

# Гравитационные волны

*краткий обзор*

*А.Н. Баушев, в.н.с. ЛТФ*

$$\text{TT-калибровка} \quad \bar{h}_\alpha{}^\alpha \equiv \bar{h} = \bar{h}_{\alpha\beta} k^\beta = \bar{h}_{\alpha 0} = 0$$

$$h_{\alpha\beta} = \bar{h}_{\alpha\beta} - \frac{1}{2} \eta_{\alpha\beta} \bar{h} \quad \rightarrow \quad h_{\alpha\beta} = \bar{h}_{\alpha\beta}$$

$$h_\alpha{}^\alpha \equiv h = h_{\alpha\beta} k^\beta = h_{\alpha 0} = 0$$

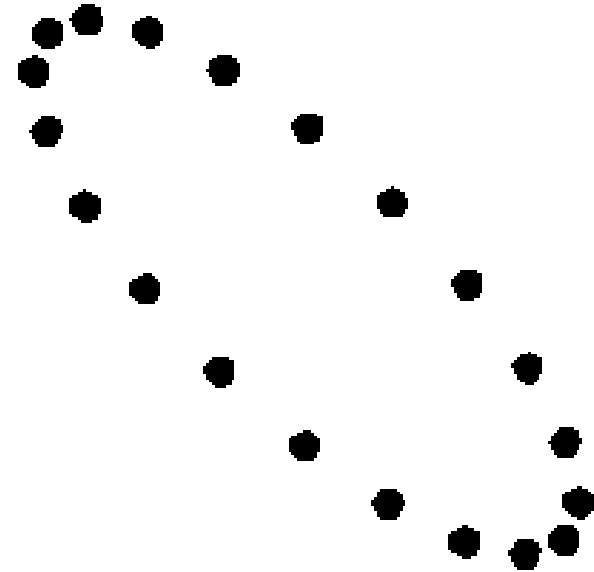
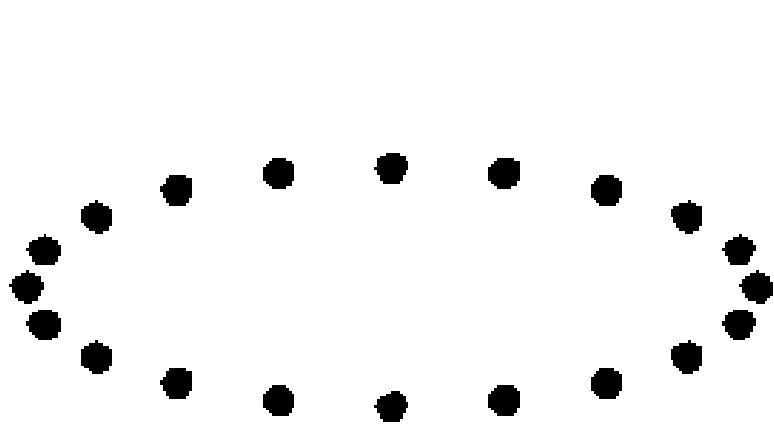
Рассмотрим плоскую волну вдоль оси OZ:  $k_\alpha = (\omega, 0, 0, \omega)$

$$h_{\alpha\beta} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_{xx} & h_{xy} & 0 \\ 0 & h_{xy} & -h_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = \underbrace{h_{xx} dx^2 - h_{yy} dy^2}_{h_+} + \underbrace{2h_{xy} dx dy}_{h_\times}$$

# Две поляризации гравитационных волн

$$h_+ = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & h_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -h_{xx} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$h_{\times} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & h_{xy} & 0 \\ 0 & h_{xy} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$



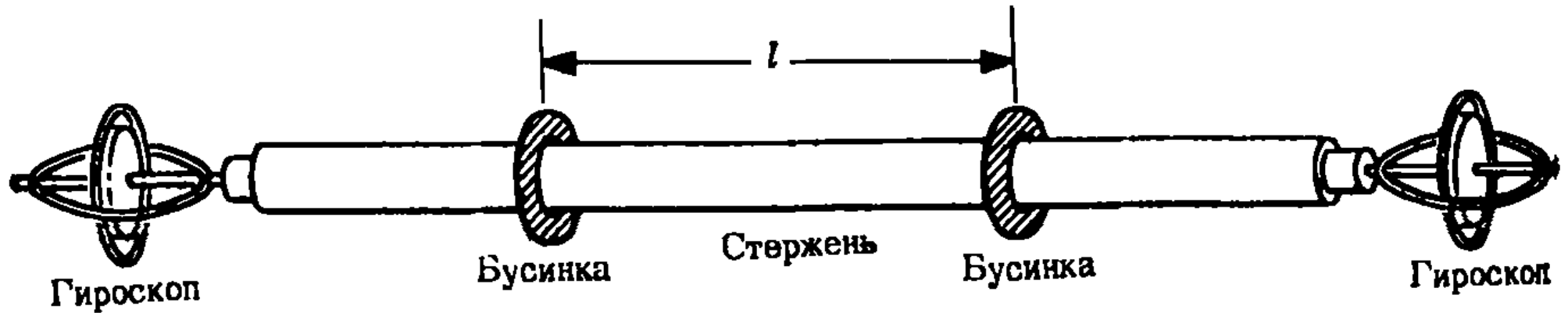
## Немного истории...

- 1900 — Лоренц предположил, что гравитация «...может распространяться со скоростью, не большей скорости света»;
- 1905 — Пуанкаре впервые ввёл термин гравитационная волна (фр. onde gravitique). Пуанкаре на качественном уровне снял устоявшиеся возражения Лапласа и показал, что связанные с гравитационными волнами поправки к общепринятым законам тяготения Ньютона порядка  $v/c$  сокращаются, таким образом, предположение о существовании гравитационных волн не противоречит наблюдениям;
- 1916 — Эйнштейн показал, что в рамках ОТО механическая система будет передавать энергию гравитационным волнам, хотя в обычных условиях потери энергии порядка  $1/c^4$  ничтожны и практически не поддаются измерению (в этой работе он ещё ошибочно полагал, что механическая система, постоянно сохраняющая сферическую симметрию, может излучать гравитационные волны)

# Einstein's changing attitude to gravitational waves

- **19 Feb 1916, letter to Schwarzschild:** *“Es gibt also keine Gravitationswellen, welche Lichtwellen analog wären”*
- **22 Jun 1916, article:** *“...so sieht man, daß A (die Ausstrahlung des Systems durch Gravitationswellen pro Zeiteinheit) in allen nur denkbaren Fällen einen praktisch verschwindenden Wert haben muß.”* Nährungsweise Integration der Feldgleichungen, Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), 1916 688
- **31 Jan 1918, article:** *“Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.”* Sitzungsberichte der Königlich Preußischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), 1916 154
- **1936 undated letter to Max Born:** *“Together with a young collaborator, I arrived at the interesting result that gravitational waves do not exist, though they have been assumed a certainty to the first approximation.”*
- **1936 Princeton lecture:** *“If you ask me whether there are gravitational waves or not, I must answer that I do not know. But it is a highly interesting problem.”*

Bondi, Feinman, 1957



Рассмотрим плоскую волну вдоль оси  $OZ$ . Единичный вектор вдоль стержня  $\vec{n} = (\sin \theta \cos \phi; \sin \theta \sin \phi; \cos \theta)$

Тогда амплитуда колебаний бусинок

$$l = l_0 \left( 1 + \frac{1}{2} h_{xx} \sin^2 \theta \cos 2\phi + \frac{1}{2} h_{xy} \sin^2 \theta \sin 2\phi \right)$$

Мизнер, Торн, Уилер,  
Гравитация, том 2, стр. 78

$$a^i = \sum_{j=1}^3 \frac{\ddot{h}_{ij}^{TT} l^j}{2}$$

# Мнение Фейнмана о конференции по гравитации

“I am not getting anything out of the meeting. I am learning nothing. Because there are no experiments this field is not an active one, so few of the best men are doing work in it. The result is that there are hosts of dopes here and it is not good for my blood pressure...

...Remind me not to come to any more gravity Conferences!”

*R. Feynman, What Do You Care What Other People Think? P91, 1988 (Warsaw meeting 1962)*

# Излучение гравитационных волн

$$h \sim m \frac{da}{dt}$$

$$m_1 a_1 = -m_2 a_2 \quad \rightarrow \quad m_1 \frac{da_1}{dt} + m_2 \frac{da_2}{dt} \simeq 0$$

$$\left( \left( \frac{v}{c} \right)^3 \frac{r_g}{r} \right)^2 \quad r_g = \frac{2Gm}{c^2}$$

$$D_{ij} = \int \rho (3x_i x_j - r^2 \delta_{ij}) dV$$

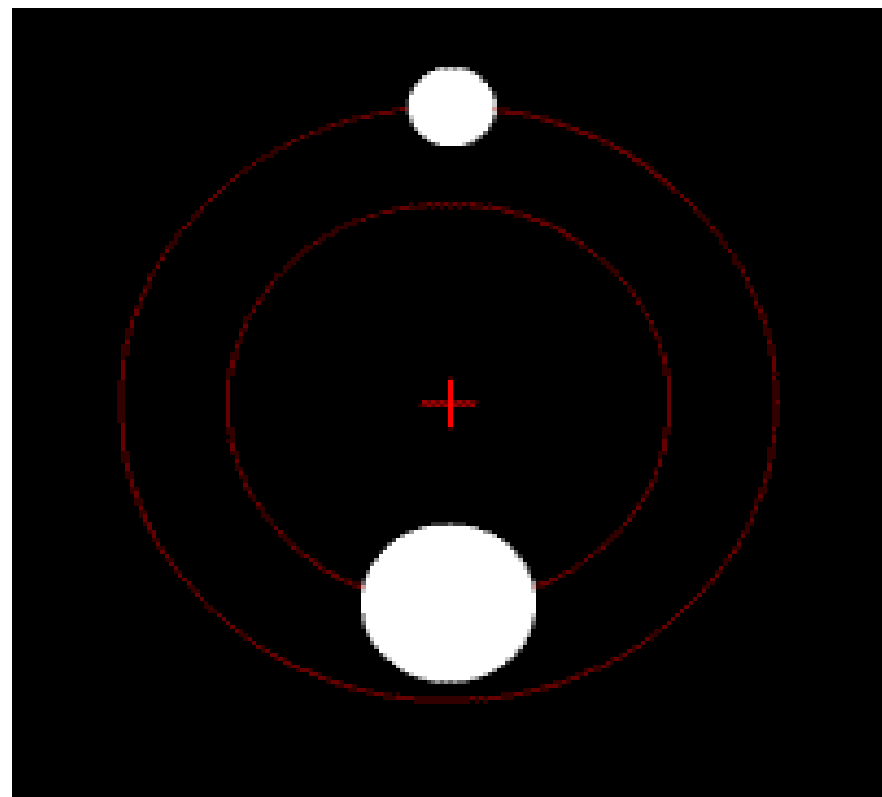
$$-\frac{dE}{dt} = \frac{G}{45c^5} \ddot{D}_{ij} \ddot{D}^{ij}$$



# Потенциальные источники гравитационных волн

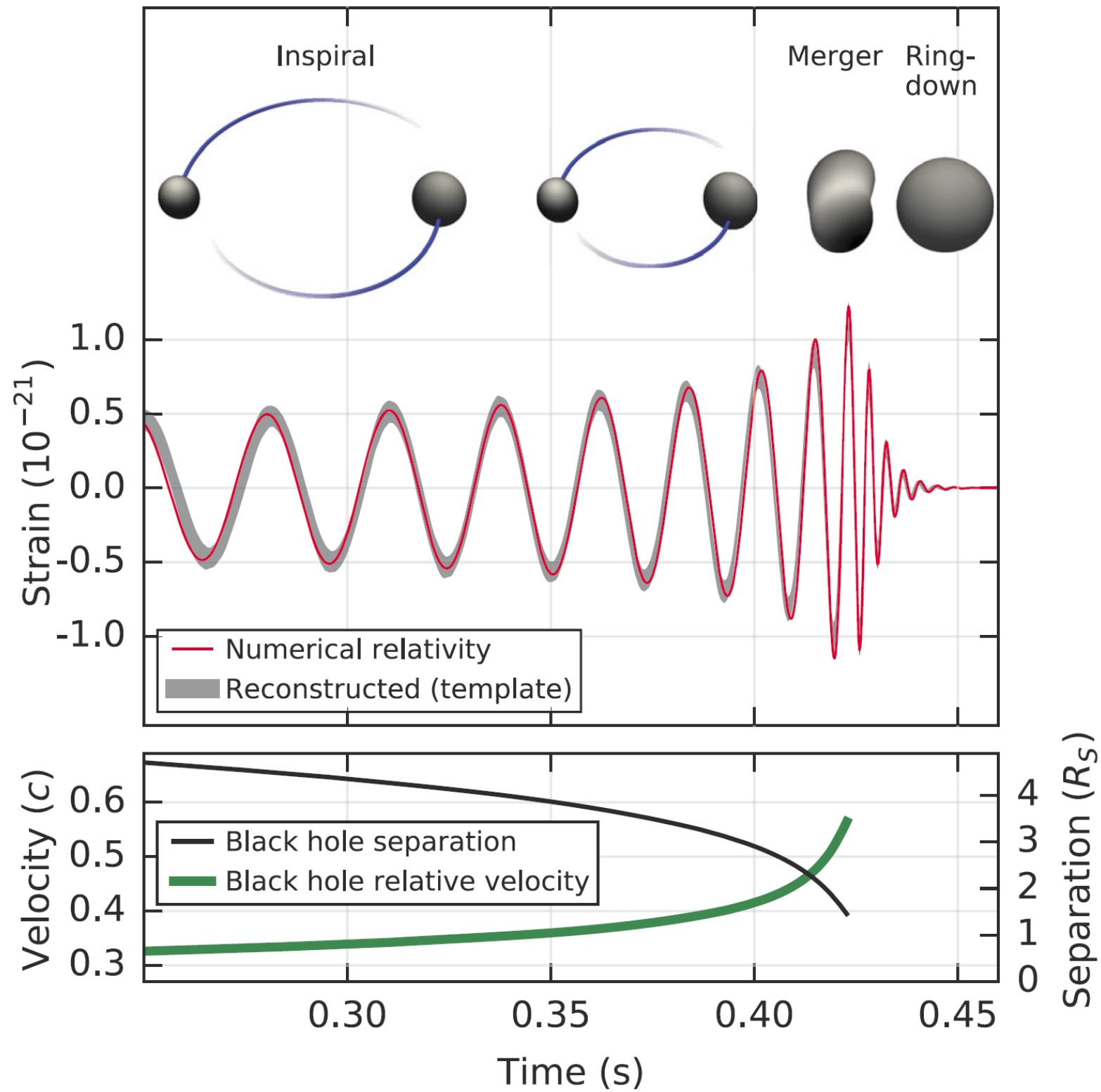
- Двойные компактные объекты (нейтронные звезды, черные дыры, белые карлики)
- Столкновения галактик и их скоплений
- Несимметричный коллапс звезд
- Космологические гравитационные волны
- Вообще, практически любое ускоренное движение масс (кроме сферически-симметричного)

# Двойная система

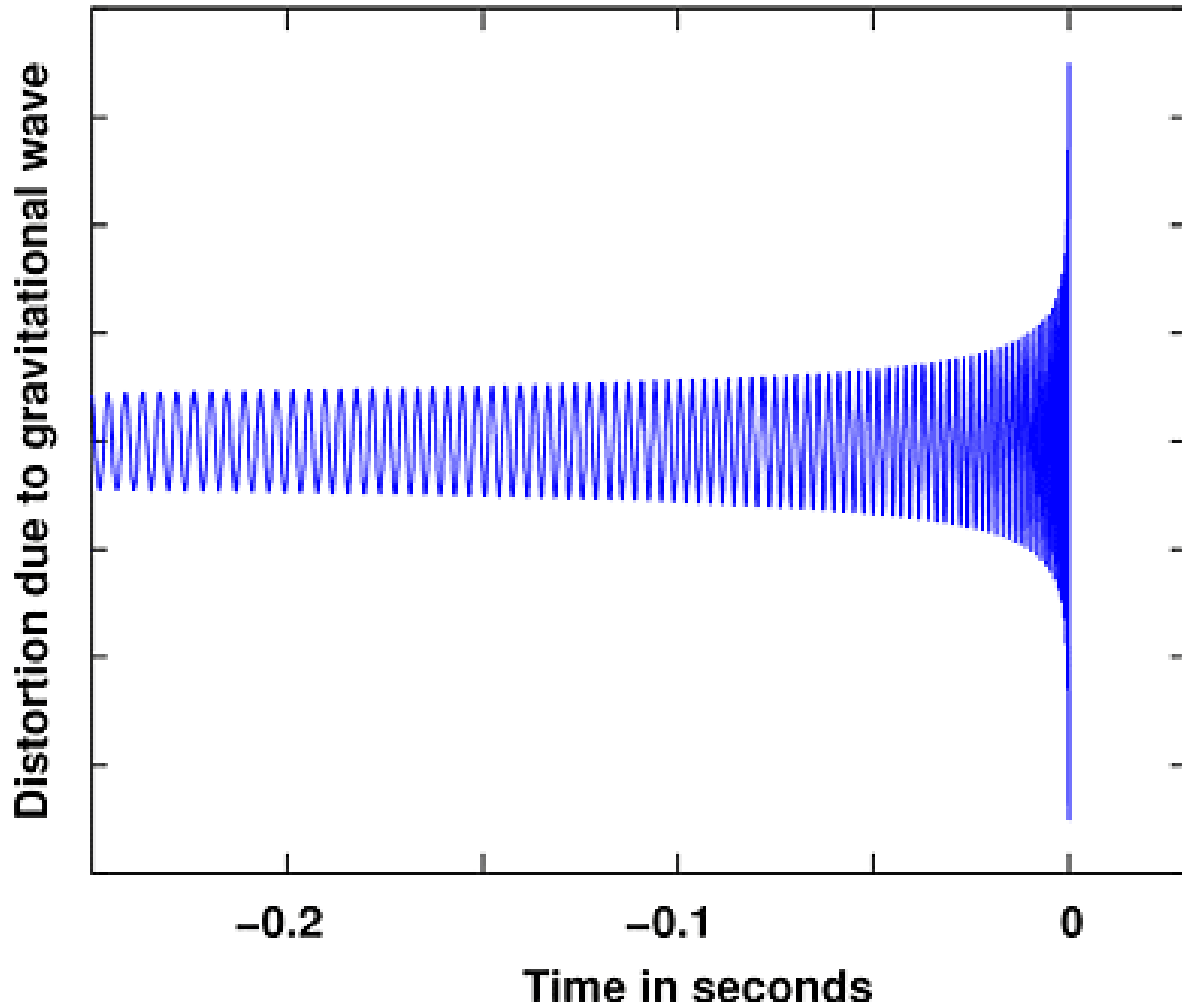


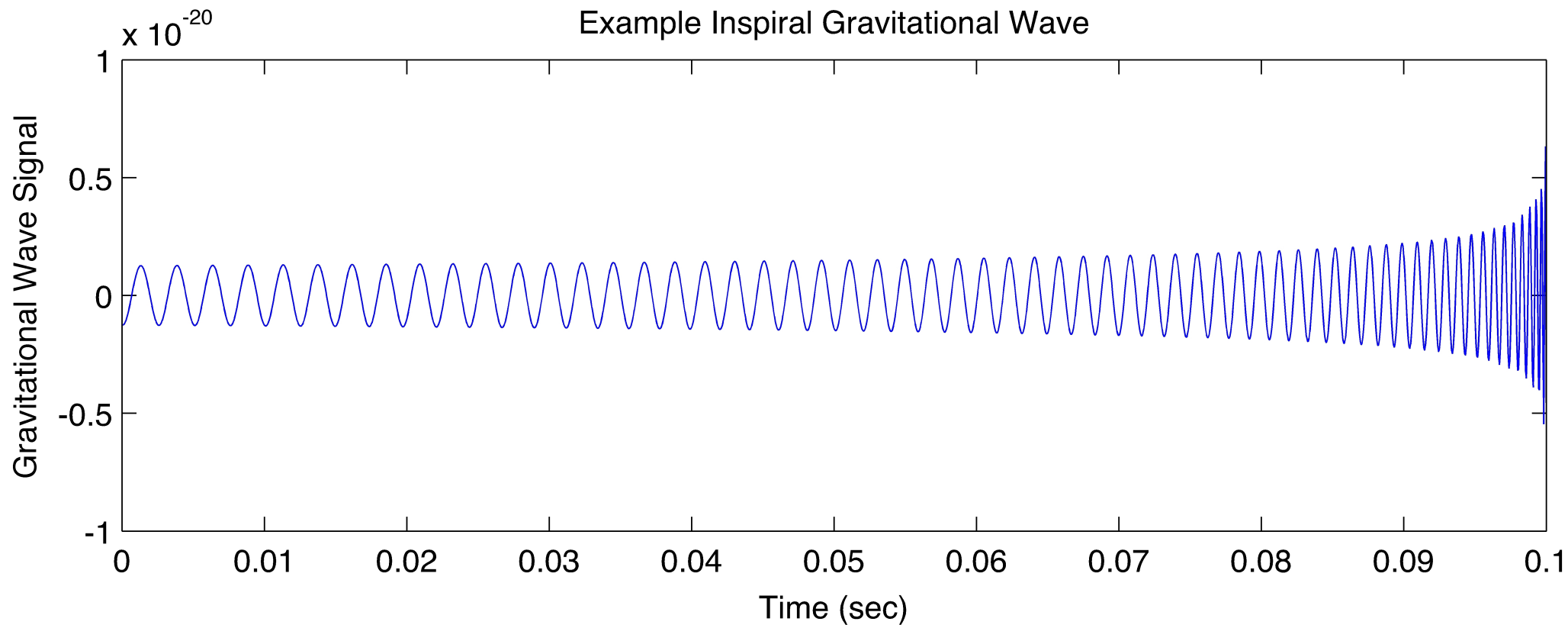
$$-\frac{dE}{dt} = \frac{32G^4 m_1^2 m_2^2 (m_1 + m_2)}{5c^5 r^5}$$

$$-\frac{dr}{dt} = \frac{64G^3 m_1 m_2 (m_1 + m_2)}{5c^5 r^3}$$



# Chirp от нейтронных звезд





*Schutz (1986);*

*Cutler&Flanagan (1994)*

*arXiv:gr-qc/9402014*

$$M_{chirp} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}}$$

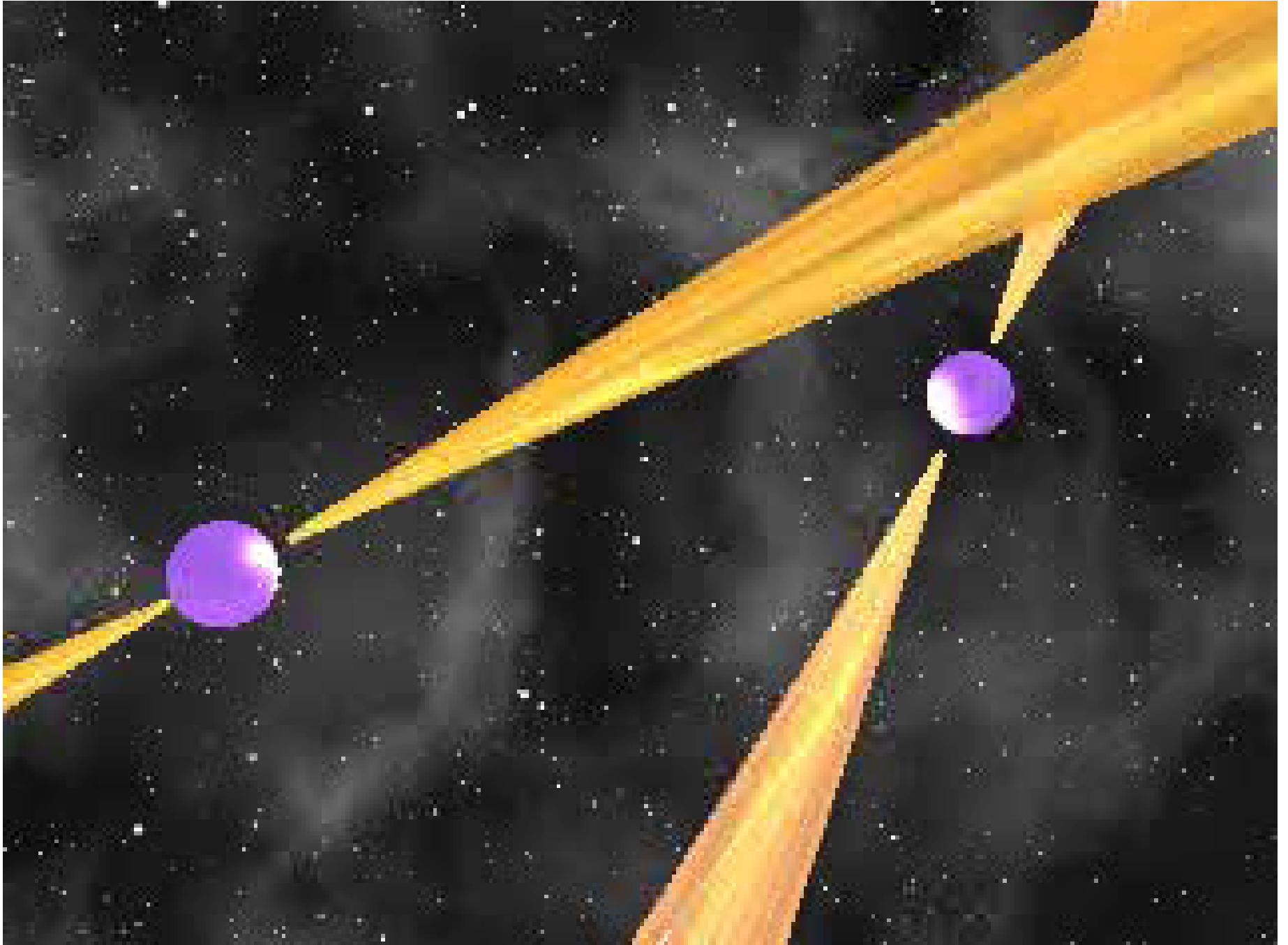
$$M_{chirp} = \frac{c^3}{G} \left( \frac{5\pi^{-8/3}}{96} f^{-11/3} \dot{f} \right)^{3/5}$$

Джозеф  
Вебер,  
*конец 60-ых*

Резонансный  
детектор



# PSR J0737-3039

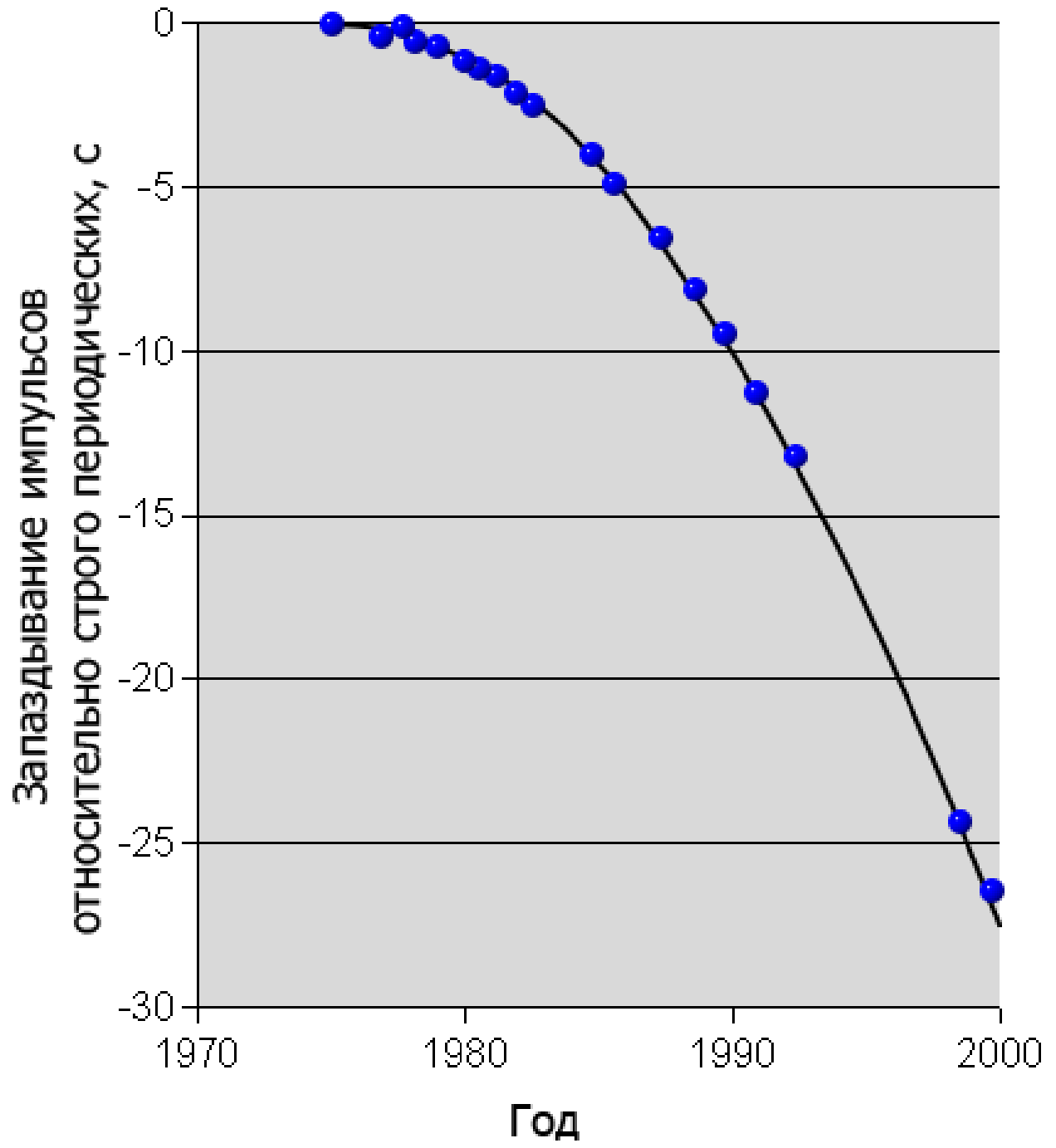


# Пульсар Халса-Тейлора PSR J1915+1606 (1974)

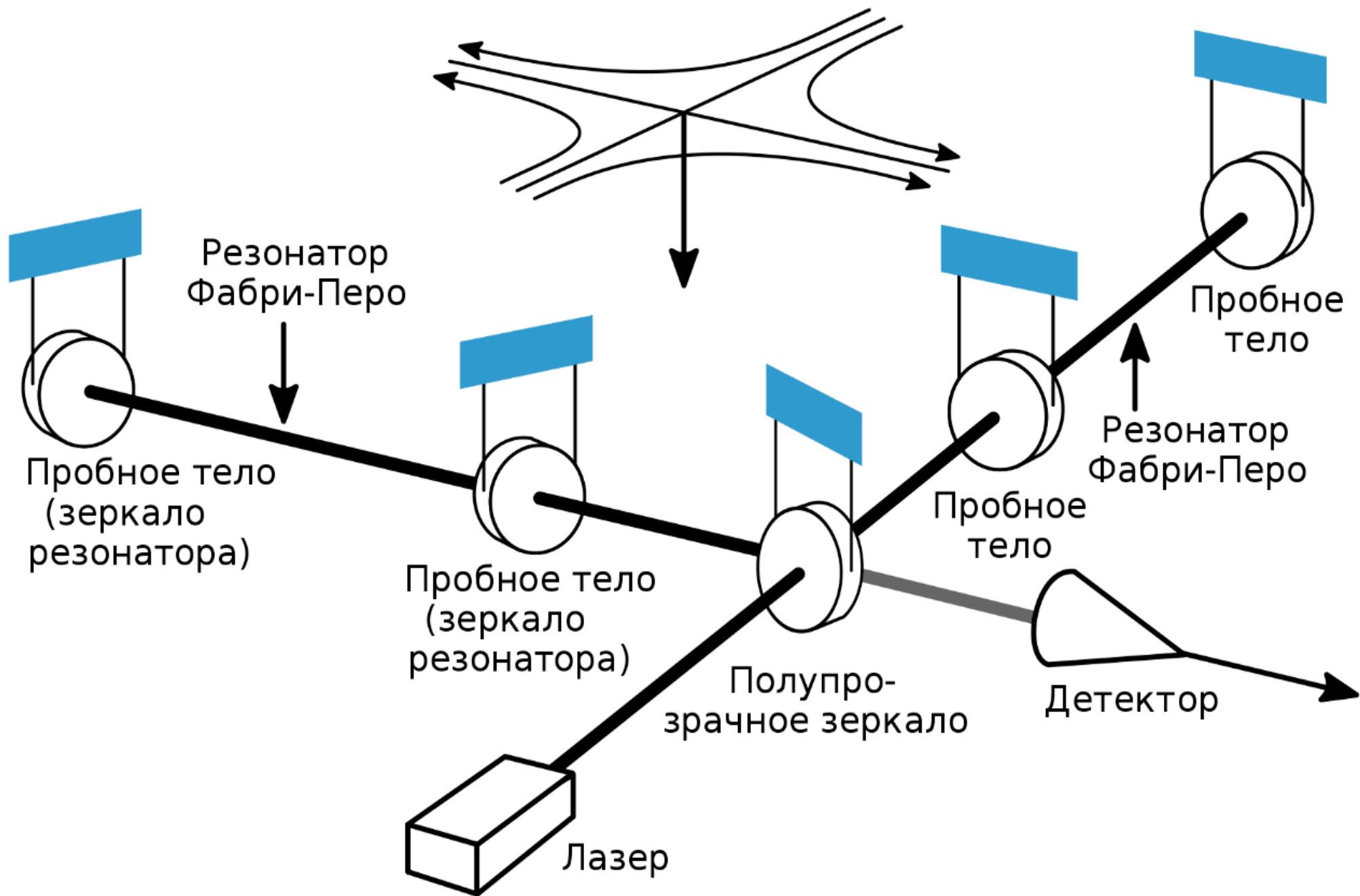
Две нейтронные  
звезды

Нобелевская  
премия 1993 г.

Столкнутся через  
~300 млн. лет





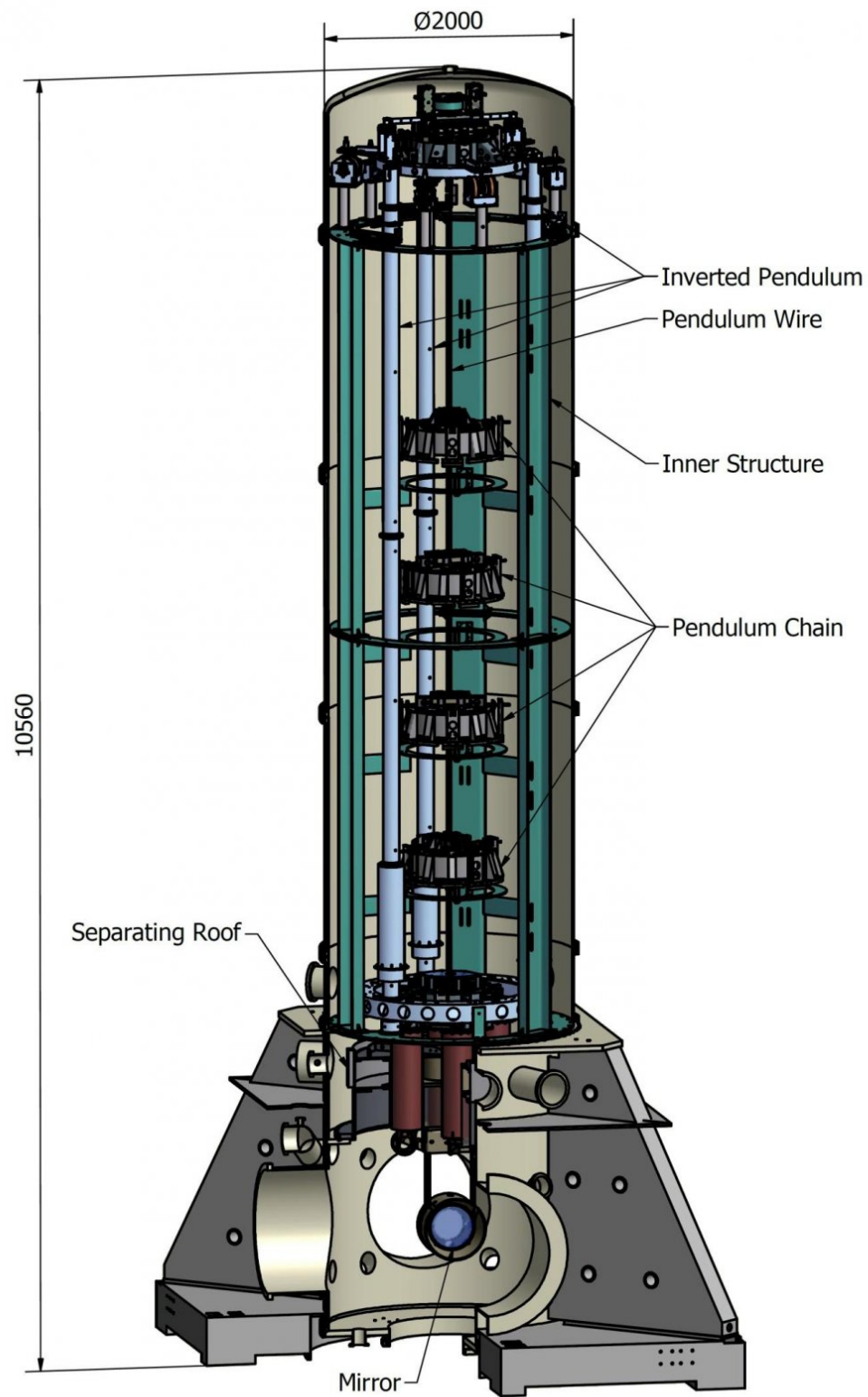


# VIRGO



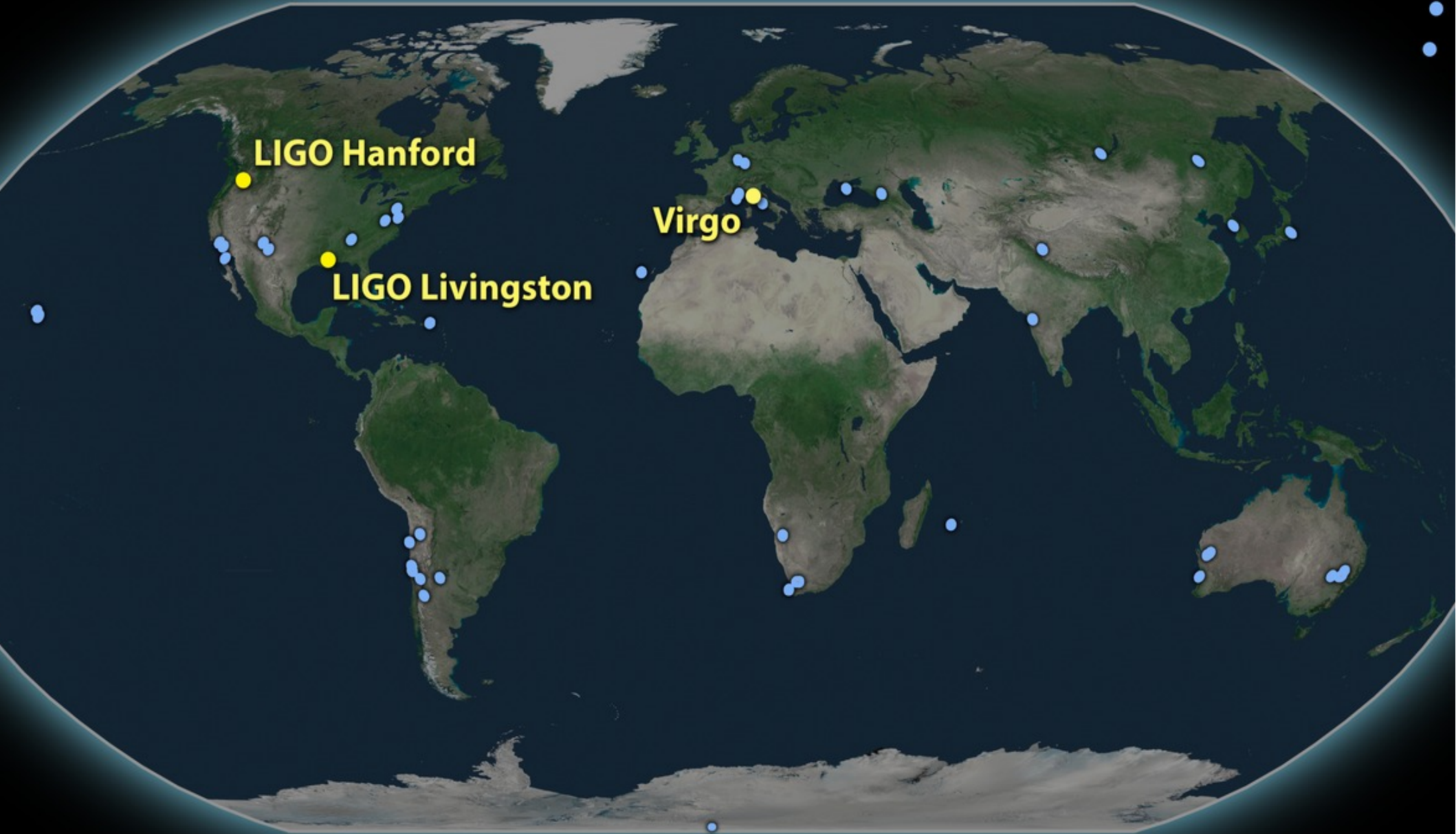
# Крепление зеркала

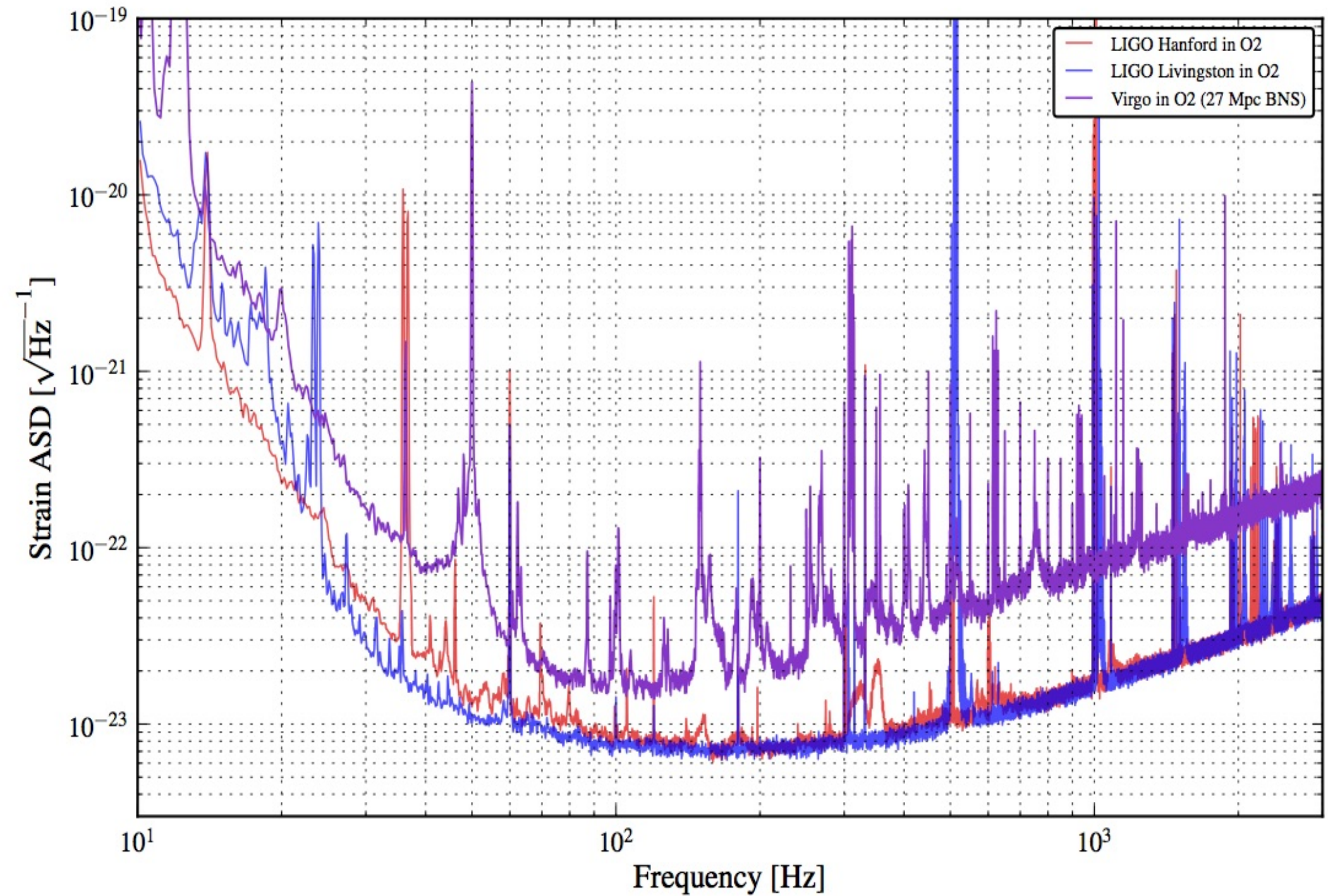
*Adalberto Giazotto*



# Earth

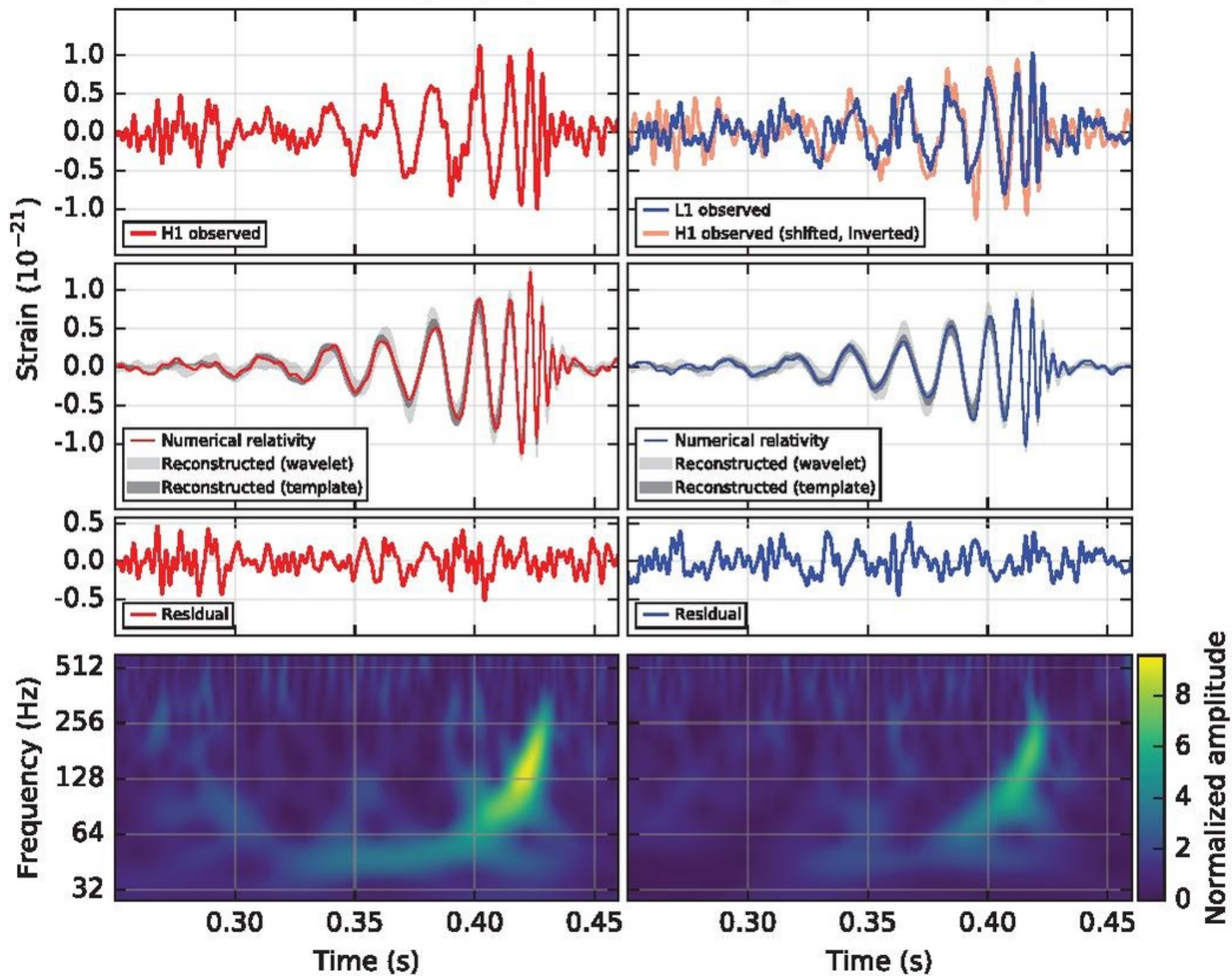
Sp



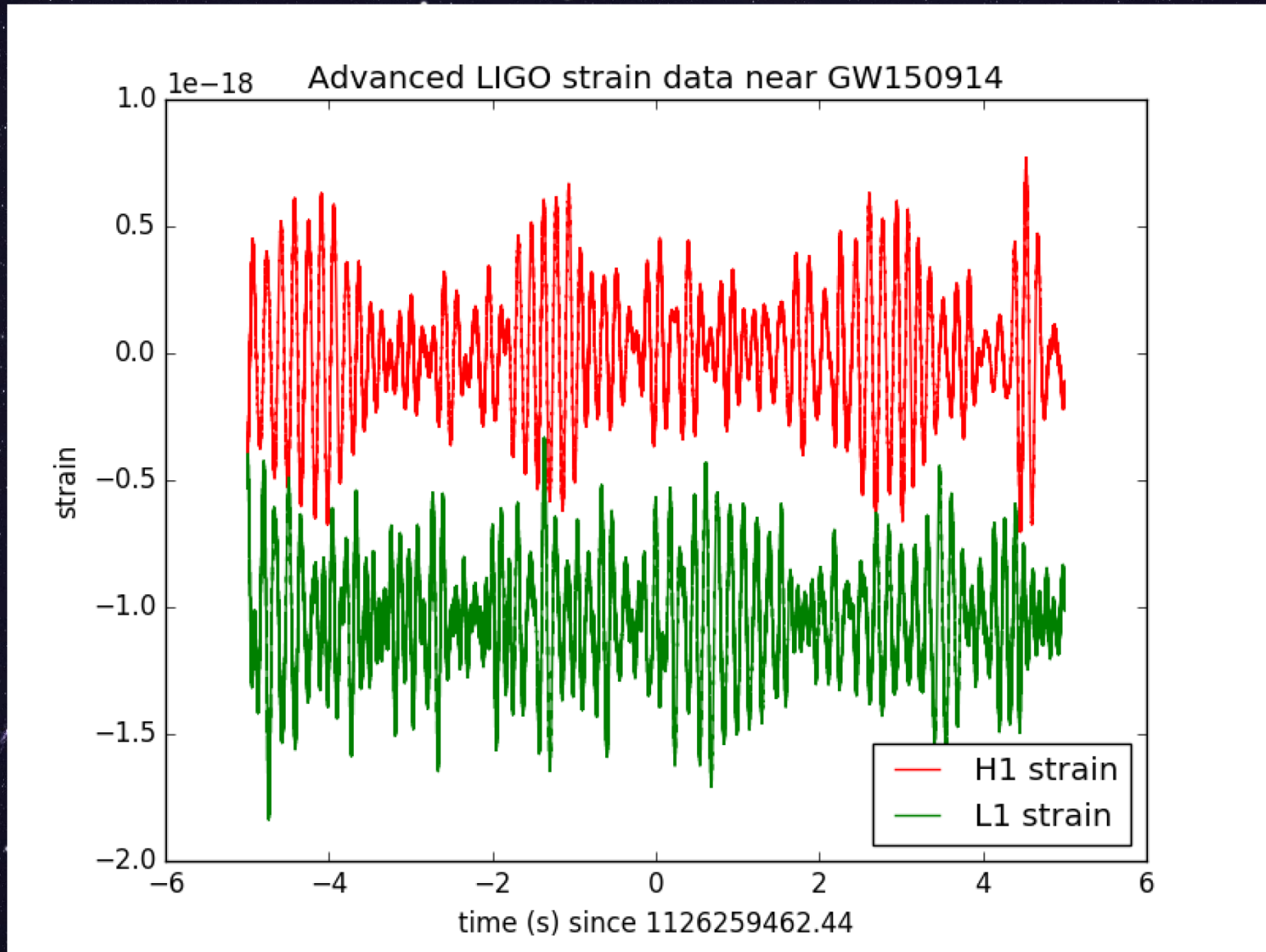


Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



# Data without whitening or band pass




26,768 views | Jun 16, 2017, 04:30pm

# Was It All Just Noise? Independent Analysis Casts Doubt On LIGO's Detections



**Starts With A Bang** Contributor

**Starts With A Bang** Contributor Group 

Science

POST WRITTEN BY

**Sabine Hossenfelder**

Sabine is a theoretical physicist specialized in quantum gravity and high energy physics. She also freelance writes about science.



LIGO, NSF, Illustration: A. Simonnet (SSU)



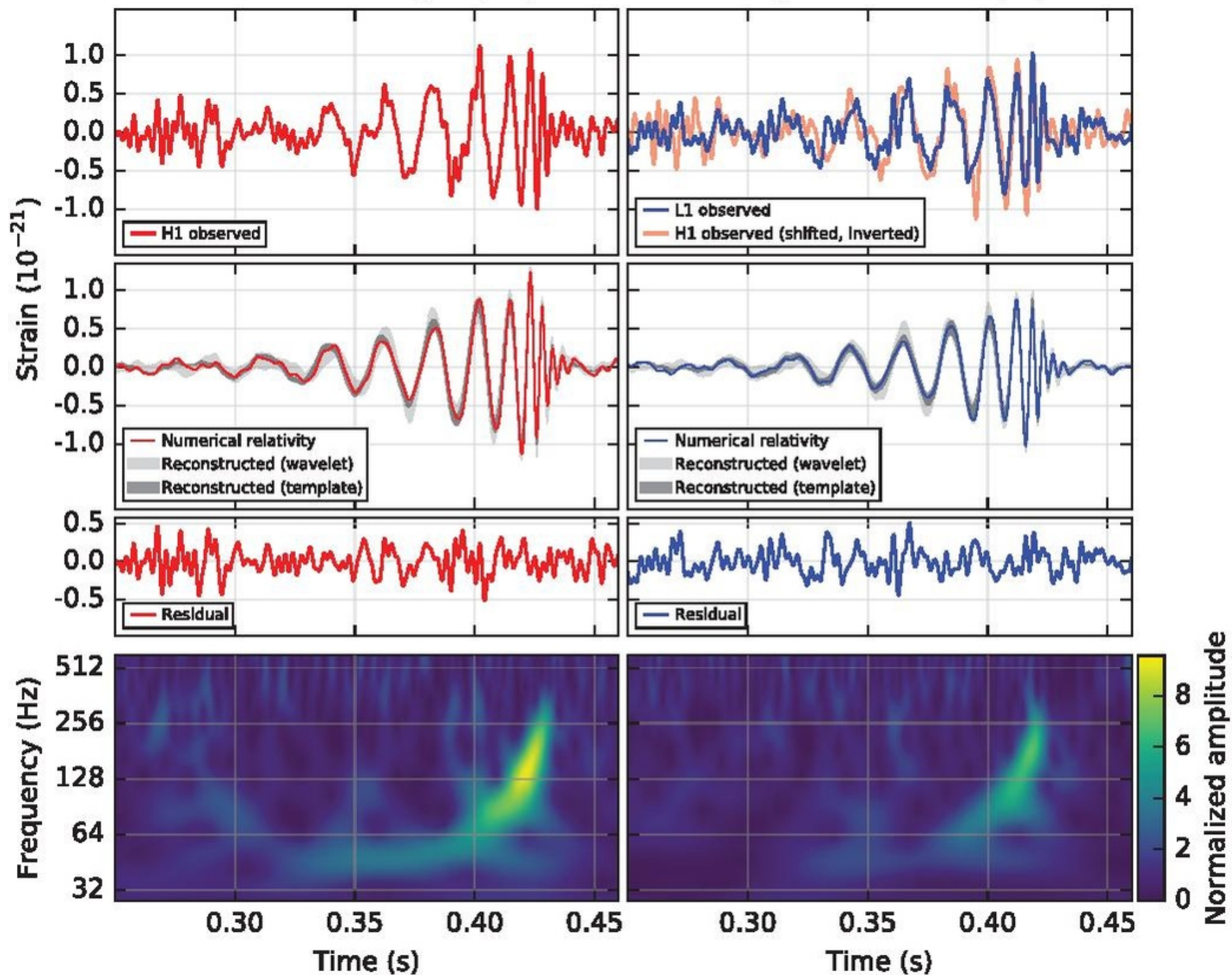


# GW150914

- 14 сентября 2015 года в 9:50:45 UTC, двумя детекторами LIGO: сначала в Ливингстоне, а через 7 миллисекунд — в Хэнфорде
- Слияние двух черных дыр,  $36_{-4}^{+5} M_{\text{sun}}$  и  $29_{-4}^{+5} M_{\text{sun}}$
- Получилась одна черная дыра с массой  $62_{-4}^{+4} M_{\text{sun}}$ , и  $3_{-0.5}^{+0.5} M_{\text{sun}}$  унесло гравитационное излучение.
- Расстояние до события  $410_{-140}^{+160}$  Мпс,  $\sim 1.3$  млрд. св. лет

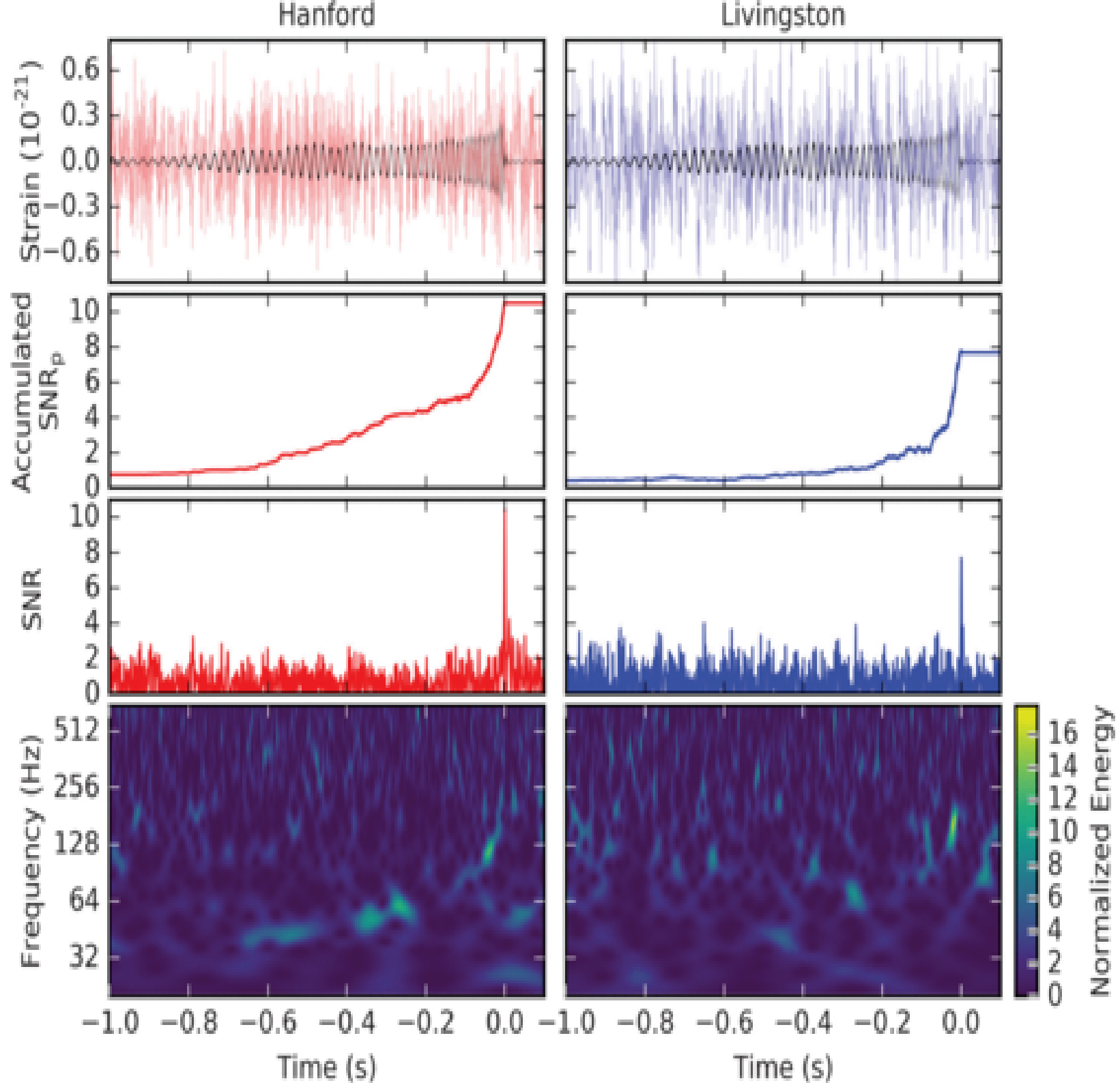
Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)



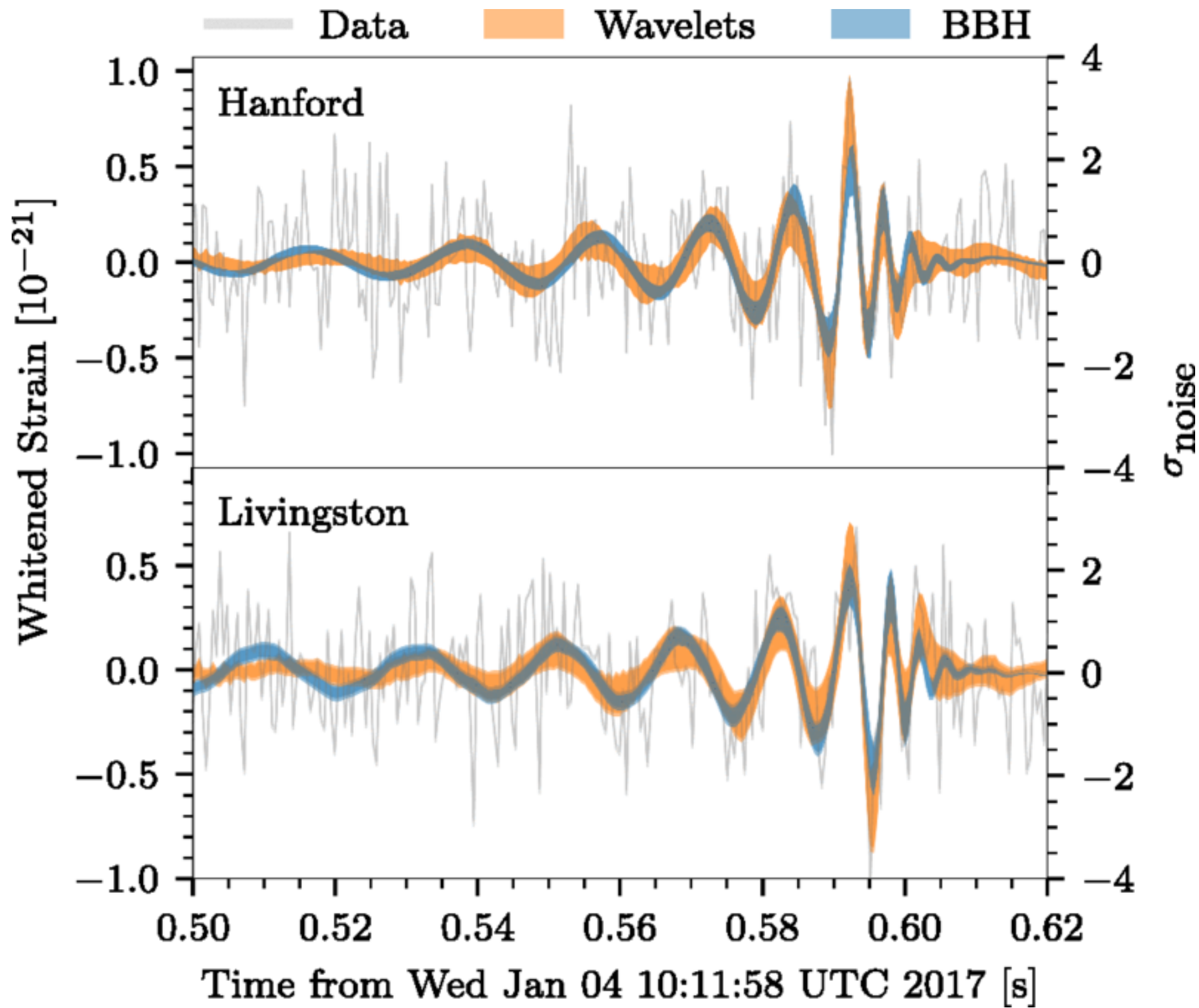
# GW151226

- 26 декабря 2015 года UTC, двумя детекторами LIGO: сначала в Ливингстоне, а через 1.1 миллисекунды — в Хэнфорде
- Слияние двух черн. дыр  $14.2_{-3.7}^{+8.3} M_{\text{sun}}$  и  $7.5_{-2.3}^{+2.3} M_{\text{sun}}$
- Получилась черная дыра с массой  $20.8_{-1.7}^{+6.1} M_{\text{sun}}$ , и  $1_{-0.2}^{+0.1} M_{\text{sun}}$  унесло гравитационное излучение.
- Расстояние до события  $440_{-190}^{+180}$  Мпс,  $\sim 1.4$  млрд. св. лет



# GW170104

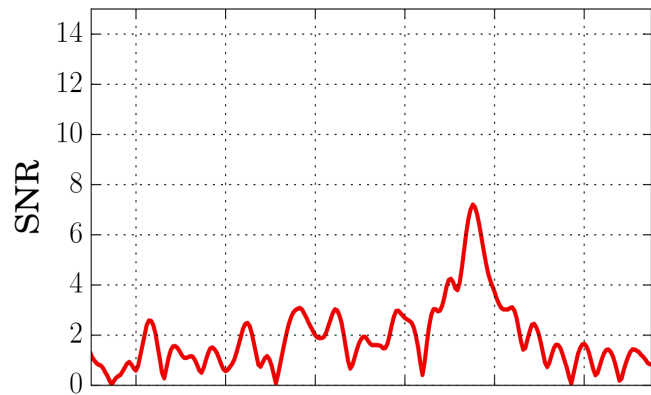
- 4 января 2017 в 10:11:58,6 UTC, двумя детекторами LIGO: сначала в Хэнфорде, а через 3 миллисекунды — в Ливингстоне
- Слияние черных дыр  $31.2_{-6.0}^{+8.4} M_{\text{sun}}$  и  $19.4_{-5.9}^{+5.3} M_{\text{sun}}$   
 $M_{\text{sun}}$
- Получилась черная дыра с массой  $48.7_{-4.6}^{+5.7} M_{\text{sun}}$ , и  $2 M_{\text{sun}}$  унесло гравитационное излучение.
- Расстояние до события  $880_{-390}^{+450}$  Мпс,  $\sim 2.9$  млрд. св. лет



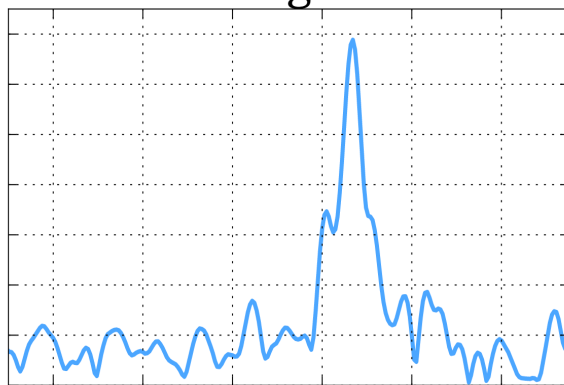
# GW170814

- 14 августа 2017 года. **Впервые тремя детекторами:** двумя детекторами LIGO и детектором VIRGO. Ливингстон, через 8 миллисекунд Хэнфорд, через 14 миллисекунд VIRGO. Область уменьшилась с 1160 до 60 кв. градусов.
- Слияние двух черных дыр,  $31 M_{\text{sun}}$  и  $25 M_{\text{sun}}$ , получилась черная дыра с массой  $53 M_{\text{sun}}$ , и  $3 M_{\text{sun}}$  унесло гравитационное излучение.
- Расстояние до события 567 Мпс, ~1.8 млрд. св. лет
- **Впервые экспериментально оценена поляризация гравитационных волн**

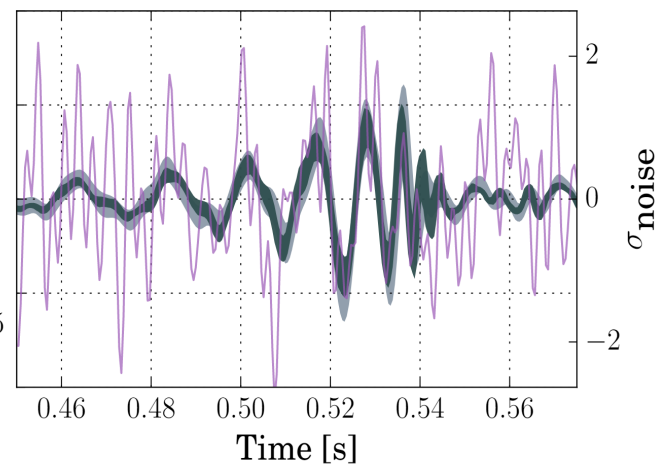
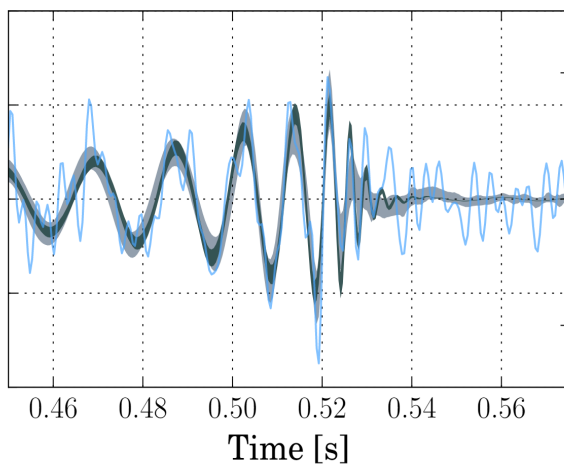
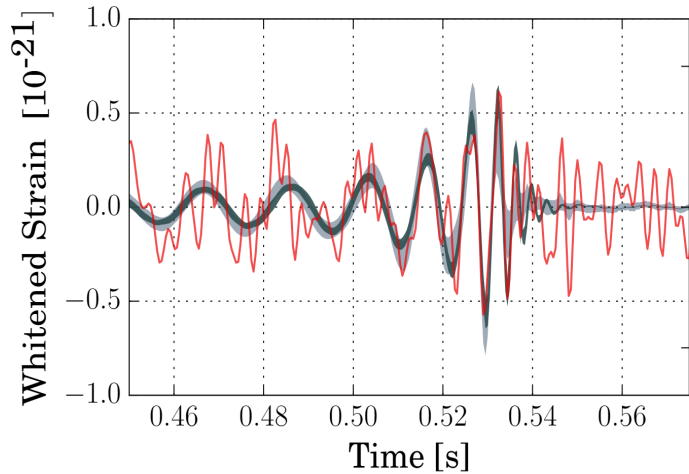
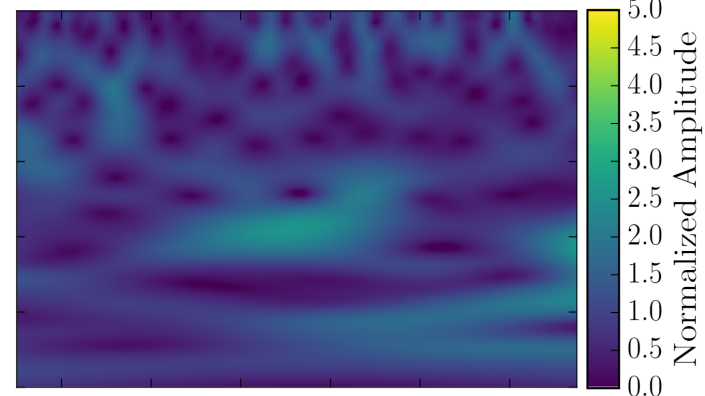
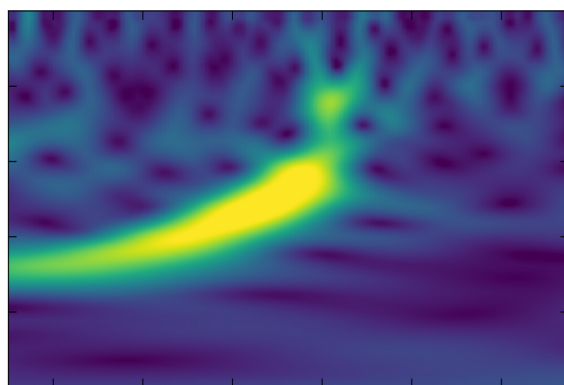
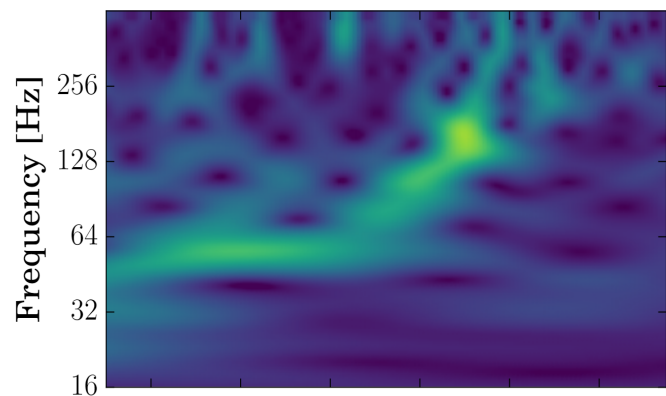
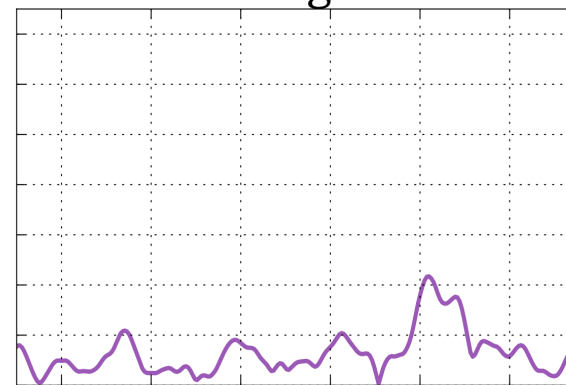
Hanford



Livingston



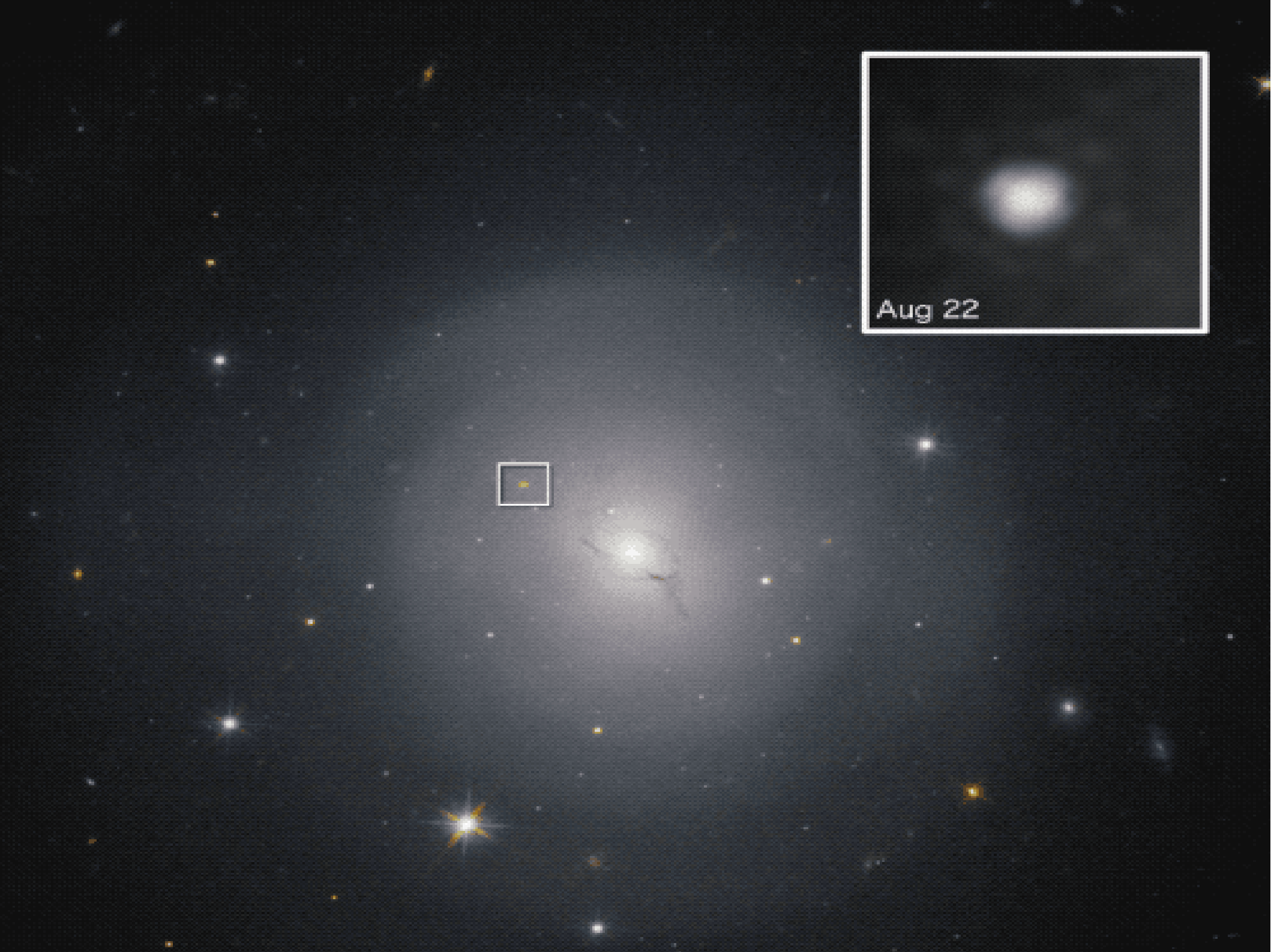
Virgo



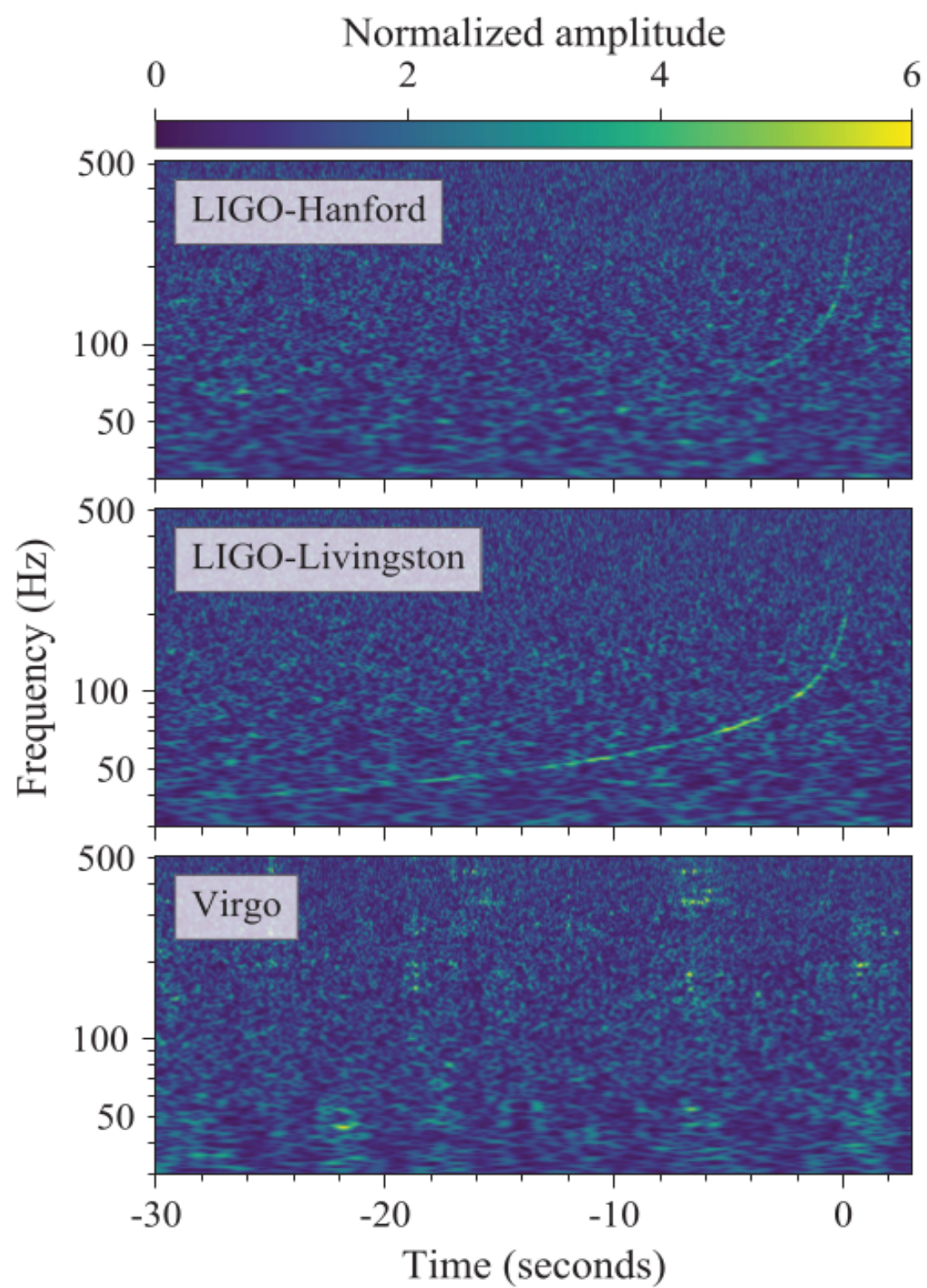


# GW170817

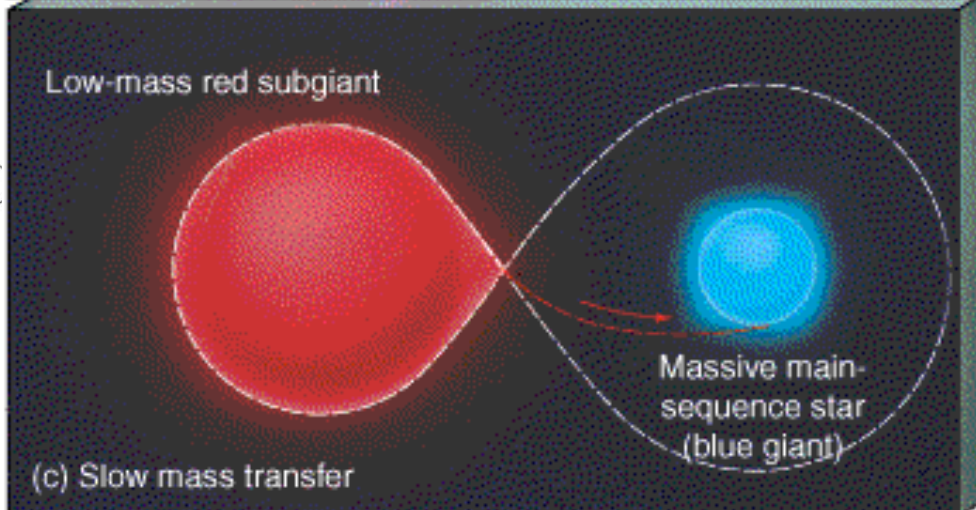
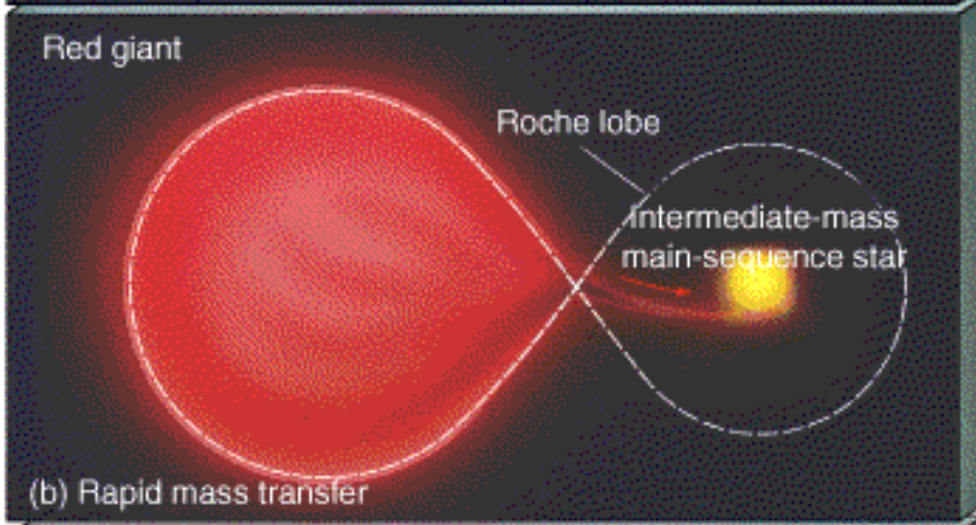
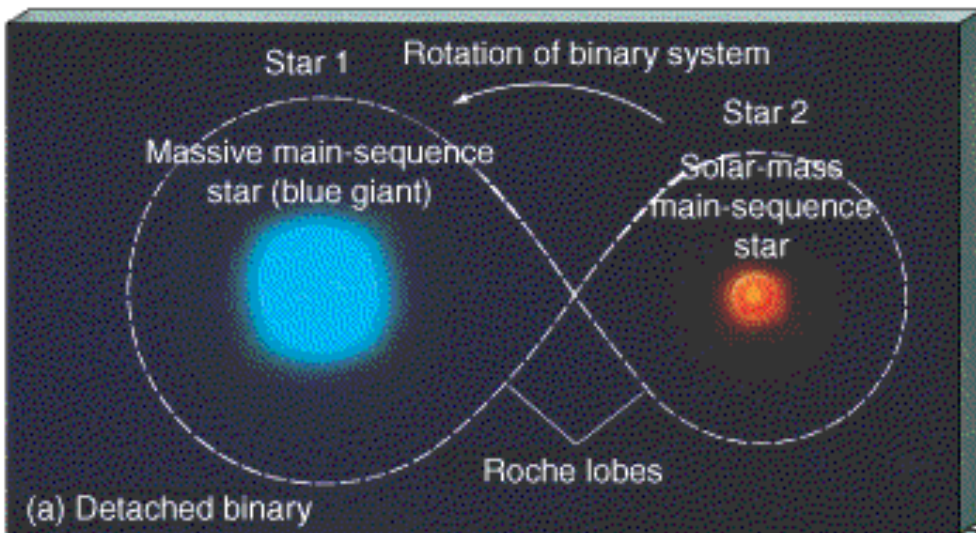
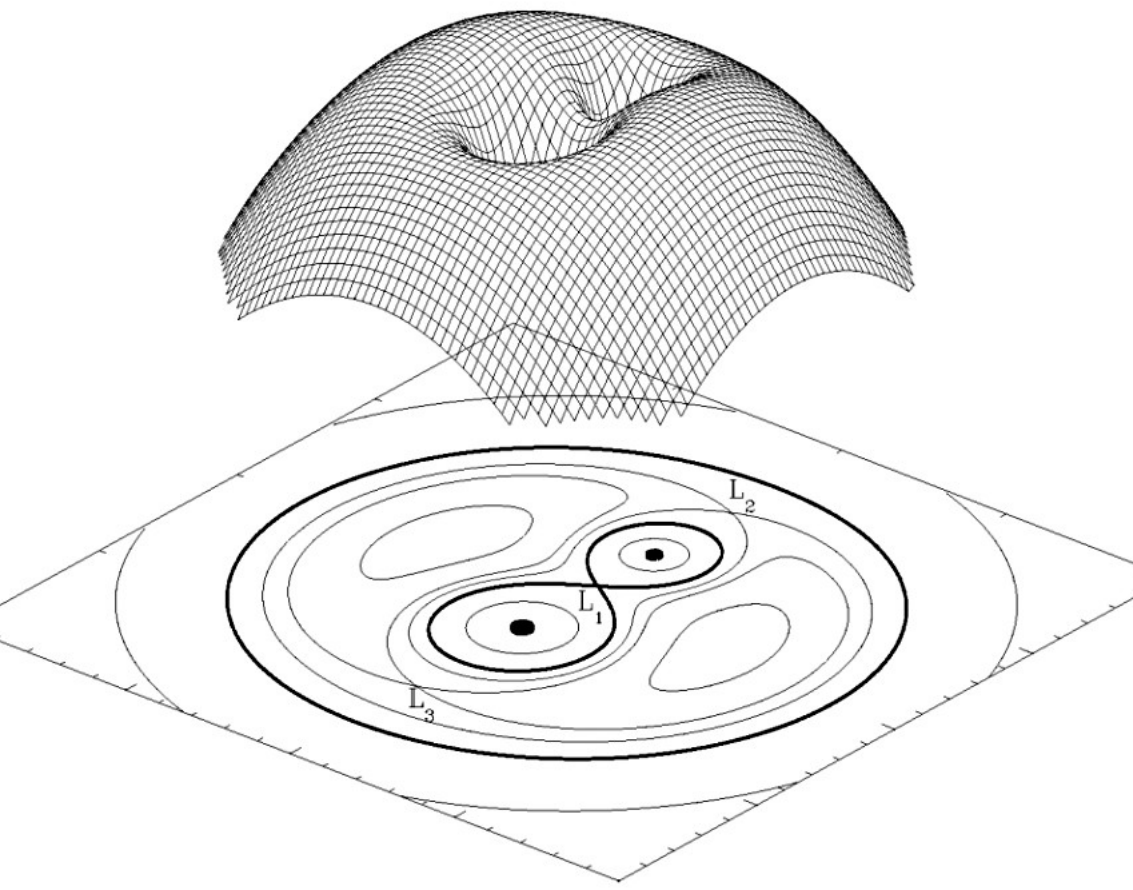
- 17 августа 2017 года в 12:41:04,4 UTC. Все три детектора.
- **Слияние двух нейтронных звезд**,  $1.36\text{--}2.26 M_{\text{sun}}$  и  $0.86\text{--}1.36 M_{\text{sun}}$ , более  $0.025 M_{\text{sun}}$  ушло в виде грав. волн.
- NGC 4993 (созвездие Гидры), расстояние  $40_{-14}^{+8}$  Мпс,  $\sim 130$  млн. св. лет
- локализация источника по грав. волнам в телесном угле 28 кв. градусов
- **Впервые — электромагнитный сигнал**
- через  $1,74 \pm 0,05$  с после максимума гравитационно-волнового всплеска произошёл короткий гамма-всплеск GRB 170817A
- Ультрафиолетовый и инфракрасные сигналы
- Только через несколько дней появились радио и рентген



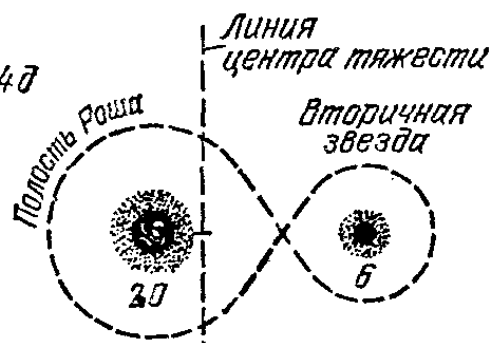
Aug 22



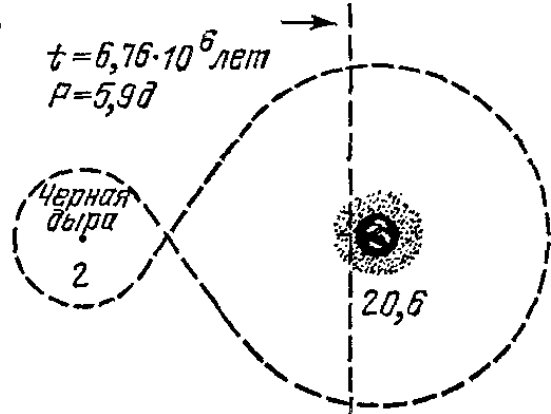
# Эволюция двойной звезды (вкратце)



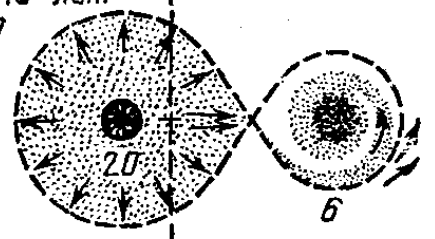
$t=0$   
 $R=4,4\text{д}$



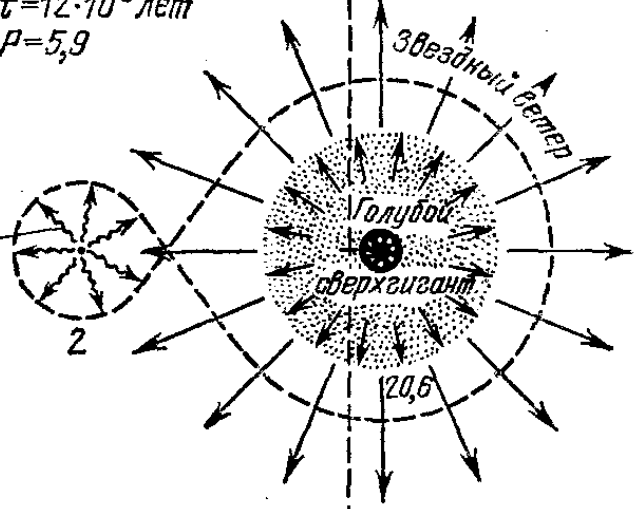
$t=6,76 \cdot 10^6 \text{ лет}$   
 $R=5,9\text{д}$



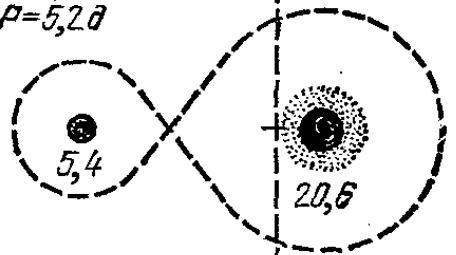
$t=6,16 \cdot 10^6 \text{ лет}$   
 $R=4,4\text{д}$



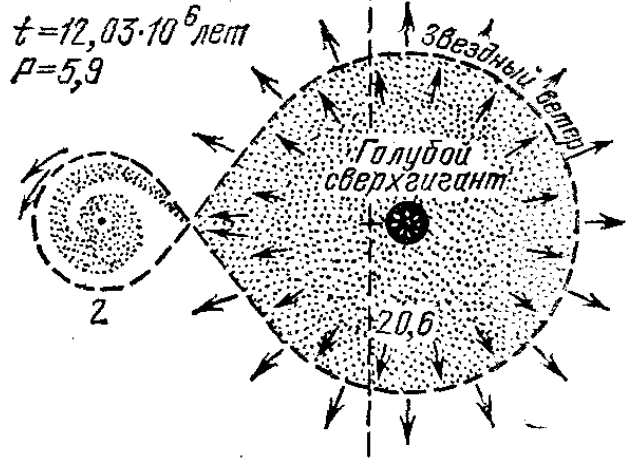
$t=12 \cdot 10^6 \text{ лет}$   
 $R=5,9$



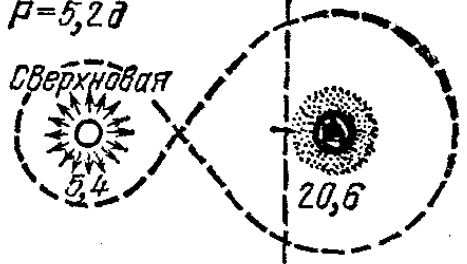
$t=6,7 \cdot 10^6 \text{ лет}$   
 $R=5,2\text{д}$



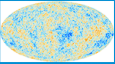





$t=12,03 \cdot 10^6 \text{ лет}$   
 $R=5,9$

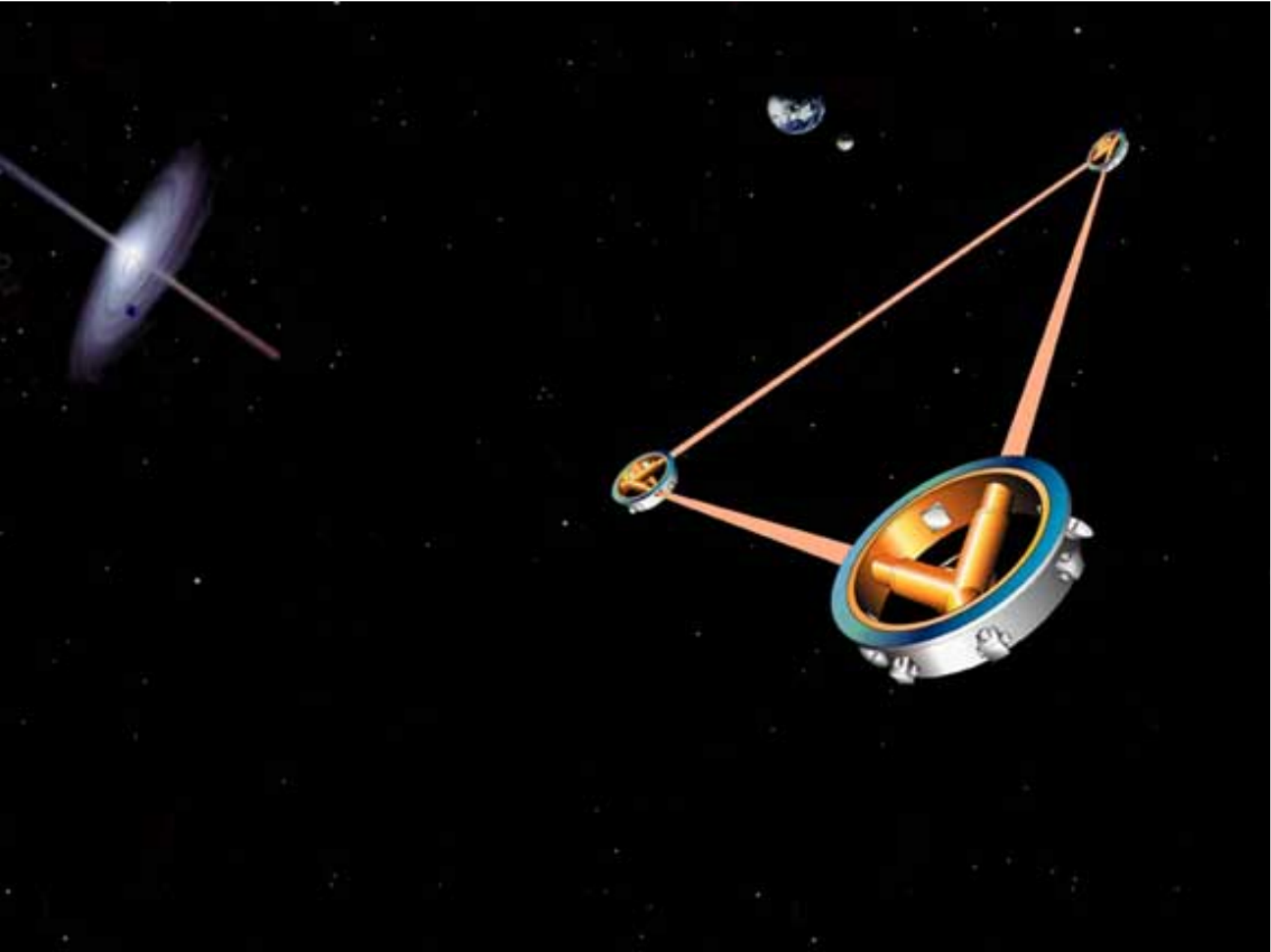


$t=6,7 \cdot 10^6 \text{ лет}$   
 $R=5,2\text{д}$

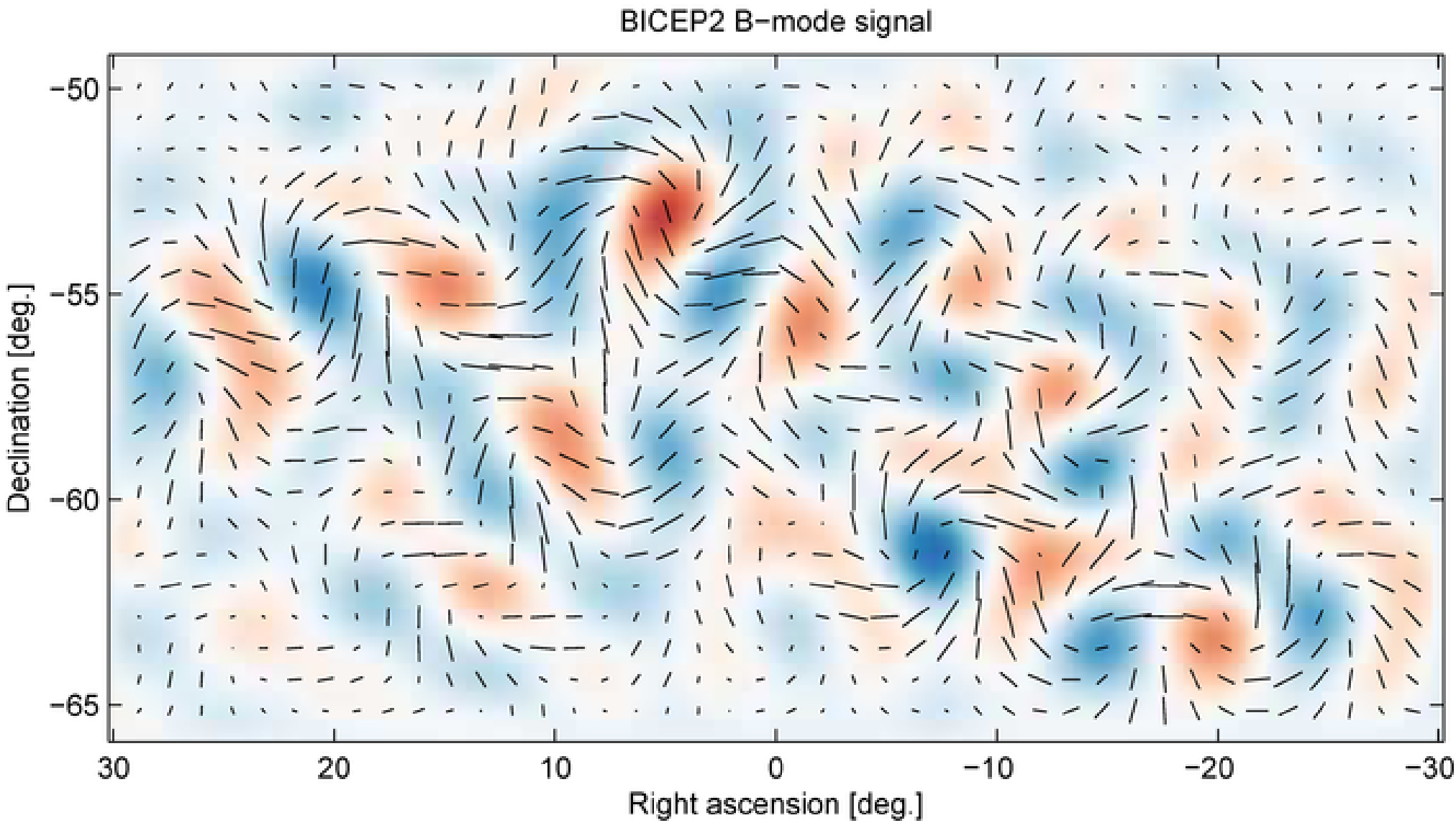


# The Origin of the Solar System Elements

1 H	big bang fusion 										cosmic ray fission 					2 He						
3 Li	4 Be	merging neutron stars 										exploding massive stars 					5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne
11 Na	12 Mg	dying low mass stars 										exploding white dwarfs 					13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar
19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr					
37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe					
55 Cs	56 Ba		72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn					
87 Fr	88 Ra																					
			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu					
			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U																



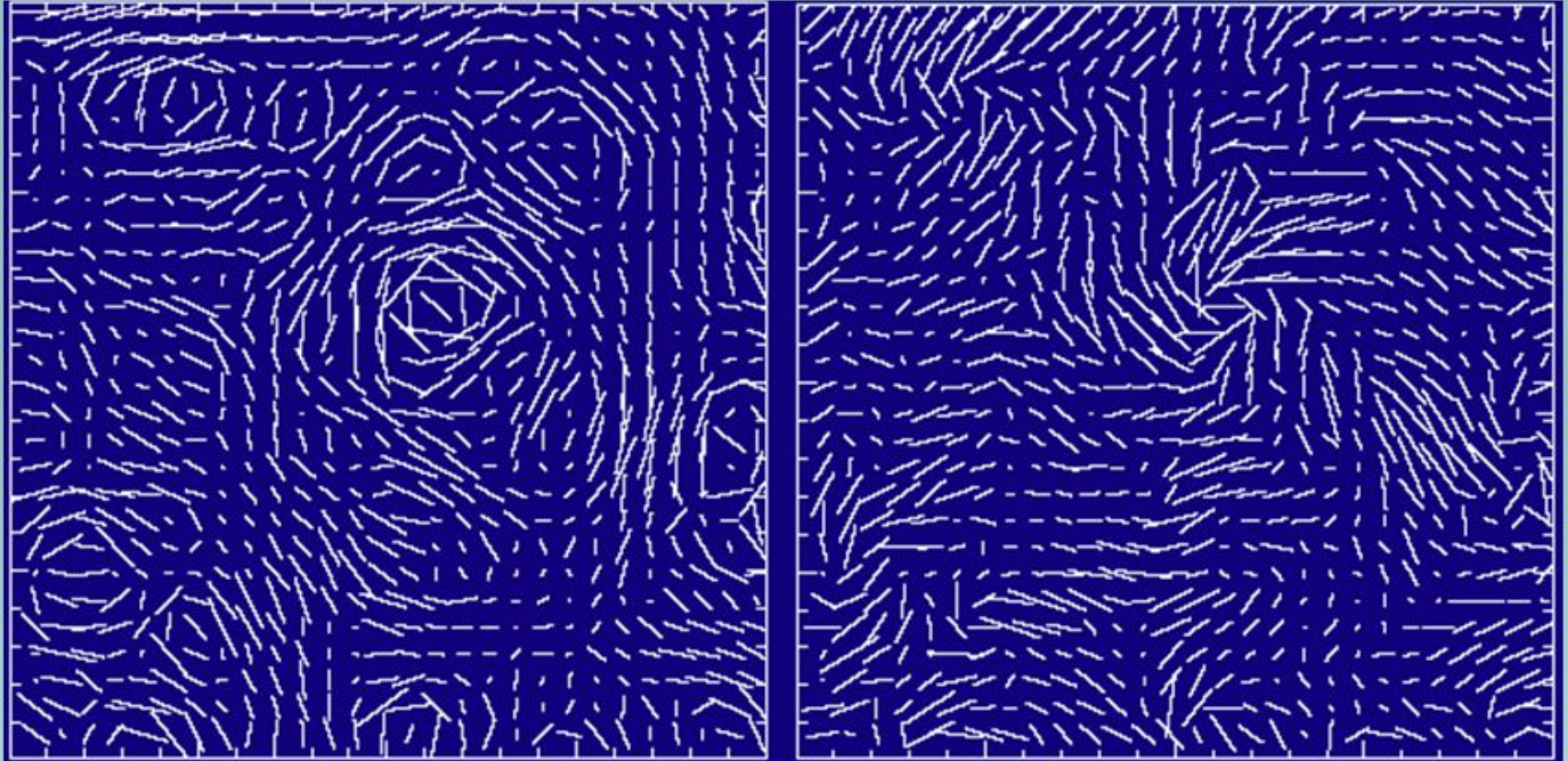
# Космологические гравитационные волны





# E-mode vs. B-mode

(curl-free) (curl)



Primordial tensors induce curl of CMB photons' polarization (B-mode).

Image: Seljak and Zaldarriaga