

# Direct observation of gravitational waves from the merger and inspiral of two black holes

**Alex Nielsen**

**Max Planck Institute (AEI) – Hanover  
on behalf of the LVC**

**Helmholtz-Institute Mainz  
13th December 2016**



MAX-PLANCK-GESELLSCHAFT



# What was seen 2015

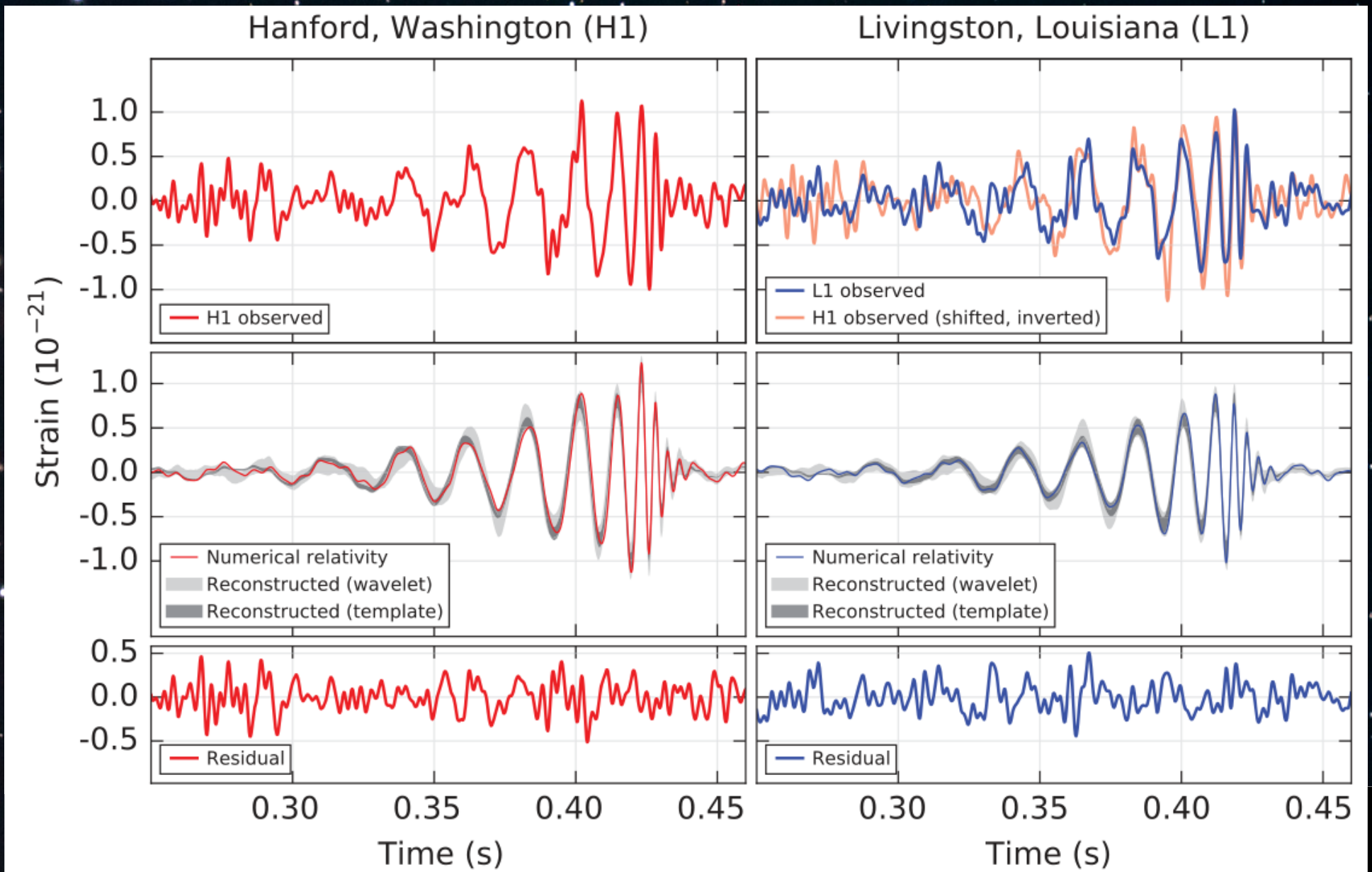


Fig 1. (top) Abbott et al. PRL 116 (2016) 6, 061102

# Gravitational waves

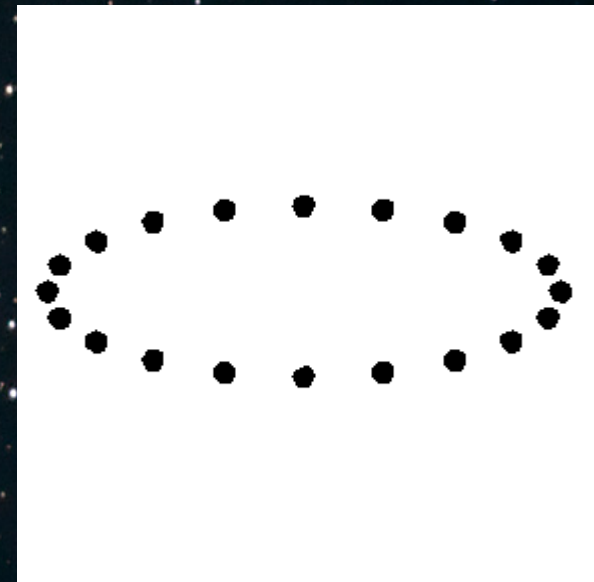
- **What are gravitational waves?**
- **Why are they detectable now?**
- **What have we learnt?**
- **Where are we going in the future?**

# What are gravitational waves?

$$G_{ab} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{ab} \quad \text{Einstein equation}$$

Small linear perturbation  $g_{ab} = \eta_{ab} + h_{ab}$

$$\nabla^2 \bar{h}_{ab} = 0 \quad \text{Wave equation}$$



$$Q_{ij} \equiv \int d^3x \rho \left( x_i x_j - \frac{1}{3} r^2 \delta_{ij} \right)$$

Einstein quadrupole formula  $h_{ij} = \frac{2}{d_L} \frac{G}{c^4} \frac{d^2 Q_{ij}}{dt^2}$

# Einstein 1916

688 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 22. Juni 1916

## Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.

Von A. EINSTEIN.

Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die  $g_{\mu\nu}$  in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable  $x_4 = it$  aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter »erster Näherung« ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

definierten Größen  $\gamma_{\mu\nu}$ , welche linearen orthogonalen Transformationen gegenüber Tensorcharakter besitzen, gegen 1 als kleine Größen behandelt werden können, deren Quadrate und Produkte gegen die ersten Potenzen vernachlässigt werden dürfen. Dabei ist  $\delta_{\mu\nu} = 1$  bzw.  $\delta_{\mu\nu} = 0$ , je nachdem  $\mu = \nu$  oder  $\mu \neq \nu$ .

Wir werden zeigen, daß diese  $\gamma_{\mu\nu}$  in analoger Weise berechnet werden können wie die retardierten Potentiale der Elektrodynamik. Daraus folgt dann zunächst, daß sich die Gravitationsfelder mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Wir werden im Anschluß an diese allgemeine Lösung die Gravitationswellen und deren Entstehungsweise untersuchen. Es hat sich gezeigt, daß die von mir vorgeschlagene Wahl des Bezugssystems gemäß der Bedingung  $g = |g_{\mu\nu}| = -1$  für die Berechnung der Felder in erster Näherung nicht vorteilhaft ist. Ich wurde hierauf aufmerksam durch eine briefliche Mitteilung des Astronomen DE SITTER, der fand, daß man durch eine andere Wahl des Bezugssystems zu einem einfacheren Ausdruck des Gravitationsfeldes eines ruhenden Massenpunktes gelangen kann, als ich ihn früher gegeben hatte<sup>1</sup>. Ich stütze mich daher im folgenden auf die allgemein invarianten Feldgleichungen.

<sup>1</sup> Sitzungsber. XLVII, 1915, S. 833.

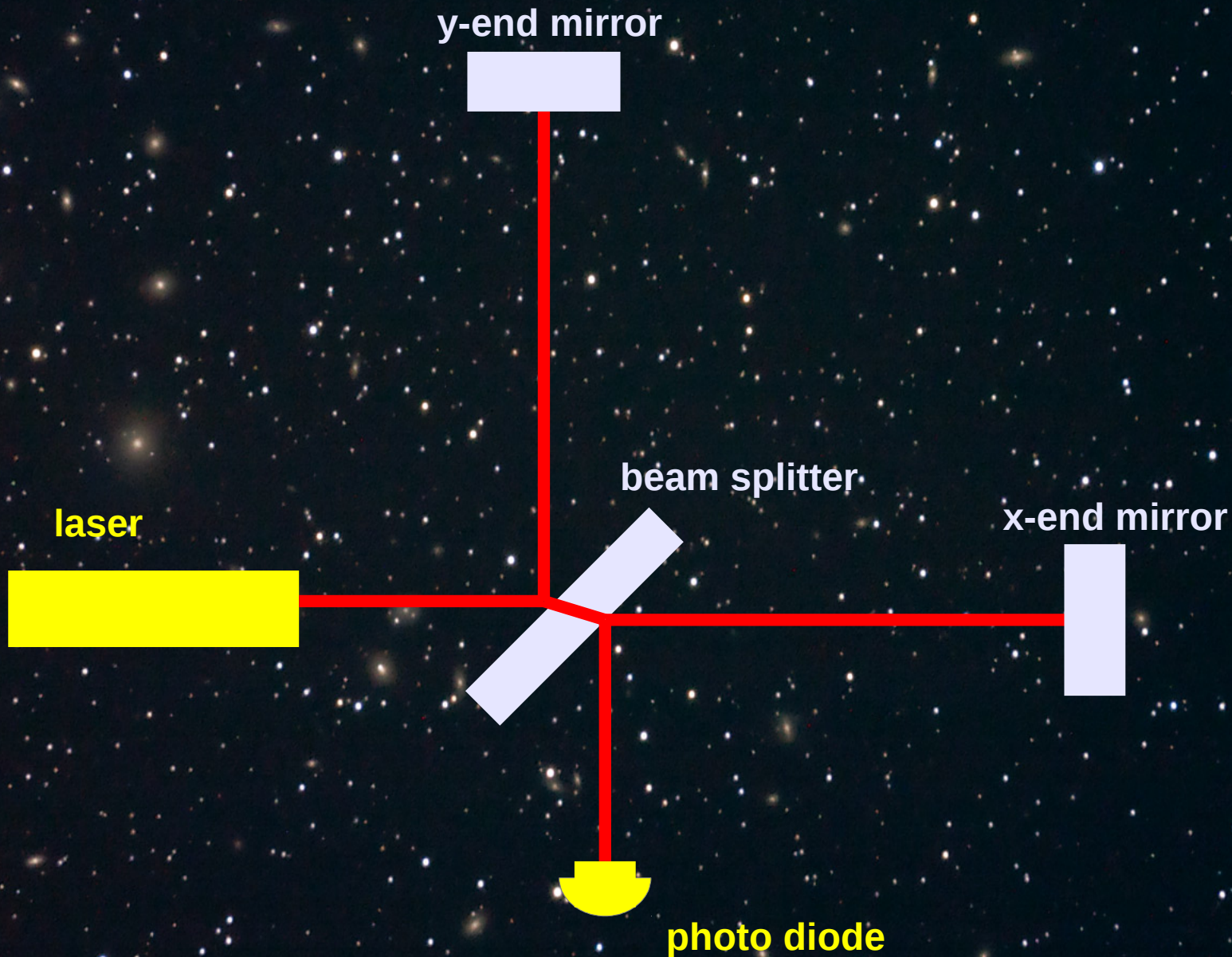
*“...so sieht man, daß A (die Ausstrahlung des Systems durch Gravitationswellen pro Zeiteinheit) in allen nur denkbaren Fällen einen praktisch verschwindenden Wert haben muß.”*

A. Einstein, Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften (Berlin), 1916 688.

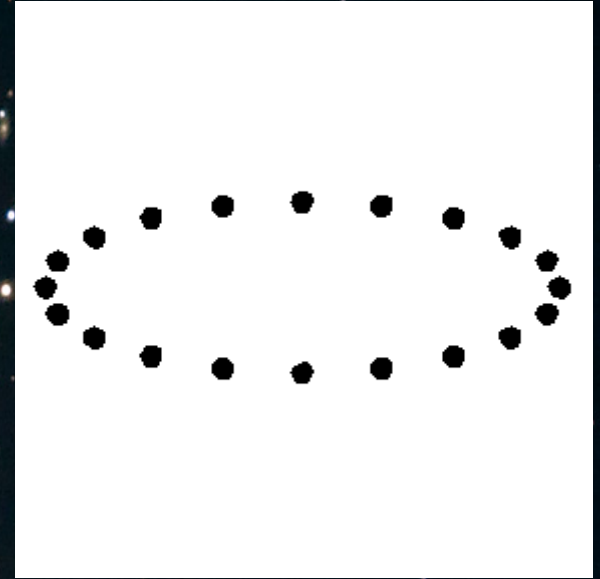
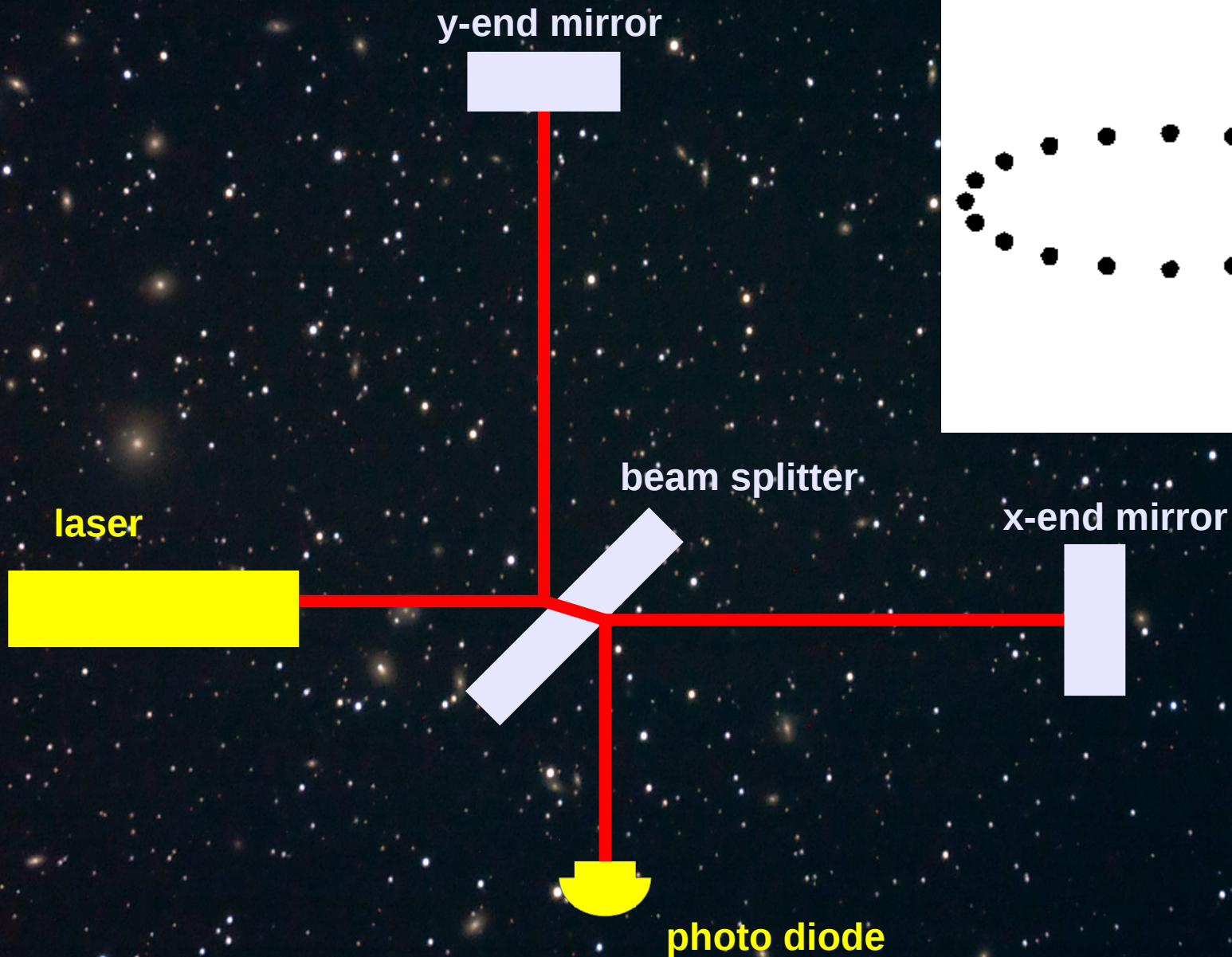


Source: LIGO Lab

# Interferometers



# Interferometers



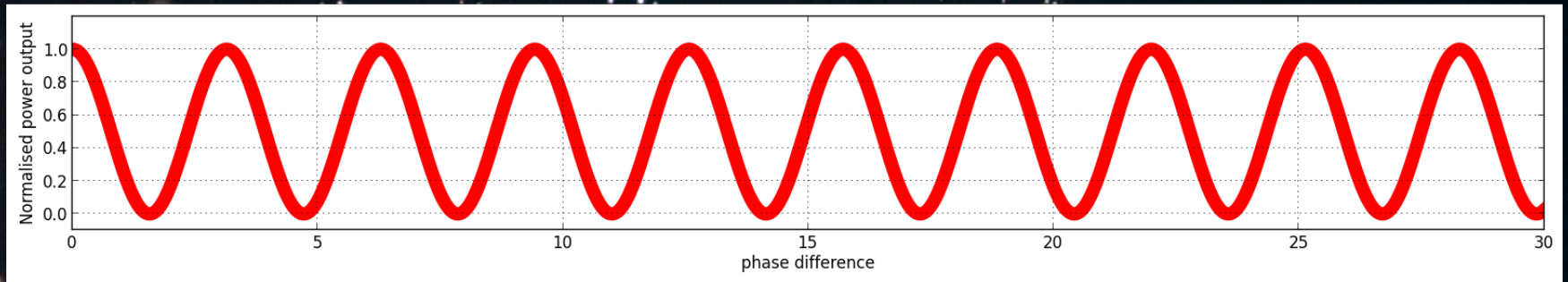


# How LIGO really works

- **Long arms:** Earth's curvature over 4km is  $\sim 1\text{m}$
- **High vacuum:** One trillionth atm,  $10^{-9}$  torr in  $10,000\text{m}^3$
- **High power laser:** 20W 1064 nm Nd:YAG (neodymium-doped yttrium aluminium garnet) (will be up to 200W)
- **Higher power beams:** Fabry-Perot cavities, 100kW, power and signal recycling
- **Near-dark photo diodes:** 50 mW
- **Active seismic isolation:** at  $\sim 10^{-13}$  m
- **Passive suspension:** at  $\sim 10^{-19}$  m
- **Heavy test-mass mirrors:** 40kg suspended by fused-silica wires 0.4mm thick (Suprasil 3001)

# Reading between the lines

Interference pattern:  $P_{out} = P_{max} \cos^2 \Delta \varphi$

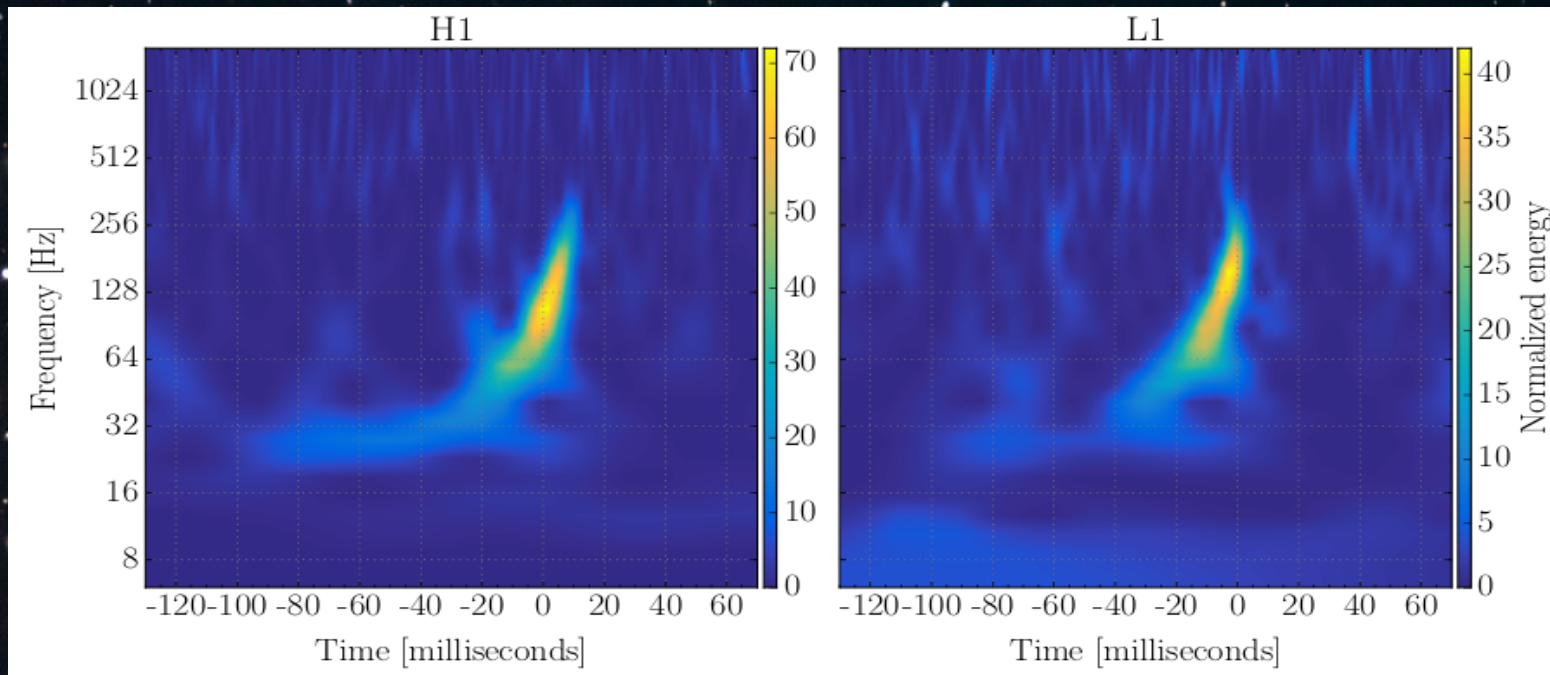


$$\Delta \varphi = \frac{\pi}{2} + B \frac{c \Delta T}{\lambda} \quad \text{: Accumulated phase difference}$$

Displacement sensitivity:

$$\Delta L = \frac{\lambda}{B} \sqrt{\frac{P_{out}}{P_{max}}}$$

# What was seen II



*Fig. 10 Abbott et al. CQG33 (2016) 134001*

**Frequency ~30 Hz to ~250 Hz**

**Wavelength ~10,000 km to ~1,000 km**

**Visible duration ~ 0.1 secs**

**Increasing amplitude, increasing frequency = chirp**

**0.007 secs earlier in Livingston**

**The same signal in both detectors!**

# LVT151012

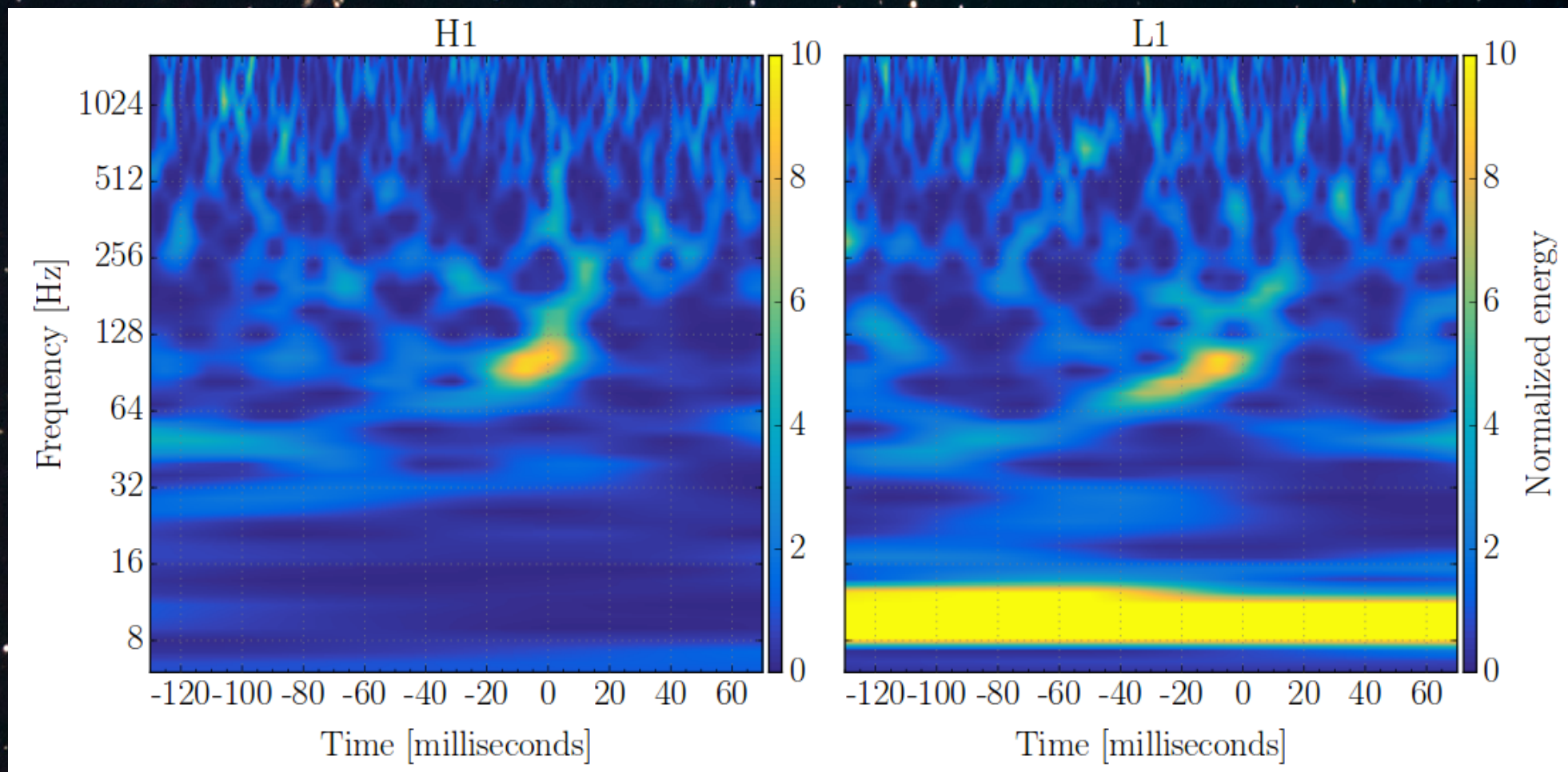
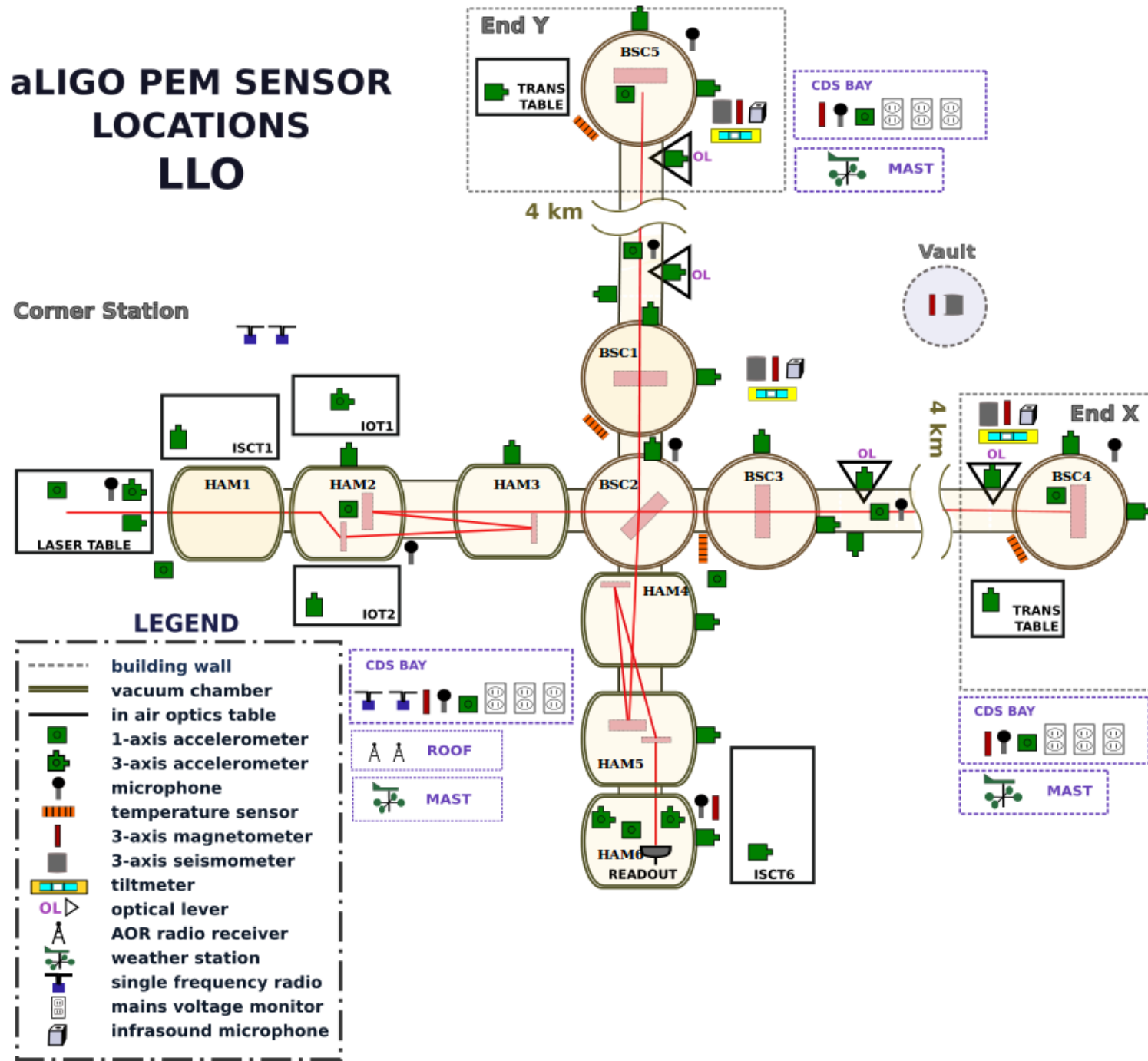


Fig. 13 Abbott et al. CQG33 (2016) 134001

**False Alarm Rate, 1 per 2.3 years**

# aLIGO PEM SENSOR LOCATIONS LLO



# Non-Gaussian transients

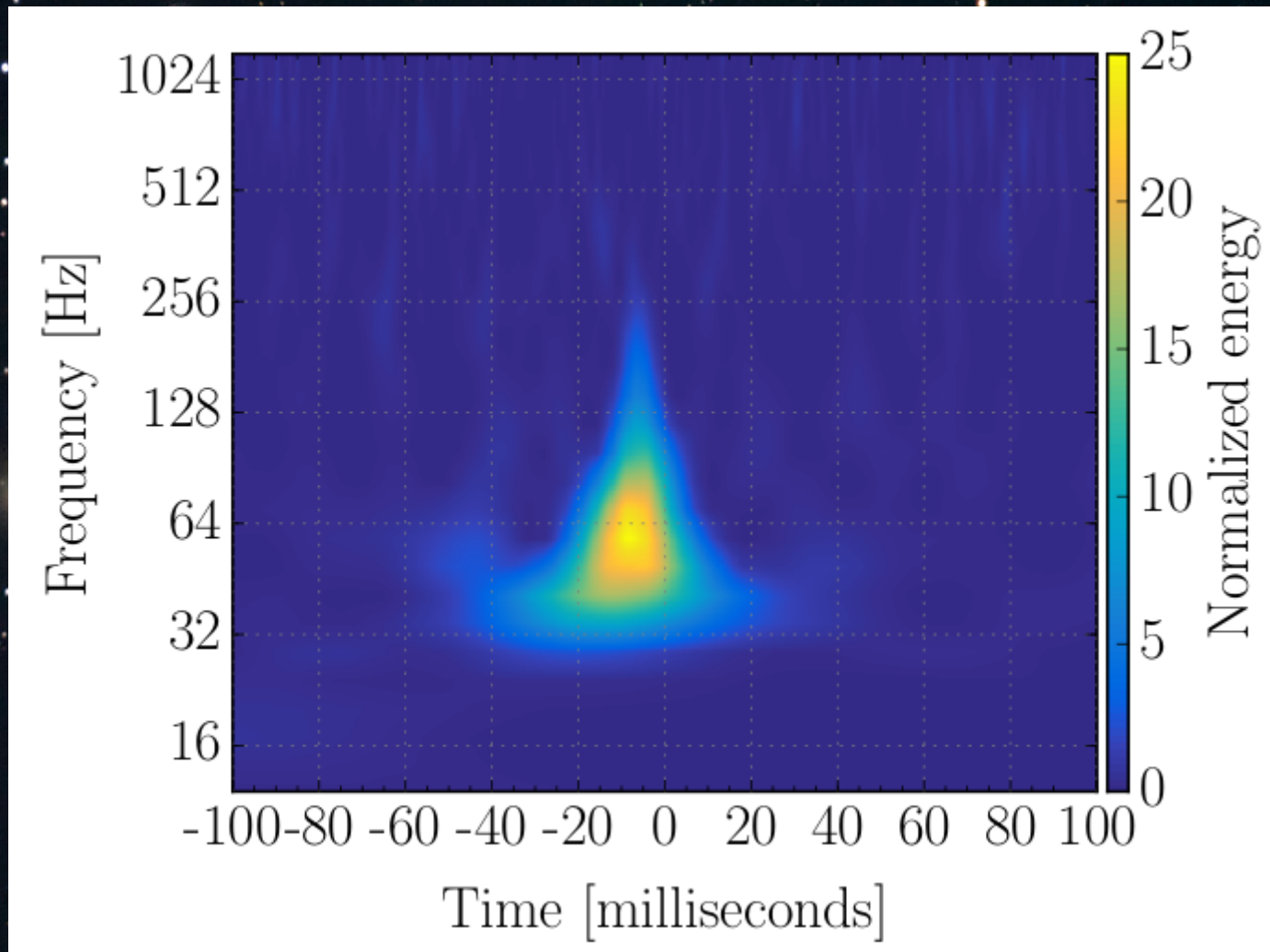


Fig. 3 Abbott et al. CQG33(2016) 134001

# Search significance

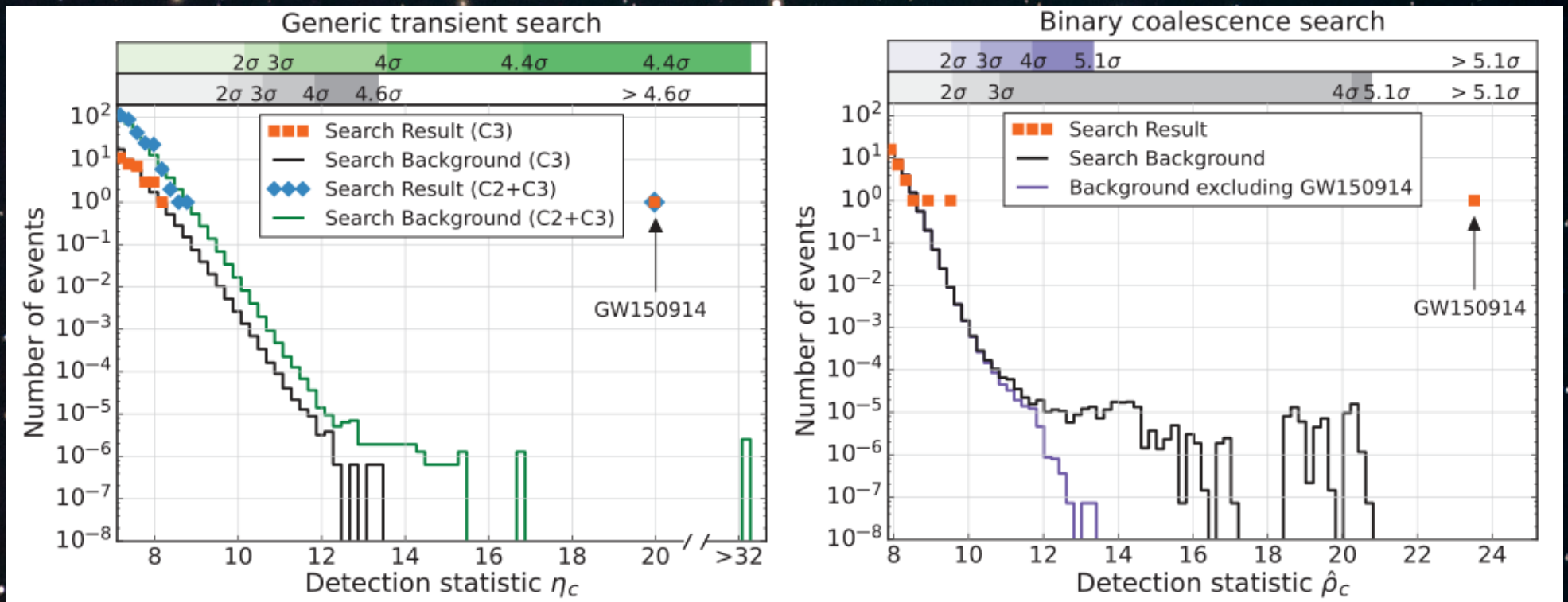


Fig 4 Abbott et al. PRL 116 (2016) 6, 061102

# Three binary black hole events

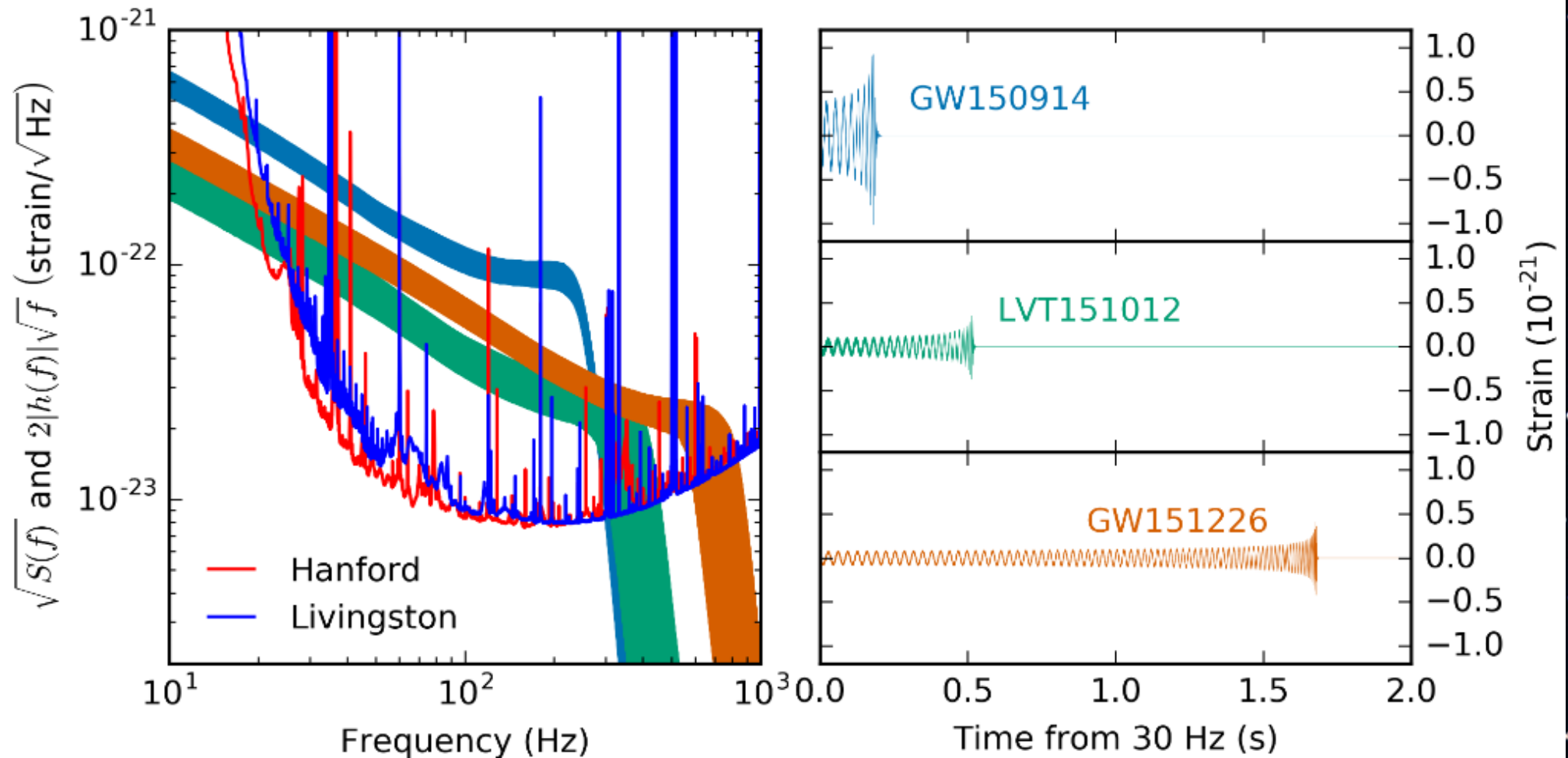
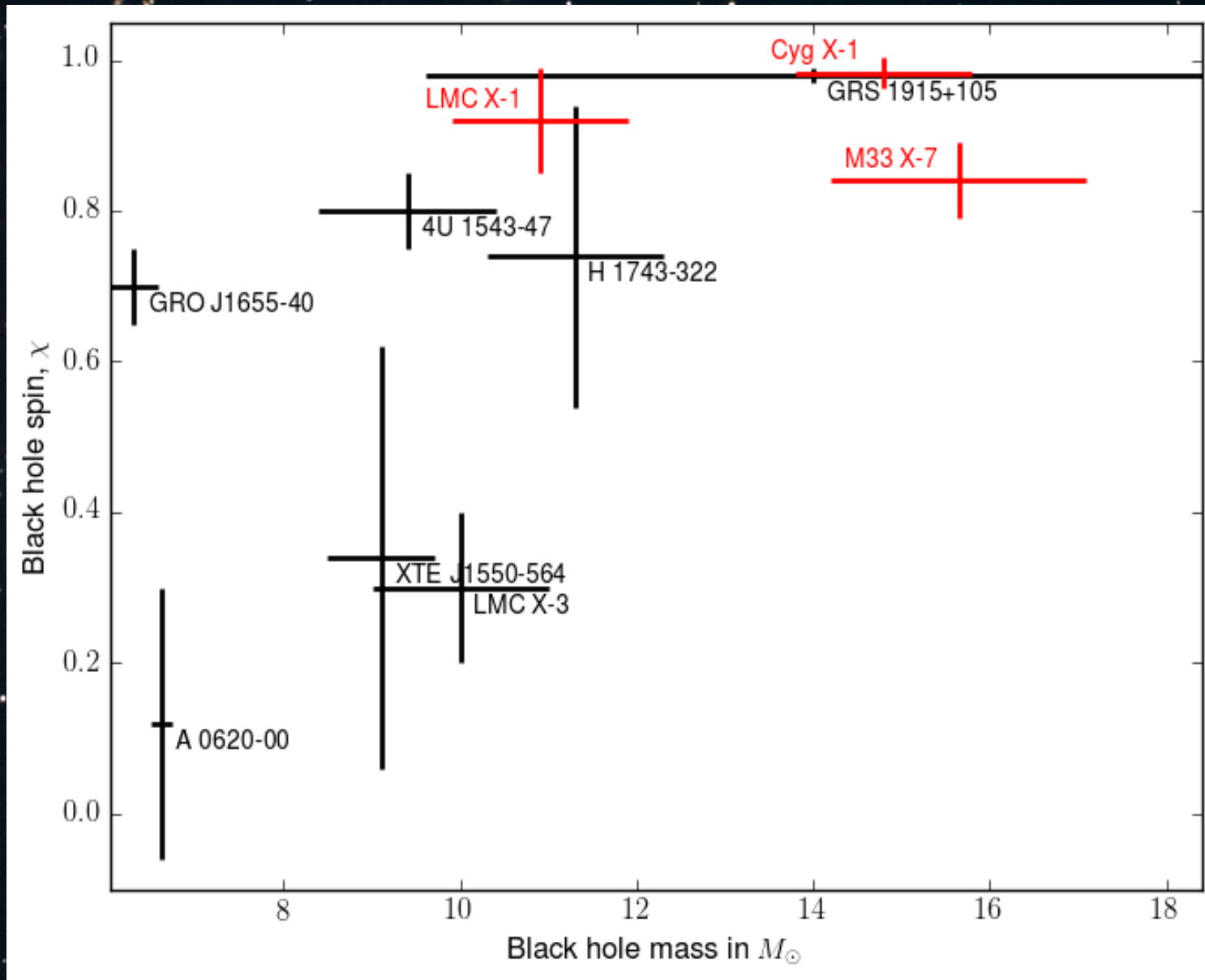


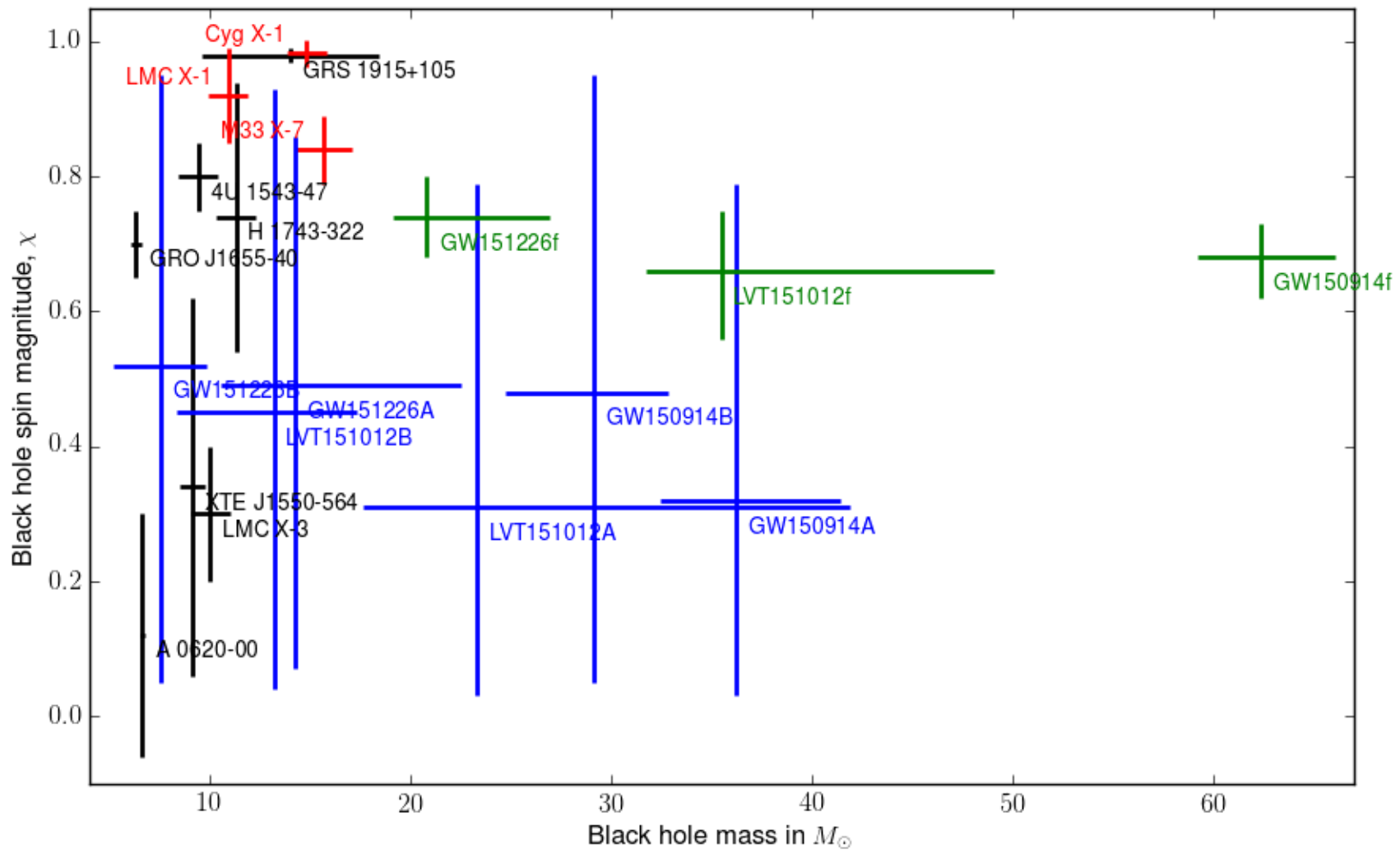
Fig 1 of Abbott et al. 1606.04856



# X-ray binaries masses and spin



# X-ray + GW masses and spins



# Astrophysics

- Formation of heavy black holes – **direct collapse?**
- Time to merge from 1AU by GW alone,  
~ 100x age of universe - **common envelope?**
- Formation of binary still open – **cluster or field?**
- Peak energy flux  $200_{-20}^{+30}$  solar masses per second

# Signal consistency test

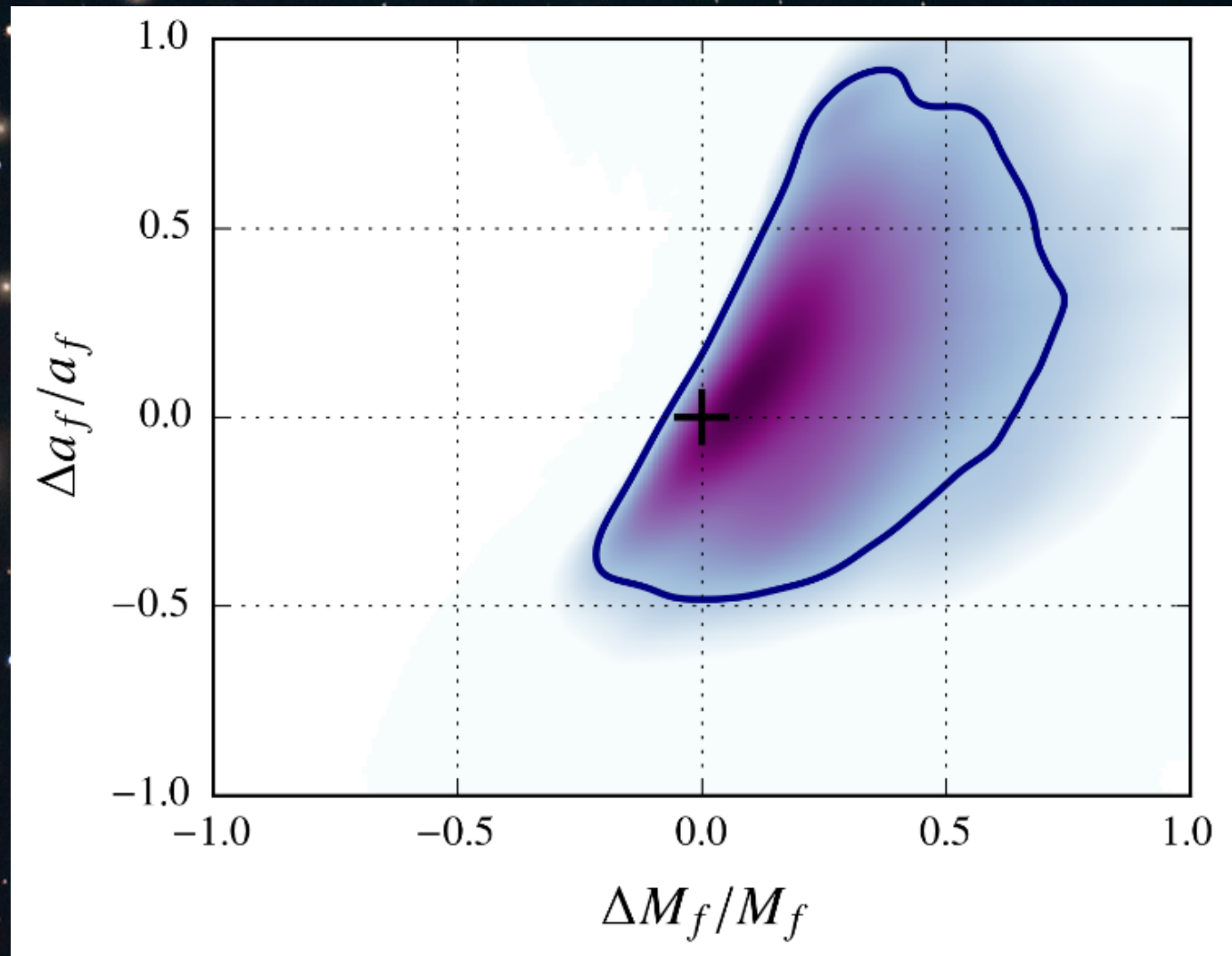
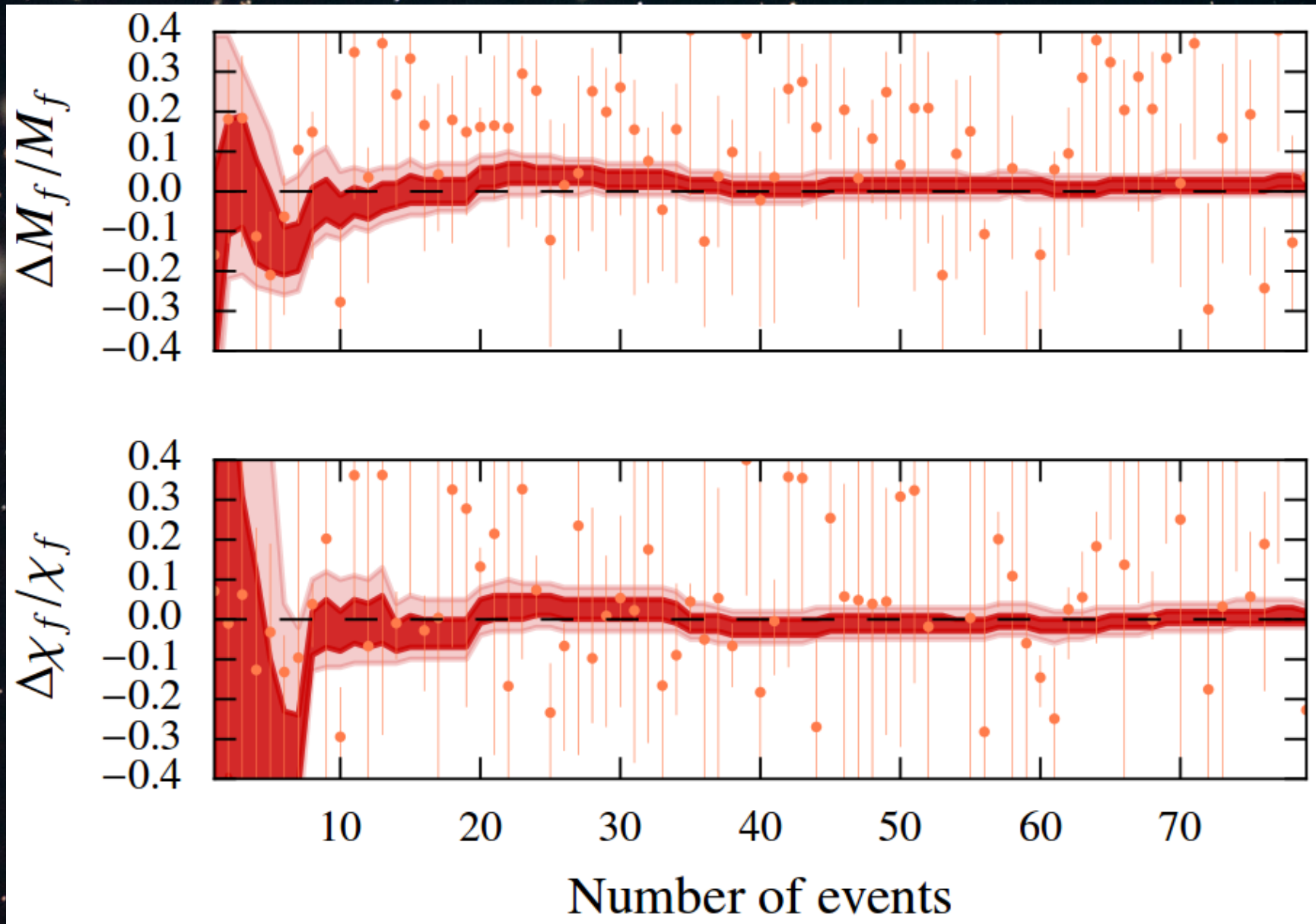
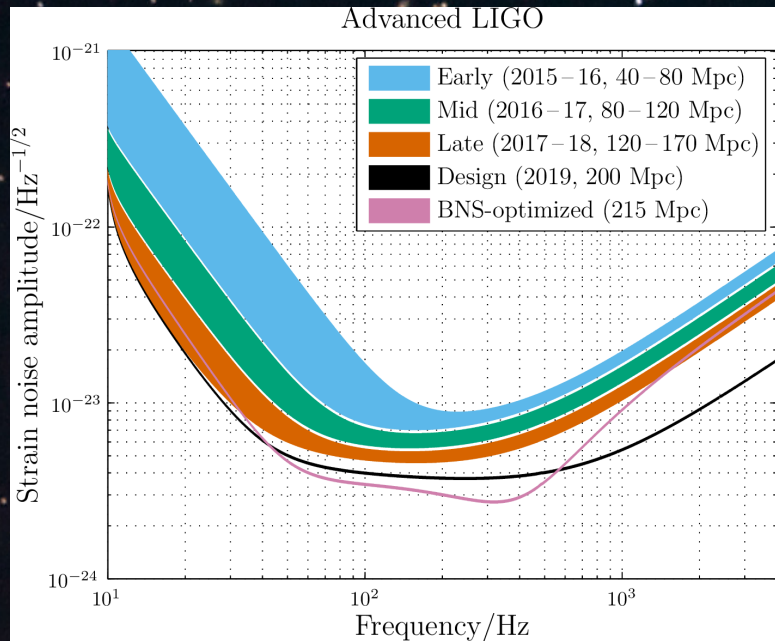


Fig. 3 (bot) of Abbott et al. PRL 16 (2016) 221101

# IMR consistency going forward



# Event rate estimates



Ten or more detections by the end of O2 is quite likely

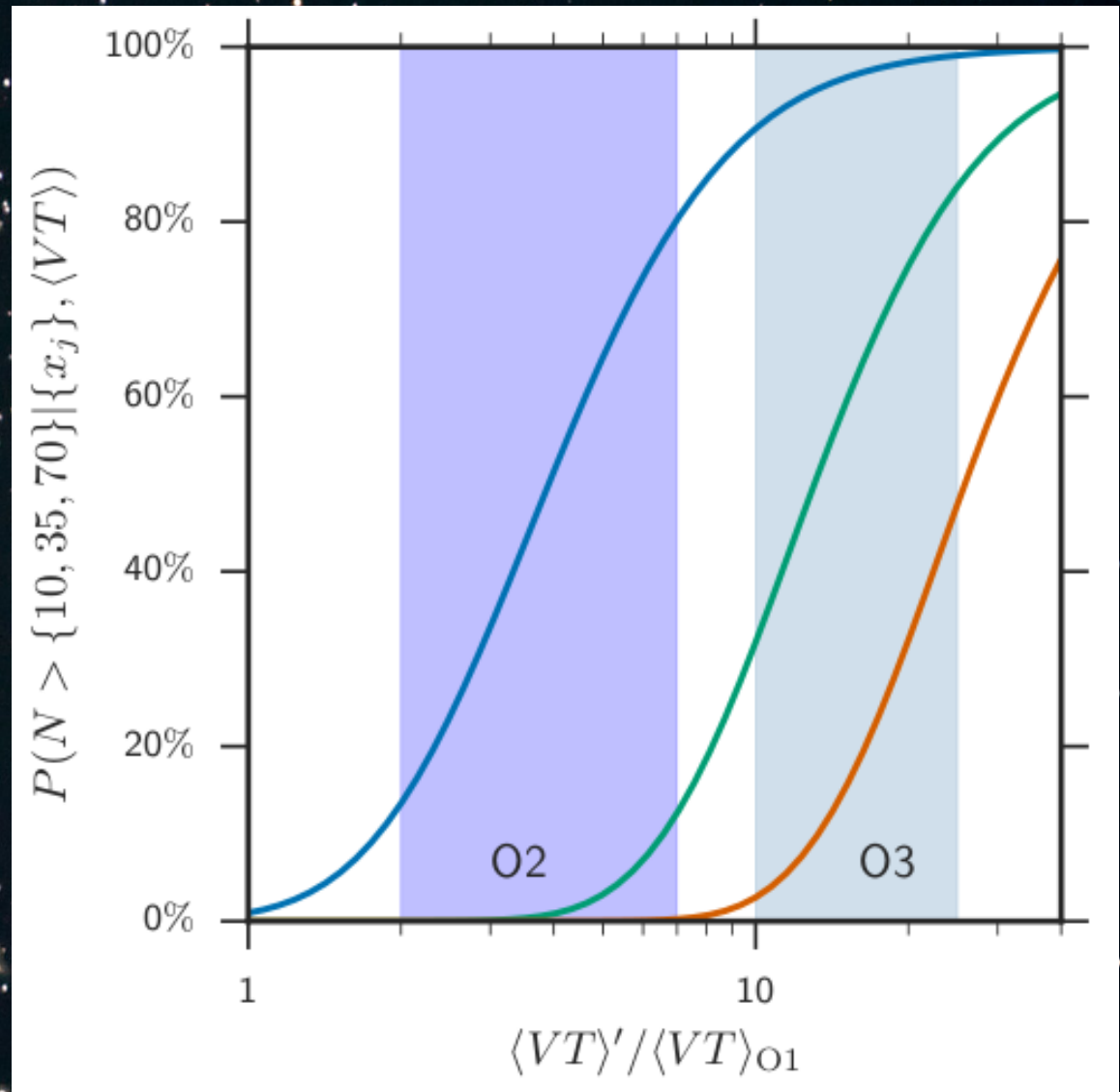
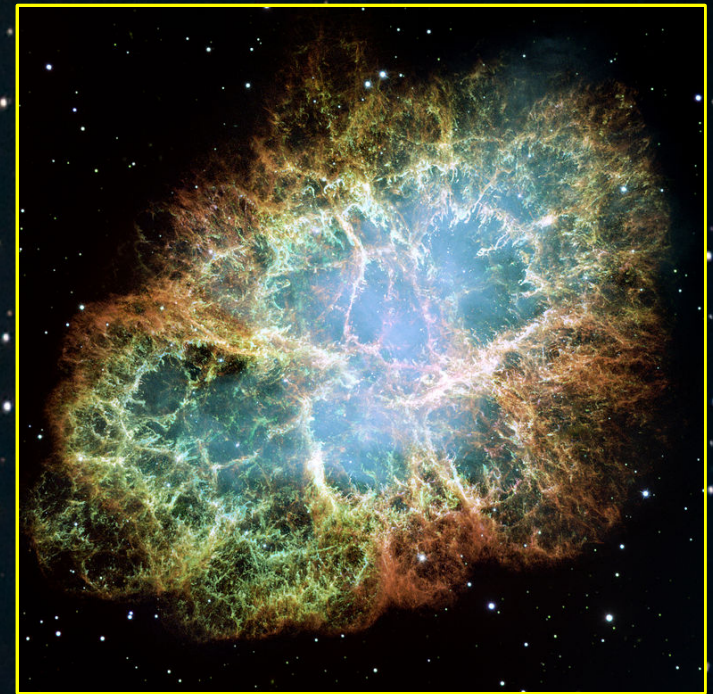


Fig 12 of Abbott et al. 1606.04856

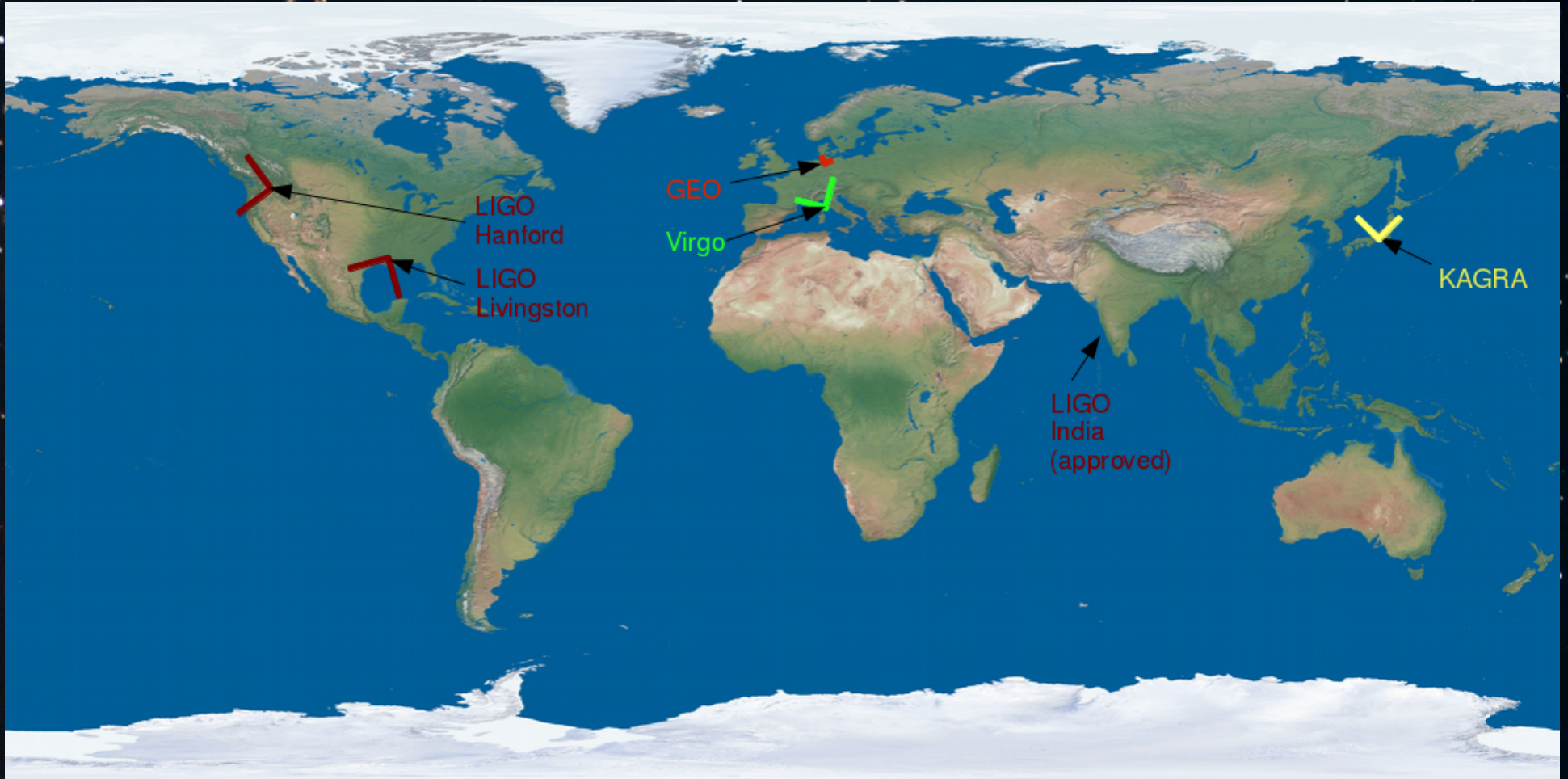
# Other potential aLIGO sources

- Neutron stars – tidally disrupting
- Deformed rotating neutron stars
- Galactic supernovae
- Astrophysical background
- Cosmic strings
- First-order phase transitions
- Inflationary particle production
- Non-perturbative preheating
- Inflationary vacuum fluctuations



Source: NASA/HST

# Worldwide network



Source: Virgo/LAPP, T. Patterson



# Summary

- **LIGO has detected gravitational waves**
- **Binary black hole systems exist**
- **Binary black holes merge**
- **The future is likely to bring more**

**Thank you**

# References and links

- Abbott et al. *“The basic physics of the binary black hole merger GW150914”* arXiv:1608.01940, Annalen der Physik
- Abbott et al. *“Binary Black Hole Mergers in the first Advanced LIGO Observing Run”* arXiv: 1606.04856, PRX
- Abbott et al. *“Properties of the Binary Black Hole Merger GW150914”* PRL 116 (2016) 241102
- LIGO Open Science Center: <https://losc.ligo.org>
- Logbooks: <https://alog.ligo-la.caltech.edu/aLOG/>
- Physical environment monitors: <https://pem.ligo.org>