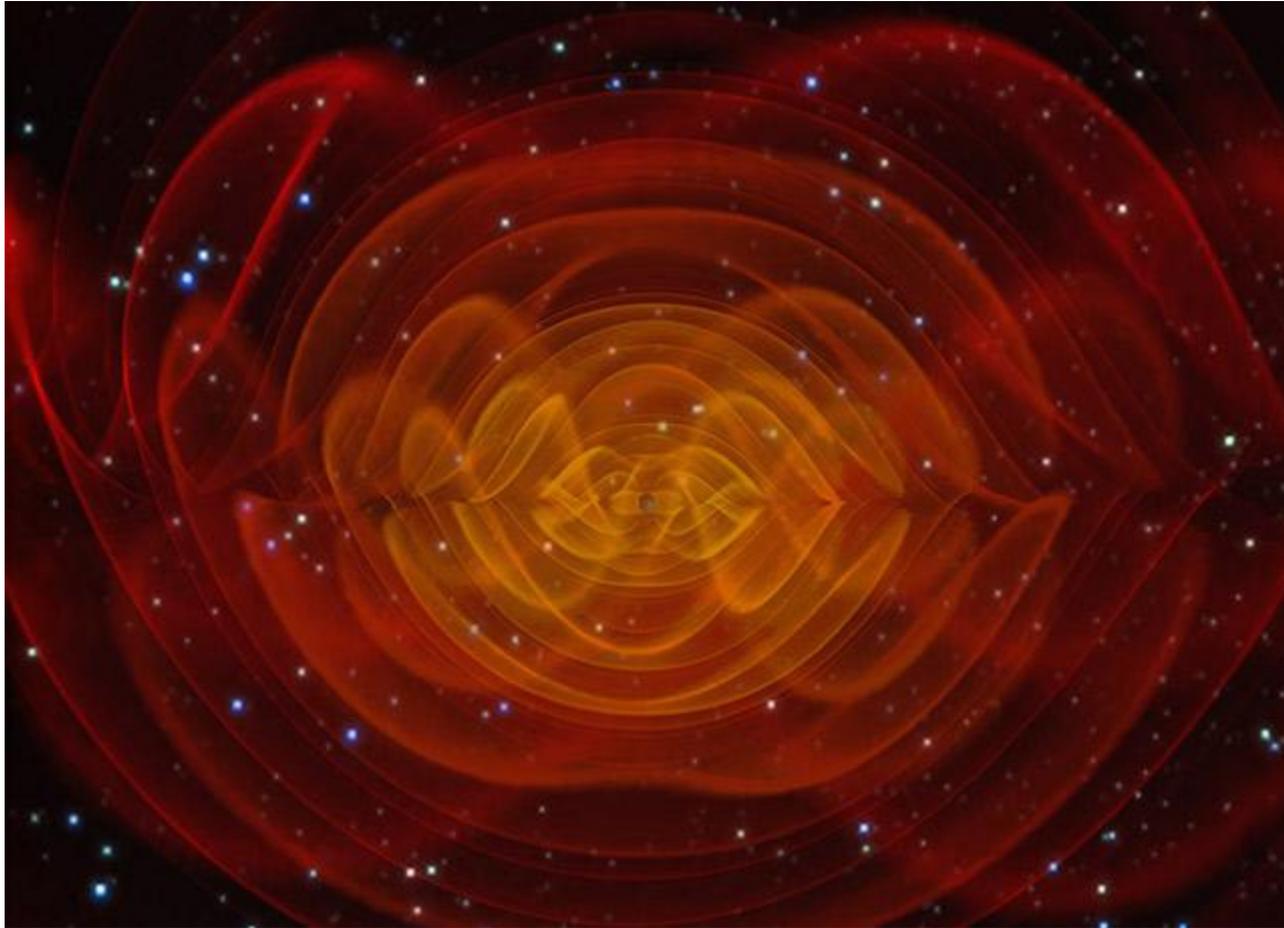
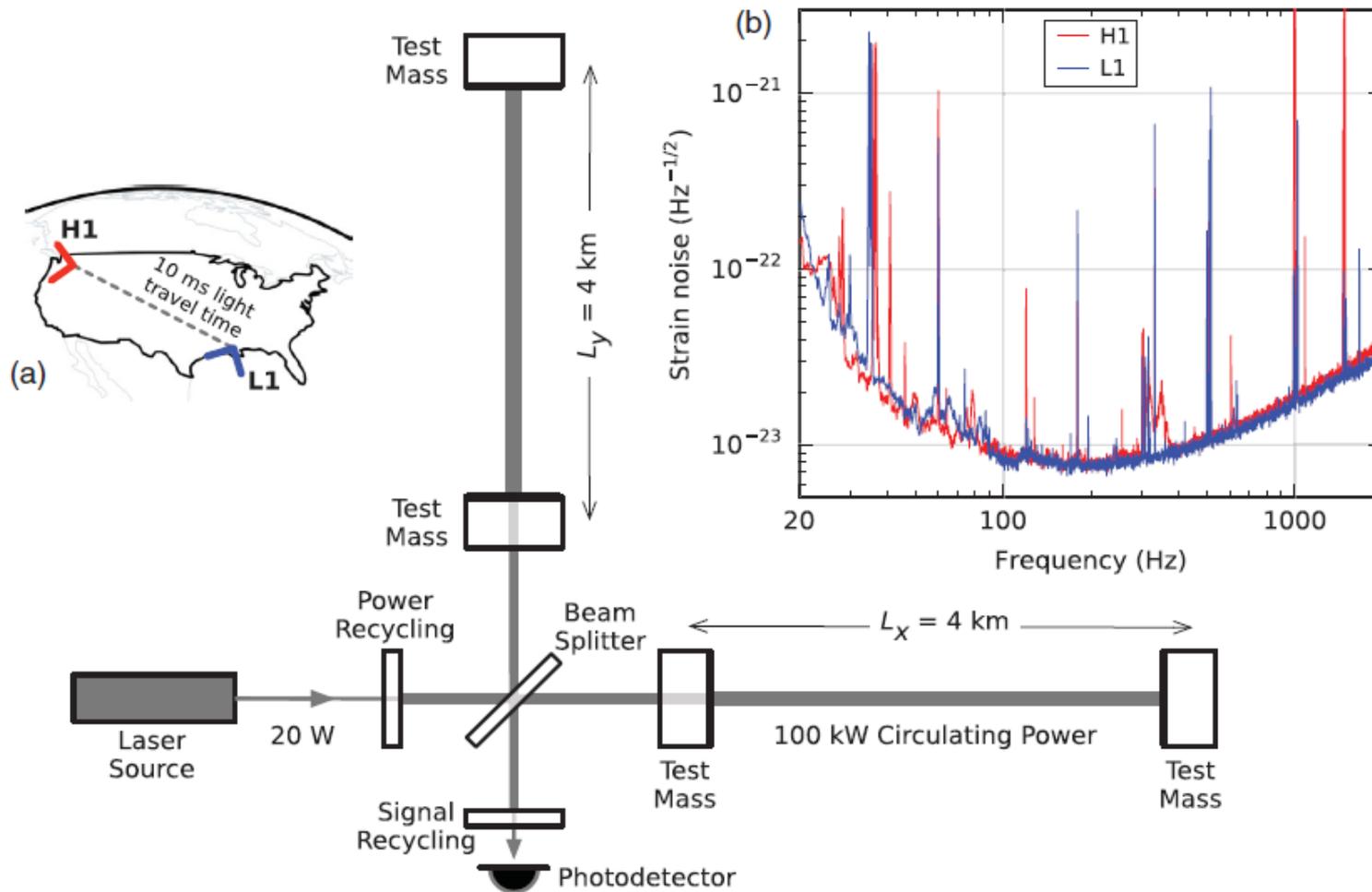


Гравитационные волны LIGO

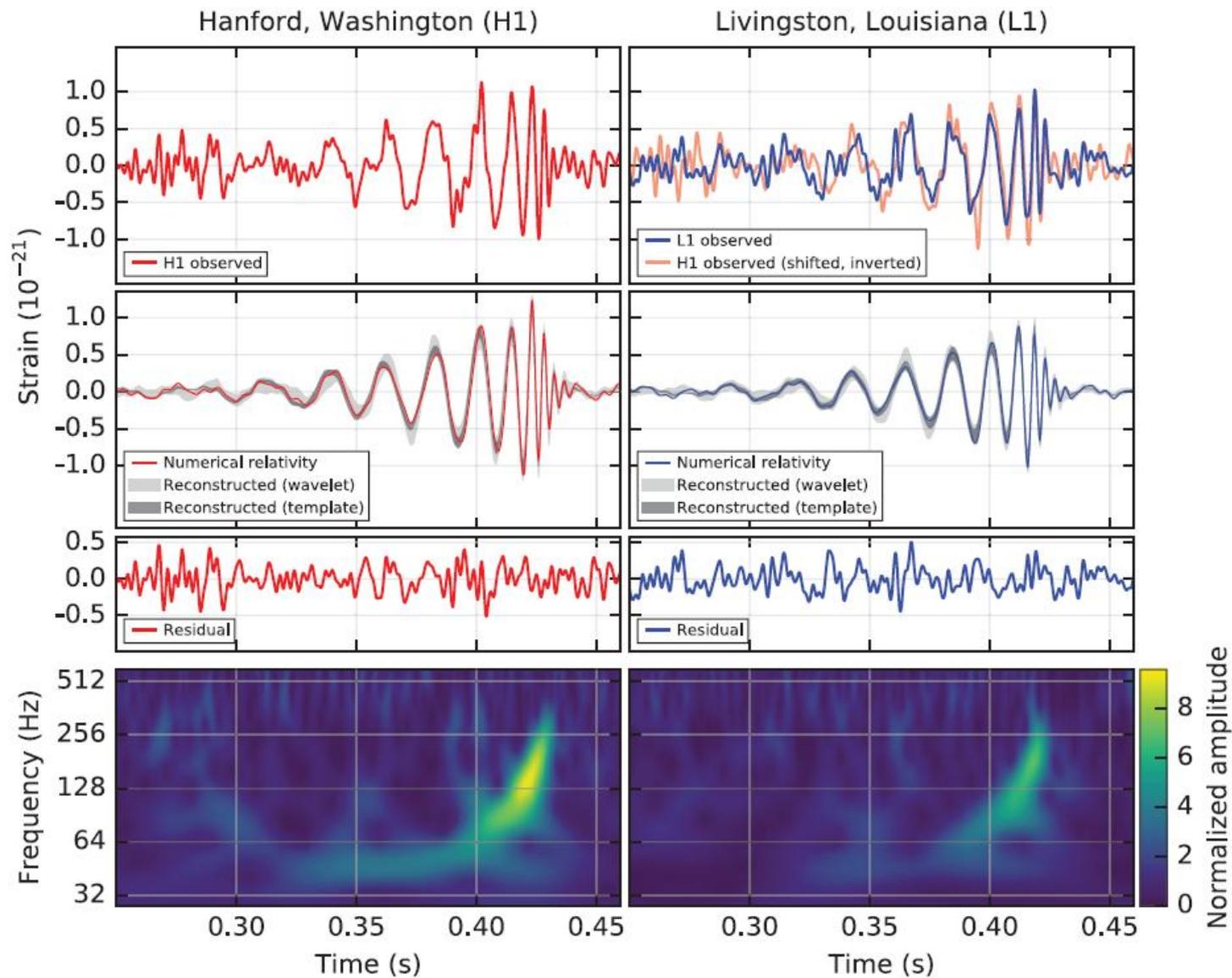


Объявление об открытии коллаборацией LIGO 11/02/2016

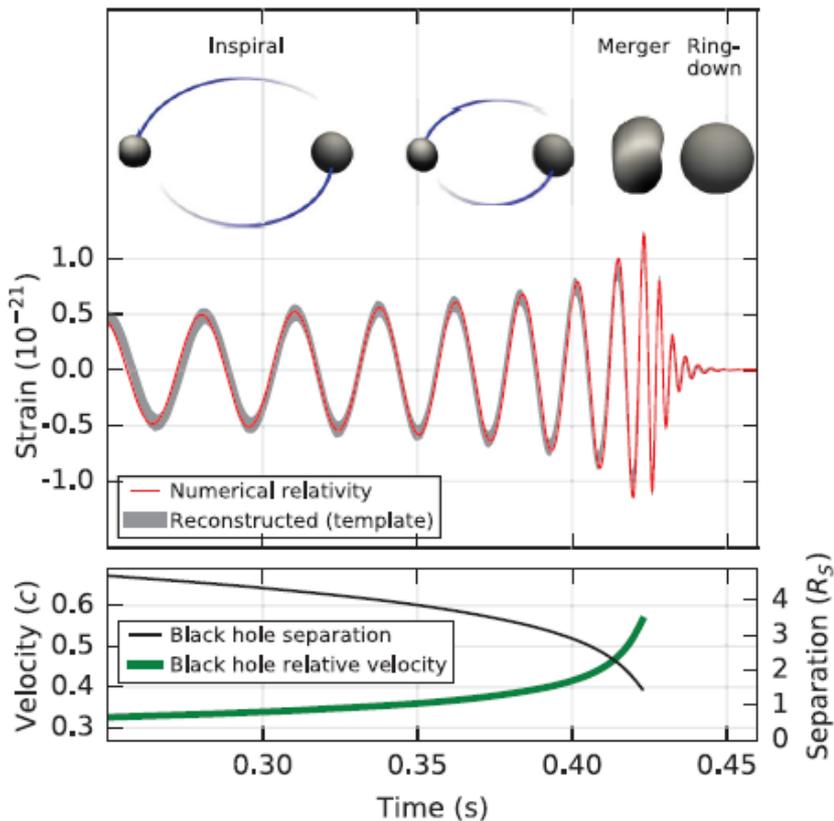
Детекторы LIGO



Сигнал



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

1) Фаза приближения по спирали

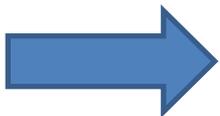
$$h_k = F_k^{(+)} h_+ + F_k^{(\times)} h_\times$$

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

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

- 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
 $h \sim m_s/d_m = m/(1+z)d_m = m/d_l \rightarrow d_l!$

Астрофизика

- 2 канала образования:
 - из эволюции массивных двойных систем
 - Динамические захваты в плотных звездных скоплениях с последующим выбросом из скоплений
- 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
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:

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

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

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

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

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

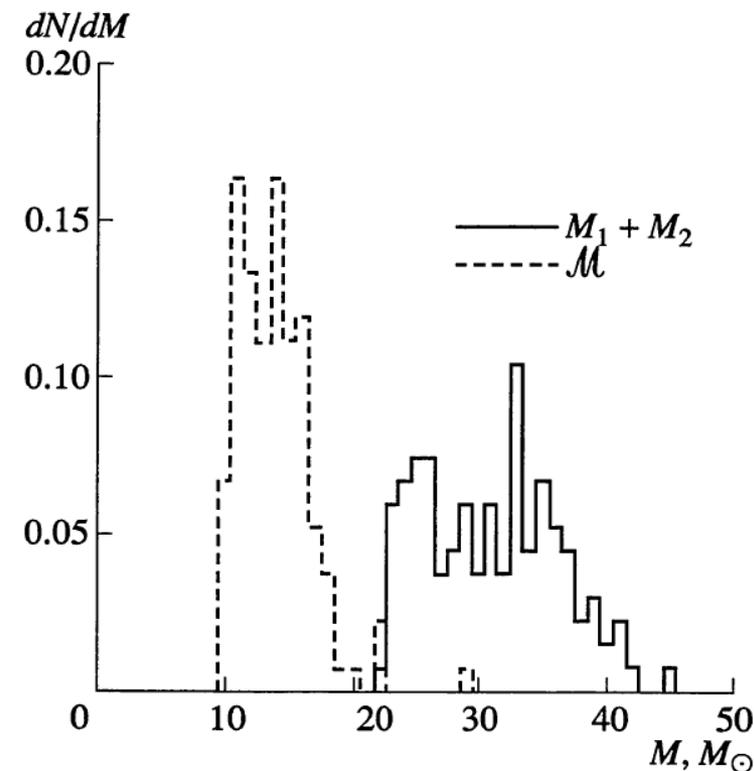
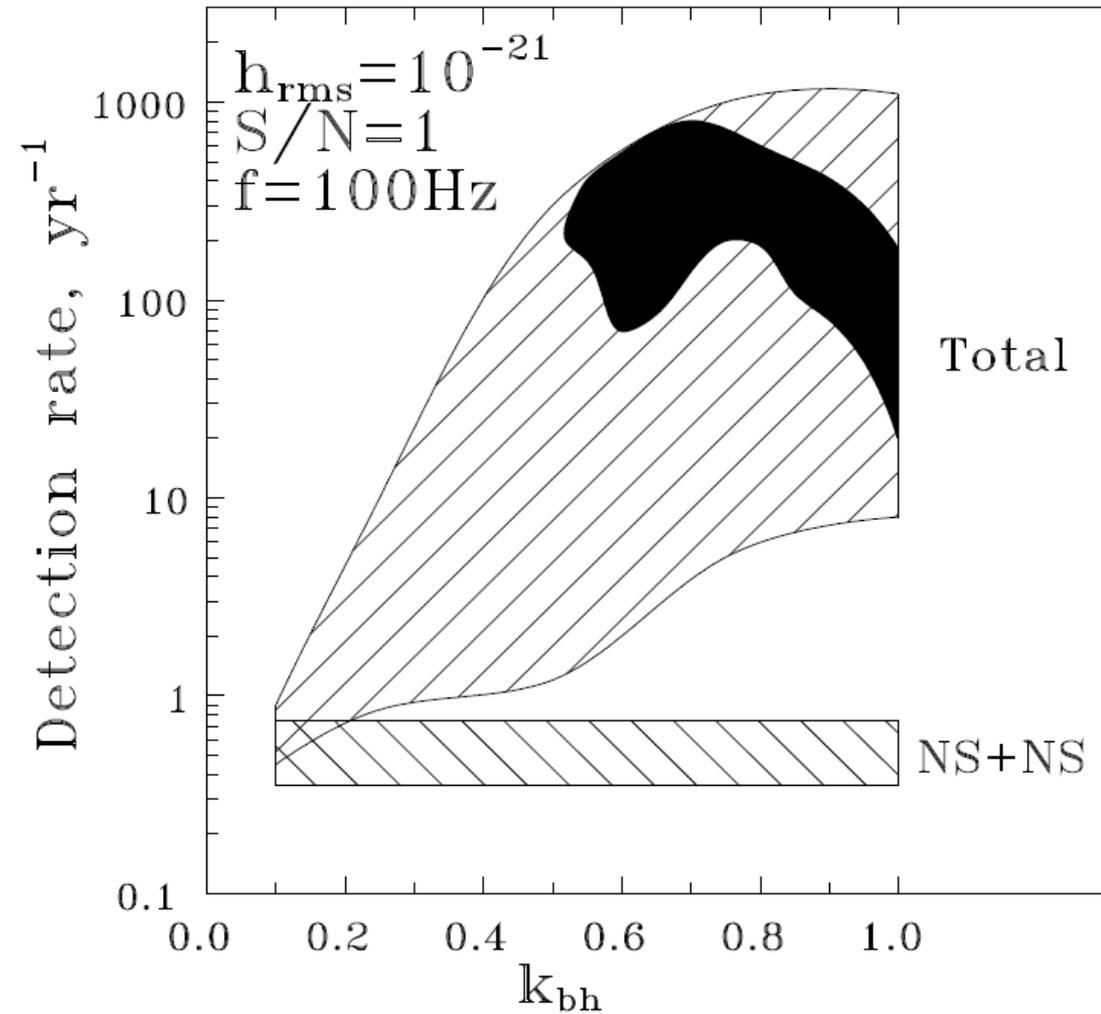


Fig. 4. The distributions of the total mass and the “chirp mass” for merging binary black holes for $M_* = 35M_{\odot}$ and $\zeta_{\text{bh}} = 0.3$ and for a Lyne–Lorimer velocity distribution with $v_0 = 400 \text{ km s}^{-1}$.

Более поздние работы (группа Kalogera-Belczynsky)

- Эффекты металличности

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

ABBOTT ET AL.

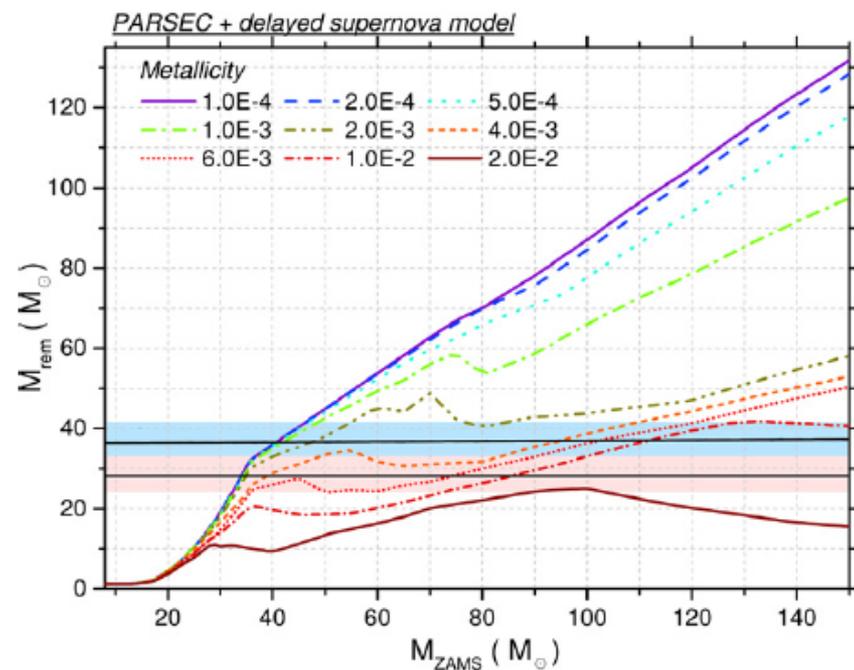
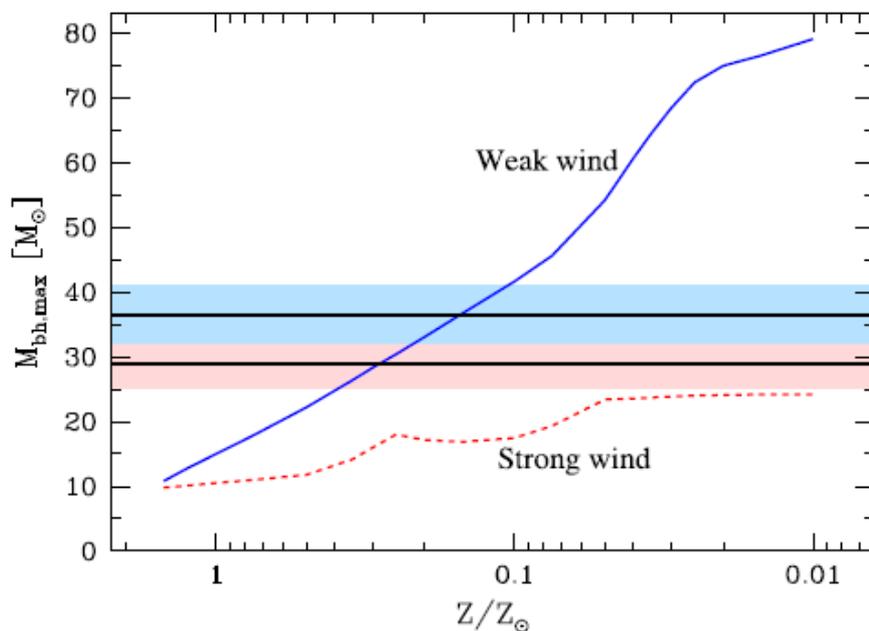


Figure 1. Left: dependence of maximum BH mass on metallicity Z , with $Z_{\odot} = 0.02$ for the old (strong) and new (weak) massive-star winds (Figure 3 from Belczynski et al. 2010a). Right: compact-remnant mass as a function of zero-age main-sequence (ZAMS; i.e., initial) progenitor mass for a set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

Модельные предсказания

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

ABBOTT ET AL.

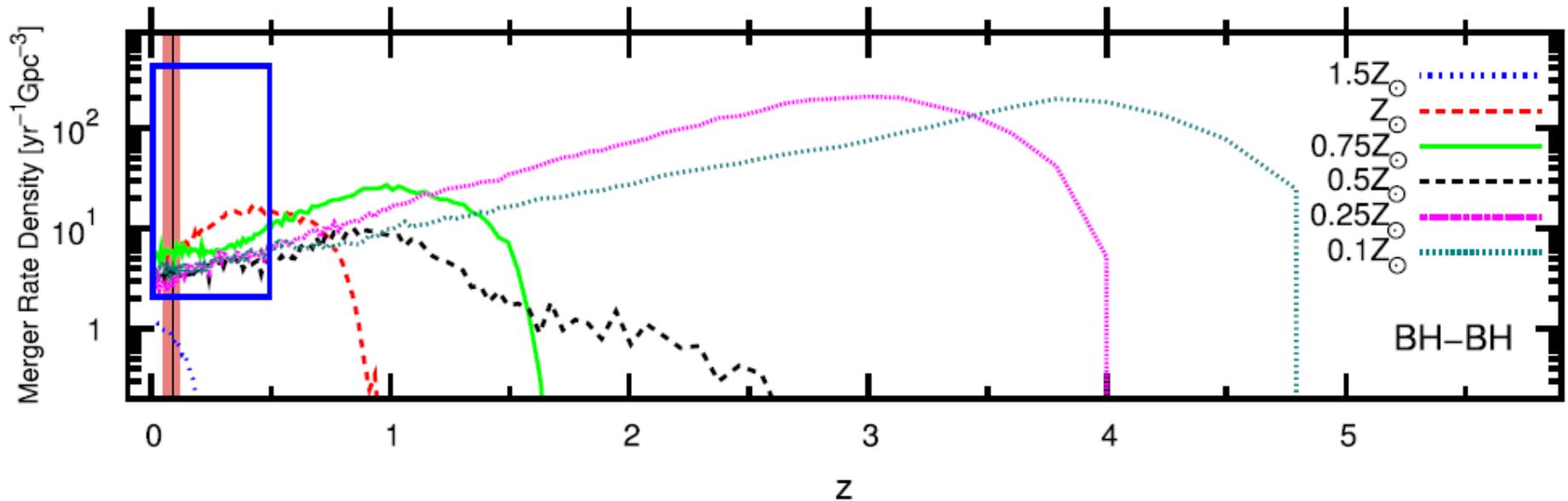
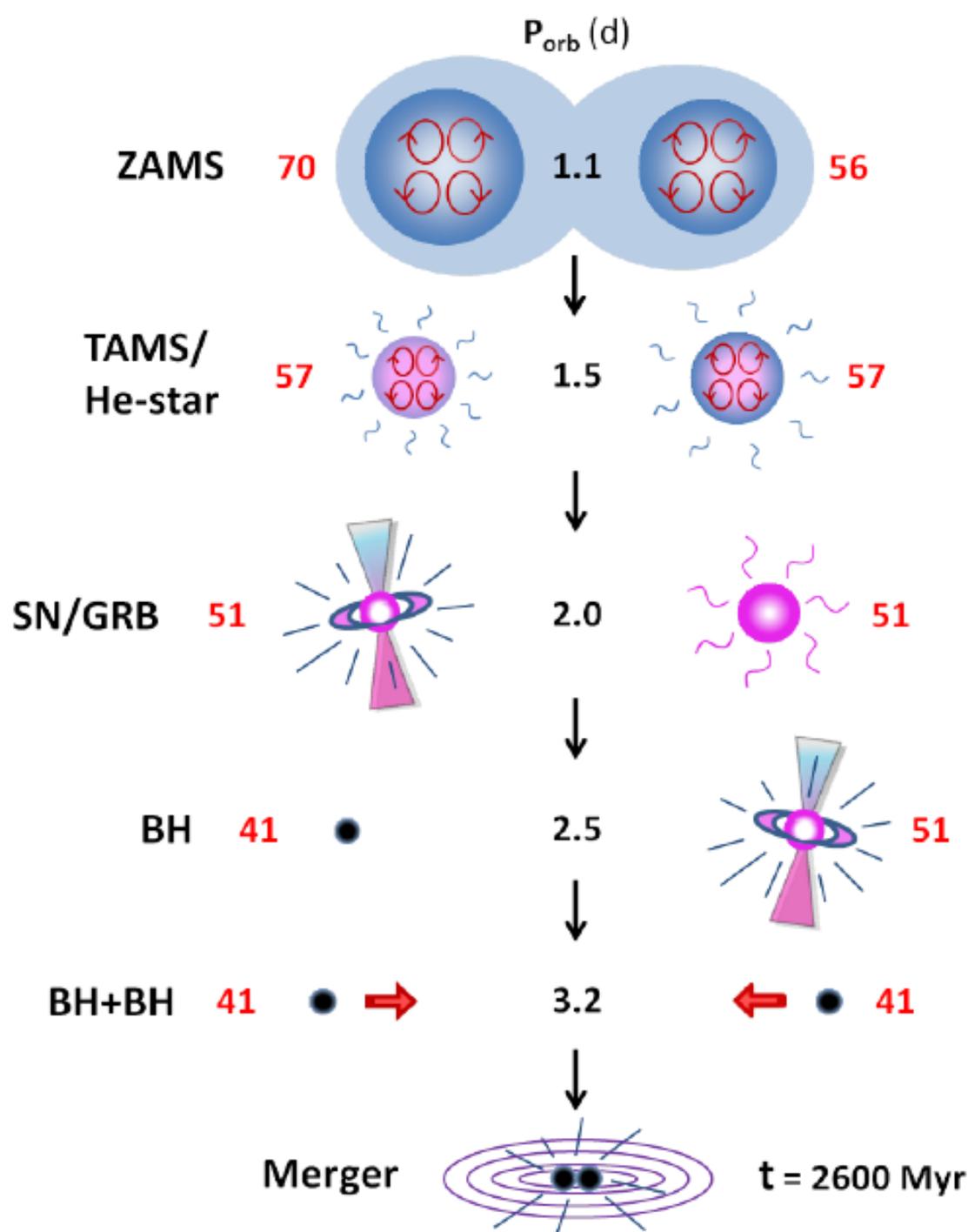


Figure 2. Predictions of BBH merger rate in the comoving frame ($\text{Gpc}^{-3} \text{yr}^{-1}$) from isolated binary evolution as a function of redshift for different metallicity values (adopted from Figure 4 in Dominik et al. 2013). At a given redshift, the total merger rate is the sum over metallicity. 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.



Новые
сценарии
(вращение
помогает
избежать
общей
оболочки)

arXiv:1601.03718

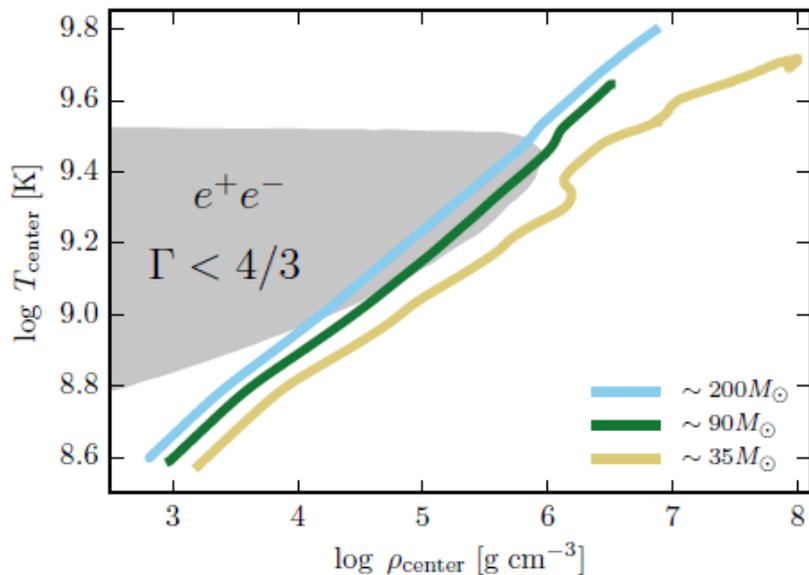


Fig. 10. The evolution in the $T_c - \rho_c$ -diagram for the three stars at $Z = Z_\odot/50$ (with the masses at helium depletion as indicated to the final evolutionary stage). The shaded region shows the region that is unstable to pair creation. Both the $35 M_\odot$ and the $90 M_\odot$ stars collapse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

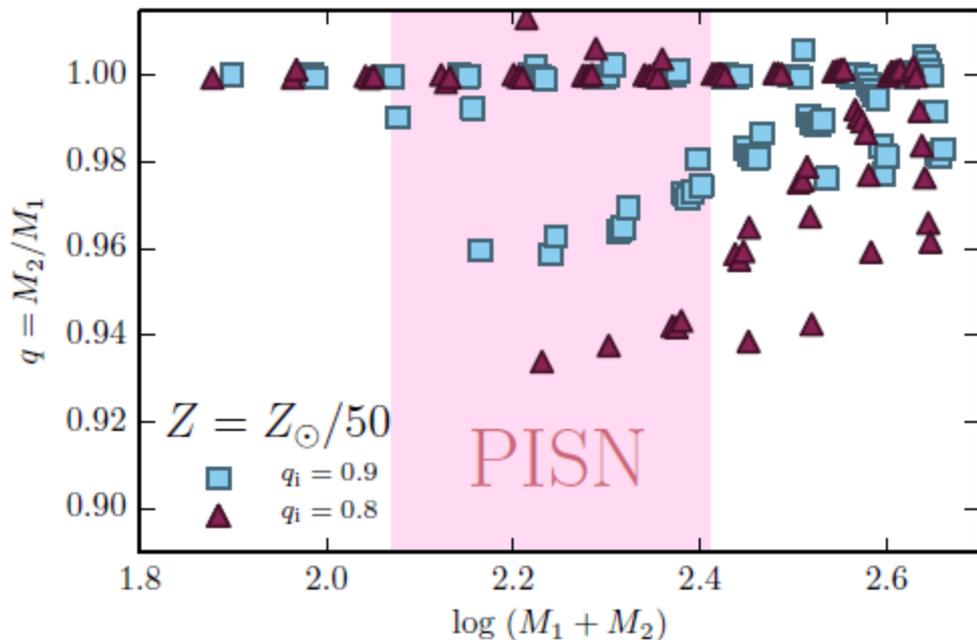


Fig. 6. Mass-ratios of BH+BH systems resulting from our modelled systems for $q_i = 0.9$ and $q_i = 0.8$ and a metallicity $Z = Z_\odot/50$ under the assumption that no mass is lost during collapse. The shaded region indicates the limits for the occurrence of PISNe.

Выводы

- Подтверждается существование двойных черных дыр (ДЧД)
- Если работает канал 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 одиночного канала пока нельзя различить, образовалась ли ДЧД давно или недавно