

**Открытие гравитационных волн от
слияния черных дыр в гравитационной
обсерватории LIGO**

А.Д. Долгов

**НГУ, Новосибирск, 630090, Россия
University of Ferrara, Ferrara 40100, Italy**

Институт Генетики

Новосибирск, 2 марта 2016

11 февраля этого года было торжественно объявлено о первой в истории прямой регистрации гравитационных волн на лазерном интерферометре гравитационной обсерватории (LIGO, USA).

Результаты работы были в тот же день опубликованы в Phys. Rev. Letters.

Нередко спрашивают, какое из открытий важнее: открытие бозона Хиггса или гравитационных волн.

"Если у тебя спрошено будет: что полезнее солнце или месяц? - ответствуй: месяц. Ибо солнце светит днём, когда и без того светло; а месяц - ночью. Но, с другой стороны: солнце лучше тем, что светит и греет; а месяц только светит, и то лишь в лунную ночь! " (Козьма Прутков).

Открытие бозона Хиггса поставило завершающую точку в установлении справедливости электро-слабой теории, а открытие гравитационных волн не только явилось первой проверкой ОТО для сильных полей и первым наблюдением именно черных дыр, но еще открыло новое окно во Вселенную!

Более того, обнаруженное, пока единственное, событие уже породило новые загадки, что делает его особенно интересным.

Оба открытия были ожидаемы.

Бозон Хиггса проявлялся в квантовых поправках к электрослабым процессам, которые были измерены на опыте.

Эффект излучения гравитационных волн наблюдался в увеличении периода вращения двойного пульсара в прекрасном согласии с ОТО, правда, лишь для слабых полей

Что же такое ОТО = общая теория относительности? Это теория гравитации с учетом конечного времени распространения сигнала, очень похожа на электродинамику. В электродинамике заряд создает электрическое поле, а движение зарядов - магнитное. Если движение зарядов равномерное, то ничего более не происходит. Но если заряд двигать с переменной скоростью, то поле оторвется от него и побежит электромагнитная волна. Волна может бежать в пустоте, в вакууме, перекачивая E в H .
Революционная идея: эфира нет .

В гравитации роль заряда играет масса (точнее, энергия). Движение массы с изменяющимся ускорением приводит к так же отрыву поля и бежит гравитационная волна и тоже со скоростью света.

Но сила гравитации в 10^{18} раз слабее электричества. Мы не чувствуем этой силы, т.к. заряды экранируются зарядами противоположного знака, а вот отрицательной массы/энергии нет.

Важное отличие ОТО связано с принципом эквивалентности: ускорения всех тел в гравитационном поле одинаковы (Г. Галилей). Идея Эйнштейна: раз все движения эквивалентны, их можно описать как изменение геометрии пространства. Масса/энергия искривляет пространство и все тела там свободно падают по геодезическим (линиям с минимальным интервалом).

Гаусс: геометрию надо проверять экспериментально. Все прекрасно проверено для слабых полей, когда геометрия лишь немного отличается от школьной эвклидовой.

Гравитационная волна это бегущее изменение геометрии, приводящее в частности к изменению расстояний между любыми объектами. На этом построена идея лазерного интерферометра (Герценштейн, Пустовойт, 1962?)

Наиболее сильные гравитационны поля генерируются при бысторм движении тел маленького размера, но большой массы. Рекордсмены здесь - черные дыры. Три режима: стационарный, спиральный и слияние. Что измерено и результаты, см.ниже

1. Случайно ли повезло или таких черных дыр много?
2. Если много, то великолепные перспективы залезть в глубины Вселенной
3. Откуда взялись ЧД с такими громадными массами?
4. Двойных звезд много, но при коллапсе звезды получают большую скорость и разл

Ранее все окна в астрономии были электро
сначала лишь свет, теперь все длину волн:
радио, ифракрасие, ультрафиолет, гамма
и все выше, выше и выше. А теперь
еще и космические лучи и нейтрино. И
наконец, гравитационные волны

On February 11, LIGO (Laser Interferometer Gravitational wave Observatory) collaborations announced discovery of gravitational waves from a coalescing binary systems of black holes.

The shape of the signal is in perfect agreement with the theory of BH interactions in the strong (Schwarzschild) self-fields, so it can be considered as a first direct proof of BH existence. All previous data was about weak fields.

Rumors about 7 or 8 more events (!?).

This discovery opens a new era of gravitational waves telescopes which will presumably allow to observe several (many) such catastrophic events per year and with onset of operation of VIRGO (Italy) and KAGRA (The Kamioka Gravitational Wave Detector, Japan) the direction to source can be reliably established and studied by optical and other electromagnetic telescopes. New discoveries are imminent.

Already Fermi has possibly registered gamma ray signal from the BH coalescence observed by LIGO (???)

It would be good to have a detector in Southern hemisphere or in utmost Northern part in our hemisphere (Alaska, Russia, Arctica??) for more precise determination of the direction.

Results, PRL, 116, 061102, 12/02/2016

TABLE I. Source parameters for GW150914. We report median values with 90% credible intervals that include statistical errors, and systematic errors from averaging the results of different waveform models. Masses are given in the source frame; to convert to the detector frame multiply by $(1+z)$ [90]. The source redshift assumes standard cosmology [91].

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

The mass and spin of the final BH, and the total energy radiated in gravitational waves are estimated by the fits to numerical simulations of binary black hole mergers.

The estimated total energy radiated in gravitational waves is $(3.0 \pm 0.5)M_{\odot}$ and a peak of gravitational-wave luminosity is 3.0×10^{56} erg/sec equivalent to $200M_{\odot}/\text{sec}$, more than whole radiation power of the visible universe.

Rotational energy (outside the BH) is about $0.3M_{\odot}$ - may be in principle extracted.

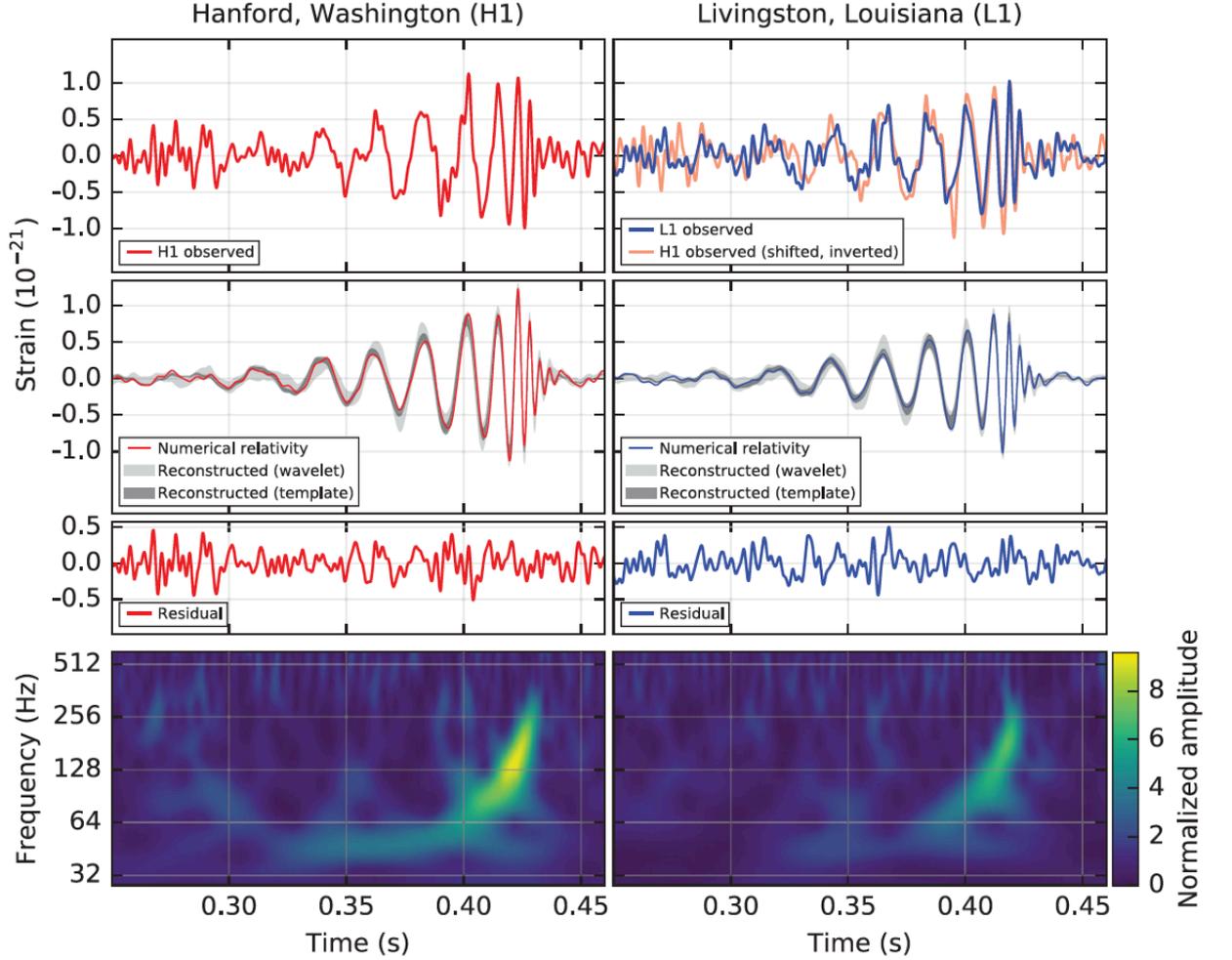


FIG. 1. The gravitational-wave event GW150914 observed by the LIGO Hanford (H1, left column panels) and Livingston (L1, right column panels) detectors. Times are shown relative to September 14, 2015 at 09:50:45 UTC. For visualization, all time series are filtered with a 35–350 Hz bandpass filter to suppress large fluctuations outside the detectors’ most sensitive frequency band, and band-reject filters to remove the strong instrumental spectral lines seen in the Fig. 3 spectra. *Top row, left:* H1 strain. *Top row, right:* L1 strain. GW150914 arrived first at L1 and $6.9^{+0.5}_{-0.4}$ ms later at H1; for a visual comparison, the H1 data are also shown, shifted in time by this amount and inverted (to account for the detectors’ relative orientations). *Second row:* Gravitational-wave strain projected onto each detector in the 35–350 Hz band. Solid lines show a numerical relativity waveform for a system with parameters consistent with those recovered from GW150914 [37,38] confirmed to 99.9% by an independent calculation based on [15]. Shaded areas show 90% credible regions for two independent waveform reconstructions. One (dark gray) models the signal using binary black hole template waveforms [39]. The other (light gray) does not use an astrophysical model, but instead calculates the strain signal as a linear combination of sine-Gaussian wavelets [40,41]. These reconstructions have a 94% overlap, as shown in [39]. *Third row:* Residuals after subtracting the filtered numerical relativity waveform from the filtered detector time series. *Bottom row:* A time-frequency representation [42] of the strain data, showing the signal frequency increasing over time.

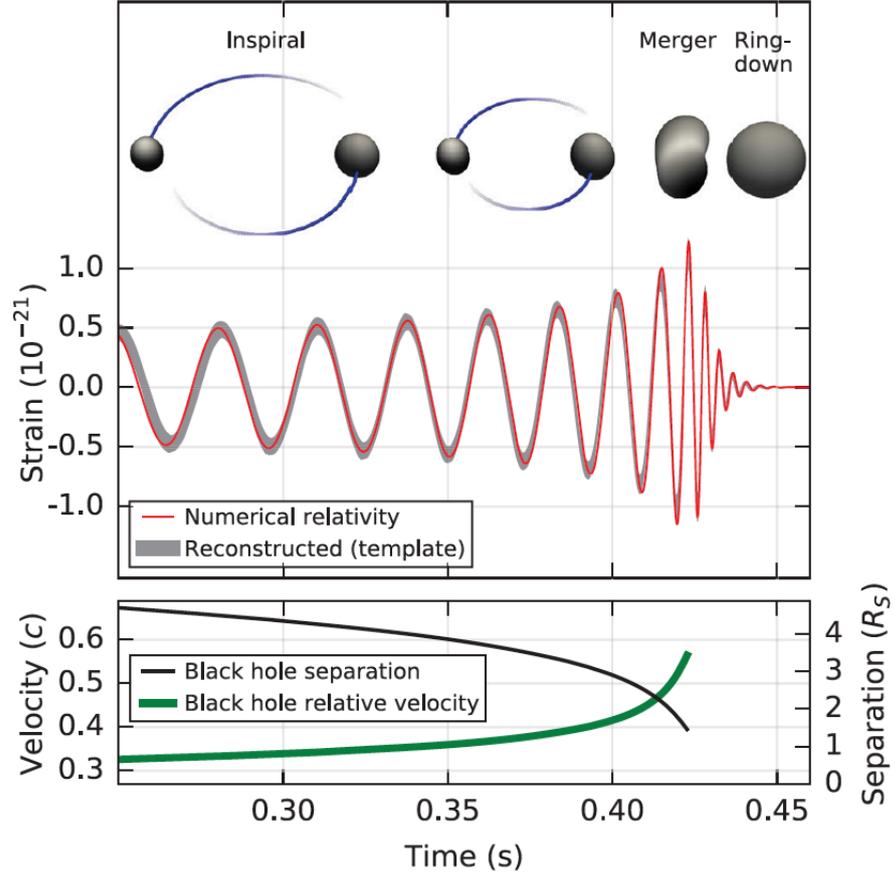


FIG. 2. *Top:* Estimated gravitational-wave strain amplitude from GW150914 projected onto H1. This shows the full bandwidth of the waveforms, without the filtering used for Fig. 1. The inset images show numerical relativity models of the black hole horizons as the black holes coalesce. *Bottom:* The Keplerian effective black hole separation in units of Schwarzschild radii ($R_S = 2GM/c^2$) and the effective relative velocity given by the post-Newtonian parameter $v/c = (GM\pi f/c^3)^{1/3}$, where f is the gravitational-wave frequency calculated with numerical relativity and M is the total mass (value from Table I).

Order of magnitude estimates.

Gravitational radius: $r_g = 2M/m_{Pl}^2$.

For the Sun: $r_g \approx 3$ km.

Virial theorem: $V^2 = \frac{M}{m_{Pl}^2 R} = \frac{r_g}{2R}$,

and period $T = \frac{2\pi R}{V} = \frac{(2R)^{3/2}\pi}{r_g^{1/2}}$.

For $M = 30M_\odot$ and $R = r_g$:

$$T \sim 0.003\text{sec.}$$

Two rotating gravitationally bound massive bodies are known to emit gravitational waves. If the back reaction is neglected, the radius of the orbit and the rotation frequency are constant and the GW frequency is twice the rotation frequency. The luminosity of the GW radiation is:

$$L = \frac{32}{5} m_{Pl}^2 \left(\frac{M_c \omega_{orb}}{m_{Pl}^2} \right)^{10/3},$$

where M_c is the so called chirp mass:

$$M_c = \frac{(M_1 M_2)^{3/5}}{(M_1 + M_2)^{1/5}},$$

and

$$\omega_{orb}^2 = \frac{M_1 + M_2}{m_{Pl}^2 R^3}.$$

This solution is valid in the adiabatic (in-spiral) regime when radius drops and frequency rises due to the energy loss induced by the GW emission. The adiabaticity condition, $\dot{R} \ll \omega_{orb} R$, can be rewritten as $\dot{\omega}_{orb} \ll \omega_{orb}^2$, which can be translated into the lower bound on the radius of the orbit:

$$R \gg r_g^{(eff)} = \frac{M_1 + M_2}{m_{Pl}^2},$$

i.e. in the Newtonian approximation.

For $R \sim r_g$:

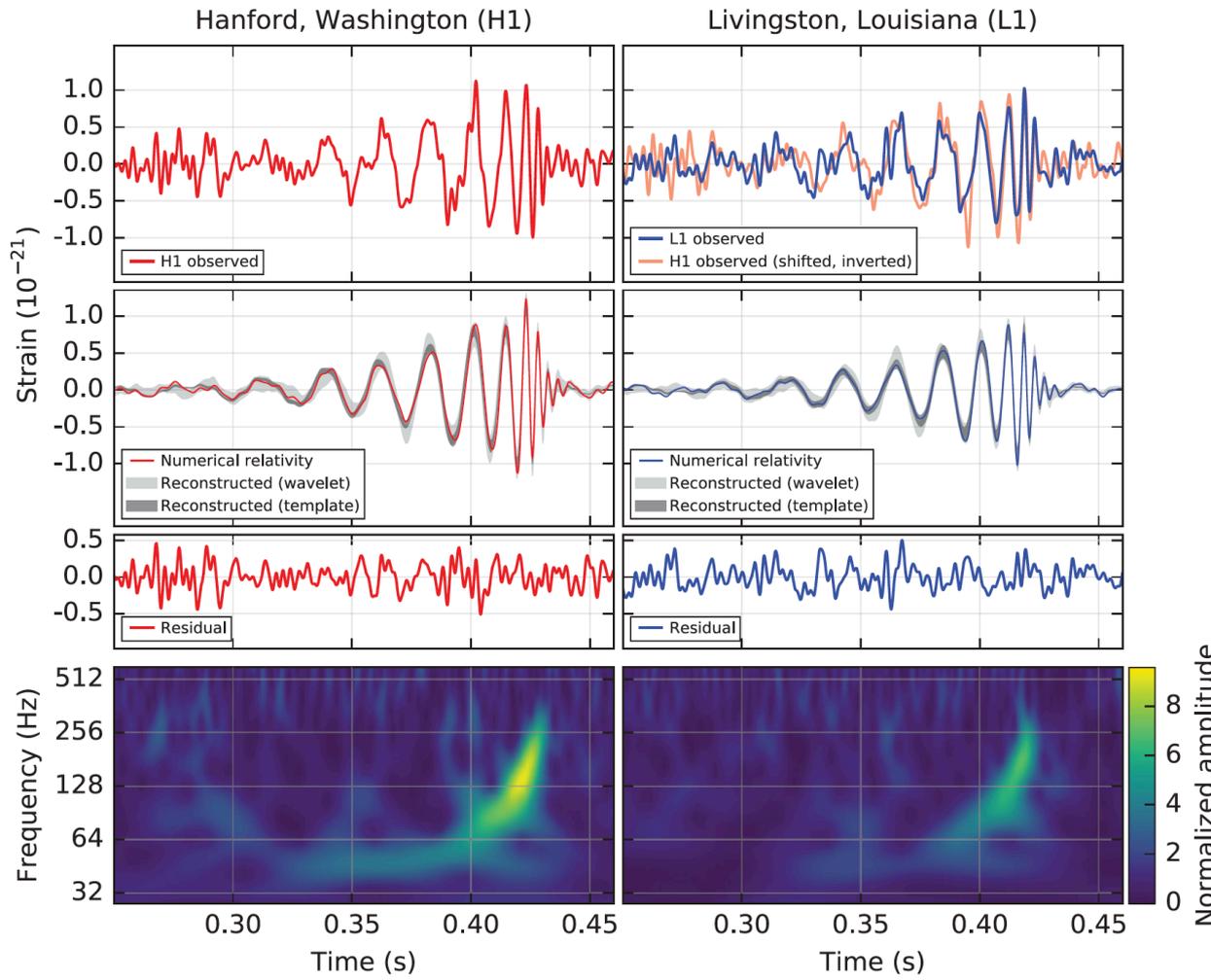
$$\omega_{orb} \sim m_{Pl}^2/M \sim 10^3/\text{sec},$$

looks reasonable. But energy taken by GW is

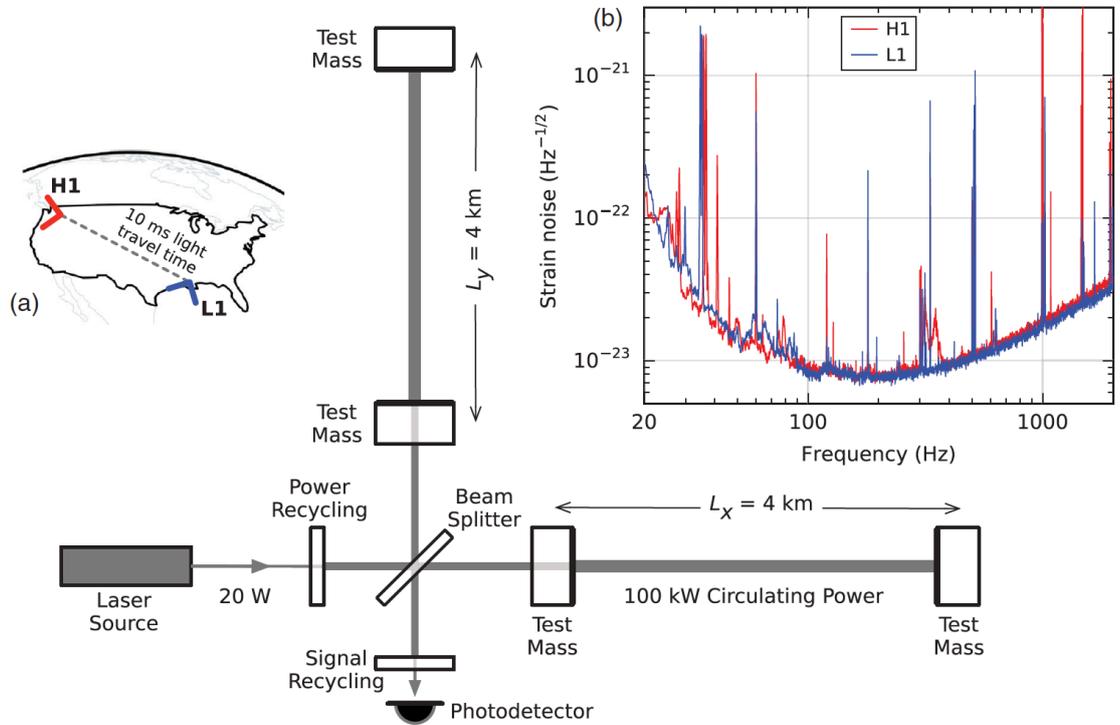
$$E_{tot} \sim L/\omega_{orb} = M,$$

slightly too much.

When $R \sim r_g$ only numerical solution of nonlinear and non-spherically symmetric GR equations is possible, which impressively agrees with the data, after fitting the parameters: M_1 , M_2 and distance to BHs.



The detector



Number of photons reaching detector

Accumulated circulated power 100 kW.

$1W = 10^7$ erg/sec, 1 erg = 10^{12} eV.

because $1g = 10^{24}$ GeV = 10^{21} erg.

If $E_\gamma = 1$ eV, then 100 kW/sec corresponds to $N_\gamma = 10^{24}$ /sec.

1 eV photons have $\lambda \sim 10^{-5}$ cm.

During 1 msec the number of photons would be $\sim 10^{21}$.

The length displacement is measured with precision 10^{-16} cm. For $\delta L = 10^{-16}$ cm the length difference would be $\Delta L = 70\delta L$, because photons run 70 times, so $\Delta\phi = \Delta L/\lambda = 10^{-9}$ and the number of photons reaching the detector in 1 msec would be 10^3 .

The sensitivity is limited by noise.

About noise see M. Maggiore, "Gravitational Waves" Oxfors Univ. Press.

Energy density of GWs:

$$\rho_{GW} = \frac{m_{Pl}^2}{32\pi} \langle \dot{h}_{ab} \dot{h}^{ab} \rangle.$$

Strain:

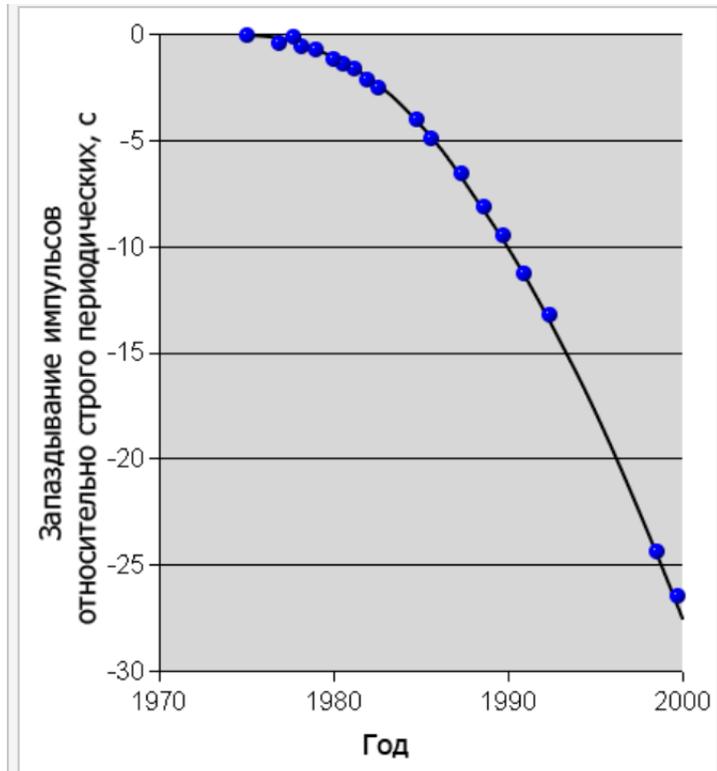
$$\langle h_{ab} h^{ab} \rangle = 4 \int_0^{+\infty} d(\log f) f S_h.$$

Characteristic amplitude

$$\langle h_{ab} h^{ab} \rangle = 2 \int_0^{+\infty} d(\log f) f h_c^2.$$

So

$$h_c^2 = 2f S_h(f).$$



Экспериментально измеренное уменьшение периода обращения двойного пульсара PSR B1913+16 (синие точки) с высокой точностью соответствует предсказаниям ОТО по гравитационному излучению (чёрная кривая).

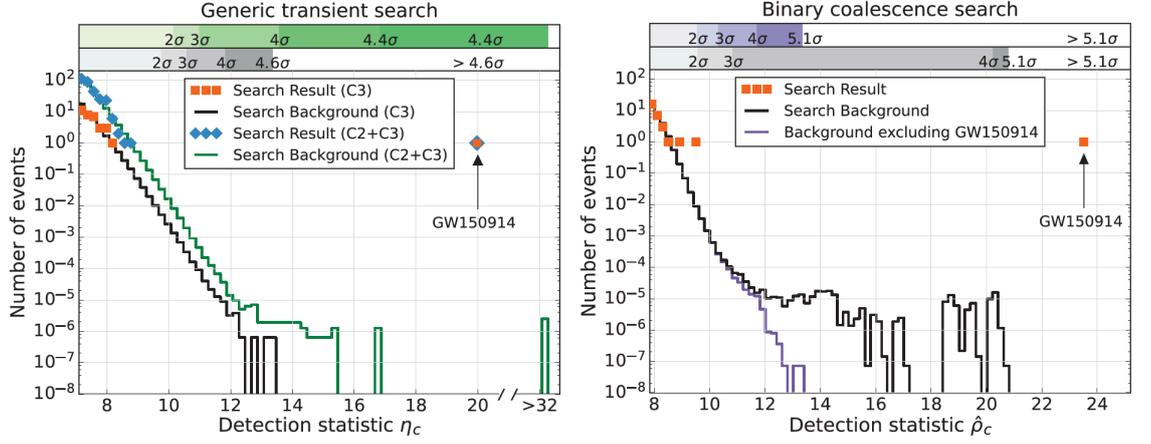
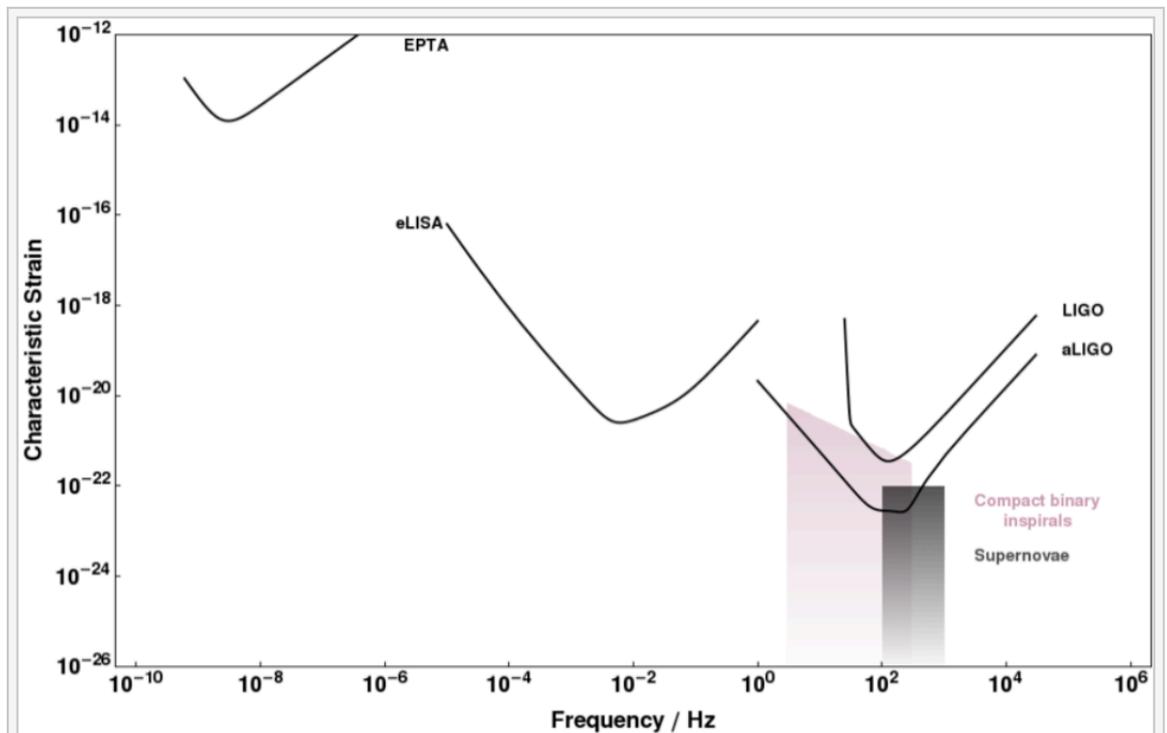


FIG. 4. Search results from the generic transient search (left) and the binary coalescence search (right). These histograms show the number of candidate events (orange markers) and the mean number of background events (black lines) in the search class where GW150914 was found as a function of the search detection statistic and with a bin width of 0.2. The scales on the top give the significance of an event in Gaussian standard deviations based on the corresponding noise background. The significance of GW150914 is greater than 5.1σ and 4.6σ for the binary coalescence and the generic transient searches, respectively. *Left:* Along with the primary search (C3) we also show the results (blue markers) and background (green curve) for an alternative search that treats events independently of their frequency evolution (C2 + C3). The classes C2 and C3 are defined in the text. *Right:* The tail in the black-line background of the binary coalescence search is due to random coincidences of GW150914 in one detector with noise in the other detector. (This type of event is practically absent in the generic transient search background because they do not pass the time-frequency consistency requirements used in that search.) The purple curve is the background excluding those coincidences, which is used to assess the significance of the second strongest event.





Detector noise curves for Initial and Advanced LIGO as a function of frequency. They lie above the bands for space-borne detectors like the evolved Laser Interferometer Space Antenna (eLISA) and pulsar timing arrays such as the European Pulsar Timing Array (EPTA). The characteristic strains of potential astrophysical sources are also shown. To be detectable the characteristic strain of a signal must be above the noise curve.^[15]