Le Onde Gravitazionali

Marco G. Giammarchi
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Via Celoria 16 – 20133 Milano (Italy)
marco.giammarchi@mi.infn.it
http://pcgiammarchi.mi.infn.it/giammarchi/

- La Gravità di Newton

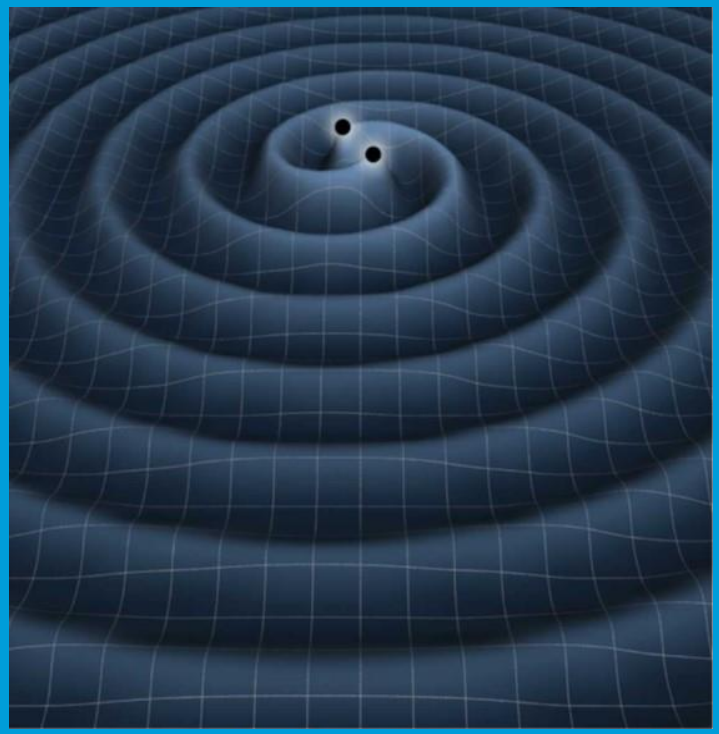
(Una grande teoria classica)

- La Gravità di Einstein

(Relatività di uno spazio e un tempo dinamici)

- Le Onde Gravitazionali

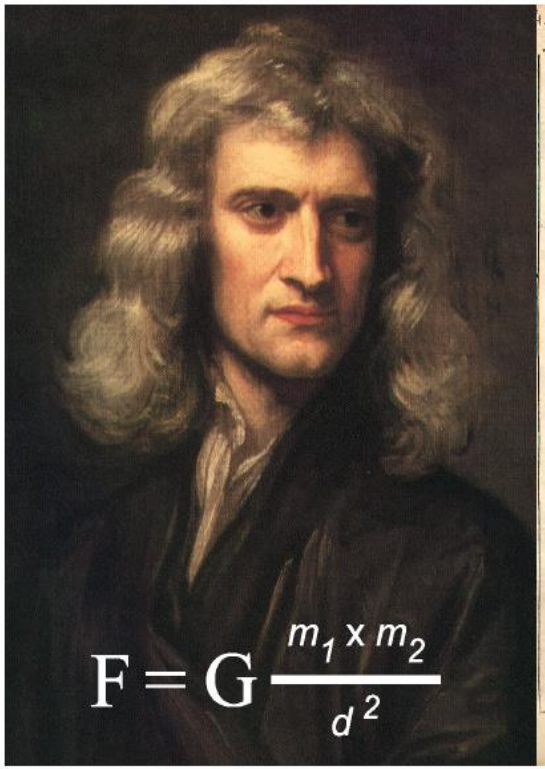
(Il successo di un paradigma)

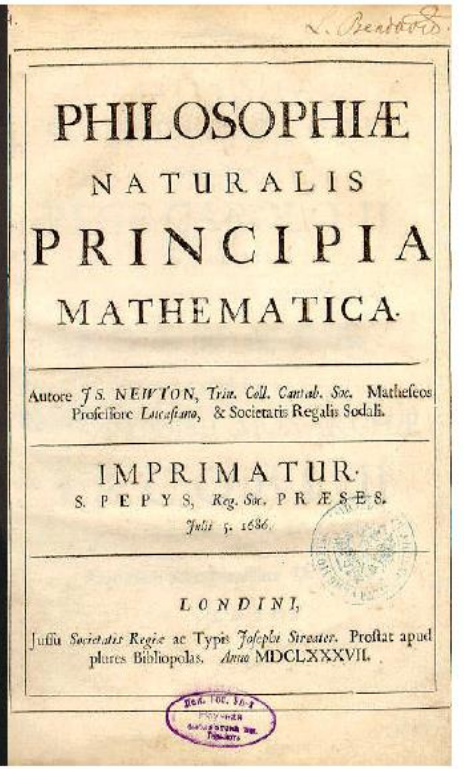


1. La Gravità di Newton

La Gravitazione Universale

- **Risolve gran parte dei fenomeni osservati a Terra e nel Cielo**
  - » **L'orbita dei pianeti e delle comete**
  - » **La cause delle maree**
  - » **Il moto della Luna e la perturbazione dovuta alla Gravita' del Sole**
- **Giunge ad una visione unitaria del lavoro di Galileo Copernico e Keplero.**




PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA

Autore *Is. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc.* Matheseos Professore *Lucasiano*, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR
S. PEPYS, *Reg. Soc.* PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Juſſu *Societatis Regiæ* ac Typis *Joſephi Streater*. Proſtat apud plures Bibliopolas. *Anno* MDCLXXXVII.

La Gravità: una forza «diversa»

La Relatività Generale è una teoria della Gravitazione che rispetta il principio di equivalenza (Albert Einstein, 1915).

Campo E
(in un campo elettrico)

$$F = qE$$

$$F = ma$$

$$qE = ma$$

$$a = \frac{qE}{m}$$

Il moto dipende da come è fatta la particella

Campo G
(in un campo g)

$$F = mg$$

$$F = ma$$

$$mg = ma$$

$$a = g$$

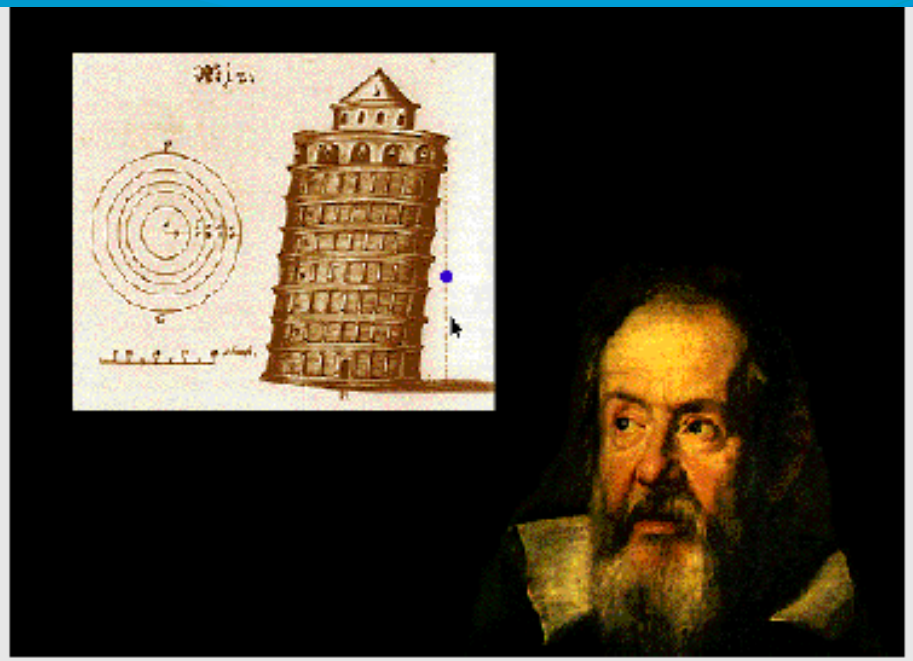
Il moto NON dipende da come è fatta la particella

Immaginiamo una particella m,q che si muova in un campo elettrico o uno gravitazionale

Ma se la gravitazione non dipende da nessuna caratteristica del corpo allora essa è una proprietà dello spaziotempo.

Teoria geometrica della gravità. Curvatura dello spaziotempo

Inerzia e Gravitazione: il principio di Equivalenza



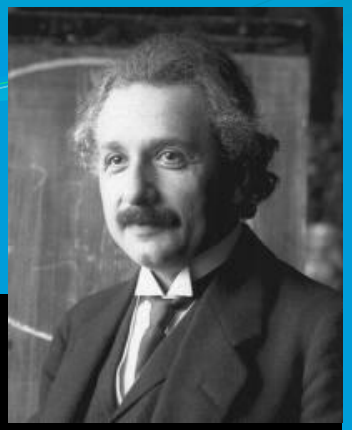
- ***Massa Inerziale*** * **Accelerazione**

=

Massa Gravitazionale * **Campo d'attrazione Gravitazionale**

- ***L'eguaglianza tra Massa Inerziale e Massa Gravitazionale fa si che tutti i corpi cadano con la stessa accelerazione, indipendentemente dalla loro natura***

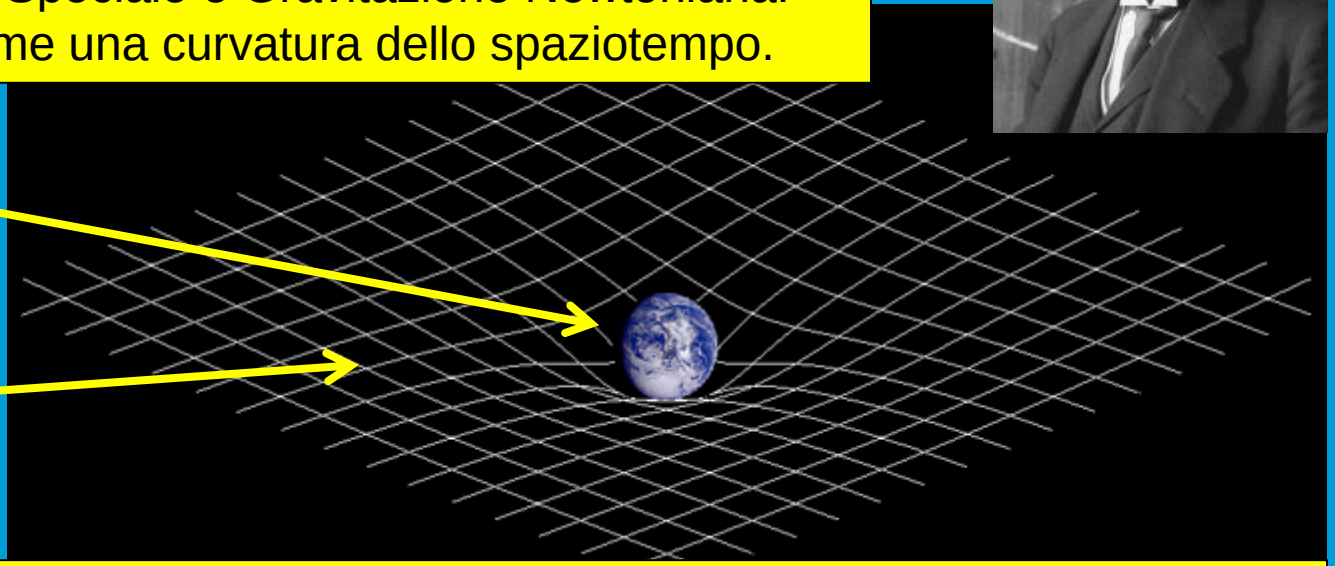
2. La Gravità di Einstein



Relatività Generale: una teoria geometrica della Gravità proposta da Albert Einstein nel 1915.
Comprende Relatività Speciale e Gravitazione Newtoniana.
Descrive la gravità come una curvatura dello spaziotempo.

Massa
Energia

Rappresentazione dello spaziotempo



La curvatura dello spaziotempo è correlata a energia/momento di materia e radiazione. Questa correlazione è data dalle Equazioni di Einstein

Tensore di Einstein

Tensore Energia-Momento

Tensore metrico

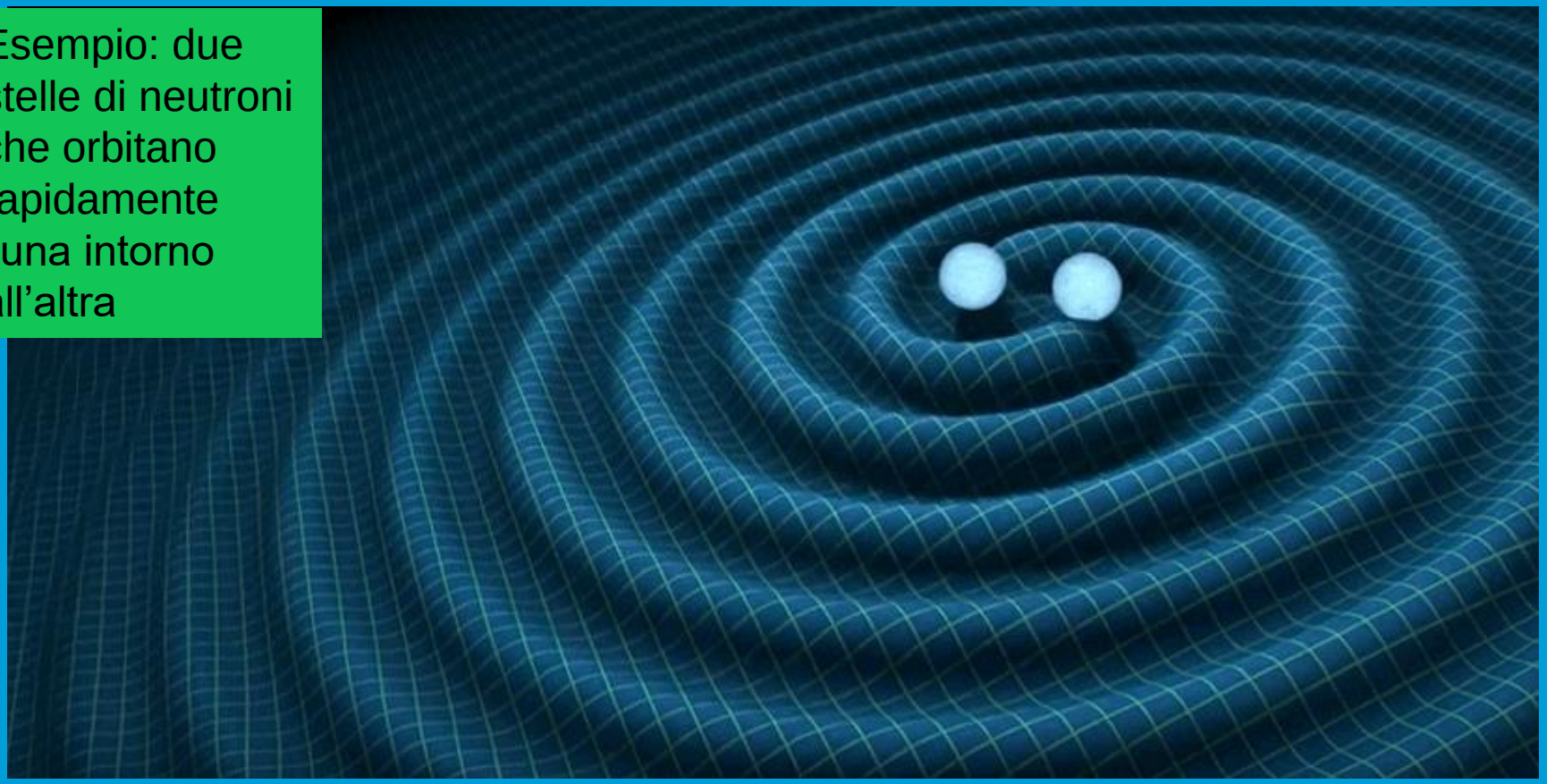
$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

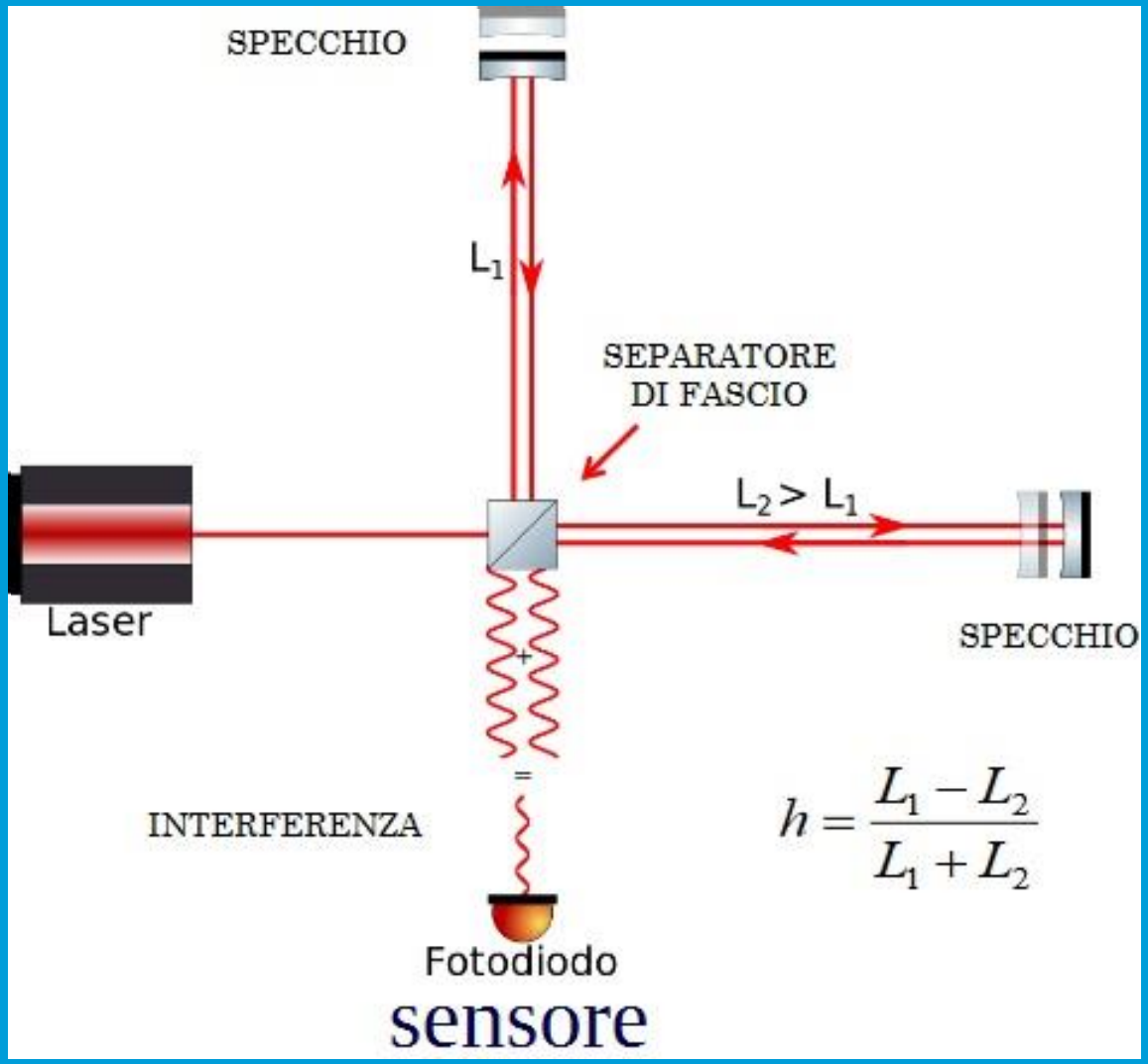
$$G_{\mu\nu} = G_{\mu\nu}(\partial_\theta \partial_\varepsilon g_{\alpha\beta})$$

3. Le Onde Gravitazionali

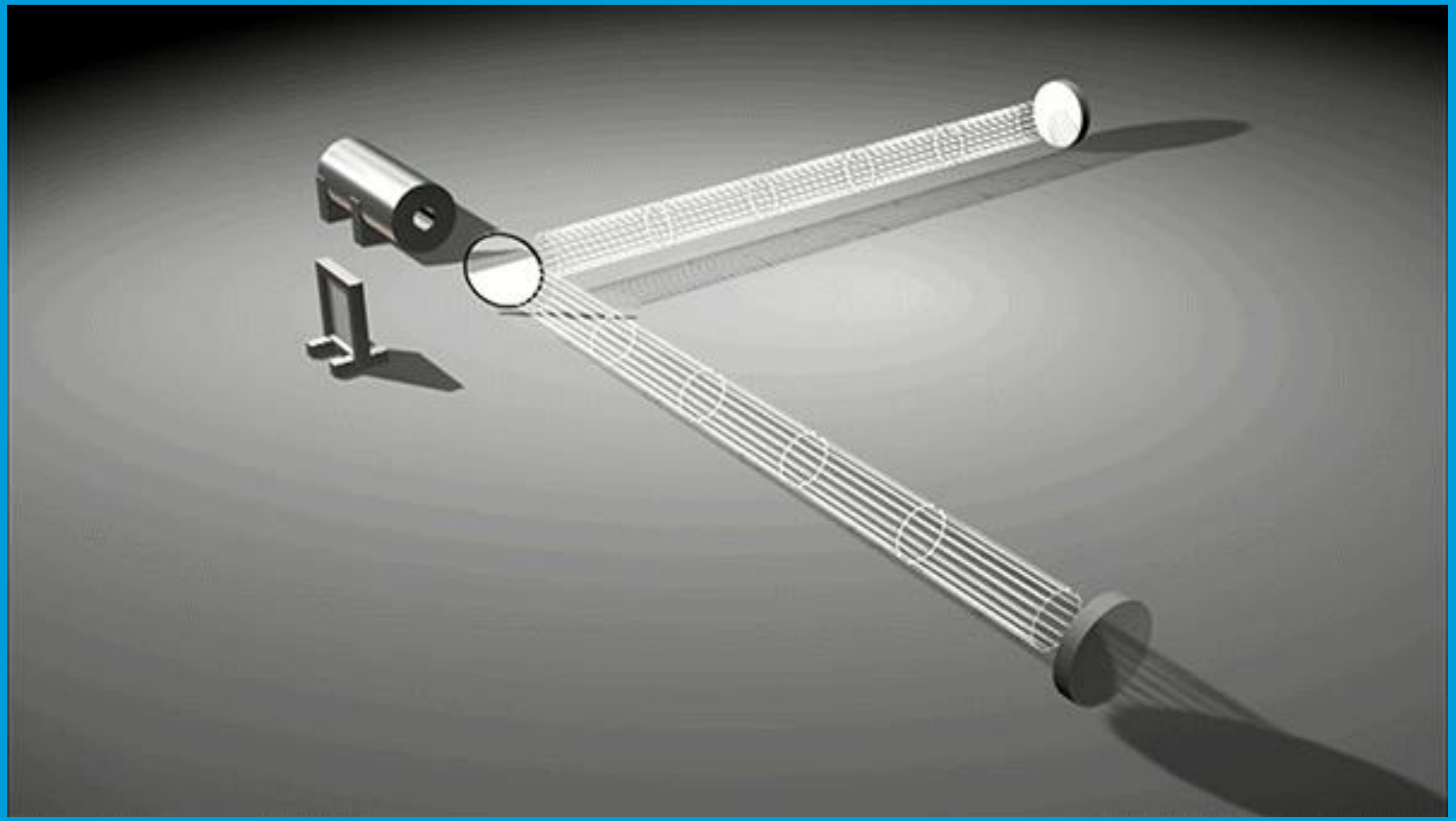
Perturbazioni dello spaziotempo dovute al movimento delle masse (energie). Si propagano alla velocità della luce.

Esempio: due stelle di neutroni che orbitano rapidamente l'una intorno all'altra




SPECCHIO
L1
SEPARATORE
DI FASCIO
L2 > L1
Laser
SPECCHIO
INTERFERENZA
Fotodiodo
sensore
$h = \frac{L_1 - L_2}{L_1 + L_2}$

Al passaggio di un’Onda Gravitazionale :

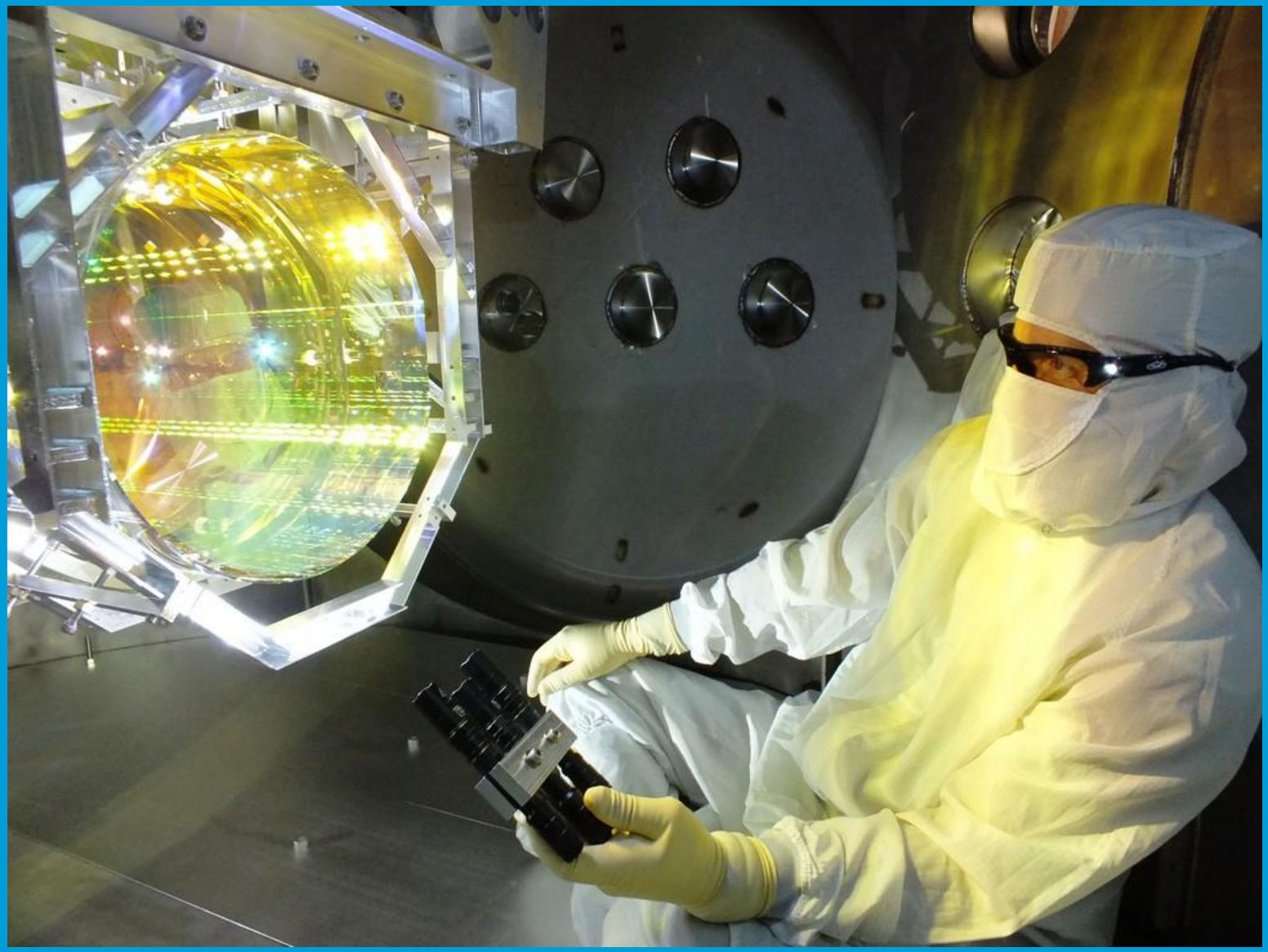


EGO - Virgo

L’Interferometro italo-francese VIRGO (Cascina, Pisa) per la rivelazione delle Onde Gravitazionali

Un interferometro gravitazionale è un’opera d’arte raffinata :

Gli specchi dell’interferometro gravitazionale :

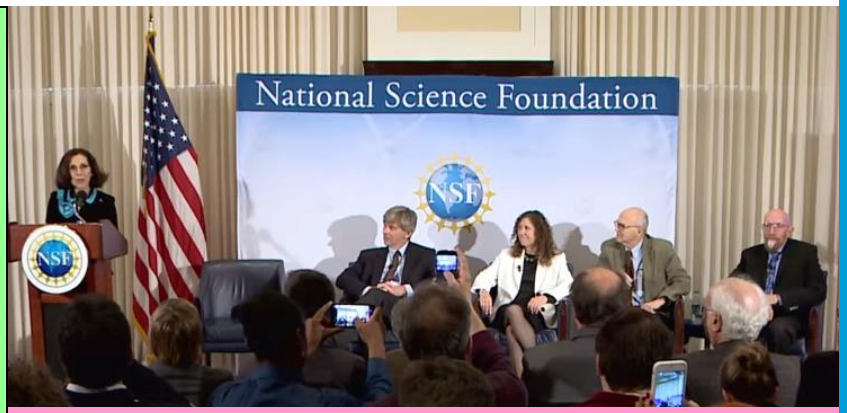


PRL 116, 061102 (2016) Selected for a Viewpoint in *Physics* PHYSICAL REVIEW LETTERS week ending 12 FEBRUARY 2016

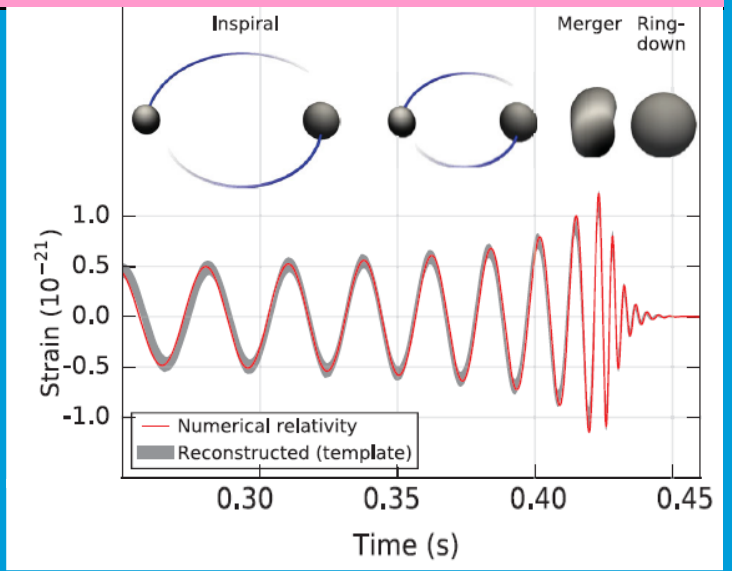
Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

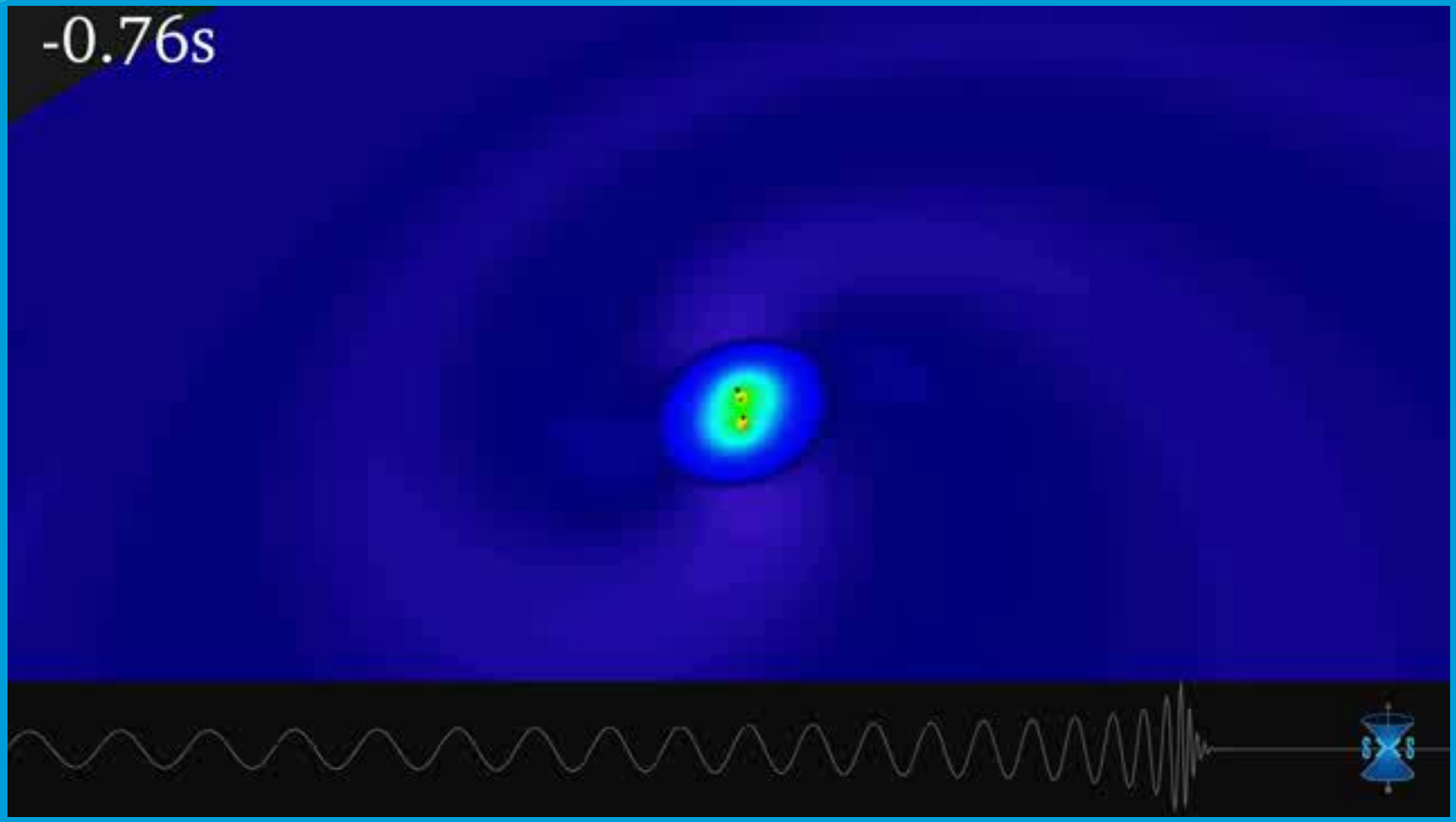
B. P. Abbott *et al.**
(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

- I rivelatori di LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) hanno osservato onde gravitazionali dalla coalescenza di due buchi neri di masse stellari.
- La forma d'onda rivelata è in accordo con le predizioni della relatività generale per la coalescenza di una coppia di buchi neri e l'assestamento del buco nero risultante.
- Questa osservazione dimostra l'esistenza di sistemi binari di buchi neri di masse stellari.
- Questa è la prima rivelazione diretta di onde gravitazionali e la prima osservazione di un sistema binario di buchi neri coalescenti.



Inizio della storia:11 Febbraio 2016

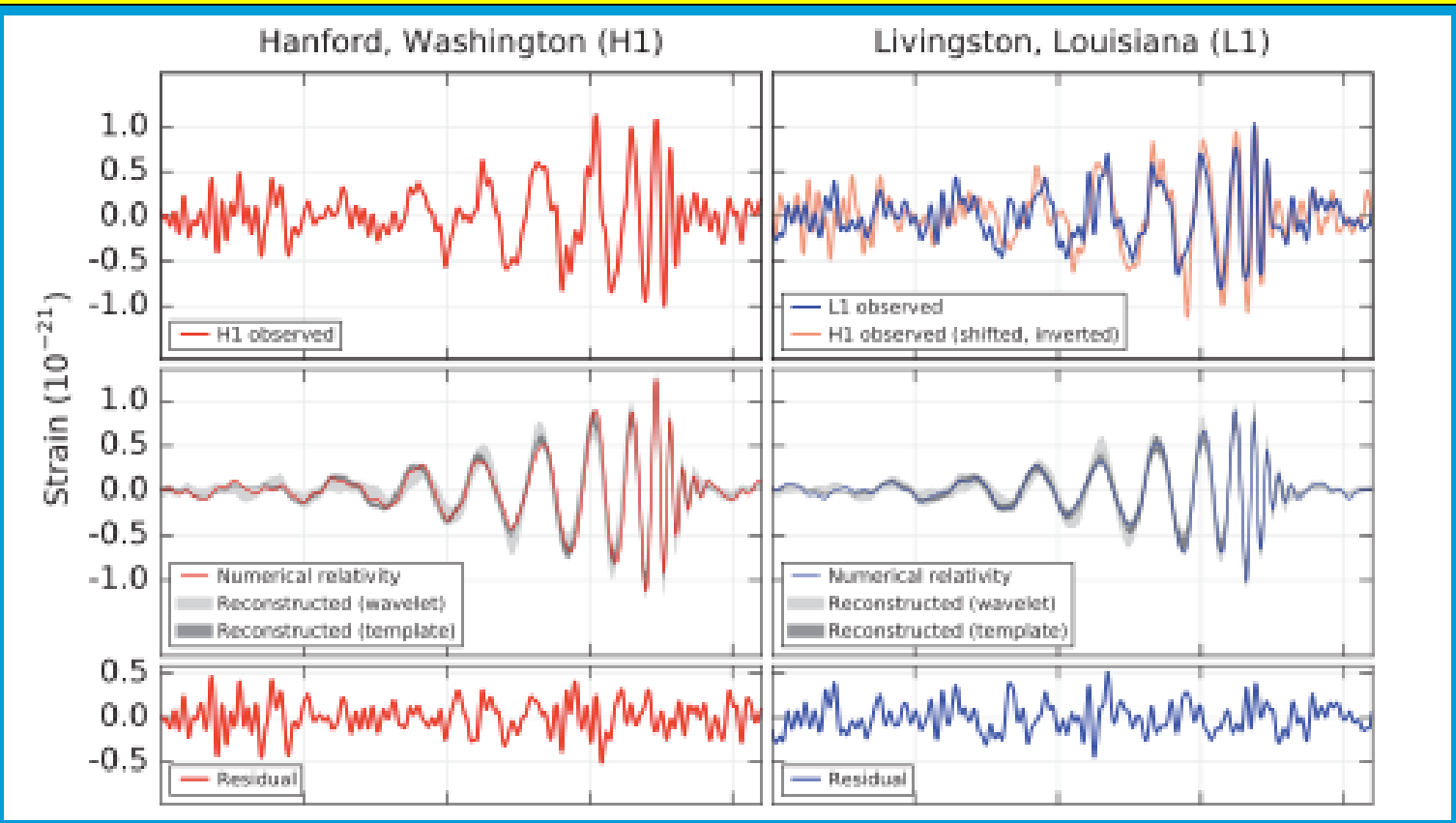



-0.76s

14 Settembre 2015: gli osservatori di Hanford e Livingston osservano il segnale coincidente (poi battezzato) GW150914.

Tale segnale è completamente incompatibile con il fondo, perfettamente in tempo tra Hanford e Livingston (entro i 10 ms).

Tale segnale dura in tutto 0.5 s ed è in perfetto accordo con quanto previsto per il collasso reciproco di due buchi neri.



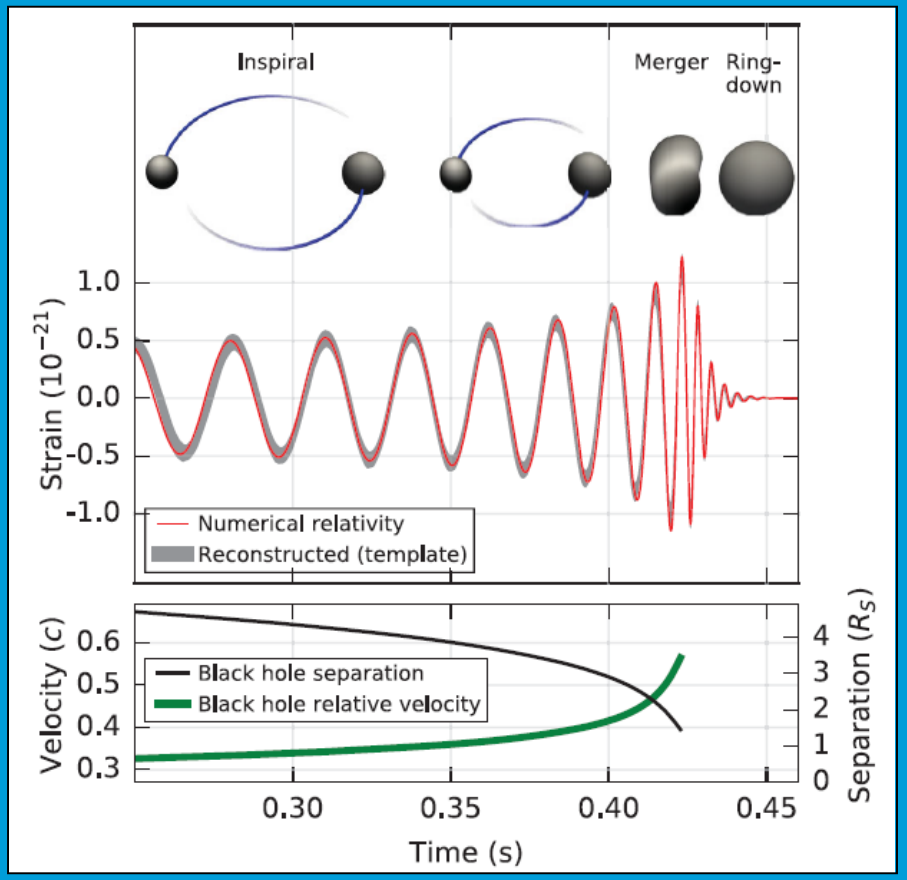
Il segnale osservato può essere generato solo dal collasso reciproco di due buchi neri di circa 36 e 29 masse solari.

Il buco nero risultato (di Kerr) ha una massa di 62 masse solari circa. Tre masse solari circa sono sparite! Trasformate in energia, vibrazione dello spaziotempo!

Physical Review Letters 116 (2016) 061102 è un articolo che entra nella storia.

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



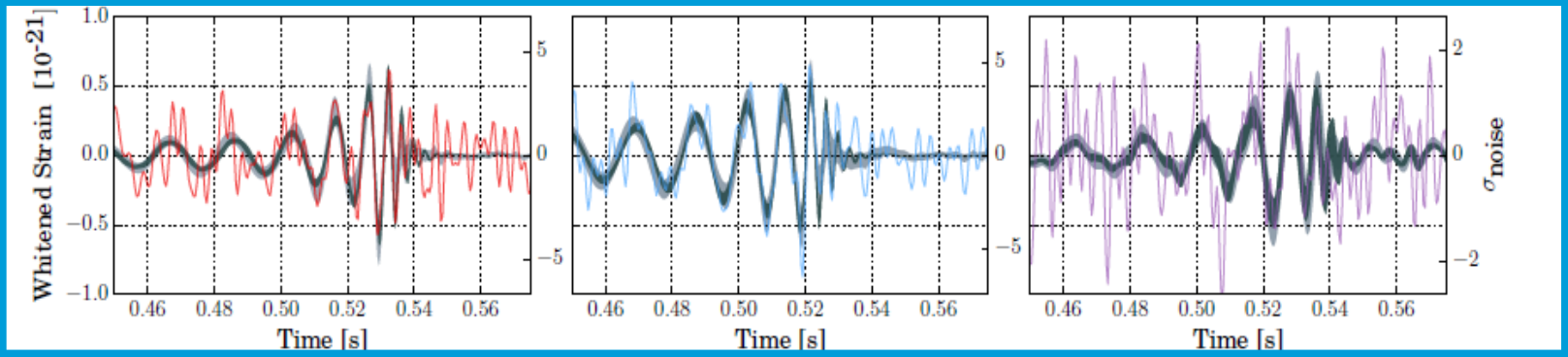
L'interferometro di Virgo a Cascina (Pisa), entra in funzione nell'Agosto 2017, e viene immediatamente osservato GW170814. E' il primo collasso BH-BH (due buchi neri) visto in simultanea da 3 interferometri.

GW170814 : A three-detector observation of gravitational waves from a binary black hole coalescence

The LIGO Scientific Collaboration and The Virgo Collaboration

On August 14, 2017 at 10:30:43 UTC, the Advanced Virgo detector and the two Advanced LIGO detectors coherently observed a transient gravitational-wave signal produced by the coalescence of two stellar mass black holes, with a false-alarm-rate of $\lesssim 1$ in 27000 years. The signal was observed with a three-detector network matched-filter signal-to-noise ratio of 18. The inferred masses of the initial black holes are $30.5^{+5.7}_{-3.0}\,M_\odot$ and $25.3^{+2.8}_{-4.2}\,M_\odot$ (at the 90% credible level). The luminosity distance of the source is 540^{+130}_{-210} Mpc, corresponding to a redshift of $z = 0.11^{+0.03}_{-0.04}$. A network of three detectors improves the

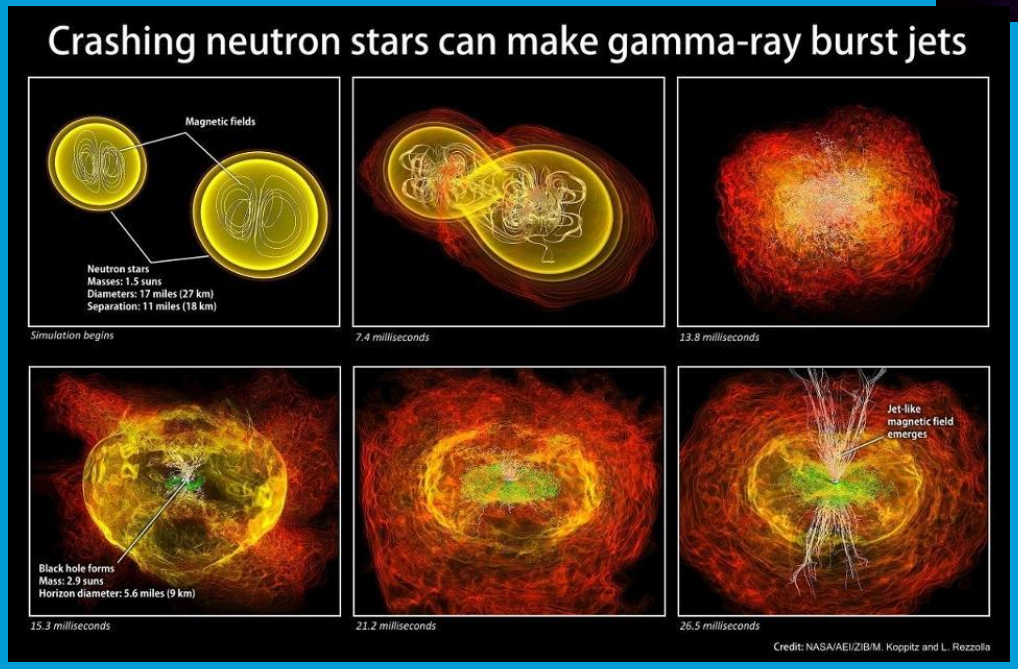
GW170814 : Black Hole-Black Hole56 Masse Solari

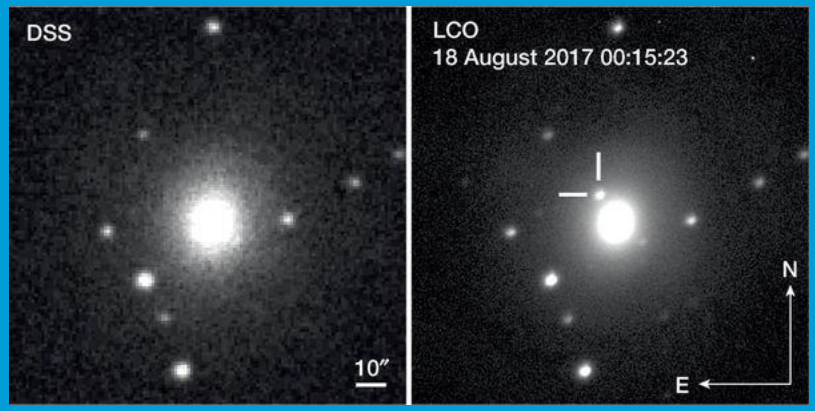


Non solo Black Hole – Black Hole Anche due Stelle di Neutroni ! (GW170817 and GRB170817A)

Rivelazione simultanea di :

- Onde Gravitazionali
- Raggi Gamma (Gamma Ray Burst)
- A seguire rivelazione nell'ottico, nei raggi X, nel Radio.

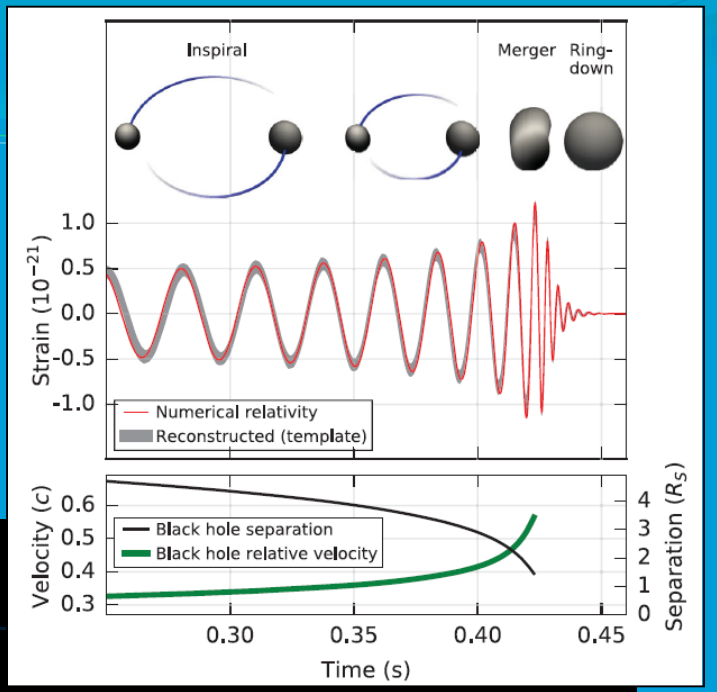


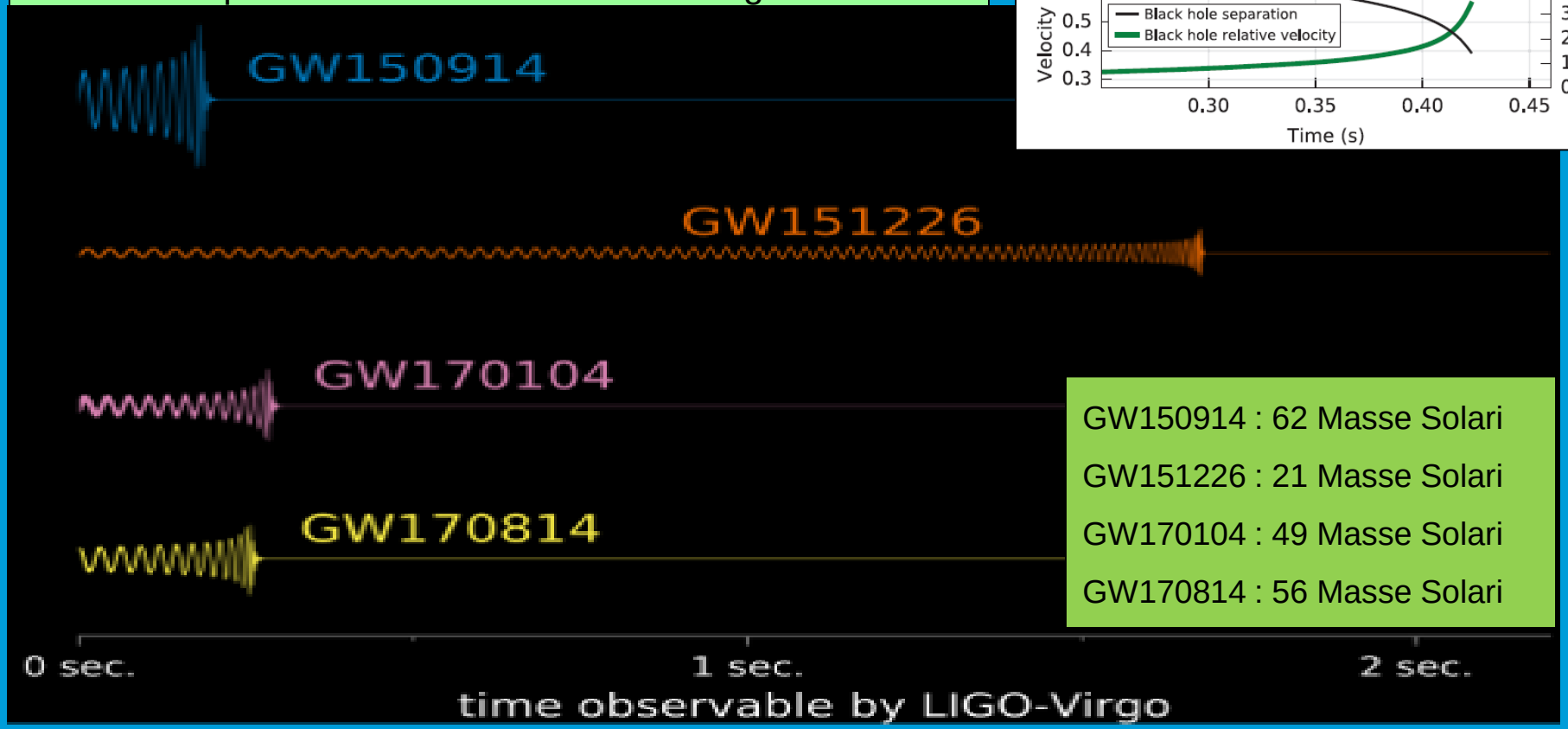


Vista la sorgente in NGC4993, a 130 milioni di anni luce di distanza

Onde Gravitazionali

- I rivelatori di LIGO e Virgo hanno osservato onde gravitazionali dalla fine del 2015.
- Le forma d'onda rivelate sono in accordo con le predizioni della relatività generale.
- Queste osservazioni dimostrano l'esistenza di sistemi binari di buchi neri di masse stellari
- Sono le prime rivelazioni dirette di onde gravitazionali.





GW150914 : 62 Masse Solari

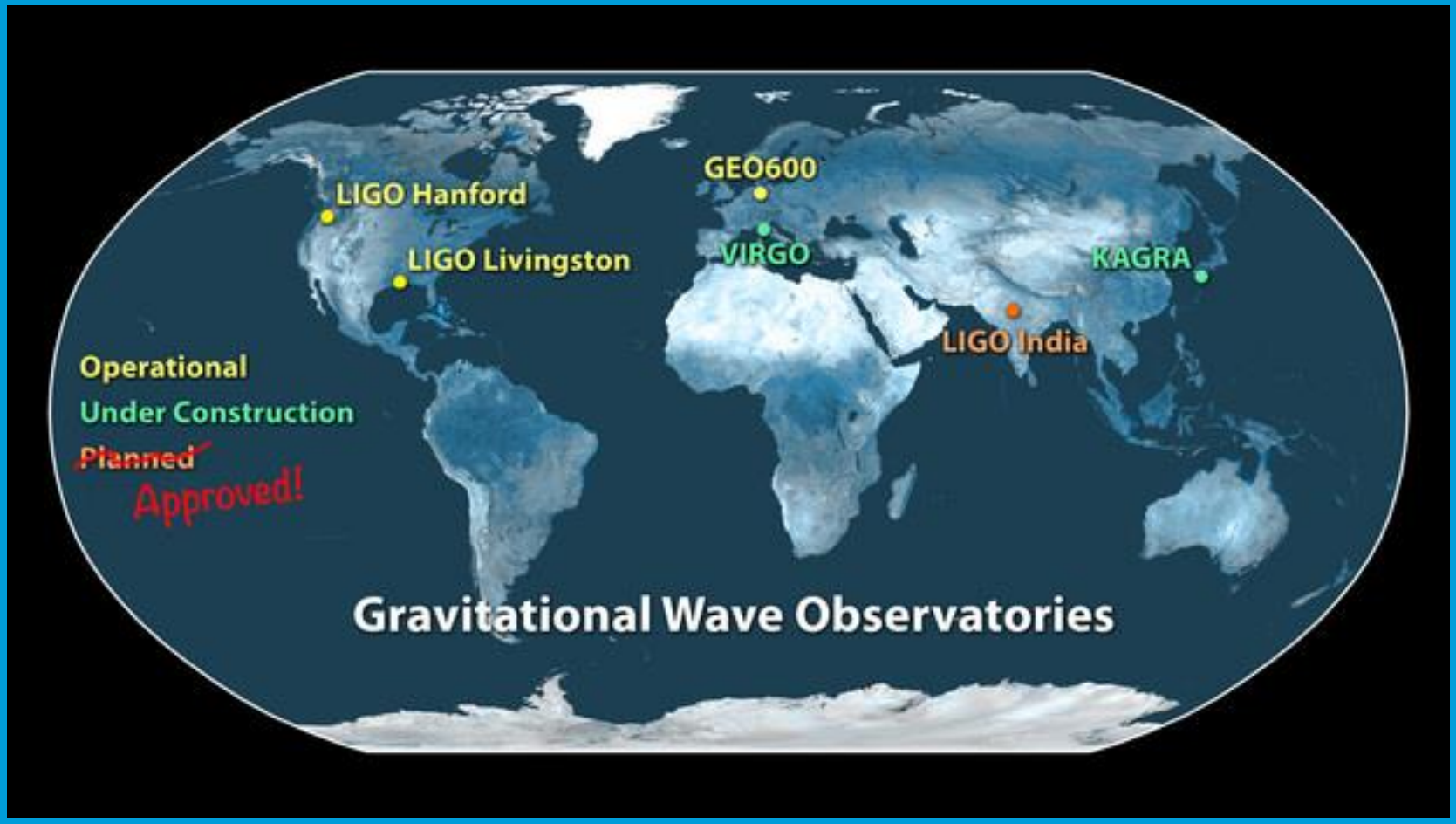
GW151226 : 21 Masse Solari

GW170104 : 49 Masse Solari

GW170814 : 56 Masse Solari

Onde Gravitazionali dopo il 2017

GraceDb: un candidato ogni due settimane circa



Una rete internazionale di interferometri, in crescita

Grazie per l'attenzione