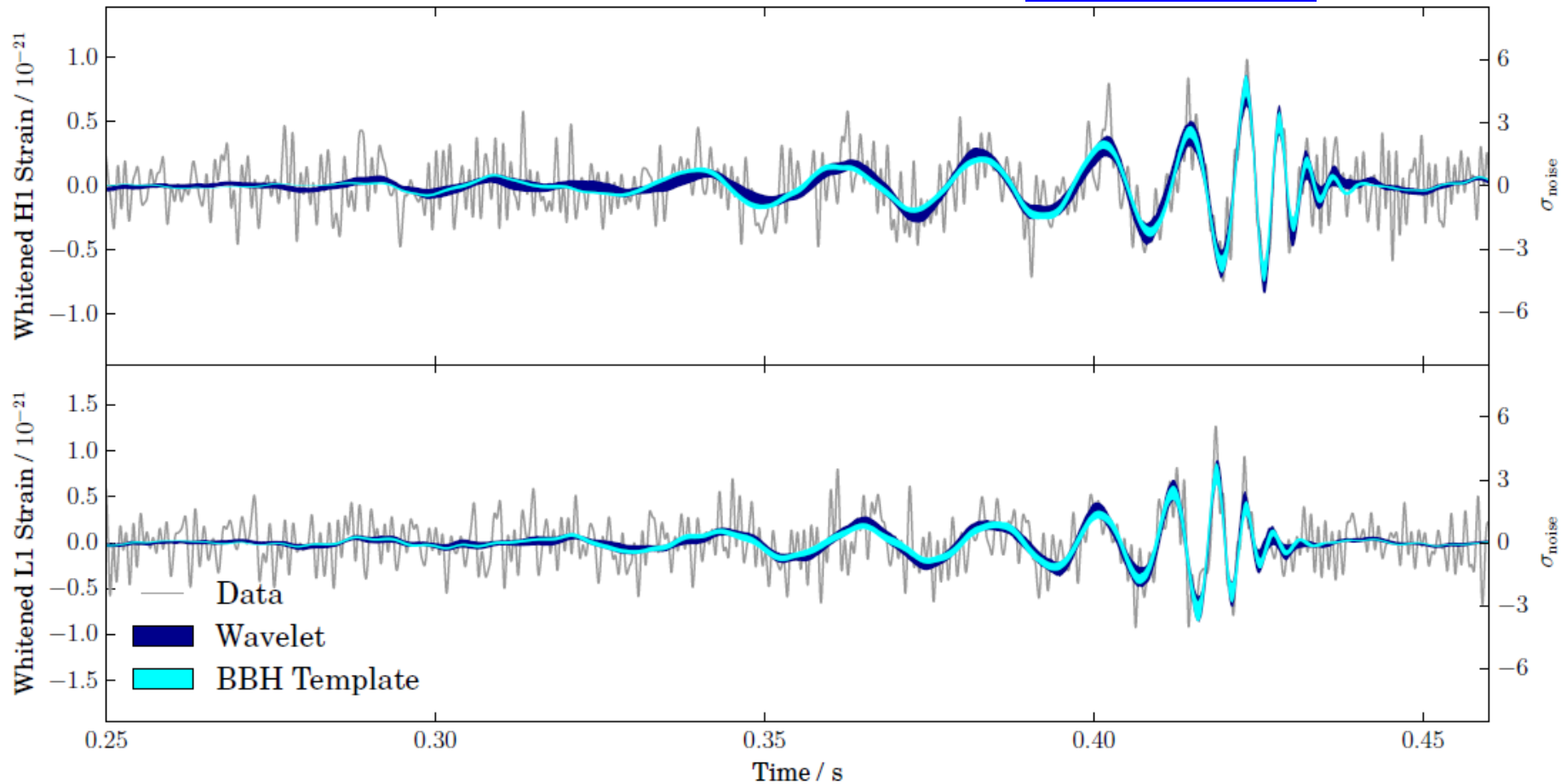
[Phys. Rev. Lett. 116, 061102 \(2016\)](#)

Binary Black Hole Mergers



Согласие темплейта ДЧД и вейвлетной формы на уровне 94(+2/-3)%

[arXiv:1602.03840](https://arxiv.org/abs/1602.03840)



1) Фаза приближения по спирали

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

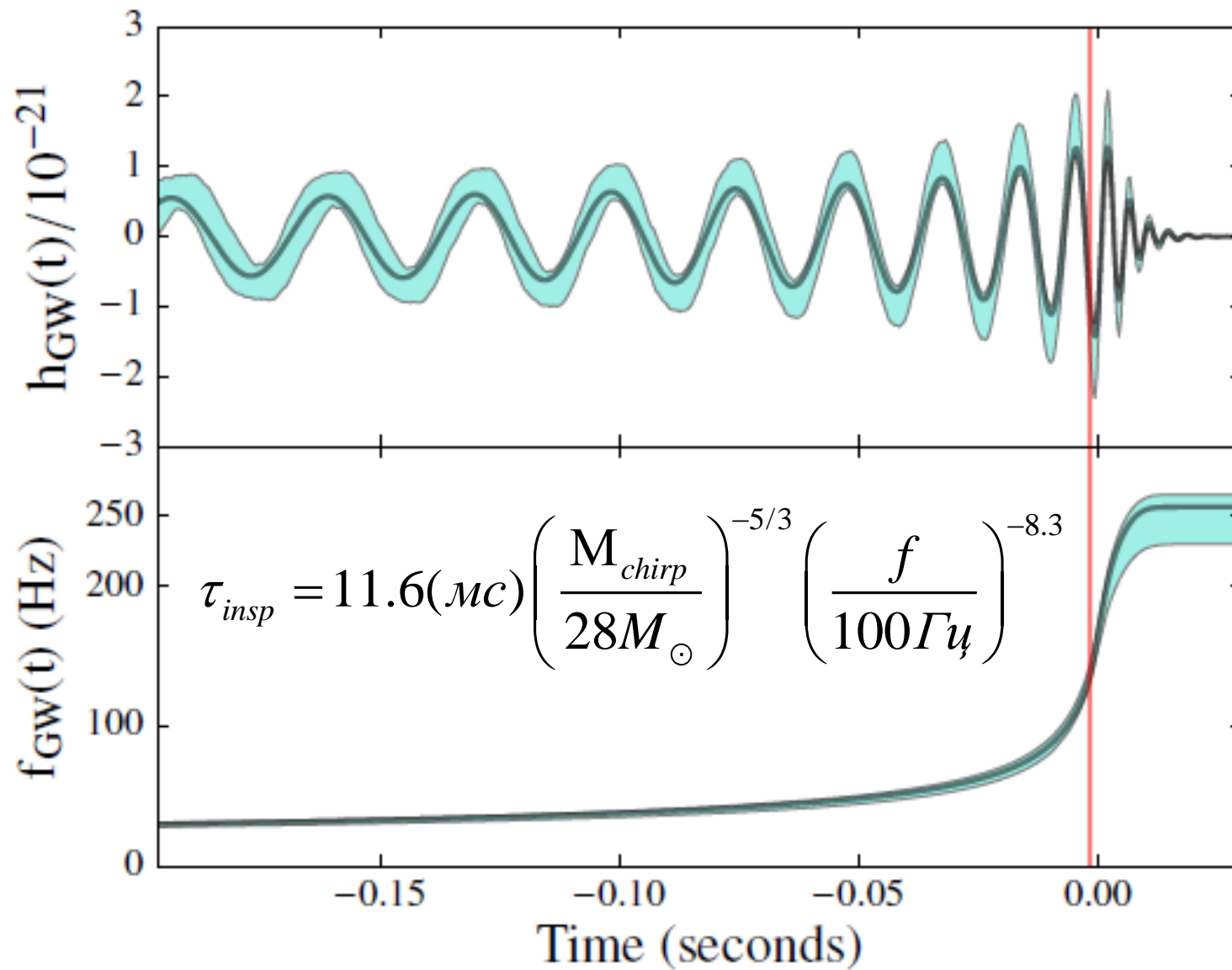
$$h_+(t) = A_{\text{GW}}(t) (1 + \cos^2 \iota) \cos \phi_{\text{GW}}(t),$$
$$h_\times(t) = -2A_{\text{GW}}(t) \cos \iota \sin \phi_{\text{GW}}(t),$$

- 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

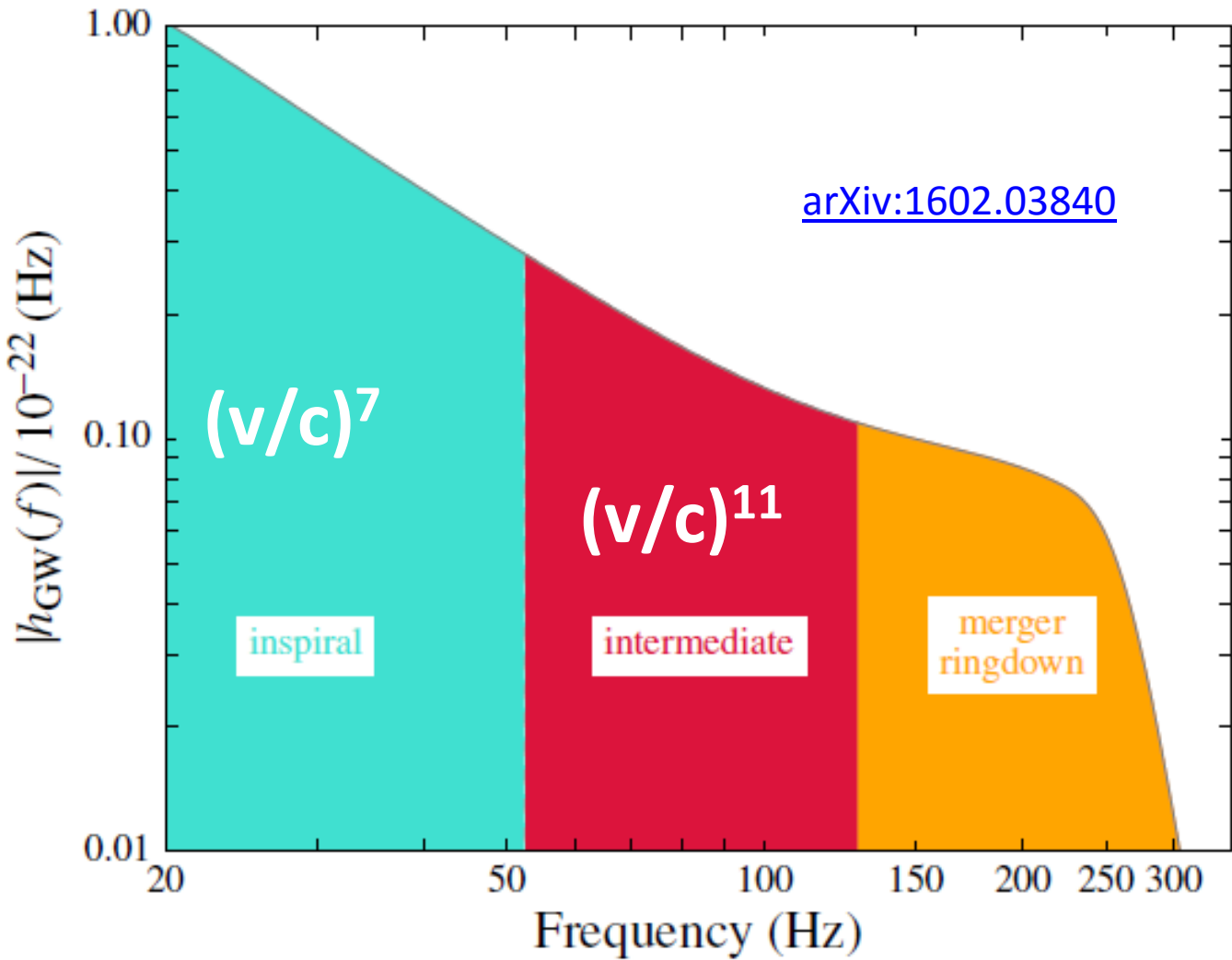


2) Фаза слияния

- Из конечной частоты определяем полную массу: $f_{\text{lim}} \sim 1/M$
- Из полной массы и чирп-массы определяем отношение масс
- Амплитуда ГВ \sim Массе

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

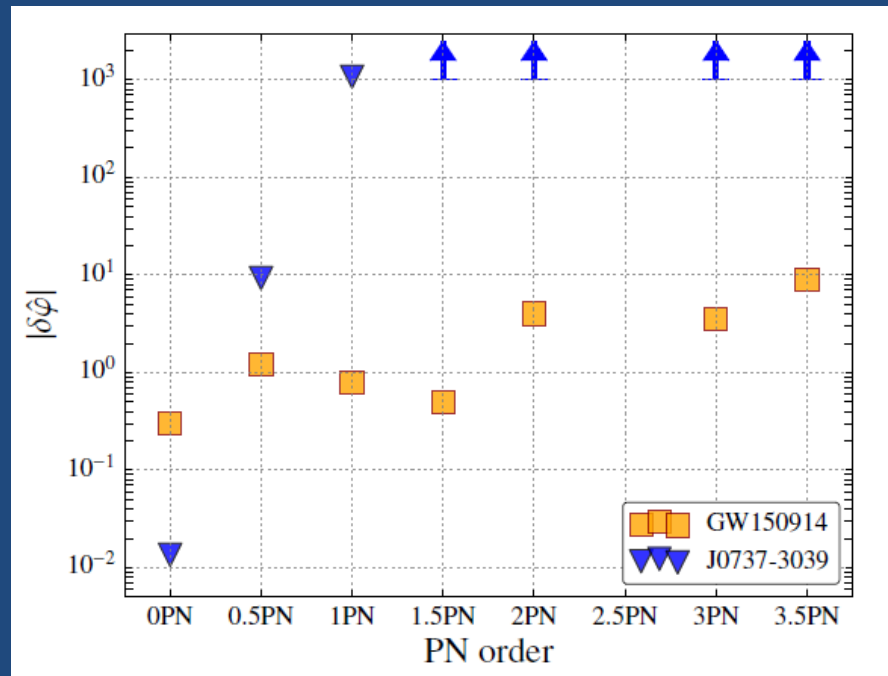
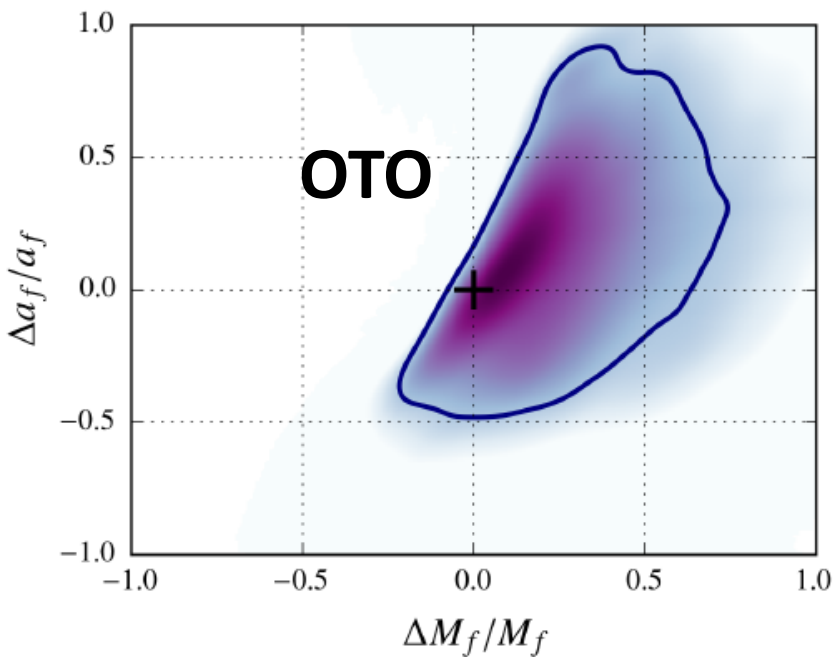
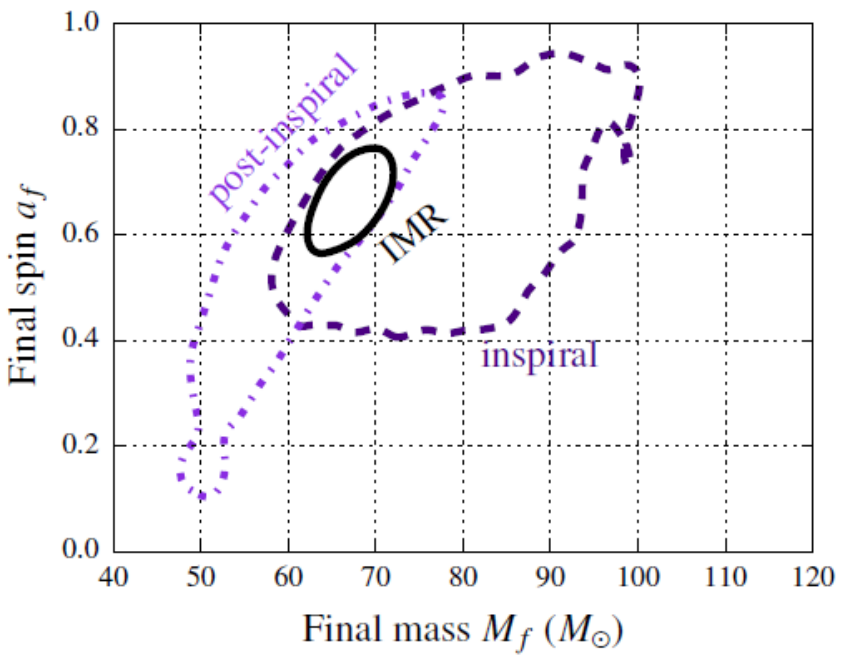
- Частота сигнала $\sim 1/M$ (т.к. fGM/c^3) \rightarrow красное смещение $(1+z)$ для частоты \Leftrightarrow перешкалированию массы \rightarrow
 $h \sim m_s/d_m = m/(1+z)d_m = m/d_l \rightarrow d_l!$



$$h = h(f) f$$

3) Фаза «звона» (ring-down)

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



Вариации постньютоновских параметров

LVC arXiv:1602.03841

Динамические ограничения на массу гравитона в феноменологической теории

$$E^2 = p^2 c^2 + m_g^2 c^4$$

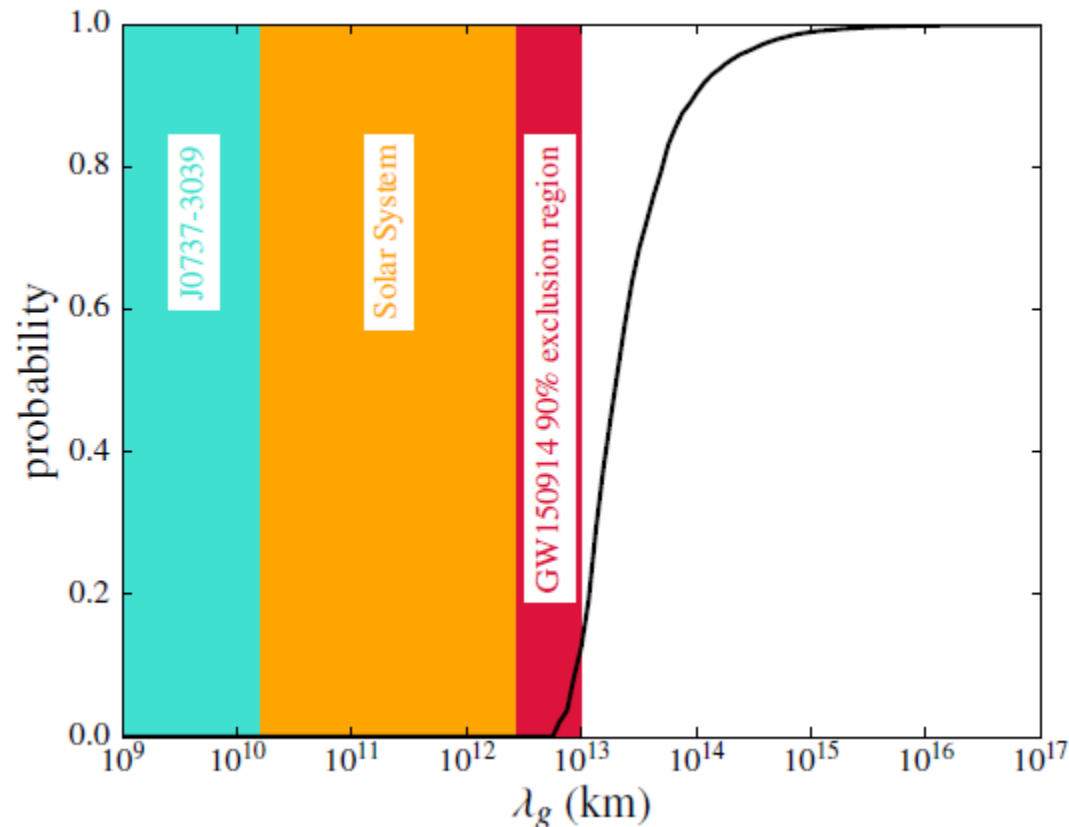
$$\lambda_g = \frac{h}{m_g c}$$

$$\left(\frac{v_g}{c}\right)^2 = \frac{p^2 c^2}{E^2} = 1 - \frac{h^2 c^2}{\lambda_g^2 E^2}$$

В 1PN приближении –
фазовый сдвиг

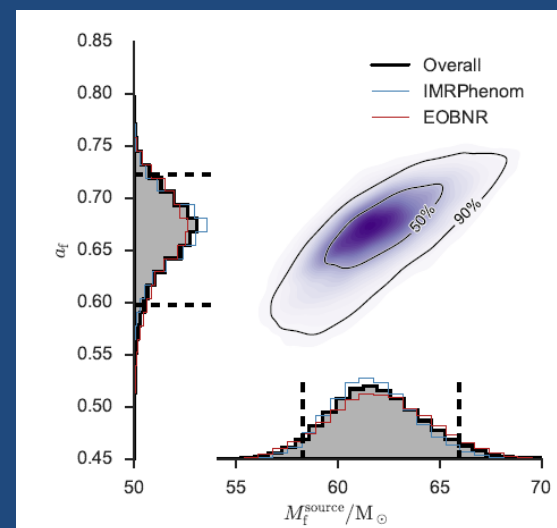
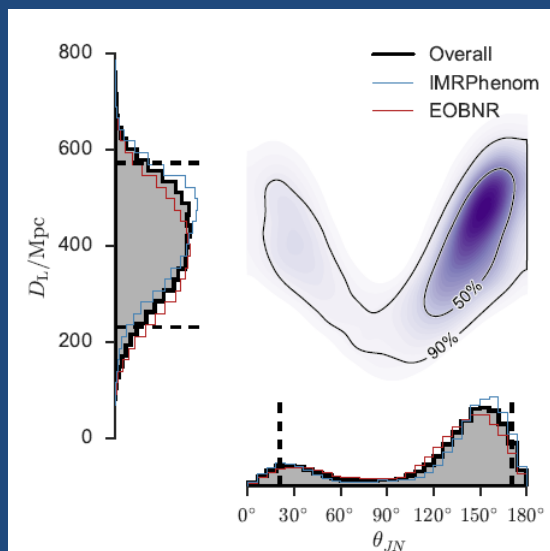
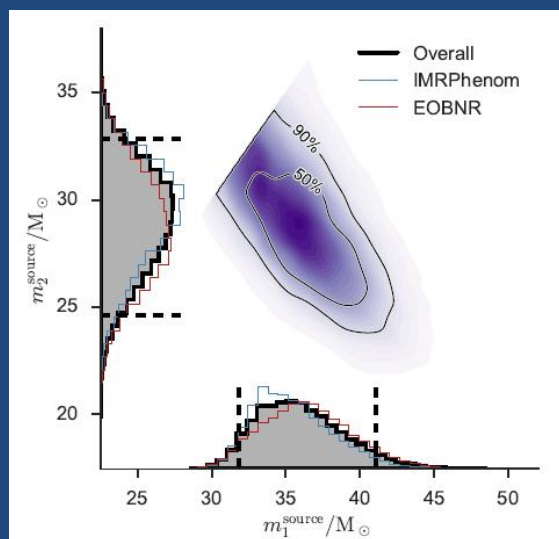
$$\Delta\Phi_{MG} = -\frac{\pi D c}{\lambda_g^2 (1+z) f}$$

$$\varphi(r) = (GM/r)[1 - \exp(-r/\lambda_g)]$$



$$m_g \leq 1.2 \times 10^{-22} \text{ eV}/c^2$$

Сечения пространства параметров



LVC arXiv:1602.03840

$$M_f^{\text{source}} = 62_{-4}^{+4} M_{\odot}$$

$$a = c|\mathcal{S}|/(Gm^2) \leq 1$$

$$a_f = 0.67_{-0.07}^{+0.05}$$

	EOBNR	IMRPhenom	Overall
Detector-frame total mass M/M_\odot	$70.3^{+5.3}_{-4.8}$	$70.7^{+3.8}_{-4.0}$	$70.5^{+4.6\pm 0.9}_{-4.5\pm 1.0}$
Detector-frame chirp mass \mathcal{M}/M_\odot	$30.2^{+2.5}_{-1.9}$	$30.5^{+1.7}_{-1.8}$	$30.3^{+2.1\pm 0.4}_{-1.9\pm 0.4}$
Detector-frame primary mass m_1/M_\odot	$39.4^{+5.5}_{-4.9}$	$38.3^{+5.5}_{-3.5}$	$38.8^{+5.6\pm 0.9}_{-4.1\pm 0.3}$
Detector-frame secondary mass m_2/M_\odot	$30.9^{+4.8}_{-4.4}$	$32.2^{+3.6}_{-5.0}$	$31.6^{+4.2\pm 0.1}_{-4.9\pm 0.6}$
Detector-frame final mass M_f/M_\odot	$67.1^{+4.6}_{-4.4}$	$67.4^{+3.4}_{-3.6}$	$67.3^{+4.1\pm 0.8}_{-4.0\pm 0.9}$
Source-frame total mass $M^{\text{source}}/M_\odot$	$65.0^{+5.0}_{-4.4}$	$64.6^{+4.1}_{-3.5}$	$64.8^{+4.6\pm 1.0}_{-3.9\pm 0.5}$
Source-frame chirp mass $\mathcal{M}^{\text{source}}/M_\odot$	$27.9^{+2.3}_{-1.8}$	$27.9^{+1.8}_{-1.6}$	$27.9^{+2.1\pm 0.4}_{-1.7\pm 0.2}$
Source-frame primary mass $m_1^{\text{source}}/M_\odot$	$36.3^{+5.3}_{-4.5}$	$35.1^{+5.2}_{-3.3}$	$35.7^{+5.4\pm 1.1}_{-3.8\pm 0.0}$
Source-frame secondary mass $m_2^{\text{source}}/M_\odot$	$28.6^{+4.4}_{-4.2}$	$29.5^{+3.3}_{-4.5}$	$29.1^{+3.8\pm 0.2}_{-4.4\pm 0.5}$
Source-frame final mass $M_f^{\text{source}}/M_\odot$	$62.0^{+4.4}_{-4.0}$	$61.6^{+3.7}_{-3.1}$	$61.8^{+4.2\pm 0.9}_{-3.5\pm 0.4}$
Mass ratio q	$0.79^{+0.18}_{-0.19}$	$0.84^{+0.14}_{-0.21}$	$0.82^{+0.16\pm 0.01}_{-0.21\pm 0.03}$
Effective inspiral spin parameter χ_{eff}	$-0.09^{+0.19}_{-0.17}$	$-0.03^{+0.14}_{-0.15}$	$-0.06^{+0.17\pm 0.01}_{-0.18\pm 0.07}$
Dimensionless primary spin magnitude a_1	$0.32^{+0.45}_{-0.28}$	$0.31^{+0.51}_{-0.27}$	$0.31^{+0.48\pm 0.04}_{-0.28\pm 0.01}$
Dimensionless secondary spin magnitude a_2	$0.57^{+0.40}_{-0.51}$	$0.39^{+0.50}_{-0.34}$	$0.46^{+0.48\pm 0.07}_{-0.42\pm 0.01}$
Final spin a_f	$0.67^{+0.06}_{-0.08}$	$0.67^{+0.05}_{-0.05}$	$0.67^{+0.05\pm 0.00}_{-0.07\pm 0.03}$
Luminosity distance D_L/Mpc	390^{+170}_{-180}	440^{+140}_{-180}	$410^{+160\pm 20}_{-180\pm 40}$
Source redshift z	$0.083^{+0.033}_{-0.036}$	$0.093^{+0.028}_{-0.036}$	$0.088^{+0.031\pm 0.004}_{-0.038\pm 0.009}$
Upper bound on primary spin magnitude a_1	0.65	0.71	0.69 ± 0.05
Upper bound on secondary spin magnitude a_2	0.93	0.81	0.88 ± 0.10
Lower bound on mass ratio q	0.64	0.67	0.65 ± 0.03
Log Bayes factor $\ln \mathcal{B}_{\text{s/n}}$	288.7 ± 0.2	290.1 ± 0.2	—

Выделение энергии в ГВ

$$E_N = (m_1 + m_2)c^2 - \frac{Gm_1m_2}{2r}$$

$$r_{insp} \approx \frac{5G(m_1 + m_2)}{c^2} \Rightarrow$$

$$\Delta E_{GW,insp} \approx \frac{1}{10} \frac{m_1m_2}{m_1 + m_2} \approx 5\% mc^2 \sim 2.5\% Mc^2$$

$$\Delta E_{GW,total} = \Delta E_{GW,insp} + \Delta E_{GW,coal} + \Delta E_{GW,ringd} \approx 5\% Mc^2$$

$$\Delta E_{GW,total} = (M_i^{source} - M_f^{source})c^2 = 3_{-0.5}^{+0.5} M_{\odot} c^2$$

Максимальная светимость

$$\frac{dE}{dt dA} = \frac{c^3}{16\pi G} (\langle \dot{h}_x \rangle^2 + \langle \dot{h}_y \rangle^2)$$

$$h_{\max} \sim 10^{-21}, d \sim 400 \text{ Мпк} \Rightarrow$$

$$\left(\frac{dE}{dt} \right)_{GW, \max} \sim 10^{56} \text{ эрг} / \text{с} \sim 200 M_{\odot} c^2 / \text{с}$$

$$\left(\frac{dE}{dt} \right)_{GW, \max} \leq L_0 = \frac{c^5}{16\pi G} \approx 7 \times 10^{57} \text{ эрг} / \text{с}$$

(Ср. ярчайший гамма – всплеск : 2×10^{54} эрг / с)

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)

M1		M2	A
50.00		36.00	190.00
48.49		34.25	197.50
46.03		34.09	203.90
28.50		47.50	235.60
28.50		47.50	235.60
23.91	WR	52.09	278.40
	SN Ib		
10.76	BH	52.09	347.80
10.76	BH	51.91	348.80
10.76	BH	49.26	364.30
10.76	BH	44.88	208.30
10.76	BH	25.32	12.38
	WR		
	BH		
10.76	BH	11.40	27.60
	Coalescence		
	BH	22.16	

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

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

- Возможный кик

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

Эффект большой чирп-массы:

$$\frac{dN}{dt dM} \simeq 1 M_{\odot} (M/M_{\odot})^{-2.35}$$

$$\frac{N(M > 80 M_{\odot})}{N(M > 10 M_{\odot})} = \left(\frac{80 M_{\odot}}{10 M_{\odot}} \right)^{-1.35} \simeq 0.06.$$

$$\frac{\mathcal{R}_{BH}}{\mathcal{R}_{NS}} = \left(\frac{80 M_{\odot}}{10 M_{\odot}} \right)^{-1.35} \simeq 0.06.$$

$$\frac{S}{N} = 3^{-1/2} \pi^{-2/3} \frac{G^{5/6}}{c^{3/2}} \frac{\mathcal{M}^{5/6}}{r} f^{-1/6} / h_{\text{rms}}(f)$$

$$\frac{\mathcal{D}_{BH}}{\mathcal{D}_{NS}} = \left(\frac{80 M_{\odot}}{10 M_{\odot}} \right)^{-1.35} \left(\frac{8.5 M_{\odot}}{1.40 M_{\odot}} \right)^{5/2} \simeq 5.5$$

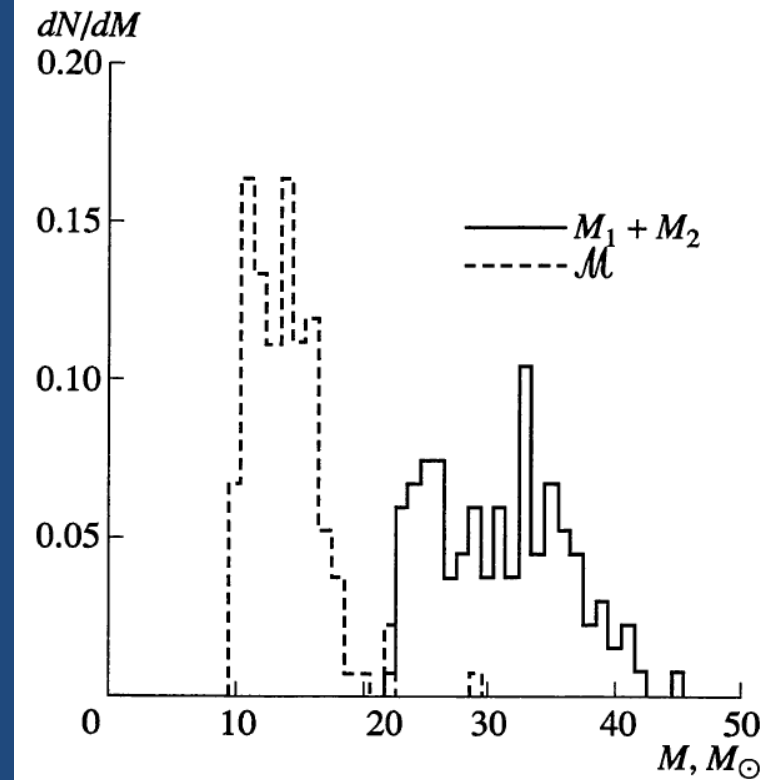
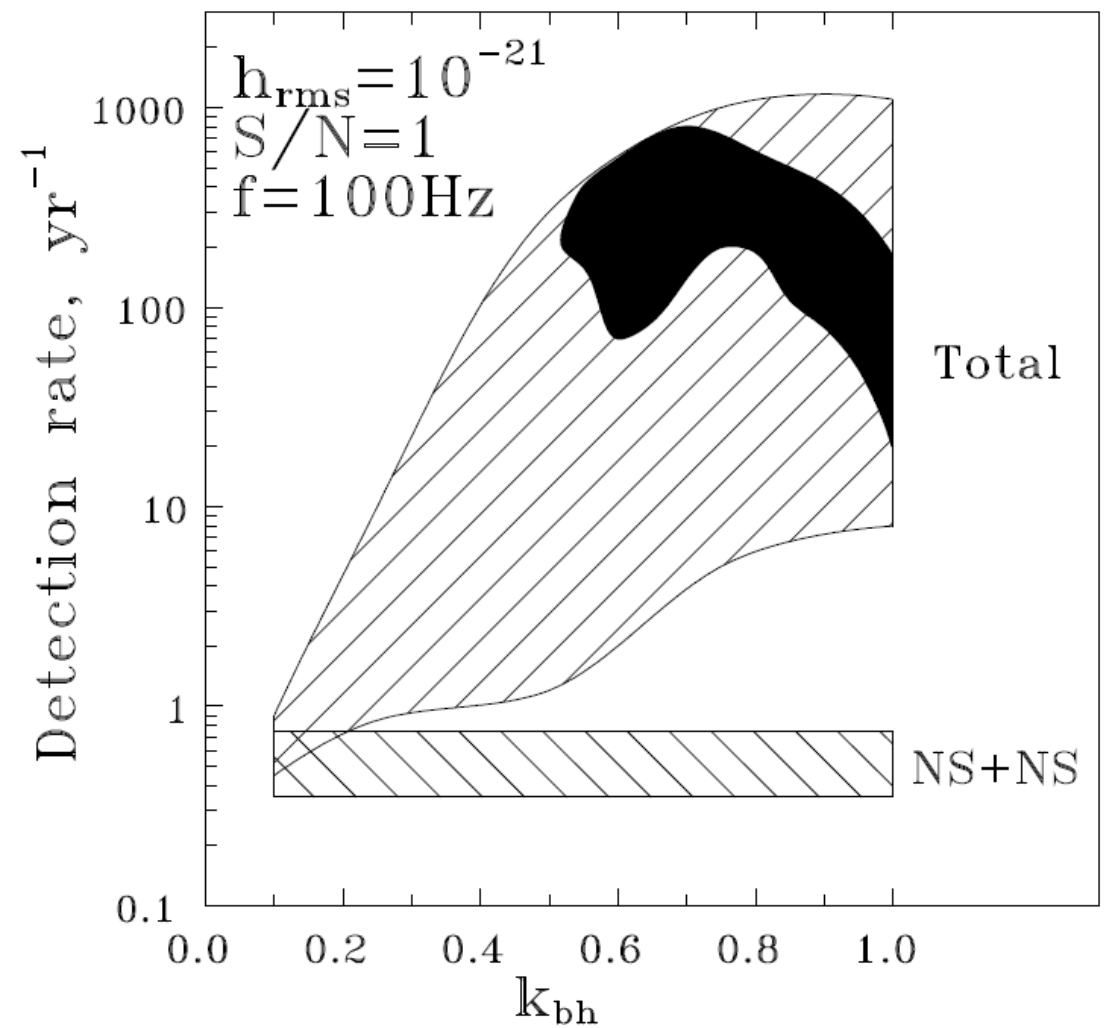


Fig. 4. The distributions of the total mass and the “chirp mass” for merging binary black holes for $M_* = 35M_{\odot}$ and $k_{\text{bh}} = 0.3$ and for a Lyne–Lorimer velocity distribution with $v_0 = 400 \text{ km s}^{-1}$.

Более поздние работы (группа Kalogera-Belczynsky)

- Эффекты металличности

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 818:L22 (15pp), 2016 February 20

ABBOTT ET AL.

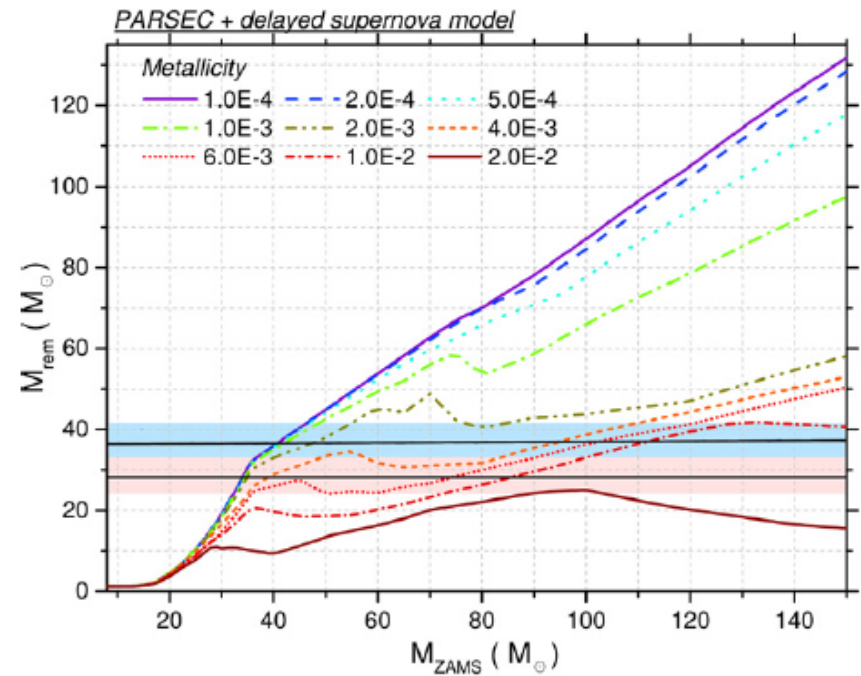
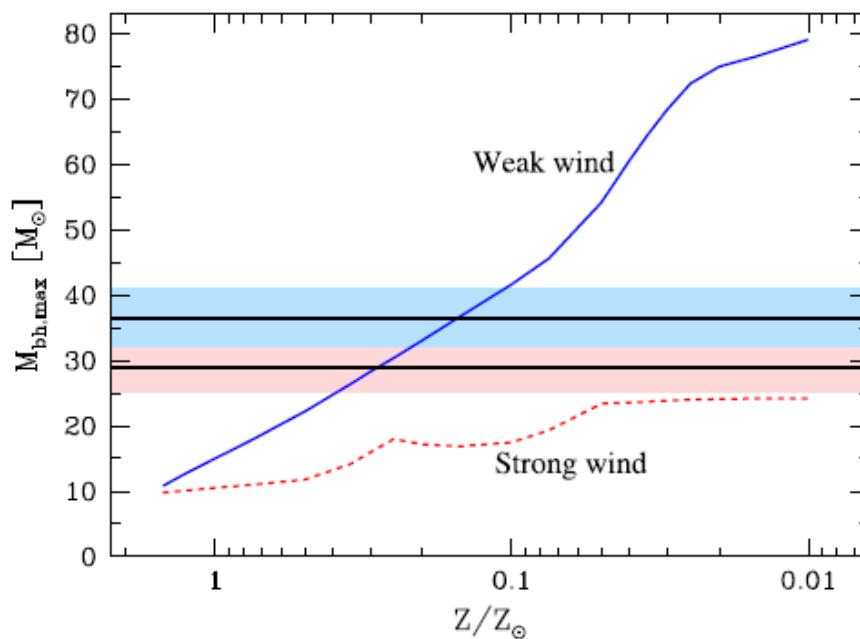


Figure 1. Left: dependence of maximum BH mass on metallicity Z , with $Z_{\odot} = 0.02$ for the old (strong) and new (weak) massive-star winds (Figure 3 from Belczynski et al. 2010a). Right: compact-remnant mass as a function of zero-age main-sequence (ZAMS; i.e., initial) progenitor mass for a set of different (absolute) metallicity values (Figure 6 from Spera et al. 2015). The masses for GW150914 are indicated by the

Модельные предсказания

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 818:L22 (15pp), 2016 February 20

ABBOTT ET AL.

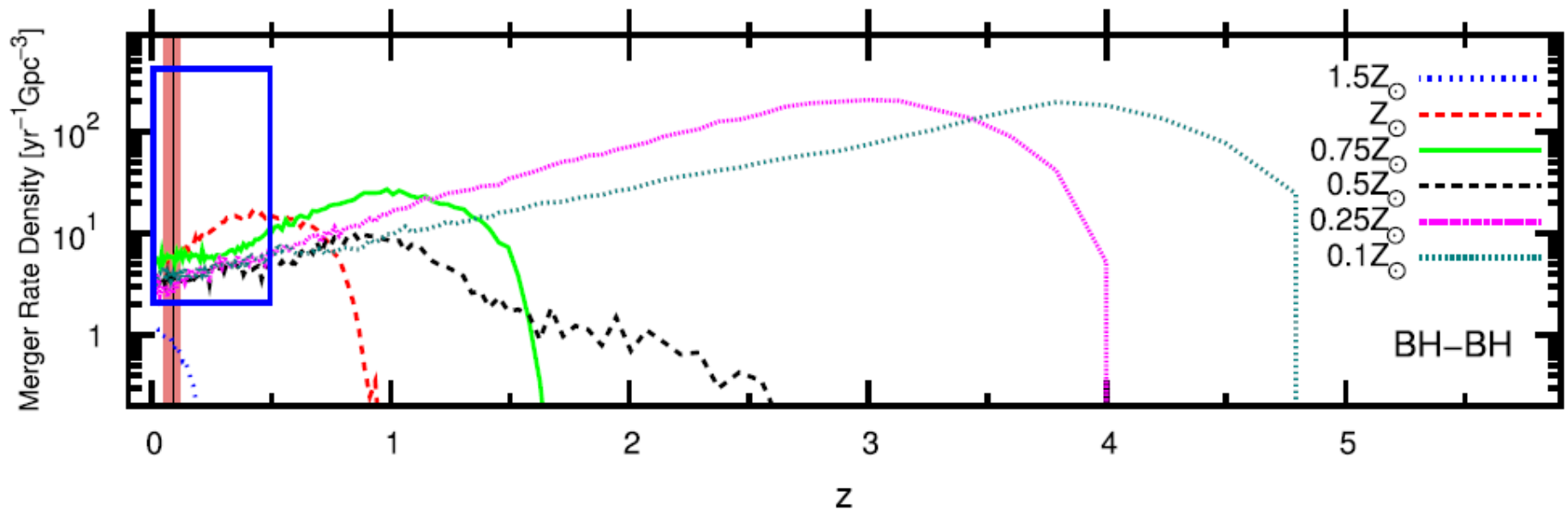
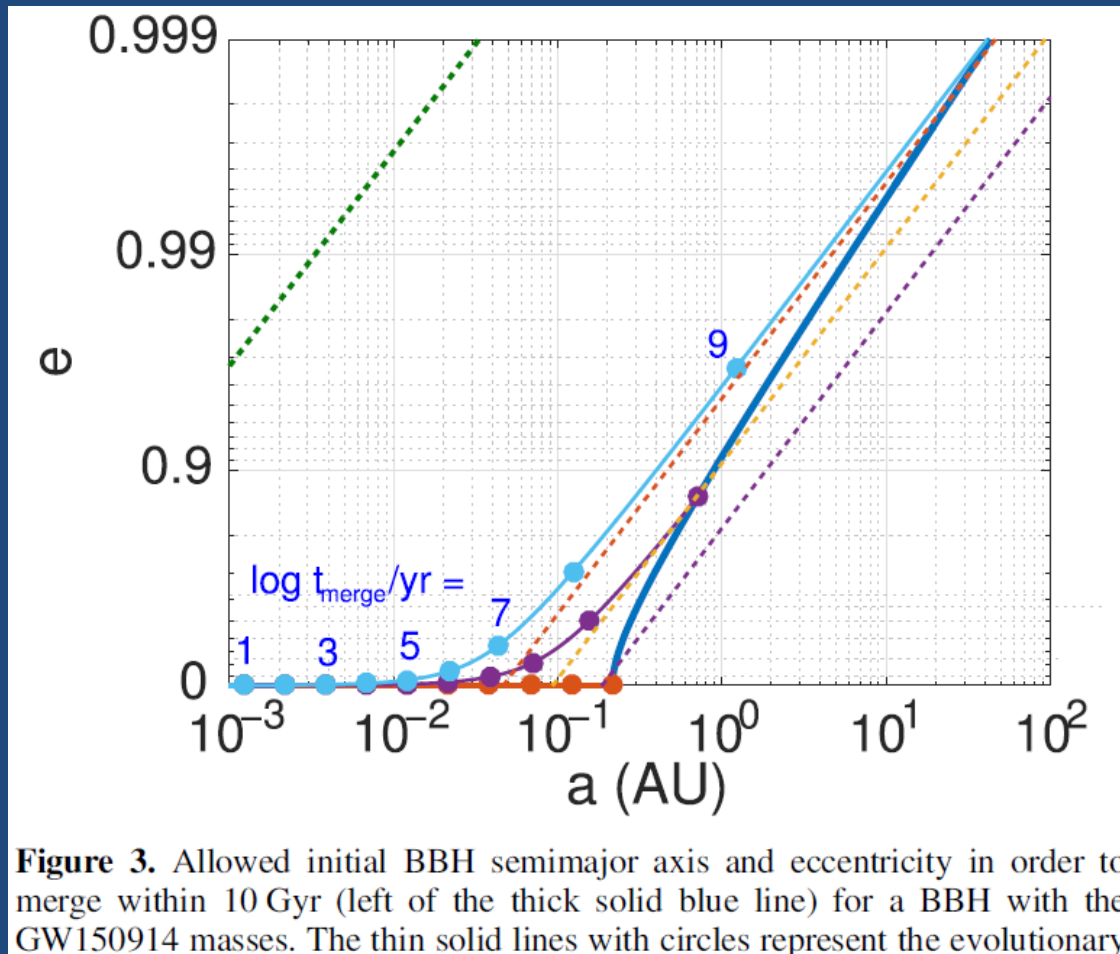
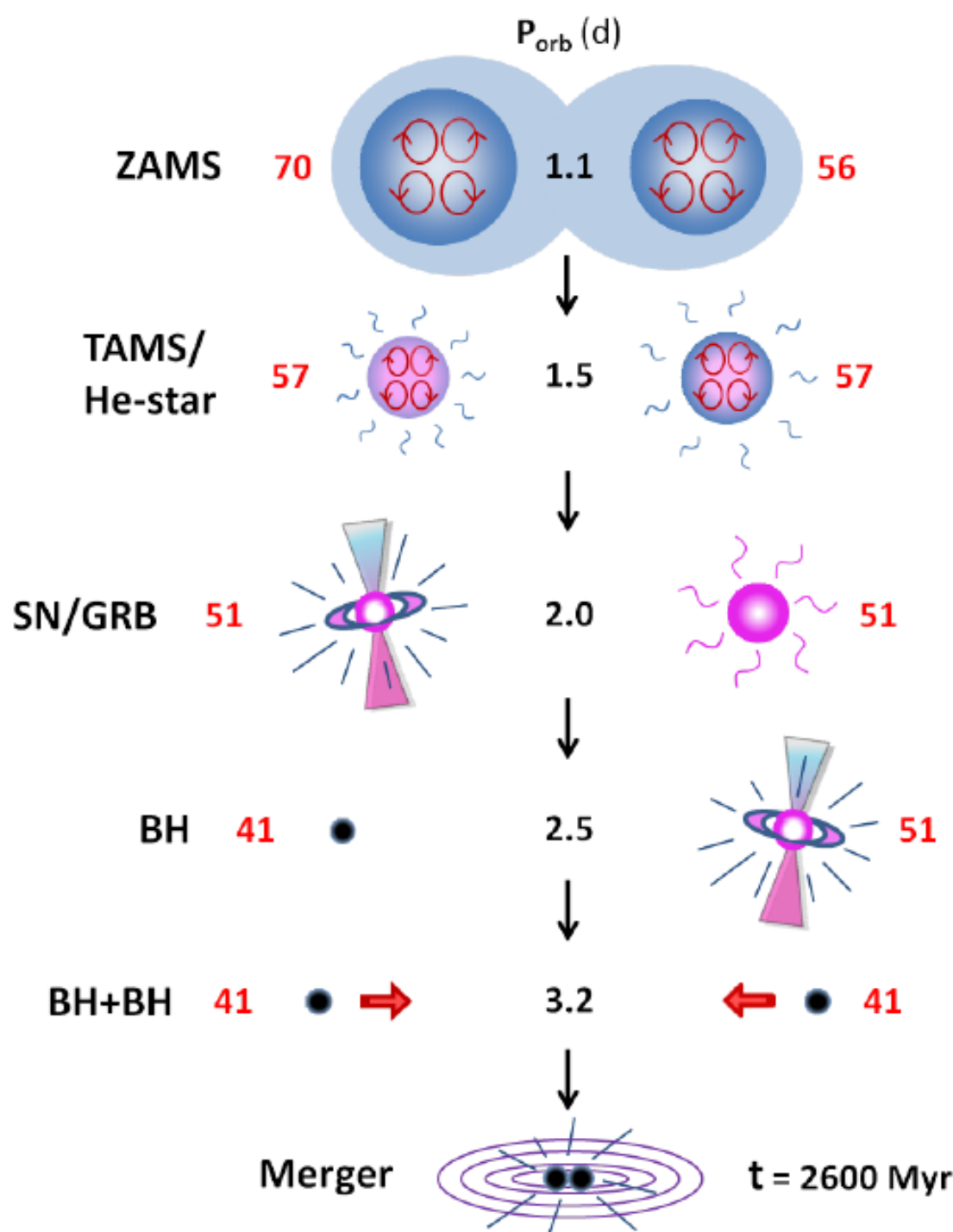


Figure 2. Predictions of BBH merger rate in the comoving frame ($\text{Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$) from isolated binary evolution as a function of redshift for different metallicity values (adopted from Figure 4 in Dominik et al. 2013). At a given redshift, the total merger rate is the sum over metallicity. The redshift range of GW150914 is indicated by the vertical band; the range of the BBH rate estimates and the redshift out to which a system like GW150914 could have been detected in this observing period are indicated by an open blue rectangular box.

Время до слияния ДЧД типа GW150914





**Новые
сценарии
(вращение
помогает
избежать
общей
оболочки)**

arXiv:1601.03718

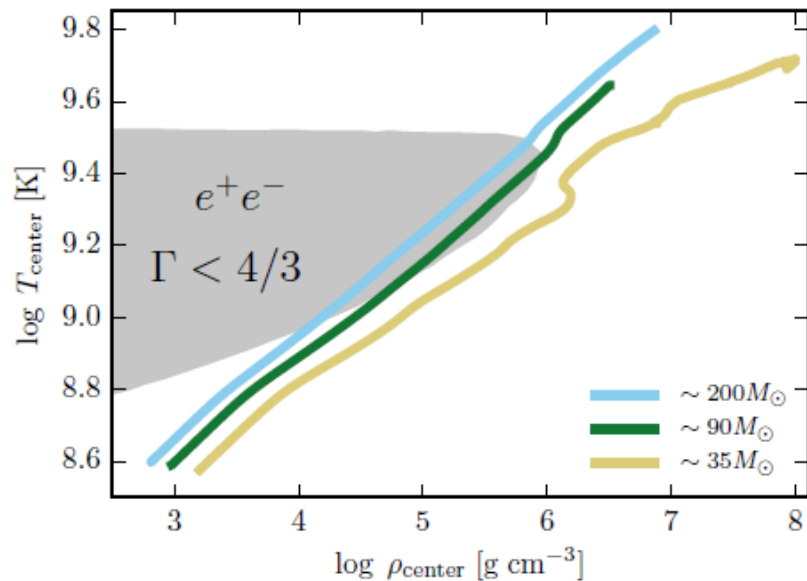


Fig. 10. The evolution in the $T_c - \rho_c$ -diagram for the three stars at $Z = Z_\odot/50$ (with the masses at helium depletion as indicated to the final evolutionary stage). The shaded region shows the region that is unstable to pair creation. Both the $35 M_\odot$ and the $90 M_\odot$ stars collapse to form black holes, while the $200 M_\odot$ star is disrupted by PISN.

arXiv:1601.03718

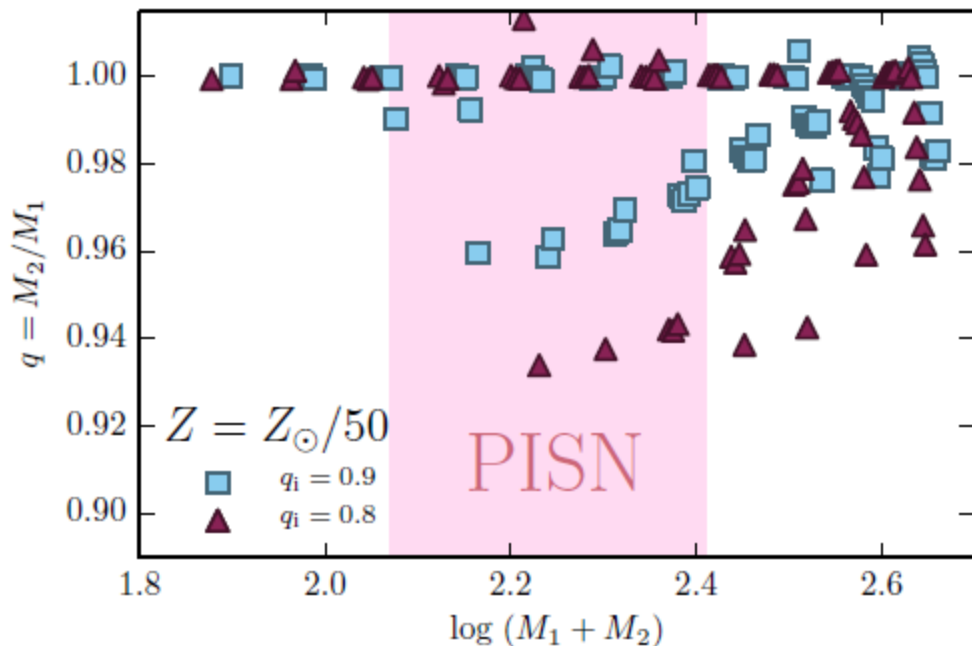


Fig. 6. Mass-ratios of BH+BH systems resulting from our modelled systems for $q_i = 0.9$ and $q_i = 0.8$ and a metallicity $Z = Z_\odot/50$ under the assumption that no mass is lost during collapse. The shaded region indicates the limits for the occurrence of PISNe.

Выводы

- Подтверждается существование двойных черных дыр (ДЧД). Отличий от ОТО не обнаружено
- Если работает канал изолированных двойных звезд, то требуется (1) меньшая не менее чем в 2 раза металличность и слабый звездный ветер (2) большая доля массы в ЧД при коллапсе
- Данные по GW150914 не позволяют различить астрофизические каналы образования ДЧД
- В рамках канала изолированной двойной системы пока нельзя различить, образовалась ли ДЧД давно или недавно