

# Le onde gravitazionali. Una scoperta a lungo attesa

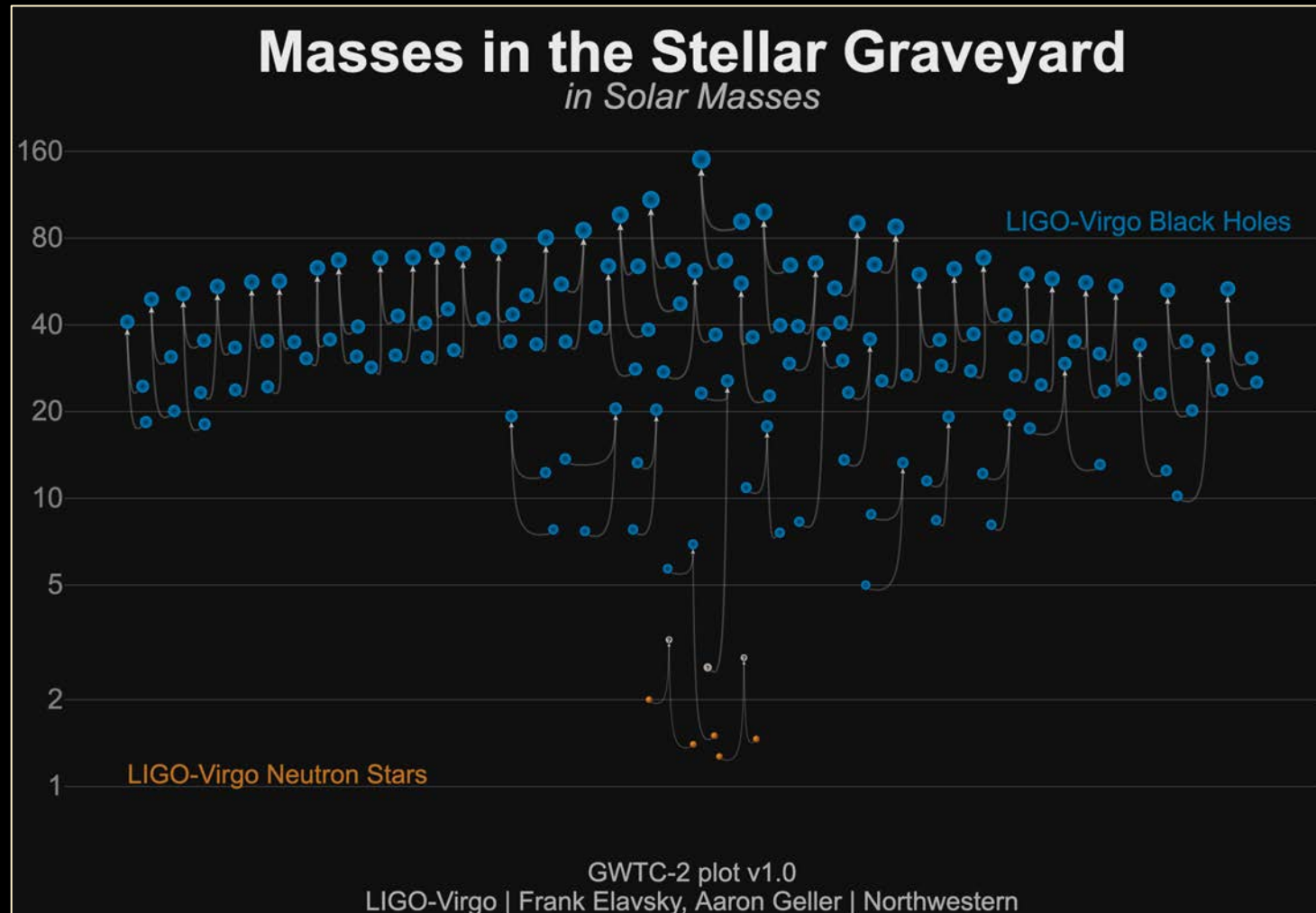
Edoardo Milotti

Dipartimento di Fisica, Univ. di Trieste

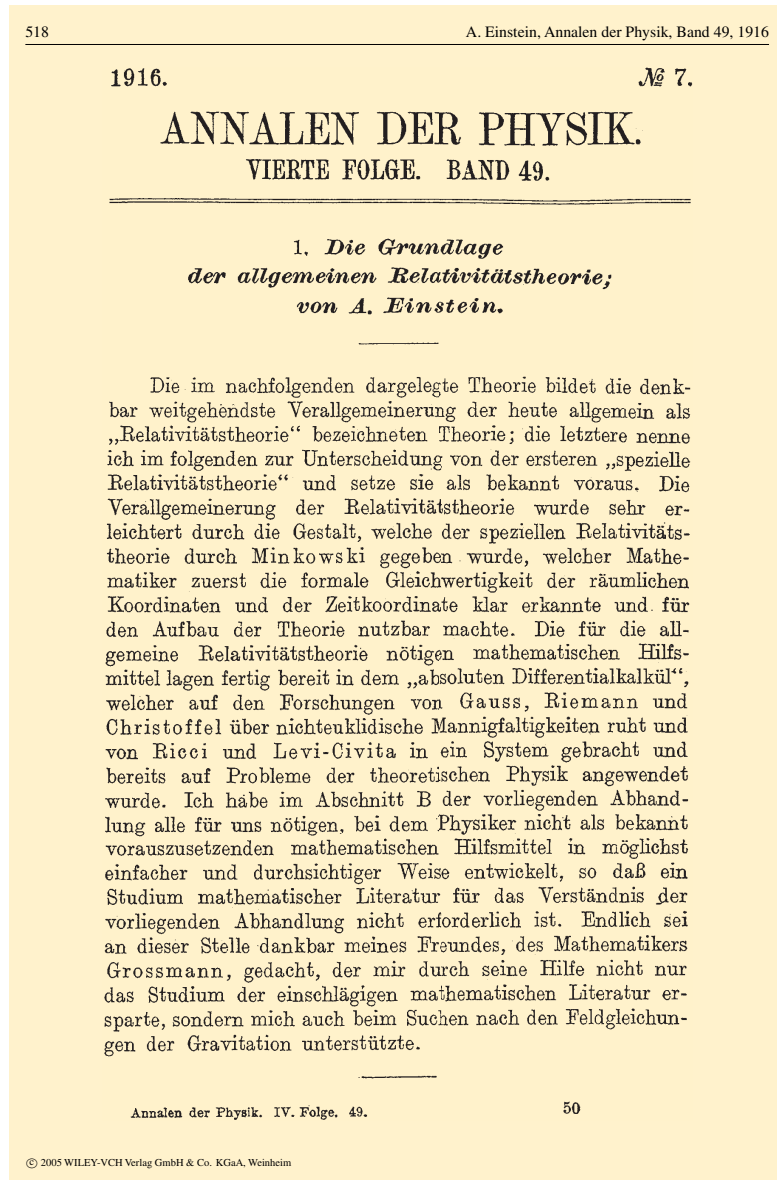
e I.N.F.N. – Sezione di Trieste

In seguito alla prima osservazione diretta di un'onda gravitazionale nel 2015, ne sono state rivelate parecchie altre. Dopo le 11 osservazioni di onde gravitazionali annunciate nei due primi periodo osservativi, collaborazione LIGO/Virgo ha appena reso nota l'osservazione di altri 39 segnali di onda gravitazionale. Si tratta di segnali estremamente deboli che provengono da sorgenti lontanissime.

**Come è possibile osservare fenomeni così elusivi e cosa significano le osservazioni fatte?**



Marzo 1916, pubblicazione dell'articolo di Albert Einstein che espone la Teoria della Relatività Generale.



La teoria di Einstein contiene un'osservazione nuova e sconcertante: lo spazio si comporta come un mezzo elastico, viene curvato dalla massa, e la stessa geometria dell'Universo non è più la geometria Euclidea.

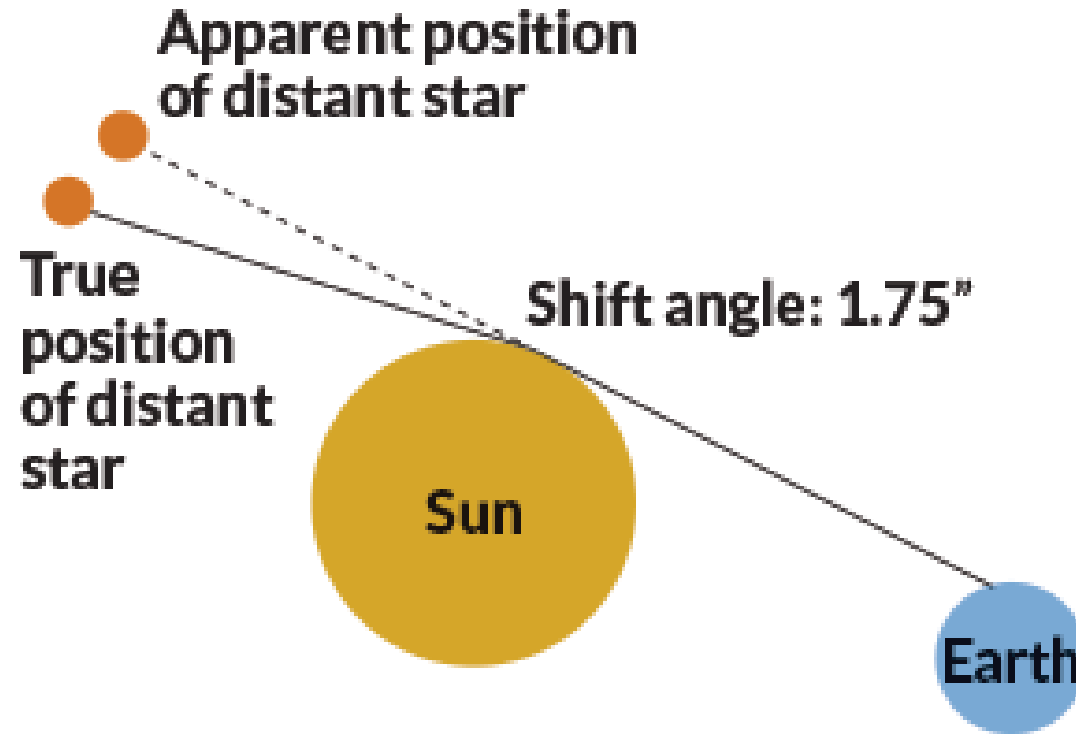


LIGO  
Scientific  
Collaboration

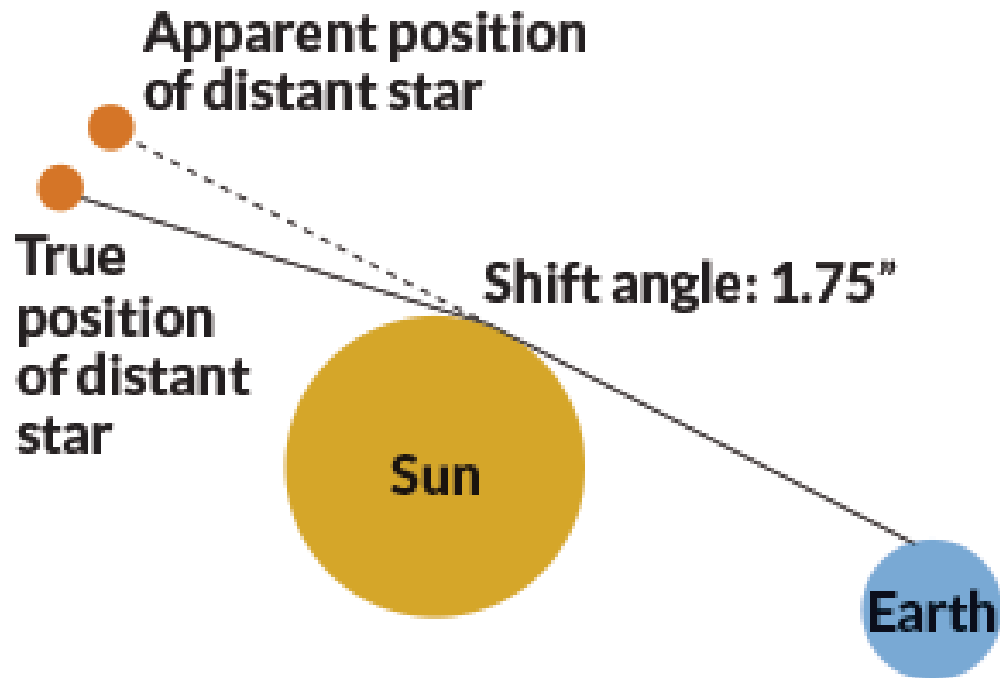


Nel suo articolo dell'inizio 1916 Einstein prevede correttamente la deflessione della luce prodotta dalla gravità e trova un valore doppio rispetto a quello previsto dalla meccanica di Newton.

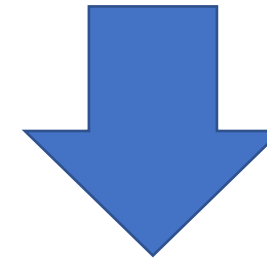
La deflessione è comunque molto piccola anche nel caso di raggi di luce che passano radenti la superficie solare



La deflessione massima prevista è circa un millesimo del diametro angolare del Sole.



$$1.75'' \approx 8.48 \times 10^{-6} \text{ radianti}$$



Precisione richiesta per distinguere la teoria di Einstein da quella di Newton, dell'ordine di

$$1 \times 10^{-6} \text{ radianti}$$

e questo corrisponde ad una risoluzione in lunghezza di 1mm ad 1 km di distanza.



Nel 1919 l'astronomo inglese Arthur Eddington organizzò una doppia spedizione per osservare la grande eclissi di sole del 29 maggio che avrebbe attraversato una striscia di terra nell'emisfero sud.

Eddington viaggiò fino alle isole São Tomé e Príncipe. L'eclissi sarebbe dovuta arrivare verso le 14 del 29 maggio e durare poco più di 6 minuti, ma fino a poco prima dell'ora prevista c'erano nuvole e pioggia...

"... The rain stopped about noon and about 1.30 ... we began to get a glimpse of the sun. We had to carry out our photographs in faith. I did not see the eclipse, being too busy changing plates, except for one glance to make sure that it had begun and another half-way through to see how much cloud there was. We took sixteen photographs. They are all good of the sun, showing a very remarkable prominence; but the cloud has interfered with the star images. The last few photographs show a few images which I hope will give us what we need ...

**... one plate I measured gave a result agreeing with Einstein.**

(dal diario di spedizione di Eddington)





29

HR1403

HR1375



Taurus

67 Tauri

65 Tauri

72 Tauri

69 Tauri



I giornali di tutto il mondo  
riportano l'osservazione di  
Eddington

The New York Times

---

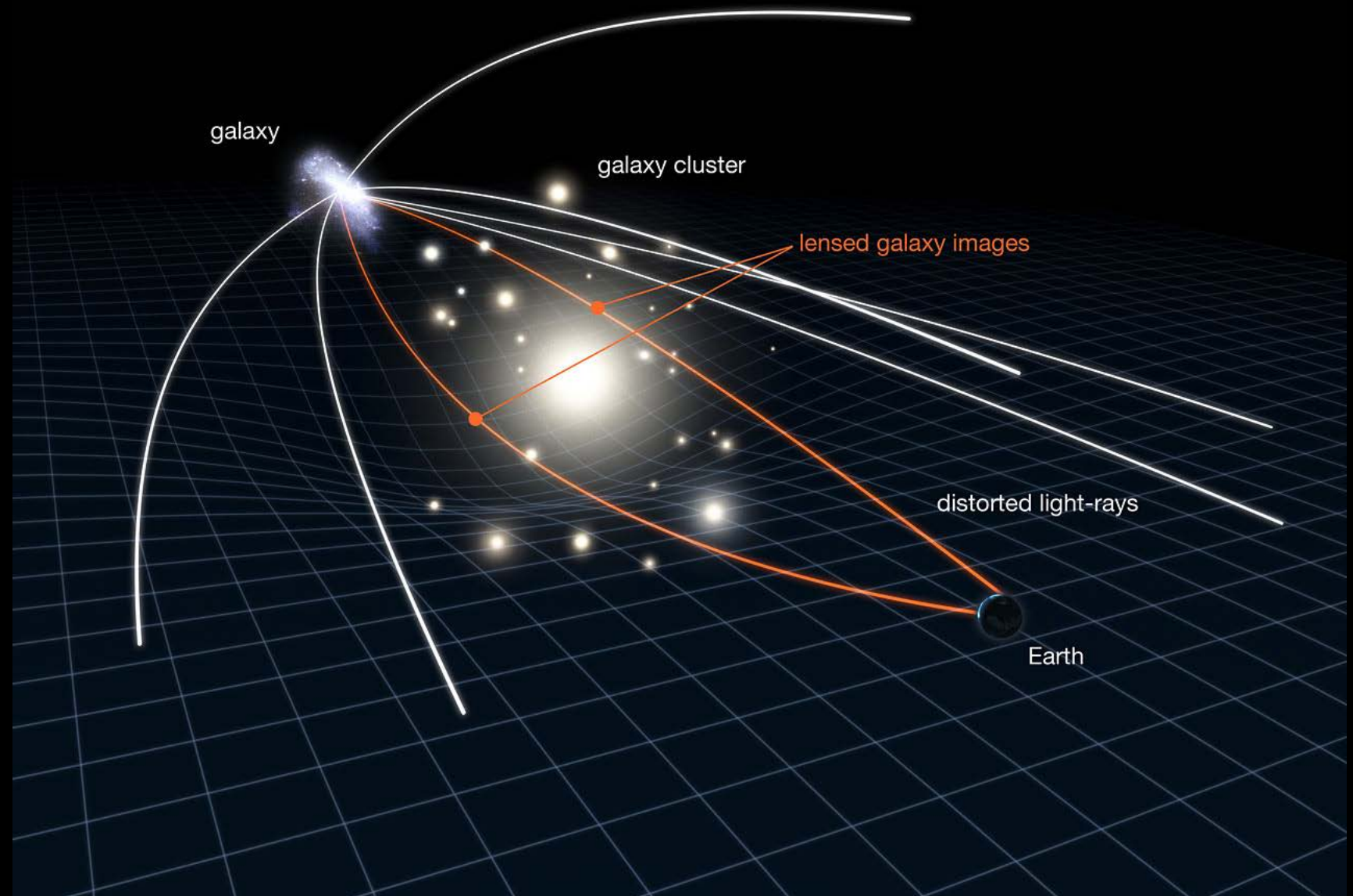
***ECLIPSE SHOWED GRAVITY  
VARIATION; Diversion of Light  
Rays Accepted as Affecting  
Newton's Principles. HAILED AS  
EPOCHMAKING British Scientist  
Calls the Discovery One of the  
Greatest of Human Achievements.***



LIGO  
Scientific  
Collaboration



Il debole effetto osservato da Eddington nel 1919 viene comunemente osservato dai grandi telescopi di oggi, che ci hanno permesso di osservare un gran numero di *lenti gravitazionali*



Polaris

Kochab

Ursa Minor

Pherkad



Abell 2218

Draco

Aldhibah

Athebyne

Polaris

Kochab

Ursa Minor

Pherkad



Abell 2218

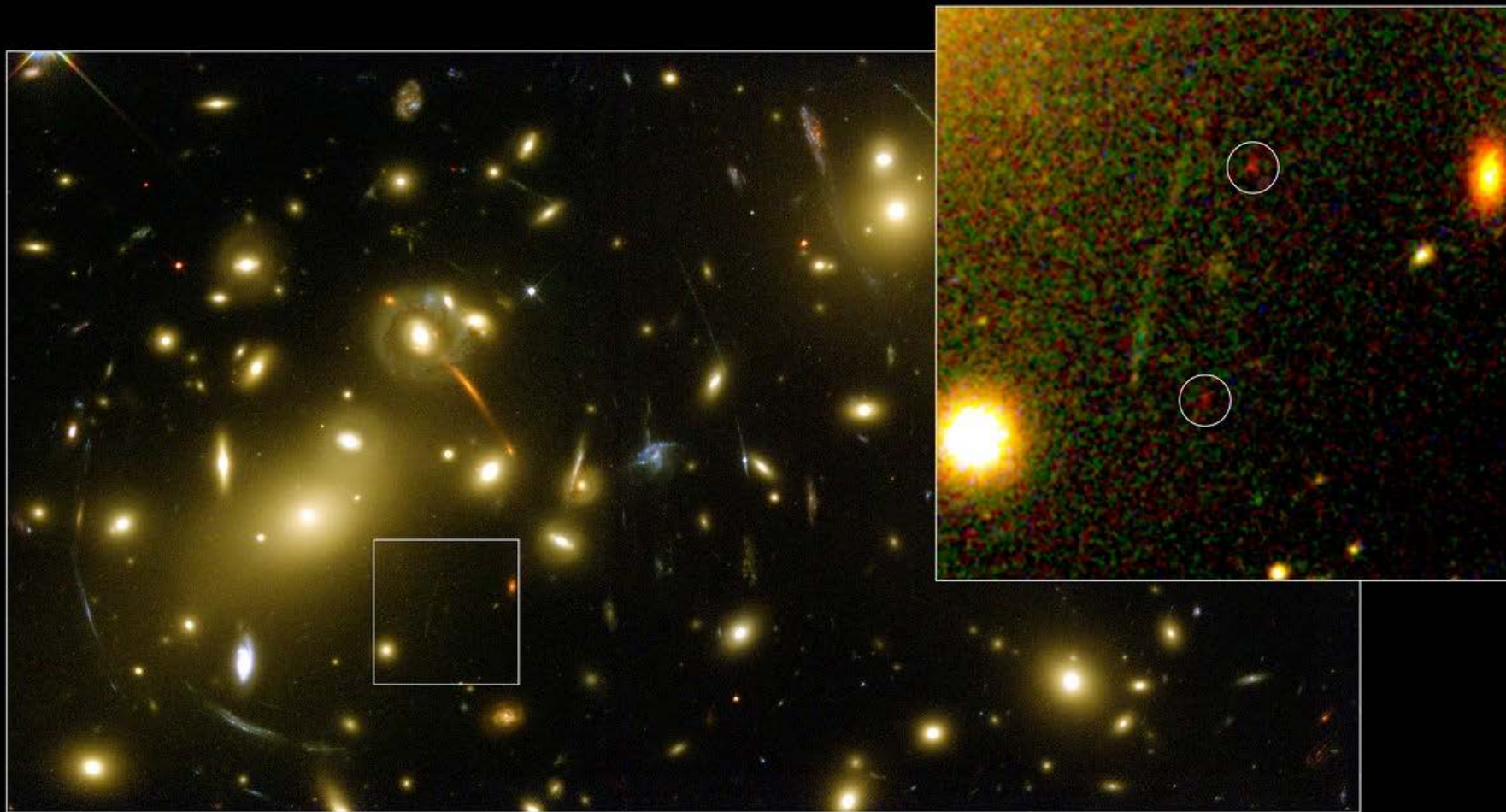
Draco  
Aldhibah

Athebyne



Abell 2218  
(Hubble Space Telescope)

Ammasso di galassie a 2  
miliardi di anni luce di  
distanza.



Nel 2004 questa immagine (oltre a quelle dell'osservatorio Keck) ha permesso di individuare una galassia lontana 13.4 miliardi di anni luce, probabilmente tra i più antichi oggetti dell'Universo.

L'immagine è ingrandita circa 30 volte, ed è doppia, a causa dell'azione della lente gravitazionale.

Nel suo articolo originale Einstein prevede fenomeni statici come la deflessione della luce, ma introduce anche un'importante analogia con l'elettromagnetismo.

Pochi mesi dopo il primo articolo, Einstein ne pubblica un secondo in cui porta più avanti questa analogia.

Così come la teoria di Maxwell aveva previsto le onde elettromagnetiche, così Einstein prevede che debbano esistere anche le onde gravitazionali.



## 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.

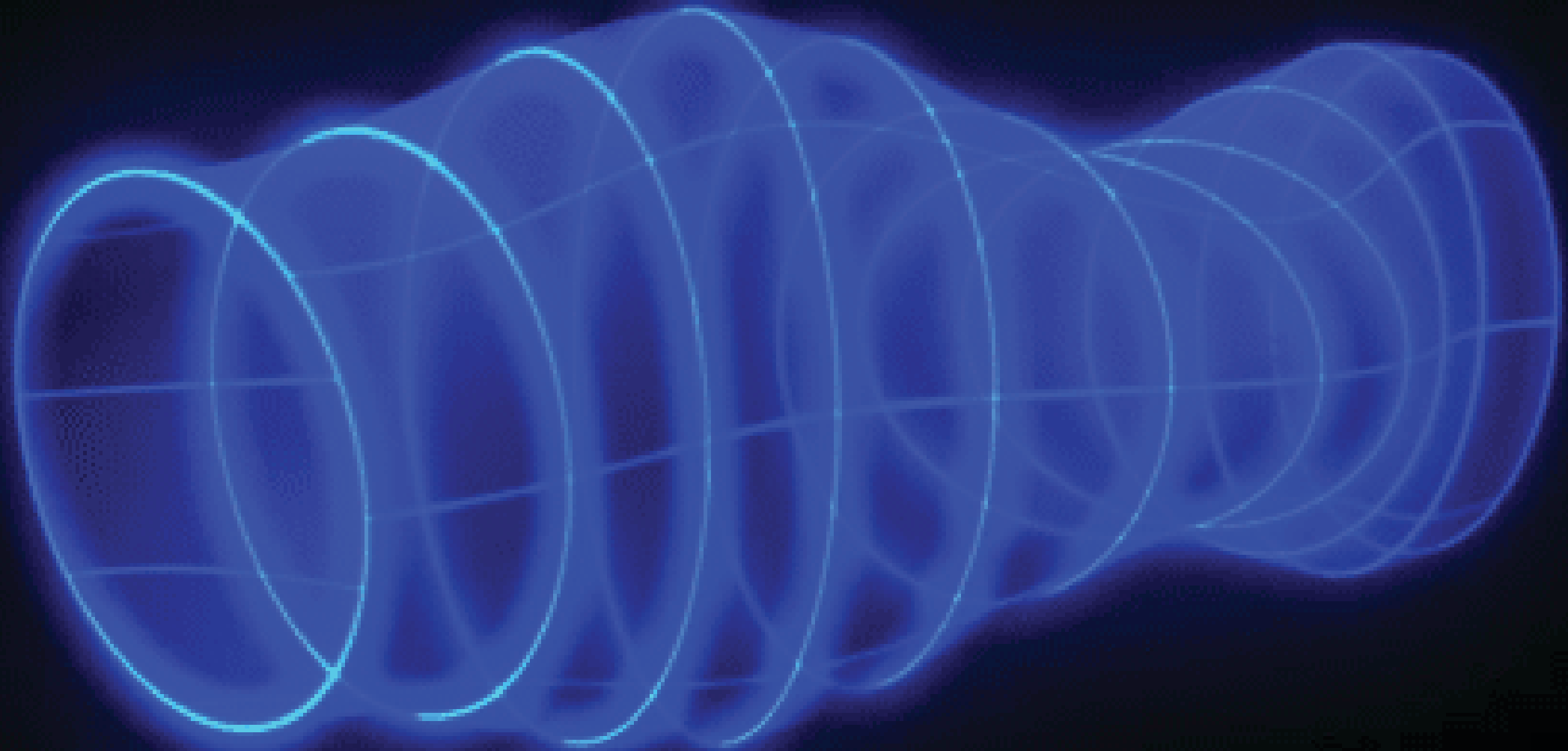
<sup>1</sup> Sitzungsber. XLVII, 1915, S. 833.



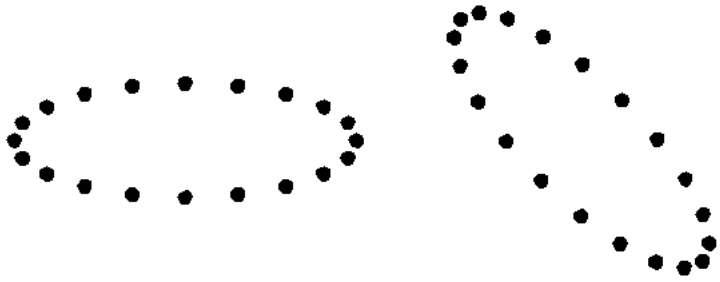


Le onde gravitazionali differiscono però in molti aspetti dalle onde elettromagnetiche, e in particolare:

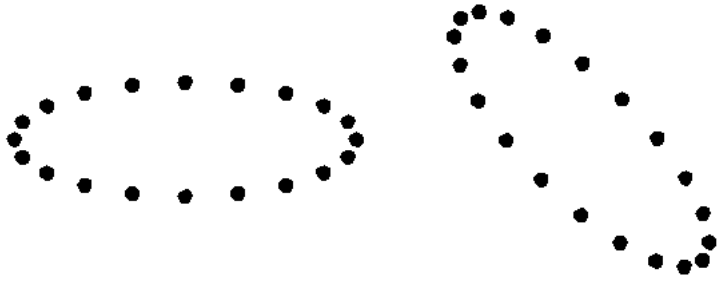
- la carica elettrica può essere positiva o negativa, ma la massa è solo positiva; per questo motivo mentre esiste la "radiazione di dipolo elettromagnetica", questa non esiste nel caso gravitazionale, che invece produce "radiazione di quadrupolo".
- le sorgenti di onde gravitazionali dipendono da variazioni della distribuzione di massa. Se una perturbazione della distribuzione di massa mantiene la simmetria sferica, non c'è emissione di onde gravitazionali



Un'onda gravitazionale produce una forza variabile tra masse di riferimento



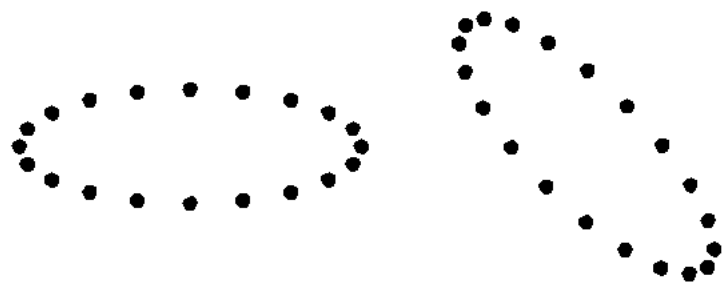
Un'onda gravitazionale produce una forza variabile tra masse di riferimento



La forza, e la corrispondente variazione di distanza tra le masse che "cadono" in questo campo gravitazionale è relativa alla lunghezza che si osserva:

$$\delta L = h \times L$$

Un'onda gravitazionale produce una forza variabile tra masse di riferimento

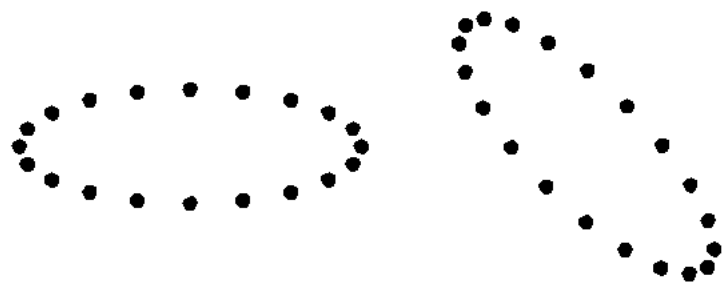


La forza, e la corrispondente variazione di distanza tra le masse che "cadono" in questo campo gravitazionale è relativa alla lunghezza che si osserva:

$$\delta L = h \times L$$

La quantità  $h$  è molto piccola  $h \lesssim 10^{-21}$

Un'onda gravitazionale produce una forza variabile tra masse di riferimento



La forza, e la corrispondente variazione di distanza tra le masse che "cadono" in questo campo gravitazionale è relativa alla lunghezza che si osserva:

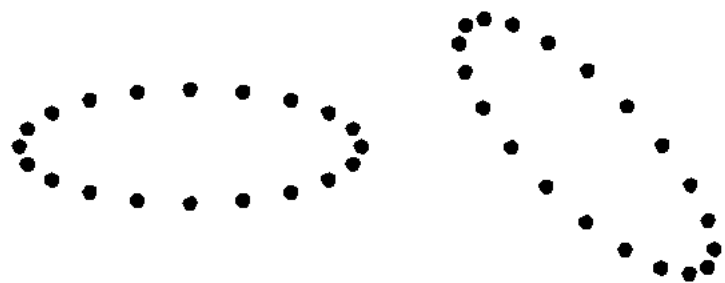
$$\delta L = h \times L$$

La quantità  $h$  è molto piccola  $h \lesssim 10^{-21}$



$$\delta L < 10^{-18} \text{ m} \quad (L = 1 \text{ km})$$

Un'onda gravitazionale produce una forza variabile tra masse di riferimento



La forza, e la corrispondente variazione di distanza tra le masse che "cadono" in questo campo gravitazionale è relativa alla lunghezza che si osserva:

$$\delta L = h \times L$$

La quantità  $h$  è molto piccola

$$h \lesssim 10^{-21}$$

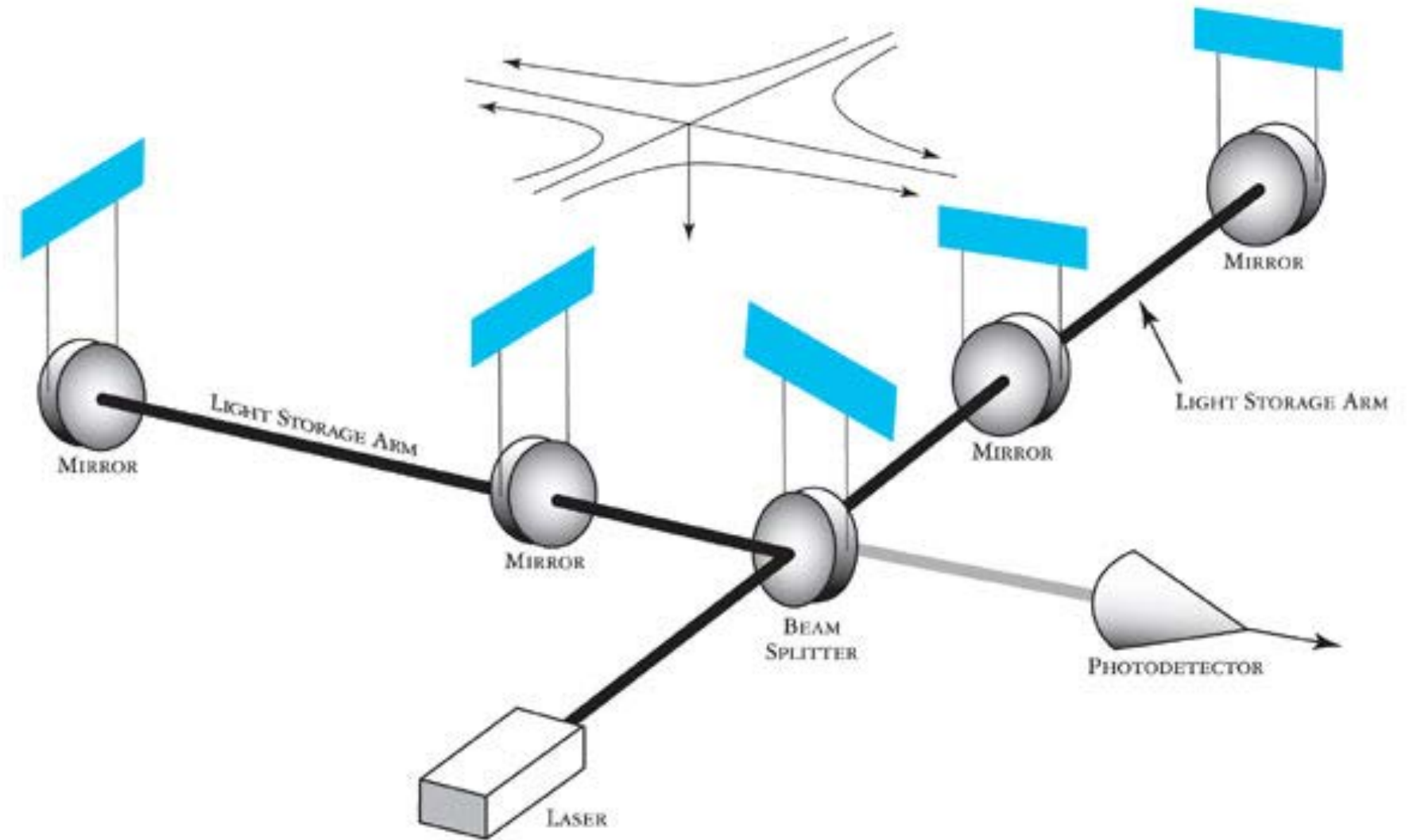
almeno 1000 volte più piccola del raggio di un protone !



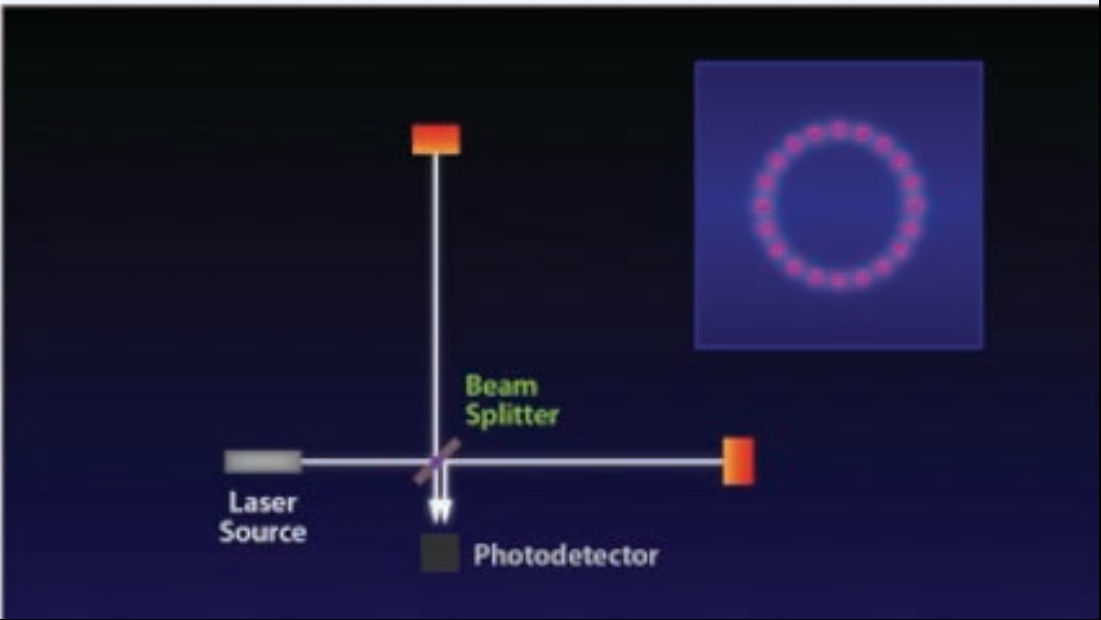
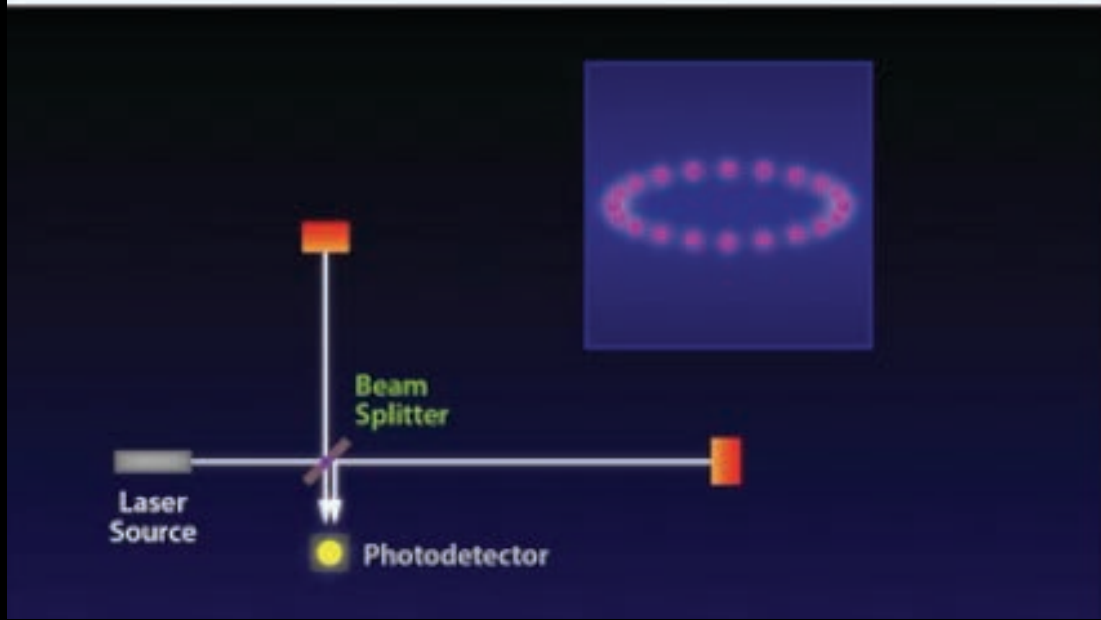
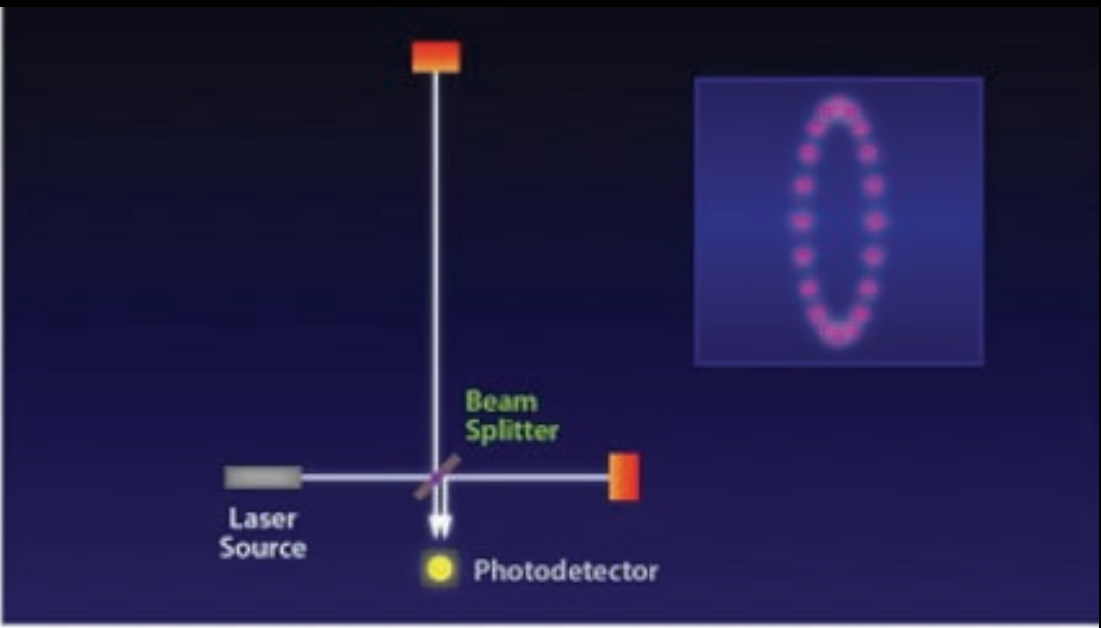
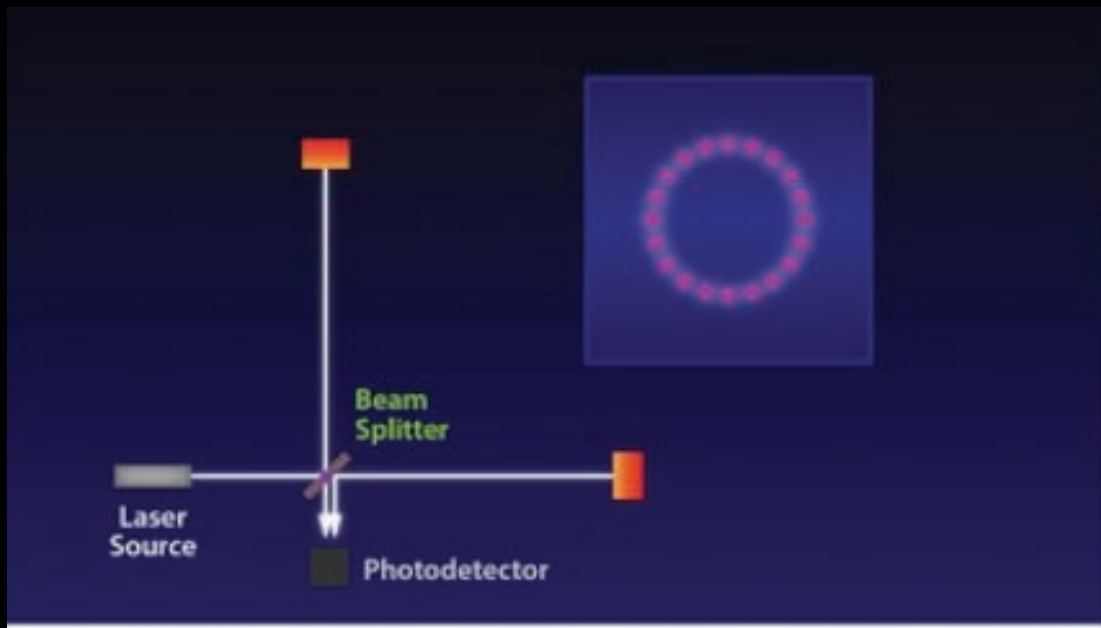
$$\delta L < 10^{-18} \text{ m} \quad (L = 1 \text{ km})$$

Per identificare la piccolissima variazione di distanza tra masse, si utilizza una variante dell'interferometro di Michelson

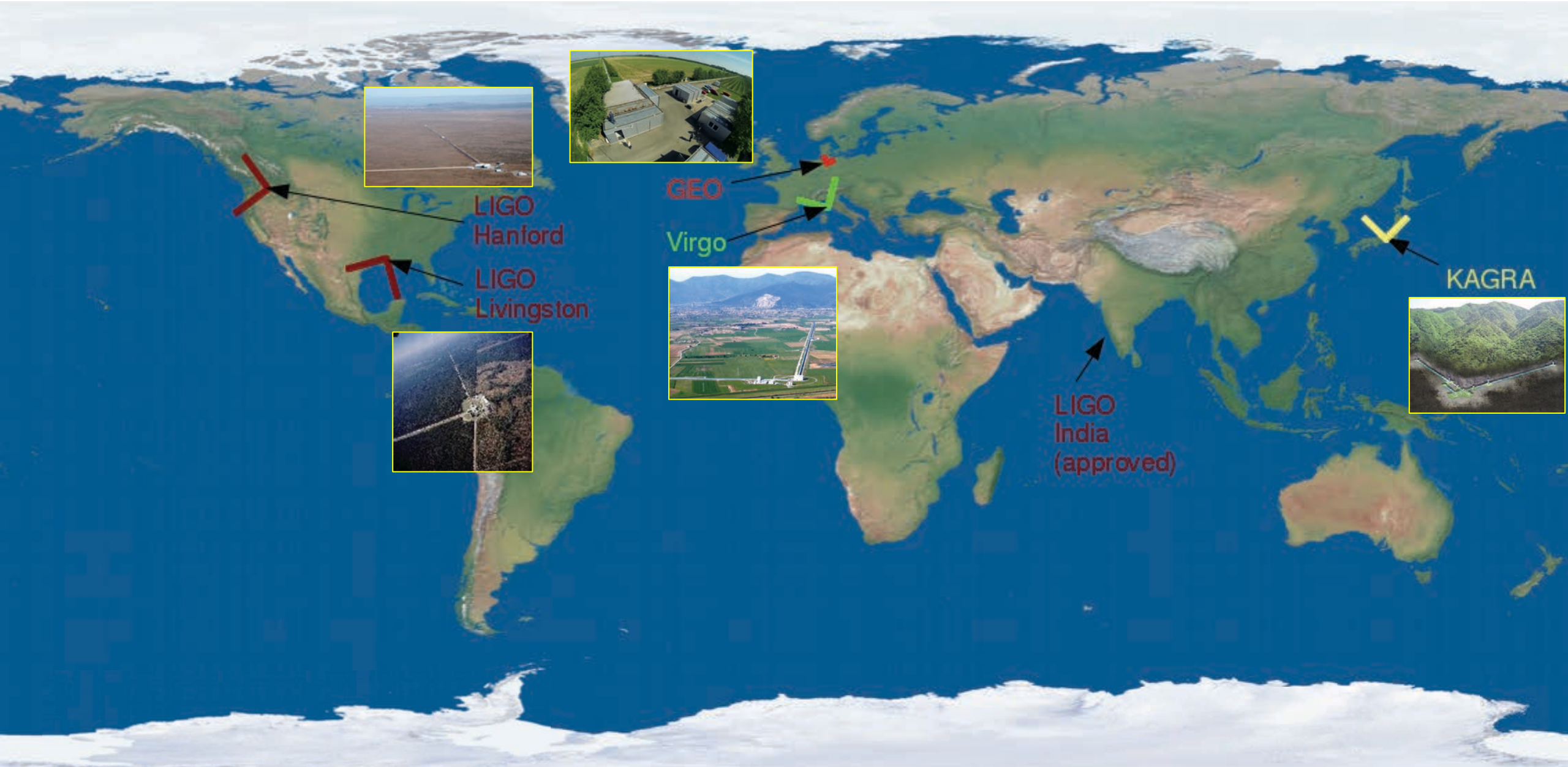
(idea sviluppata inizialmente da Ray Weiss, e dopo poco tempo anche in Italia da Adalberto Giazotto)







# La rete mondiale di osservatori gravitazionali (2020)





Virgo è una  
collaborazione  
tra:

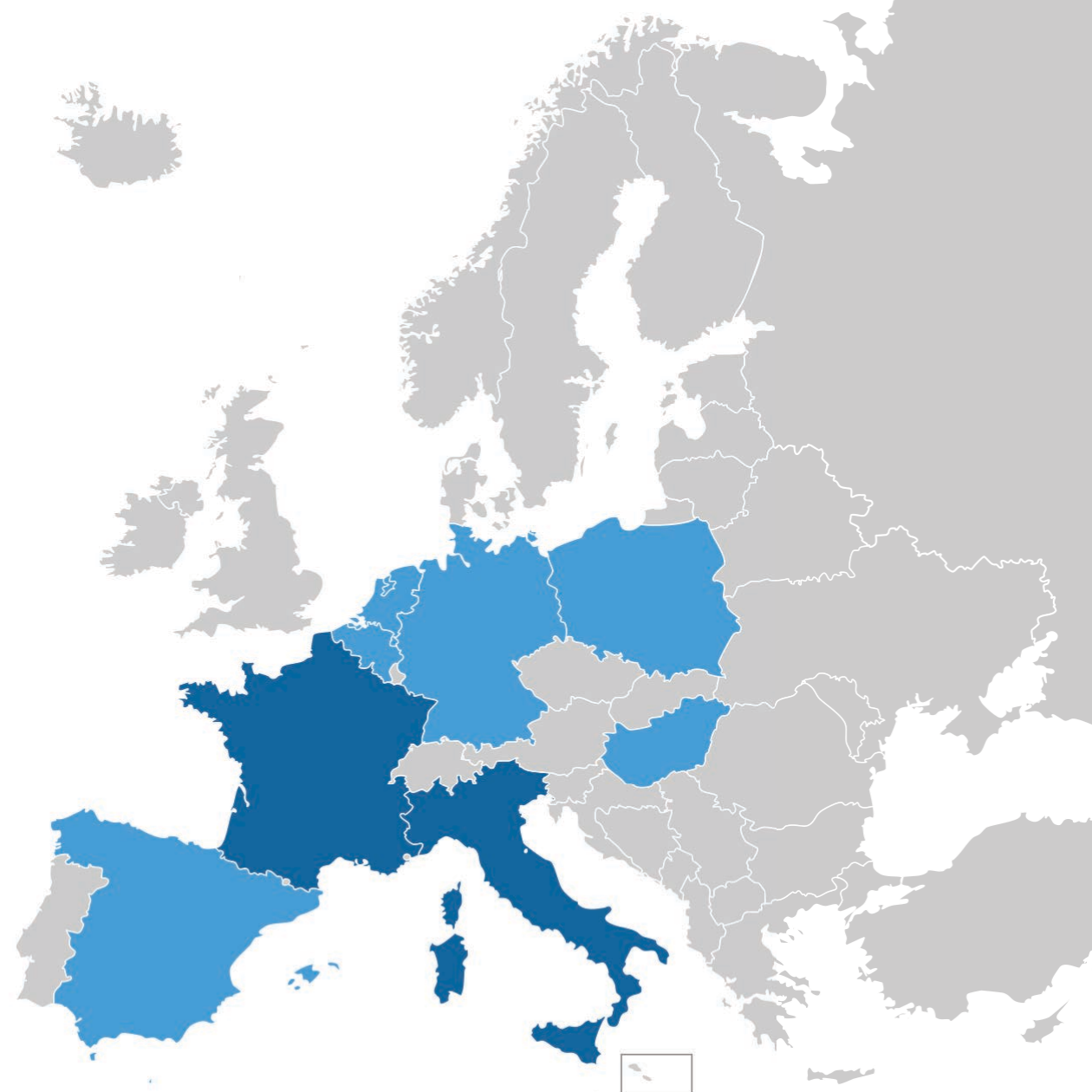
Belgio,  
Francia,  
Germania,  
Italia,  
Olanda,  
Polonia,  
Spagna,  
Ungheria

EUROPEAN GRAVITATIONAL OBSERVATORY



# Paesi che fanno parte della collaborazione Virgo

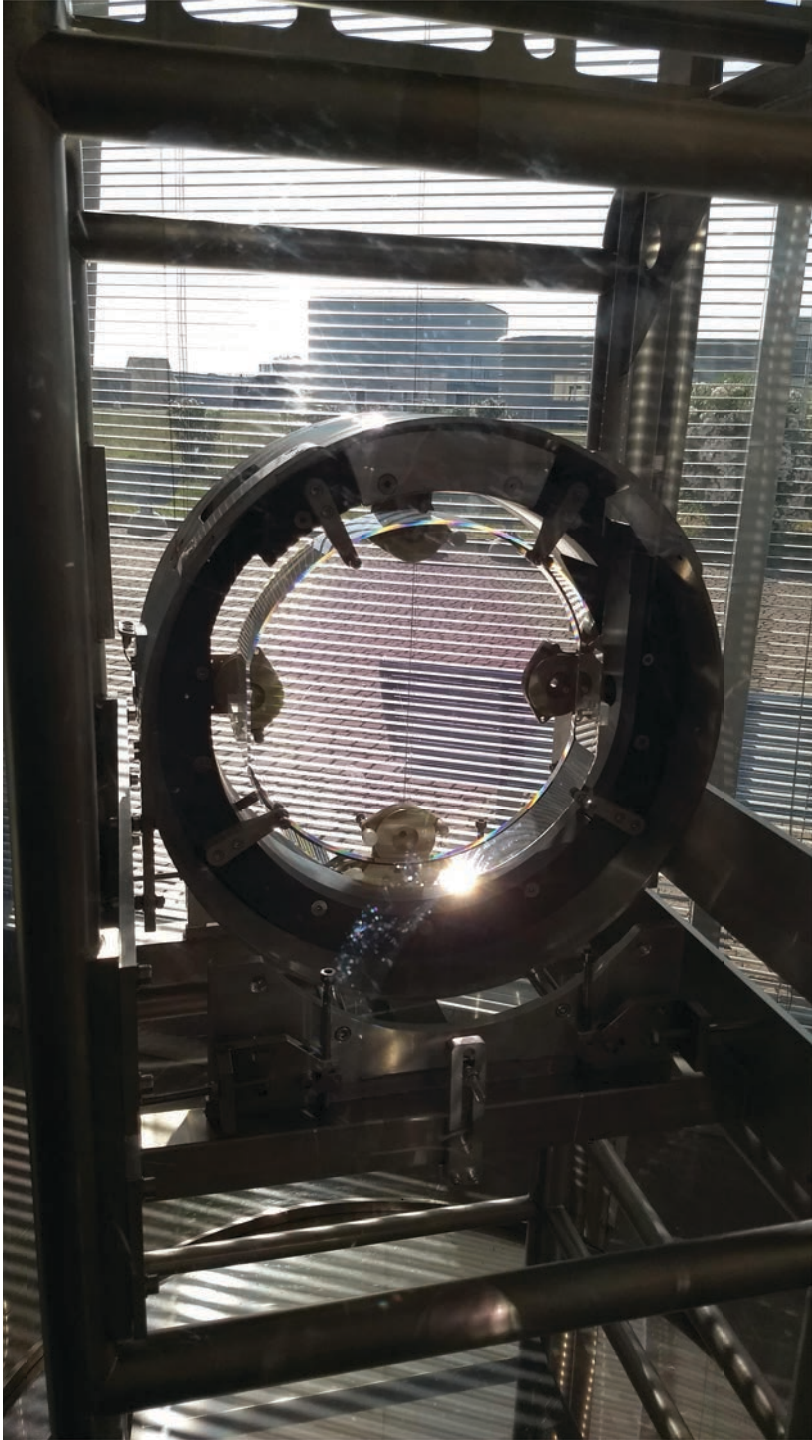
(i paesi in blu scuro sono i membri fondatori; nella mappa manca il Giappone, rappresentato dall'osservatorio astronomico nazionale)



LIGO  
Scientific  
Collaboration







LIGO  
Scientific  
Collaboration





**Il padre di Virgo: Adalberto Giazotto**

(Genova, 1 febbraio 1940 –  
Pisa, 16 novembre 2017)

(Tutto è iniziato dalla proposta,  
presentata da Giazotto nel  
1987 all'INFN, assieme a gruppi  
di Napoli, Pisa, Salerno,  
Frascati, Parigi e Orsay, di  
costruire in Italia un'antenna  
interferometrica di 3 km...)





The Nobel Prize in Physics 2017 was divided, one half awarded to Rainer Weiss, the other half jointly to Barry C. Barish and Kip S. Thorne "for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves."



Barry C. Barish (Caltech)



Kip S. Thorne (Caltech)

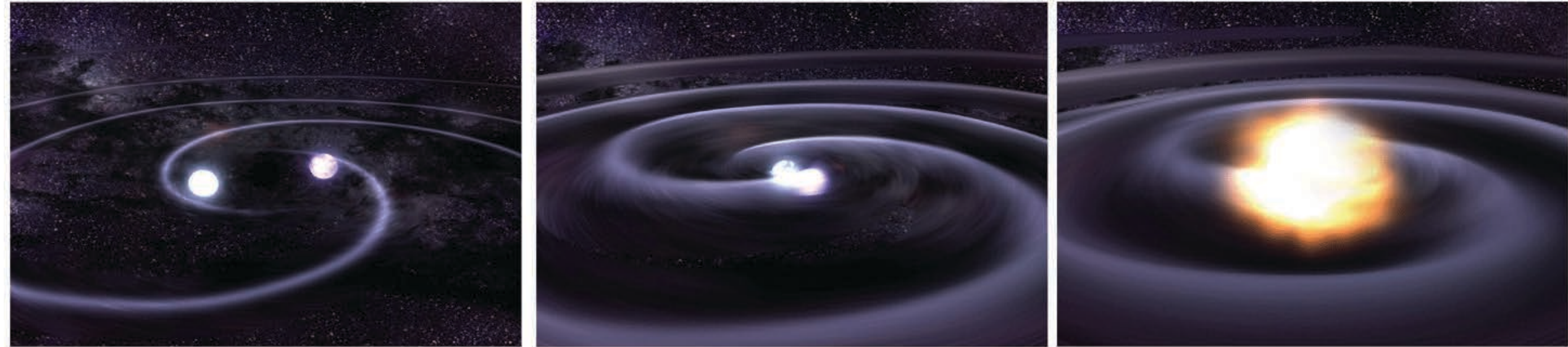


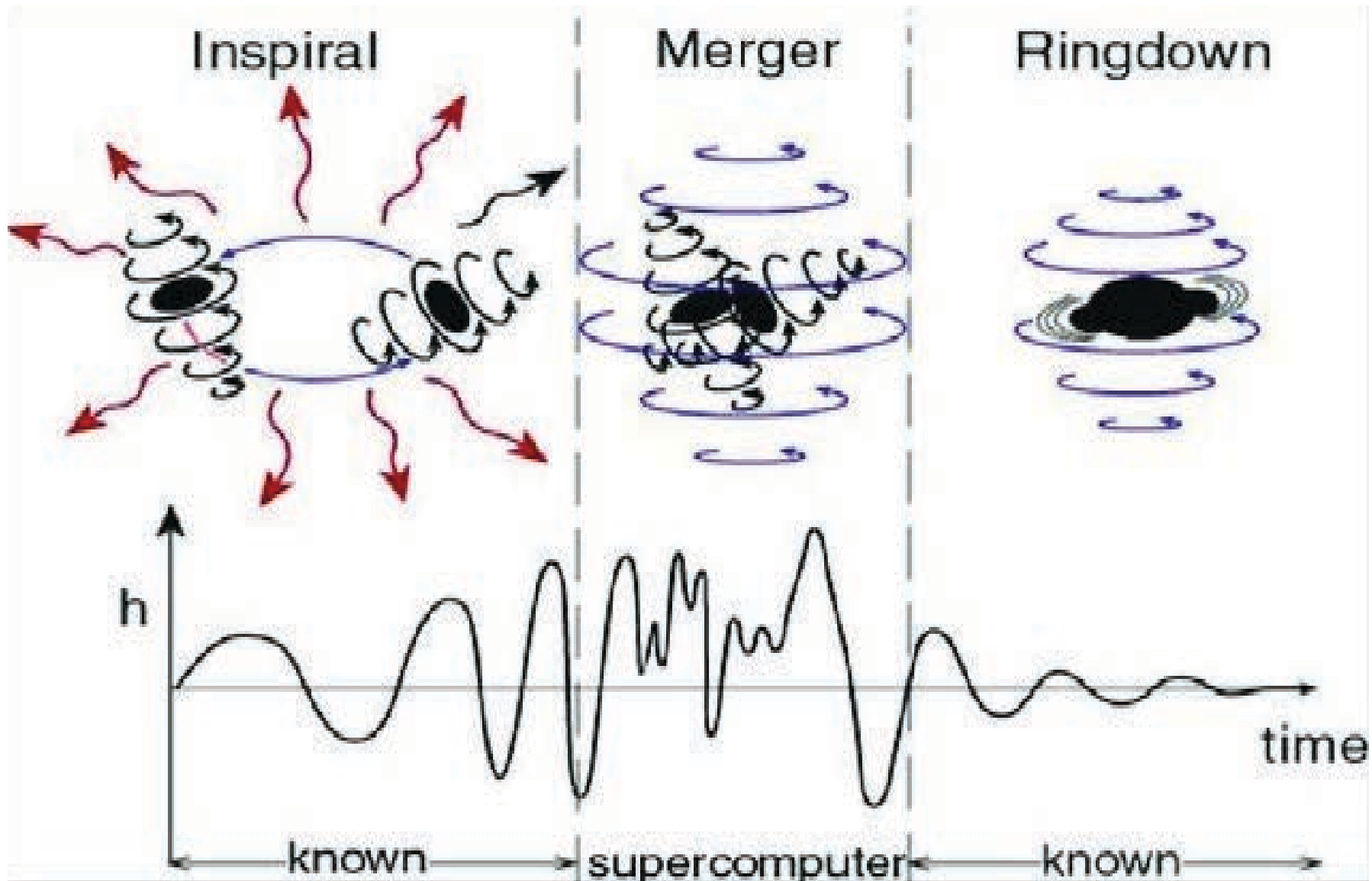
Rainer Weiss (MIT)

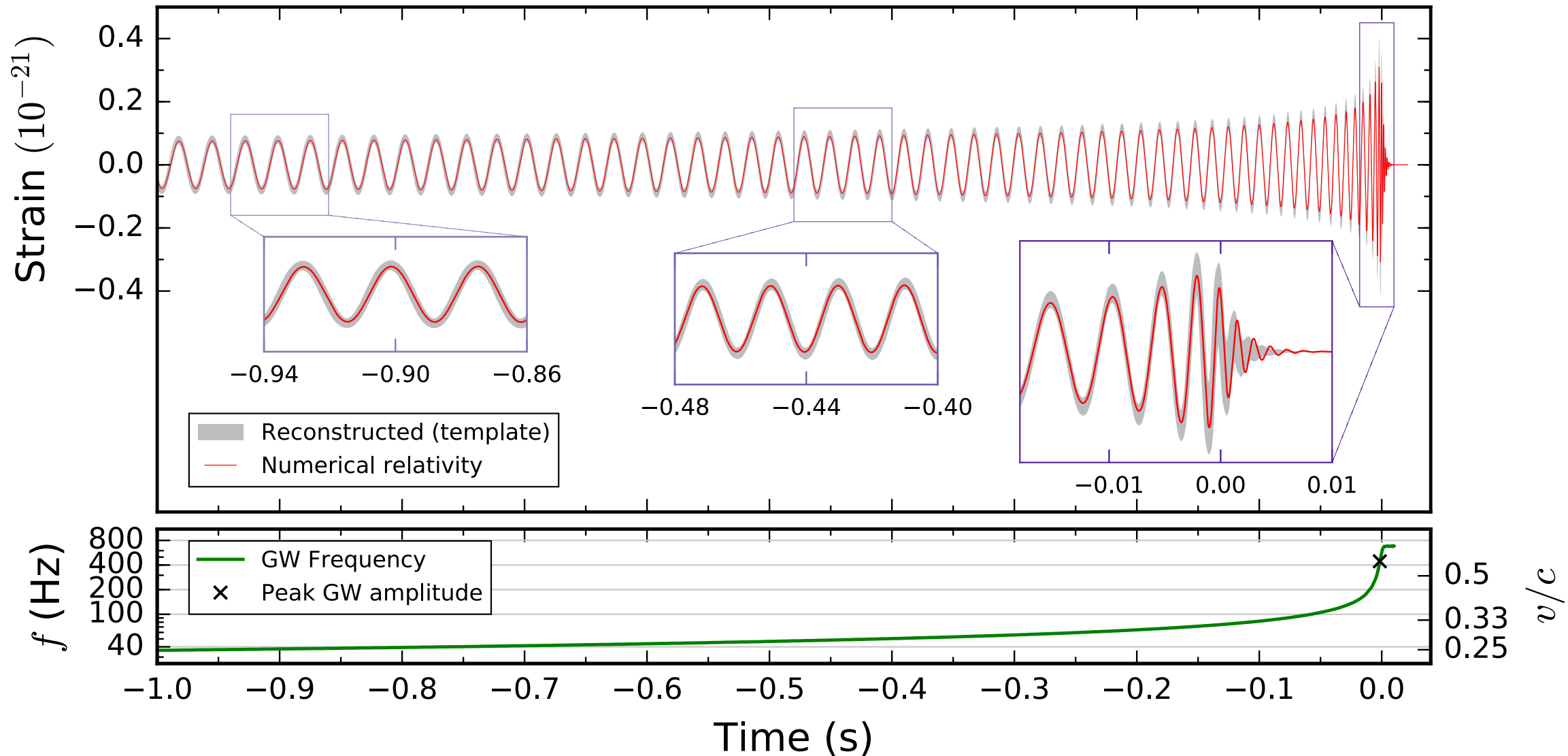


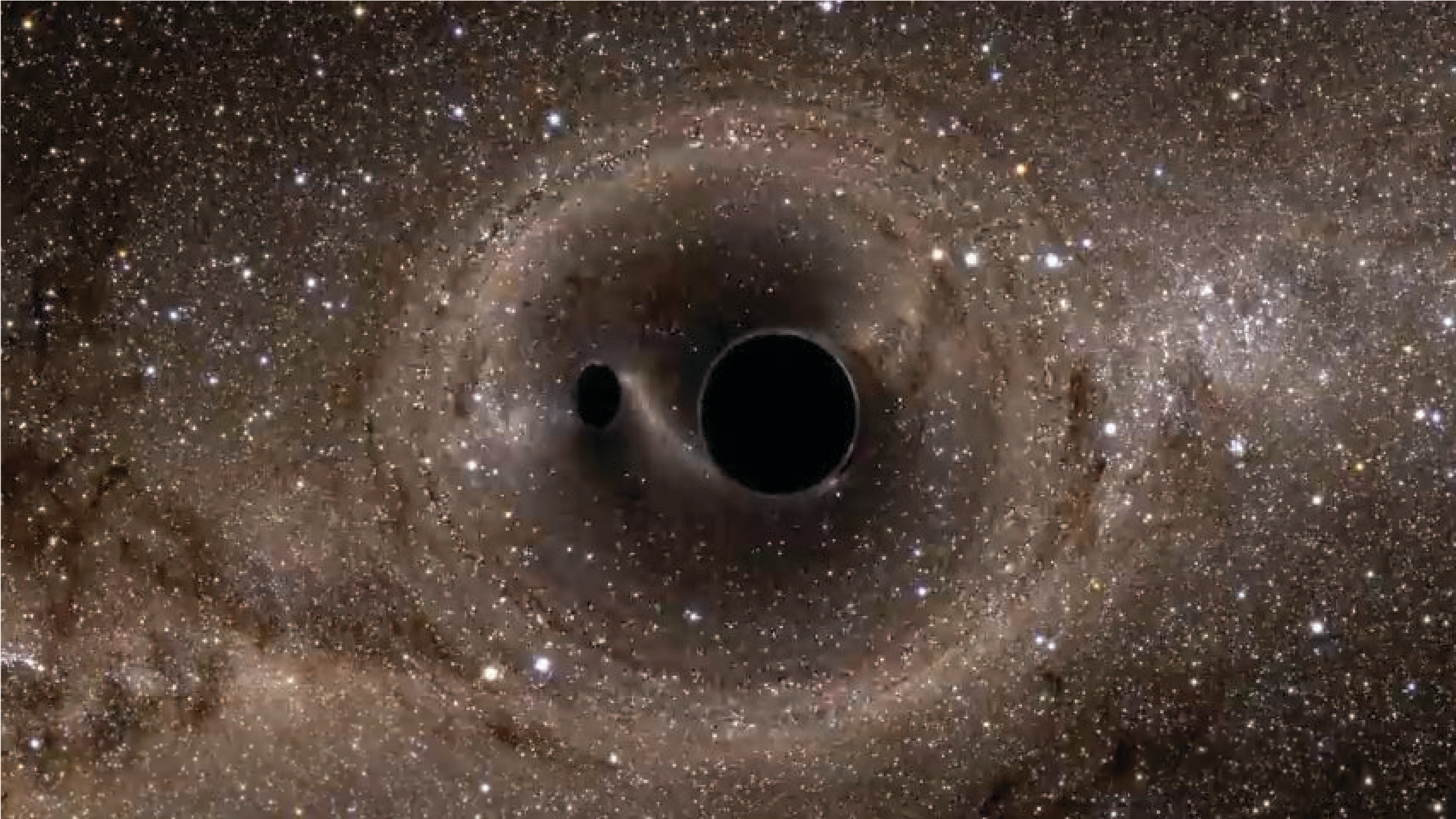
# 2017 Nobel Prize in Physics

Le più comuni sorgenti di onde gravitazionali sono sistemi binari compatti. Il momento in cui l'emissione è più intensa è quando le componenti del sistema si fondono tra loro.











# Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*\*

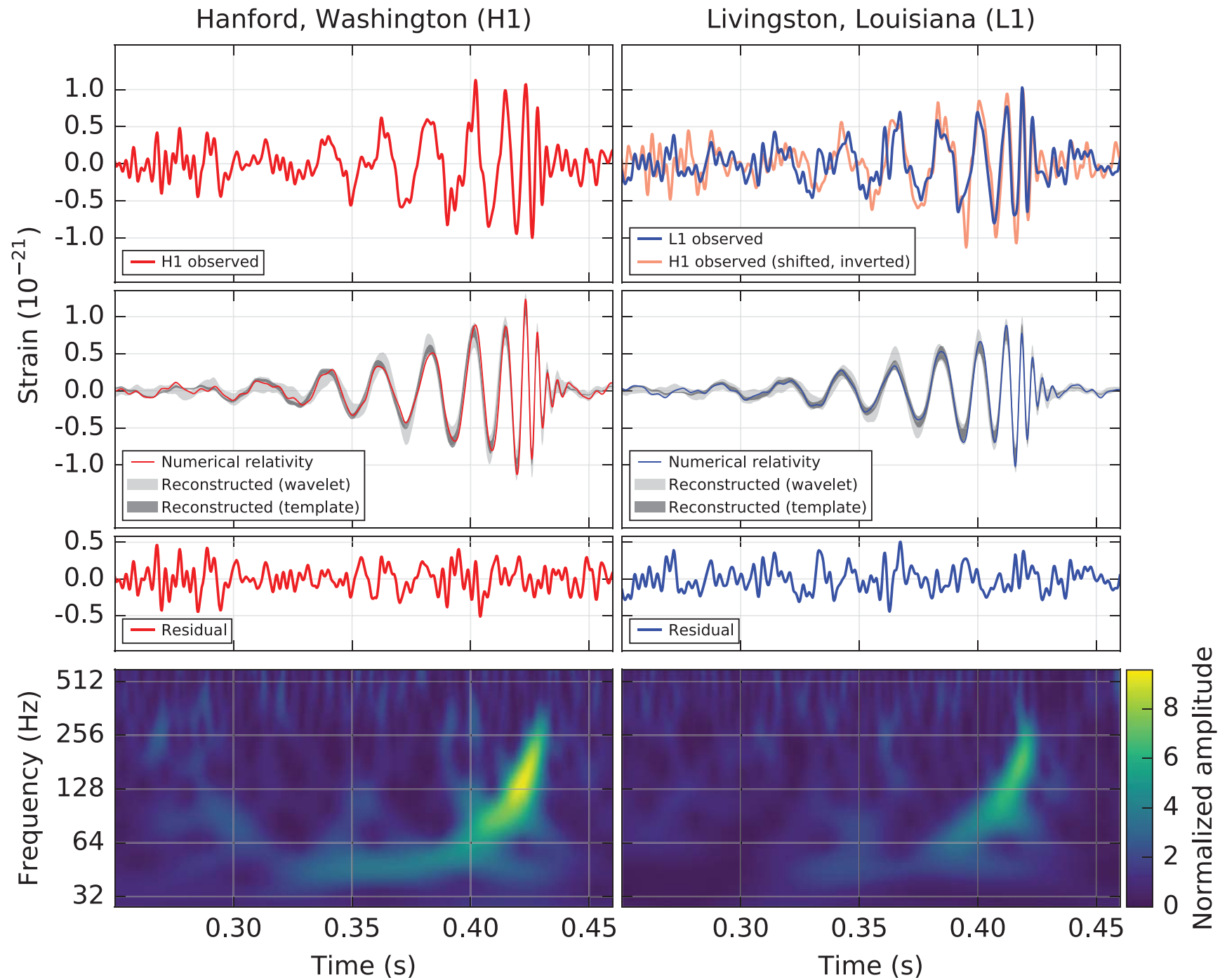
(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of  $1.0 \times 10^{-21}$ . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than  $5.1\sigma$ . The source lies at a luminosity distance of  $410_{-180}^{+160}$  Mpc corresponding to a redshift  $z = 0.09_{-0.04}^{+0.03}$ . In the source frame, the initial black hole masses are  $36_{-4}^{+5}M_{\odot}$  and  $29_{-4}^{+4}M_{\odot}$ , and the final black hole mass is  $62_{-4}^{+4}M_{\odot}$ , with  $3.0_{-0.5}^{+0.5}M_{\odot}c^2$  radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

DOI: [10.1103/PhysRevLett.116.061102](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102)

# GW150914



Quanto è grande il buco nero finale  
di GW190714?

$M \approx 60$  masse solari  
Diametro  $\approx 180$  km



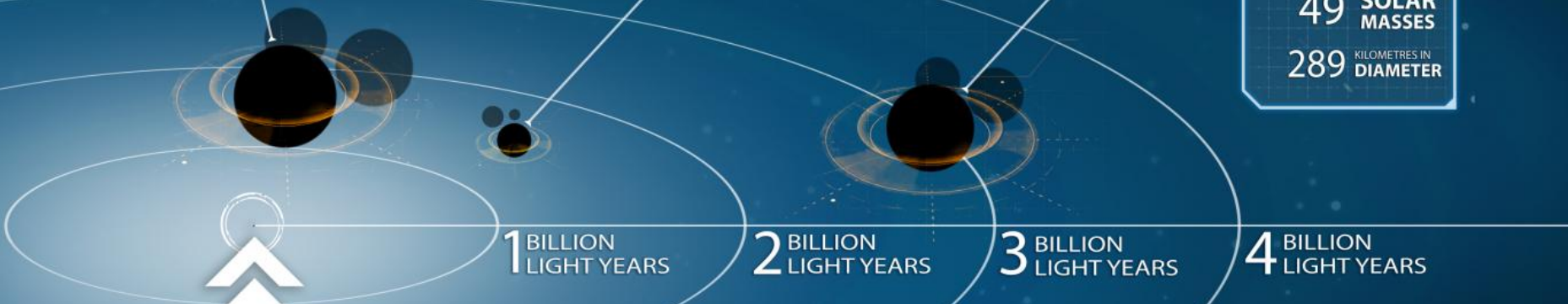


# LIGO'S **GRAVITATIONAL-WAVE** DETECTIONS

**[GW150914]**  
DISCOVERED:  
**14.09.2015**  
**1.3** BILLION  
LIGHT-YEARS  
AWAY  
**62 SOLAR  
MASSES**  
**366** KILOMETRES IN  
DIAMETER

**[GW151226]**  
DISCOVERED:  
**26.12.2015**  
**1.4** BILLION  
LIGHT-YEARS  
AWAY  
**21 SOLAR  
MASSES**  
**124** KILOMETRES IN  
DIAMETER

**[GW170104]**  
DISCOVERED:  
**04.01.2017**  
**3** BILLION  
LIGHT-YEARS  
AWAY  
**49 SOLAR  
MASSES**  
**289** KILOMETRES IN  
DIAMETER

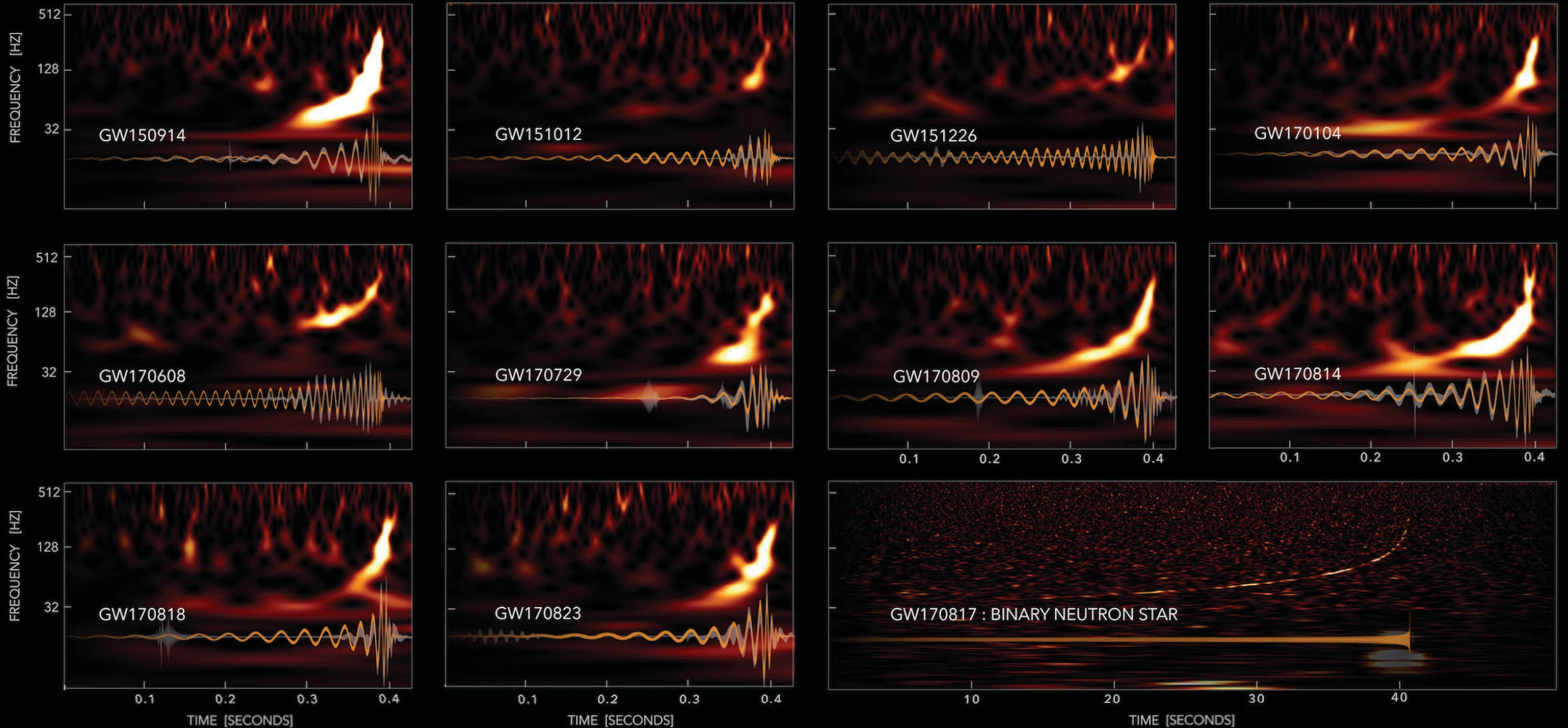


**YOU ARE  
HERE**

## DID YOU KNOW ?

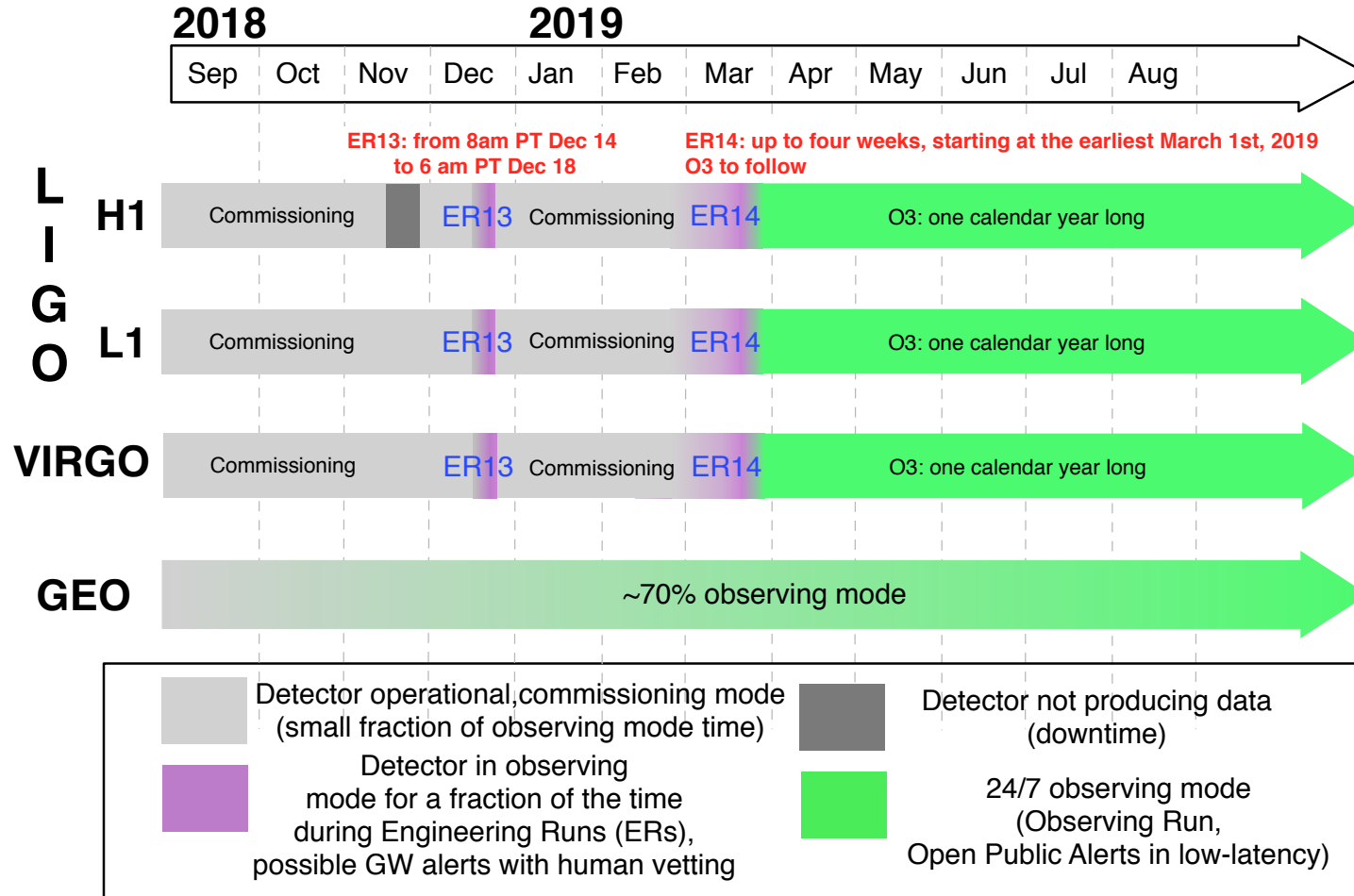
THE SOLAR MASS IS  
A STANDARD UNIT OF MASS  
IN ASTRONOMY  
IT IS EQUAL TO  
THE MASS OF THE SUN  
EQUAL TO APPROXIMATELY  
 **$1.99 \times 10^{30}$  KG**

# GRAVITATIONAL-WAVE TRANSIENT CATALOG-1



# Working schedule for O3

(Public document G1801056-v4, based on G1800889-v7)



# Il catalogo GWTC-2

Contiene 39 nuovi eventi osservati nella prima parte del terzo periodo osservativo.

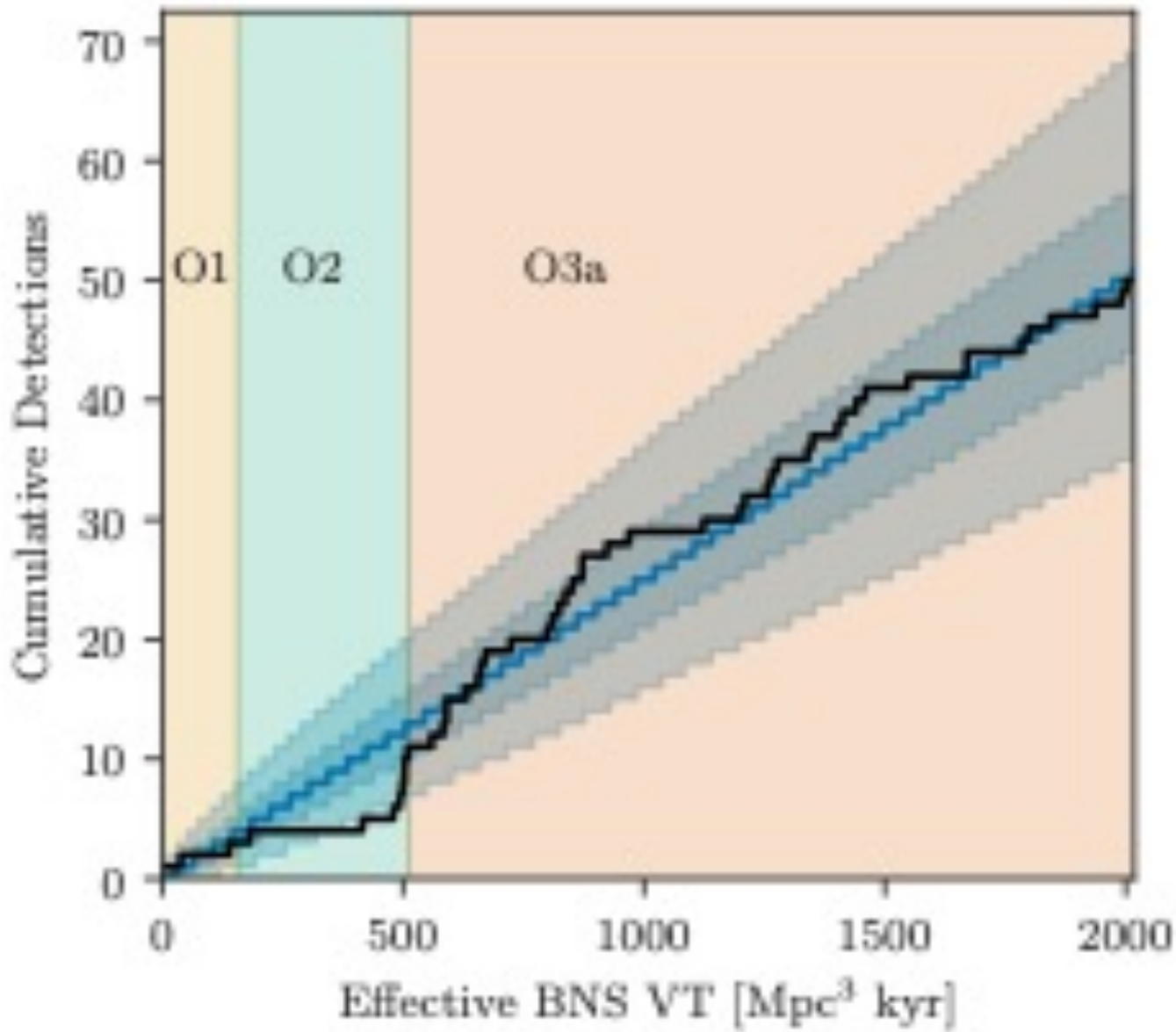
Reso pubblico a fine ottobre 2020.

Name	Inst.	cWB			GstLAL			PyCBC			PyCBC BBH		
		FAR (yr <sup>-1</sup> )	SNR*	$p_{\text{astro}}$	FAR (yr <sup>-1</sup> )	SNR	$p_{\text{astro}}$	FAR (yr <sup>-1</sup> )	SNR*	$p_{\text{astro}}$	FAR (yr <sup>-1</sup> )	SNR*	$p_{\text{astro}}$
GW190408.181802	HLV	$< 9.5 \times 10^{-4}$	14.8	$< 1.0 \times 10^{-5}$	14.7	1.00	$< 2.5 \times 10^{-5}$	13.5	1.00	$< 7.9 \times 10^{-5}$	13.6	1.00	
GW190412	HLV	$< 9.5 \times 10^{-4}$	19.7	$< 1.0 \times 10^{-5}$	18.9	1.00	$< 3.1 \times 10^{-5}$	17.9	1.00	$< 7.9 \times 10^{-5}$	17.8	1.00	
<b>GW190413.052954</b>	HLV	-	-	-	-	-	-	-	-	$7.2 \times 10^{-2}$	8.6	0.98	
<b>GW190413.134308</b>	HLV	-	-	$3.8 \times 10^{-1}$	10.0	0.95	-	-	-	$4.4 \times 10^{-2}$	9.0	0.98	
GW190421.213856	HL	$3.0 \times 10^{-1}$	9.3	$7.7 \times 10^{-4}$	10.6	1.00	$1.9 \times 10^0$	10.2	0.89	$6.6 \times 10^{-3}$	10.2	1.00	
<b>GW190424.180648</b>	L	-	-	$7.8 \times 10^{-1\dagger}$	10.0	0.91	-	-	-	-	-	-	
GW190425	LV	-	-	$7.5 \times 10^{-4\dagger}$	13.0	-	-	-	-	-	-	-	
GW190426.152155	HLV	-	-	$1.4 \times 10^0$	10.1	-	-	-	-	-	-	-	
GW190503.185404	HLV	$1.8 \times 10^{-3}$	11.5	$< 1.0 \times 10^{-5}$	12.1	1.00	$3.7 \times 10^{-2}$	12.2	1.00	$< 7.9 \times 10^{-5}$	12.2	1.00	
GW190512.180714	HLV	$8.8 \times 10^{-1}$	10.7	$< 1.0 \times 10^{-5}$	12.3	1.00	$3.8 \times 10^{-5}$	12.2	1.00	$< 5.7 \times 10^{-5}$	12.2	1.00	
GW190513.205428	HLV	-	-	$< 1.0 \times 10^{-5}$	12.3	1.00	$3.7 \times 10^{-4}$	11.8	1.00	$< 5.7 \times 10^{-5}$	11.9	1.00	
<b>GW190514.065416</b>	HL	-	-	-	-	-	-	-	-	$5.3 \times 10^{-1}$	8.3	0.96	
GW190517.055101	HLV	$6.5 \times 10^{-3}$	10.7	$9.6 \times 10^{-4}$	10.6	1.00	$1.8 \times 10^{-2}$	10.4	1.00	$< 5.7 \times 10^{-5}$	10.2	1.00	
GW190519.153544	HLV	$3.1 \times 10^{-4}$	14.0	$< 1.0 \times 10^{-5}$	12.0	1.00	$< 1.8 \times 10^{-5}$	13.0	1.00	$< 5.7 \times 10^{-5}$	13.0	1.00	
GW190521	HLV	$2.0 \times 10^{-4}$	14.4	$1.2 \times 10^{-3}$	14.7	1.00	$1.1 \times 10^0$	12.6	0.93	-	-	-	
GW190521.074359	HL	$< 1.0 \times 10^{-4}$	24.7	$< 1.0 \times 10^{-5}$	24.4	1.00	$< 1.8 \times 10^{-5}$	24.0	1.00	$< 5.7 \times 10^{-5}$	24.0	1.00	
<b>GW190527.092055</b>	HL	-	-	$6.2 \times 10^{-2}$	8.9	0.99	-	-	-	-	-	-	
GW190602.175927	HLV	$1.5 \times 10^{-2}$	11.1	$1.1 \times 10^{-5}$	12.1	1.00	-	-	-	$1.5 \times 10^{-2}$	11.4	1.00	
<b>GW190620.030421</b>	LV	-	-	$2.9 \times 10^{-3\dagger}$	10.9	1.00	-	-	-	-	-	-	
GW190630.185205	LV	-	-	$< 1.0 \times 10^{-5}$	15.6	1.00	-	-	-	-	-	-	
GW190701.203306	HLV	$5.5 \times 10^{-1}$	10.2	$1.1 \times 10^{-2}$	11.6	1.00	-	-	-	-	-	-	
GW190706.222641	HLV	$< 1.0 \times 10^{-3}$	12.7	$< 1.0 \times 10^{-5}$	12.3	1.00	$6.7 \times 10^{-5}$	11.7	1.00	$< 4.6 \times 10^{-5}$	12.3	1.00	
GW190707.093326	HL	-	-	$< 1.0 \times 10^{-5}$	13.0	1.00	$< 1.0 \times 10^{-5}$	12.8	1.00	$< 4.6 \times 10^{-5}$	12.8	1.00	
<b>GW190708.232457</b>	LV	-	-	$2.8 \times 10^{-5\dagger}$	13.1	1.00	-	-	-	-	-	-	
<b>GW190719.215514</b>	HL	-	-	-	-	-	-	-	-	$1.6 \times 10^0$	8.0	0.82	
GW190720.000836	HLV	-	-	$< 1.0 \times 10^{-5}$	11.7	1.00	$< 2.0 \times 10^{-5}$	10.6	1.00	$< 3.7 \times 10^{-5}$	10.5	1.00	
GW190727.060333	HLV	$8.8 \times 10^{-2}$	11.4	$< 1.0 \times 10^{-5}$	12.3	1.00	$3.5 \times 10^{-3}$	11.5	1.00	$< 3.7 \times 10^{-5}$	11.8	1.00	
GW190728.064510	HLV	-	-	$< 1.0 \times 10^{-5}$	13.6	1.00	$< 1.6 \times 10^{-5}$	13.4	1.00	$< 3.7 \times 10^{-5}$	13.4	1.00	
<b>GW190731.140936</b>	HL	-	-	$2.1 \times 10^{-1}$	8.5	0.97	-	-	-	$2.8 \times 10^{-1}$	8.2	0.96	
<b>GW190803.022701</b>	HLV	-	-	$3.2 \times 10^{-2}$	9.0	0.99	-	-	-	$2.7 \times 10^{-2}$	8.6	0.99	
GW190814	LV	-	-	$< 1.0 \times 10^{-5}$	22.2	1.00	-	-	-	-	-	-	
GW190828.063405	HLV	$< 9.6 \times 10^{-4}$	16.6	$< 1.0 \times 10^{-5}$	16.0	1.00	$< 1.5 \times 10^{-5}$	15.3	1.00	$< 3.3 \times 10^{-5}$	15.3	1.00	
GW190828.065509	HLV	-	-	$< 1.0 \times 10^{-5}$	11.1	1.00	$5.8 \times 10^{-5}$	10.8	1.00	$< 3.3 \times 10^{-5}$	10.8	1.00	
<b>GW190909.114149</b>	HL	-	-	$1.1 \times 10^0$	8.5	0.89	-	-	-	-	-	-	
<b>GW190910.112807</b>	LV	-	-	$1.9 \times 10^{-5\dagger}$	13.4	1.00	-	-	-	-	-	-	
GW190915.235702	HLV	$< 1.0 \times 10^{-3}$	12.3	$< 1.0 \times 10^{-5}$	13.1	1.00	$8.6 \times 10^{-4}$	13.0	1.00	$< 3.3 \times 10^{-5}$	12.7	1.00	
GW190924.021846	HLV	-	-	$< 1.0 \times 10^{-5}$	13.2	1.00	$< 6.3 \times 10^{-5}$	12.5	1.00	$< 3.3 \times 10^{-5}$	12.4	1.00	
<b>GW190929.012149</b>	HLV	-	-	$2.0 \times 10^{-2}$	9.9	1.00	-	-	-	-	-	-	
GW190930.133541	HL	-	-	$5.8 \times 10^{-1}$	10.0	0.92	$3.4 \times 10^{-2}$	9.7	1.00	$3.3 \times 10^{-2}$	9.8	0.99	



LIGO  
Scientific  
Collaboration

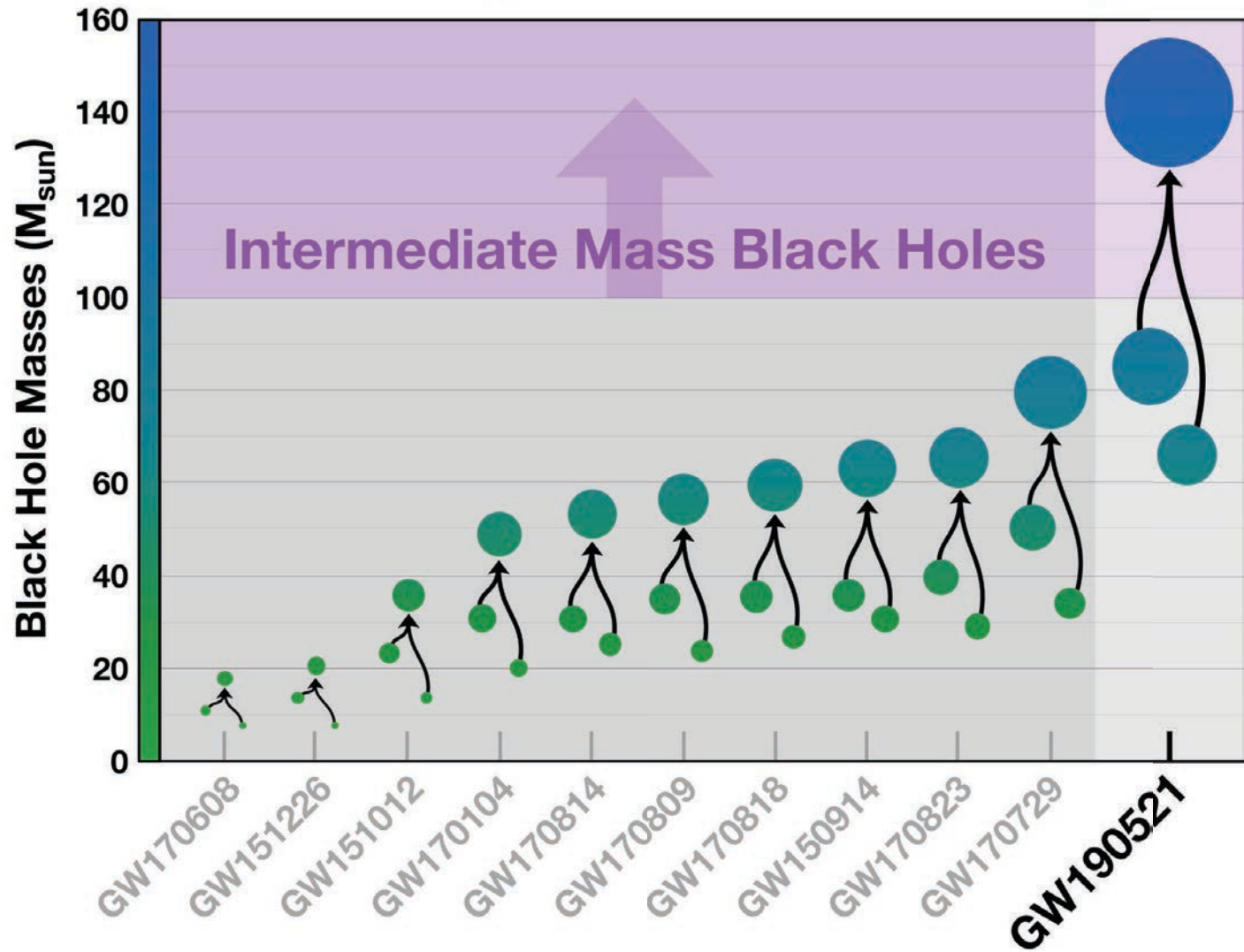




LIGO  
Scientific  
Collaboration

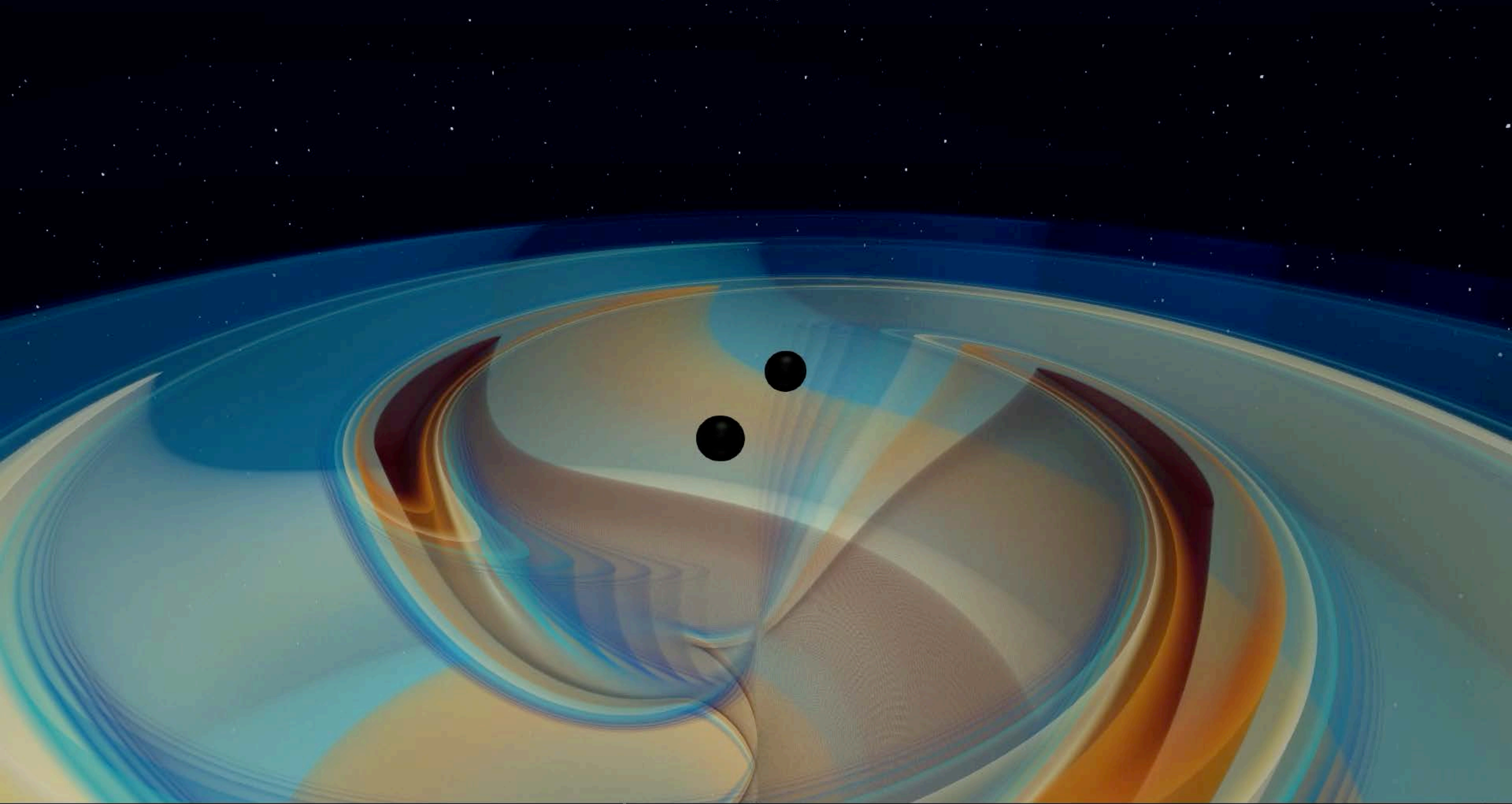


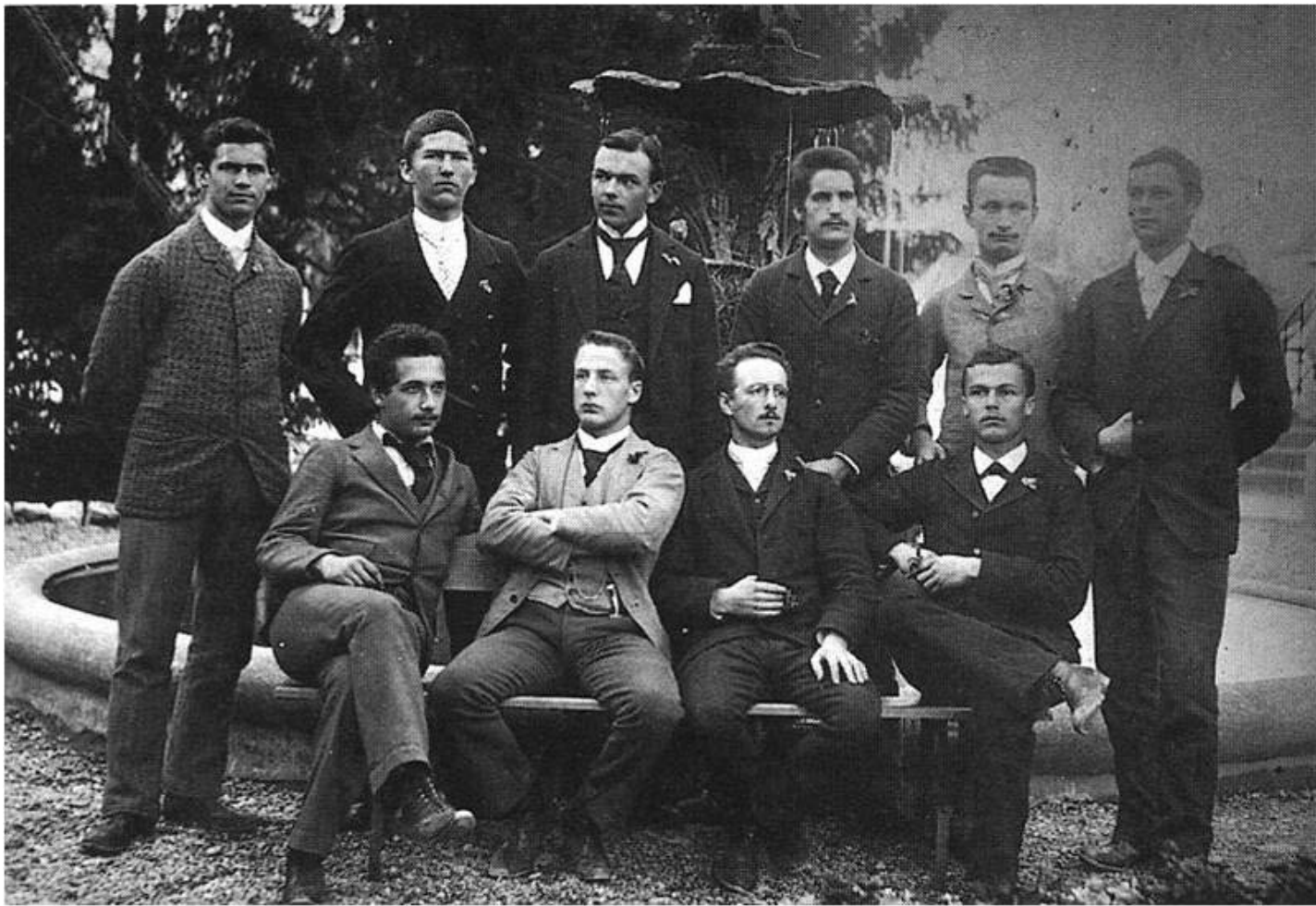
# LIGO-Virgo Black Hole Mergers



LIGO  
Scientific  
Collaboration







Il giovane Einstein (19 anni) con la sua classe ad Aarau (autunno 1896)

Group picture of the graduating class of the canton school Aarau. Standing, from the left.: Adolf Lüthy; Hans Frösch; Karl Walter; Ernst Hunziker; Eduard Haury; Emil Ott; Seated, from the left: Albert Einstein; Cäsar Hofer; Oskar Schmidt; Guido Müller)



LIGO  
Scientific  
Collaboration





