

Onde Gravitazionali: messaggeri dallo spazio profondo

Viviana Fafone

Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" e
INFN

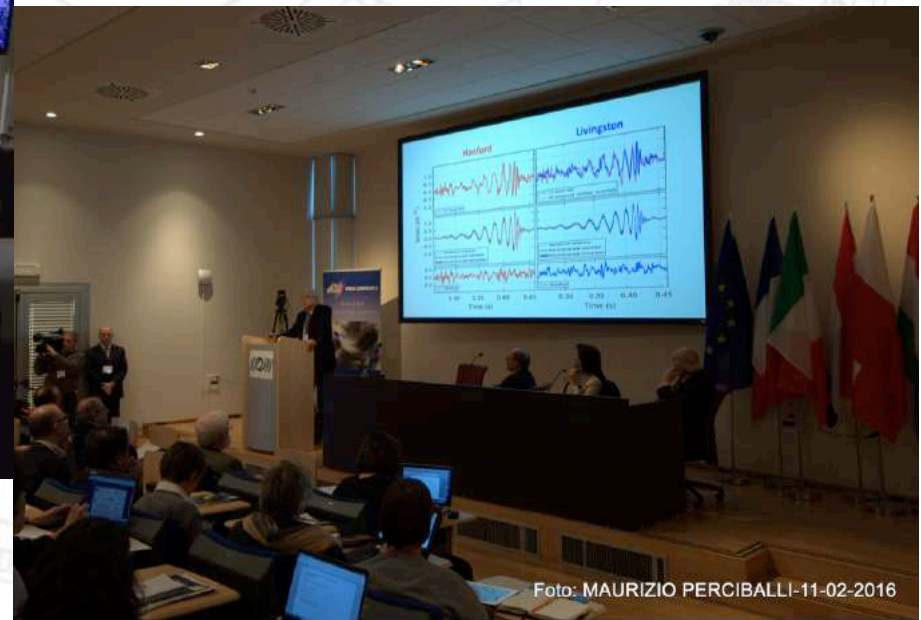
La scoperta delle onde gravitazionali

14 Settembre 2015 alle 11:50:45 ora Italiana

Il giorno 11 febbraio 2016, le Collaborazioni LIGO e VIRGO, durante due conferenze stampa in contemporanea a Washington DC e a Cascina (Pisa), annunciano la prima rivelazione diretta di un segnale di onde gravitazionali.



WASHINGTON DC



CASCINA

Foto: MAURIZIO PERCIBALLI-11-02-2016

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)

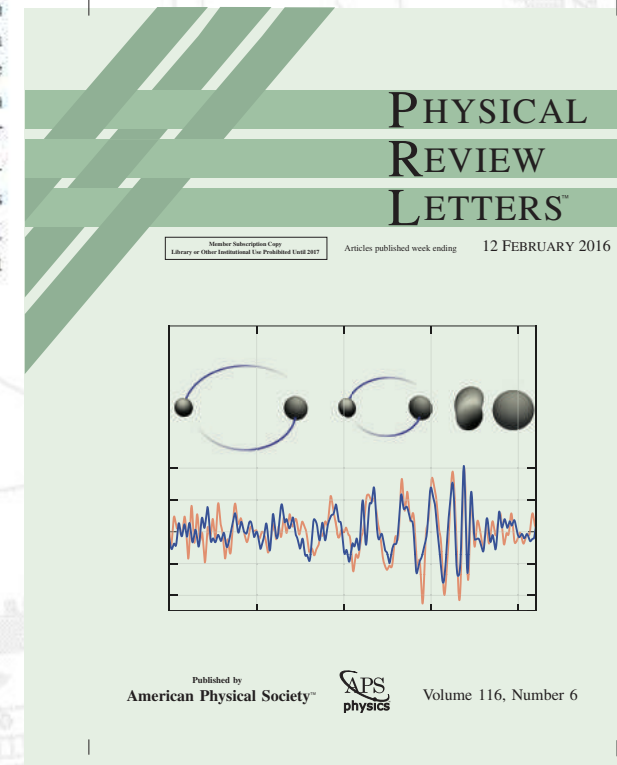
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

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 1.0×10^{-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 5.1σ . The source lies at a luminosity distance of 410_{-180}^{+100} 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.

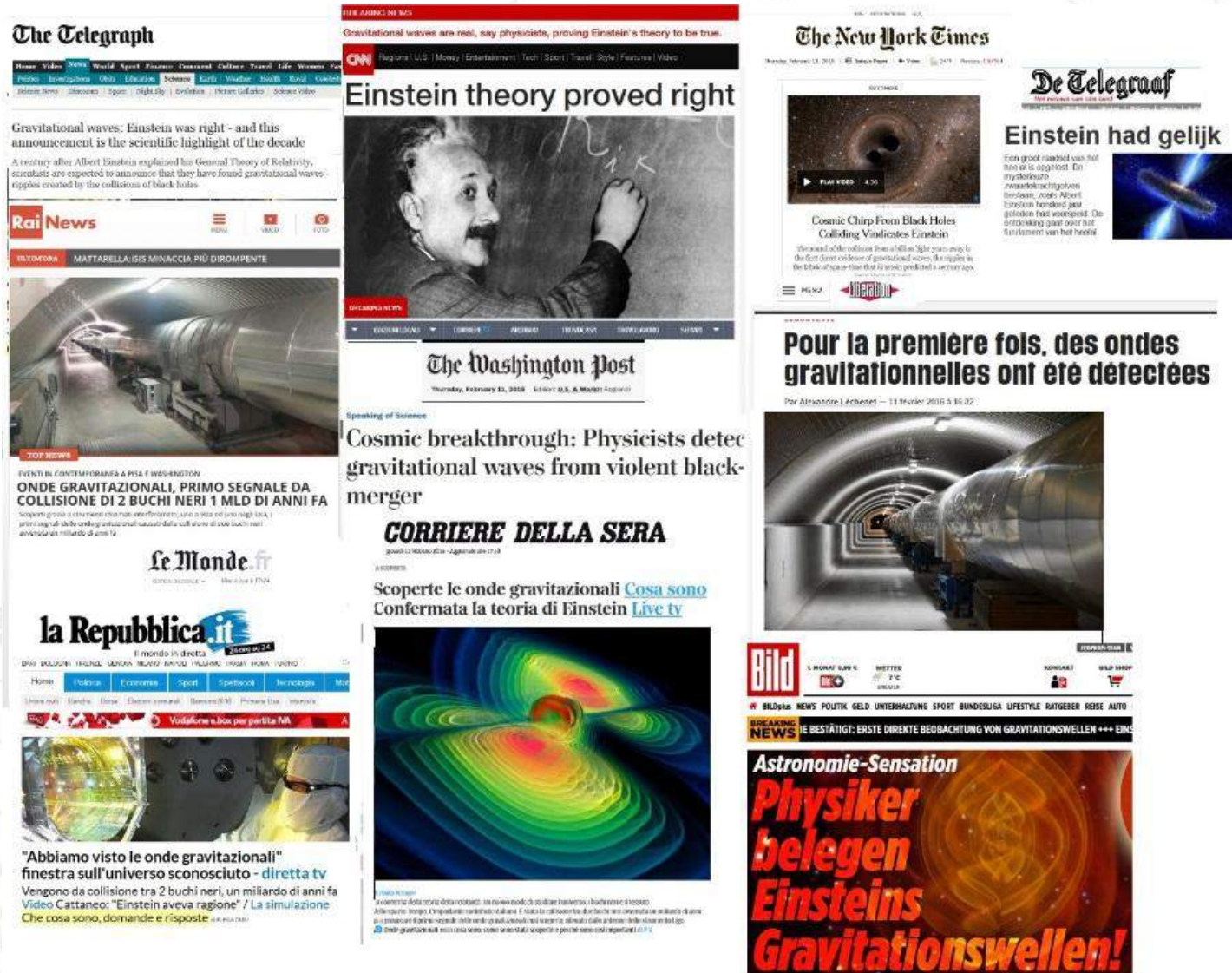
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

229,000 paper downloads from APS in the first 24 hours

[Phys. Rev. Lett. 116, 061102 \(2016\)](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.116.061102)

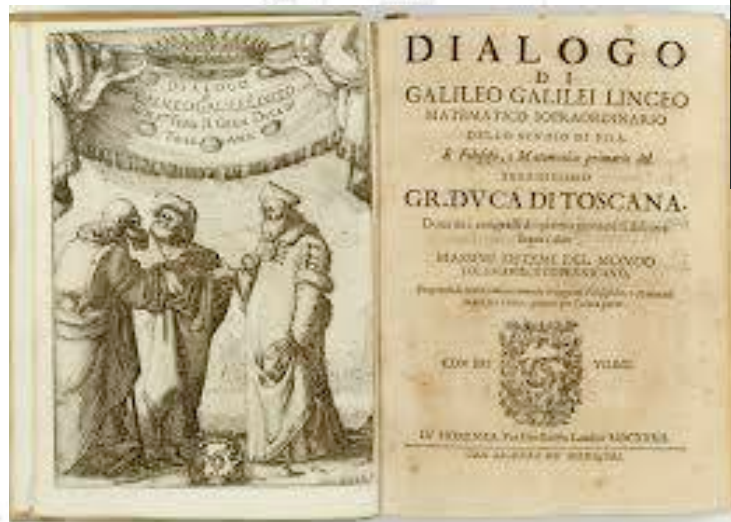


La notizia fa il giro del mondo...

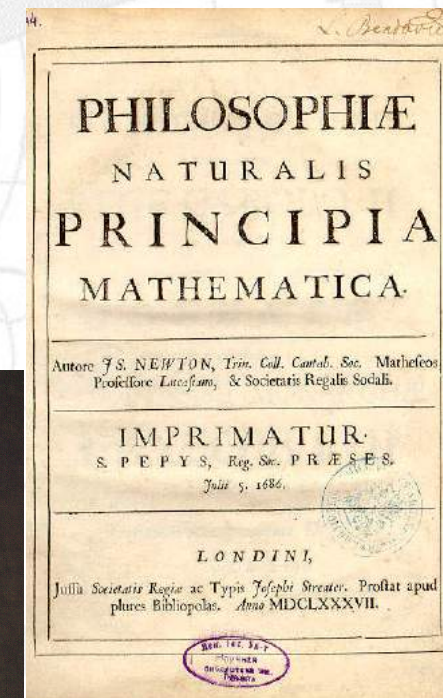
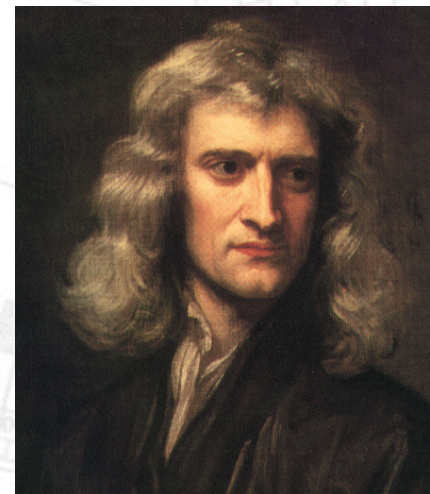


Galilei e Newton

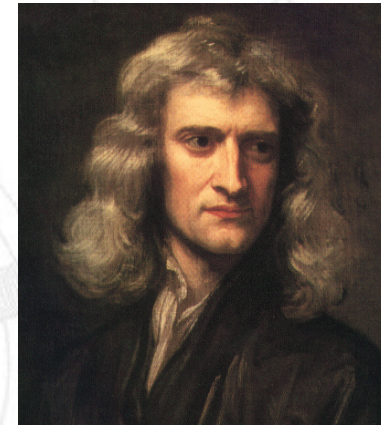
@ 1630



1686



Gravitazione Universale (1686)



Gravitazione Universale (1686)

Spiegava molti problemi irrisolti in astronomia e fisica terrestre

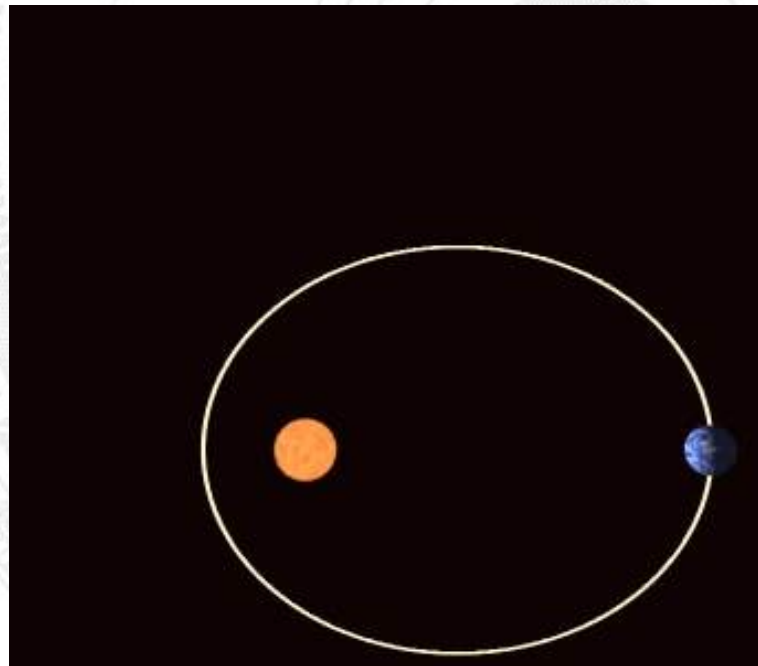
- Eccentricità delle orbite delle comete
- Le maree
- La perturbazione del moto della luna a causa dell'attrazione del Sole
- Scoperta del pianeta Nettuno (1846)



Gravitazione Universale (1686)

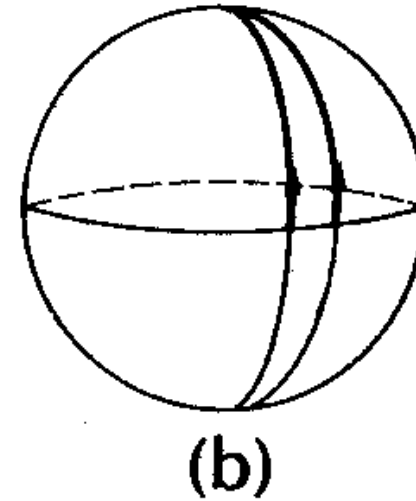
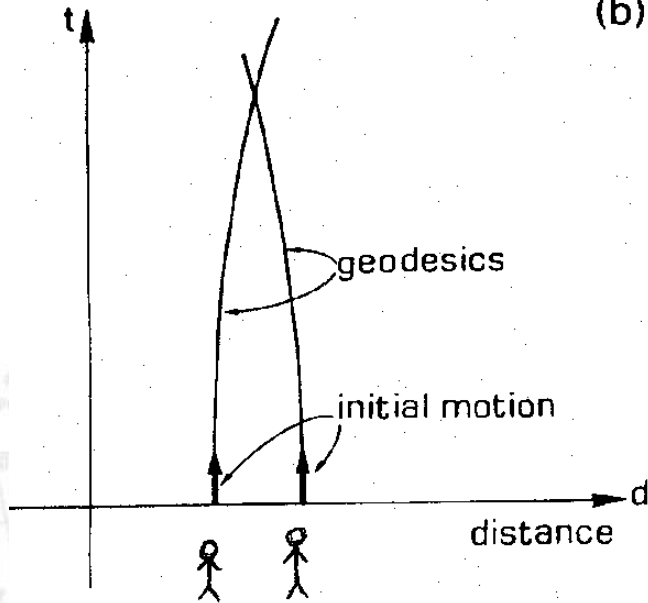
Teoria di grandissimo successo, ma...

- Una discrepanza sperimentale: precessione del perielio di Mercurio (5600"/secolo)



Gli Astronomi osservavano una differenza nella precessione del perielio di Mercurio di 43"/secolo rispetto a quanto previsto da Newton

La gravità non è una forza ma una proprietà dello spazio(-tempo)



Sorpassa definitivamente il concetto ottocentesco di tempo e spazio assoluti.

Introduce il concetto di Spazio-Tempo = 3 dimensioni + tempo.

La percezione dello spazio e del tempo è relativa.

Einstein impiegò circa 10 anni per capire come formulare una teoria che includesse la forza gravitazionale e che fosse compatibile con la relatività speciale.

Lo sforzo si concluse nel 1915 con la pubblicazione della Teoria della Relatività Generale.



Premio Nobel nel 1921



Marcell Grossmann

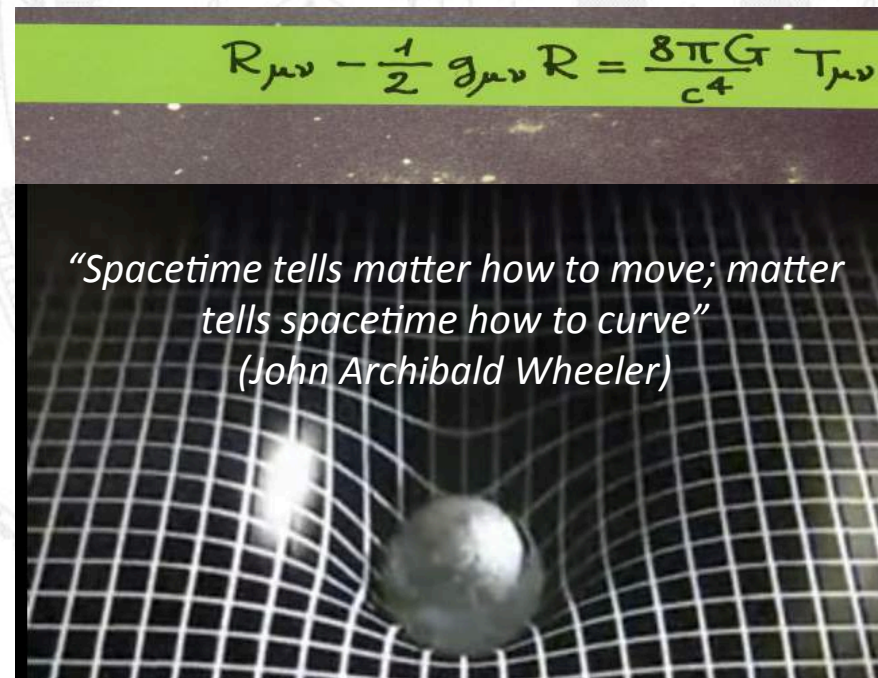


Gregorio Ricci Cubastro



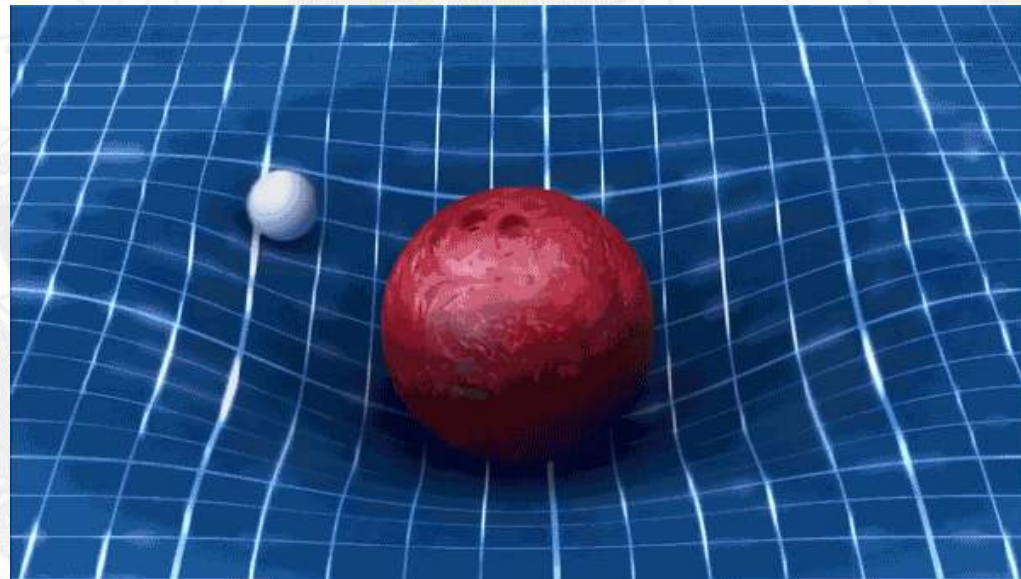
G. F. B. Riemann

La gravità non è una forza, ma una proprietà dello spazio-tempo
Lo spazio-tempo viene curvato dai corpi dotati di massa



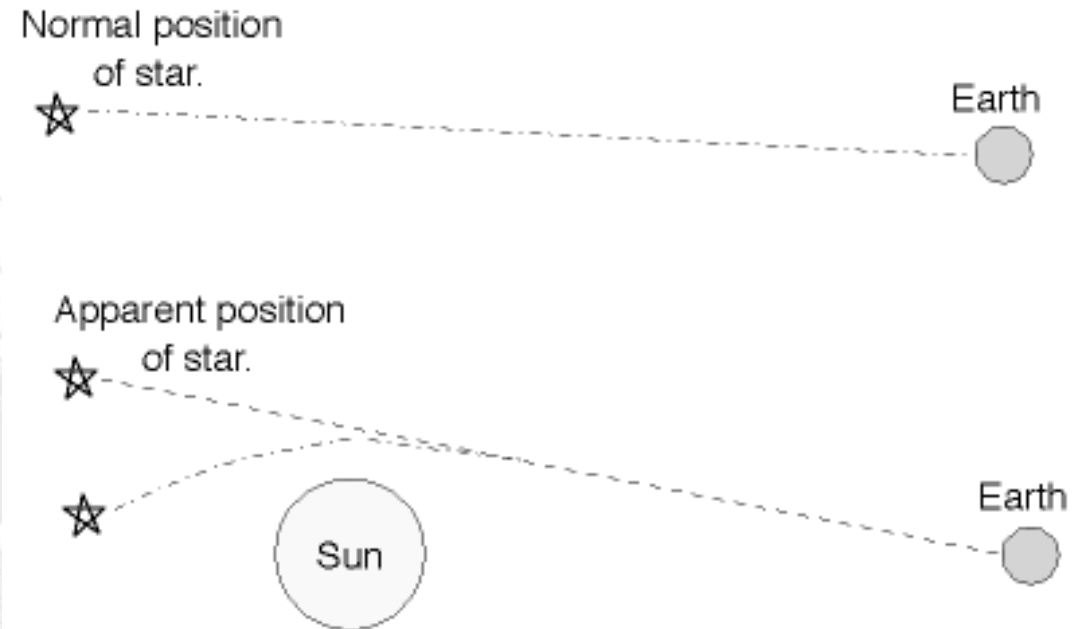
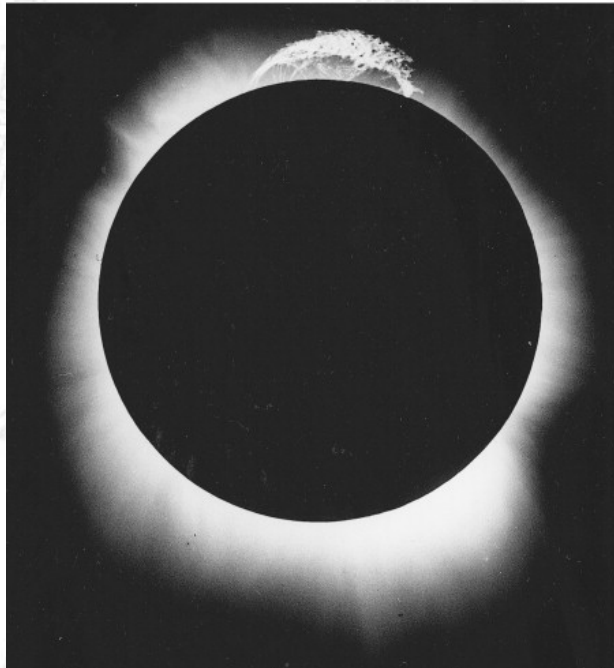
La gravità non è una forza, ma una proprietà dello spazio-tempo
Lo spazio-tempo viene curvato dai corpi dotati di massa

Gli oggetti si muovono
lungo il cammino più
breve in uno spazio-tempo
curvo



Primo successo della relatività generale: risolve la discrepanza del calcolo Newtoniano sulla precessione del perielio di Mercurio

Il percorso della luce viene
“piegato” quando questa passa
vicino ad un oggetto dotato di
massa (come il Sole)

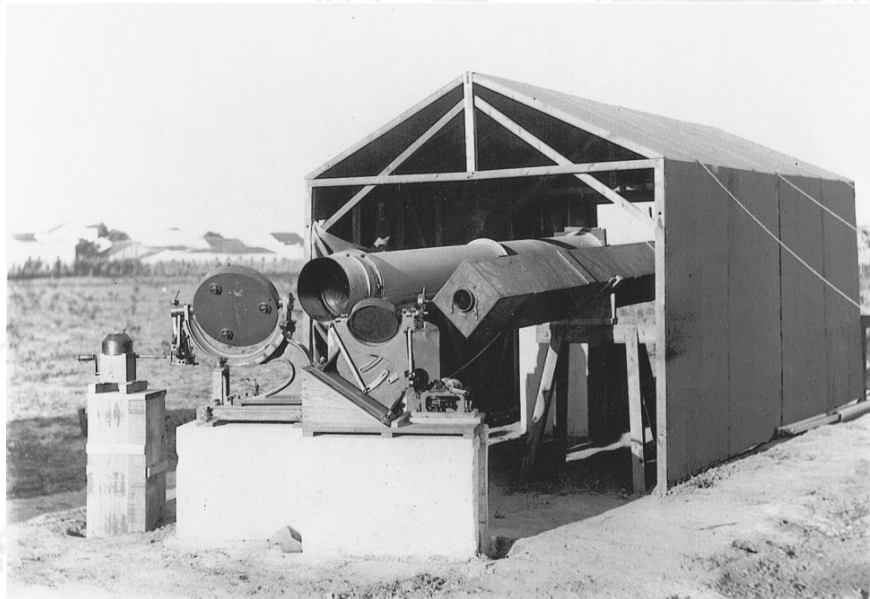


L'effetto è inversamente proporzionale
all'angolo tra il sole e la stella

Si potrebbe misurare solo durante un'eclissi

La conferma dalle osservazioni

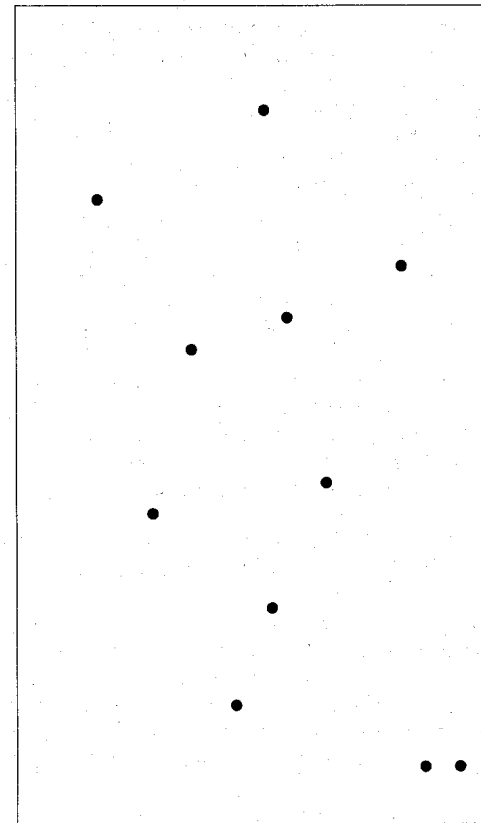
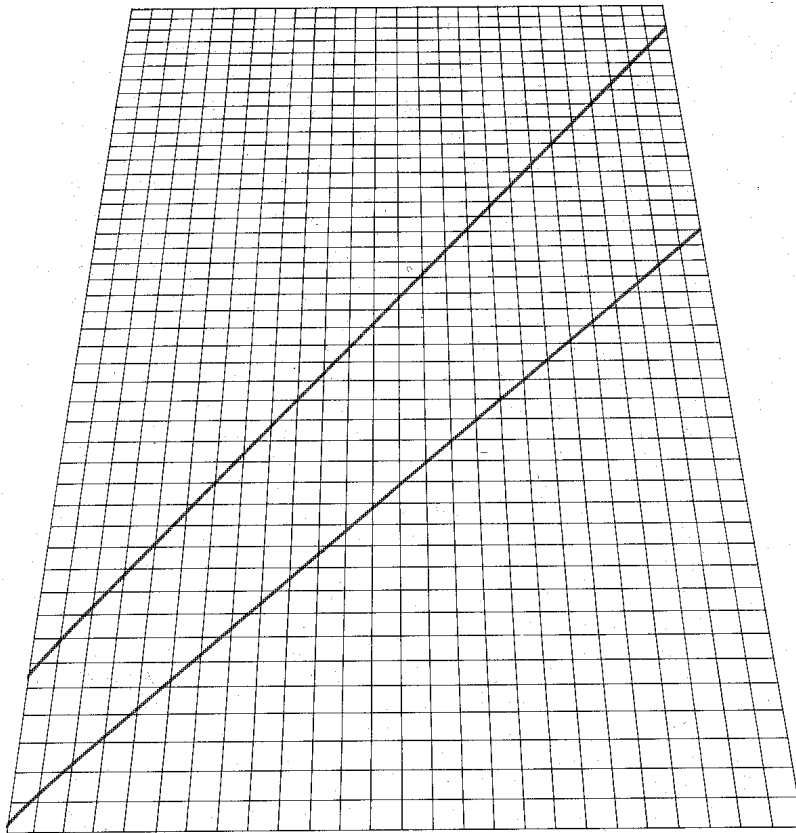
Il famoso astronomo inglese Sir Arthur Eddington guidò una spedizione per fotografare l'eclissi solare del 29 Maggio 1919 con lo sfondo dell'ammasso delle Iadi



© Science Museum/Science and Society Picture Library

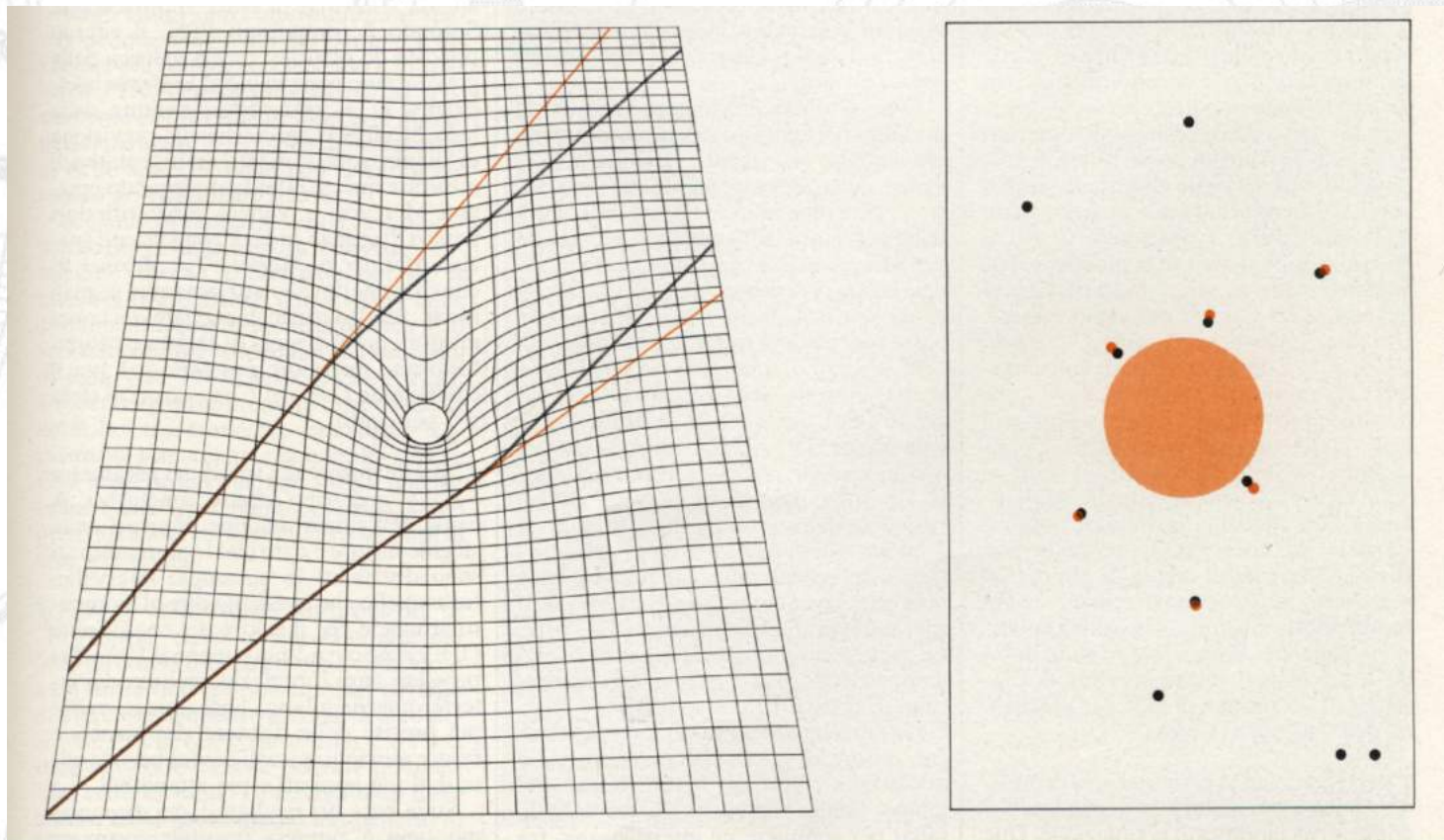
La conferma dalle osservazioni

Il famoso astronomo inglese Sir Arthur Eddington guidò una spedizione per fotografare l'eclissi solare del 29 Maggio 1919 con lo sfondo dell'ammasso delle Iadi



La conferma dalle osservazioni

Il famoso astronomo inglese Sir Arthur Eddington guidò una spedizione per fotografare l'eclissi solare del 29 Maggio 1919 con lo sfondo dell'ammasso delle Iadi



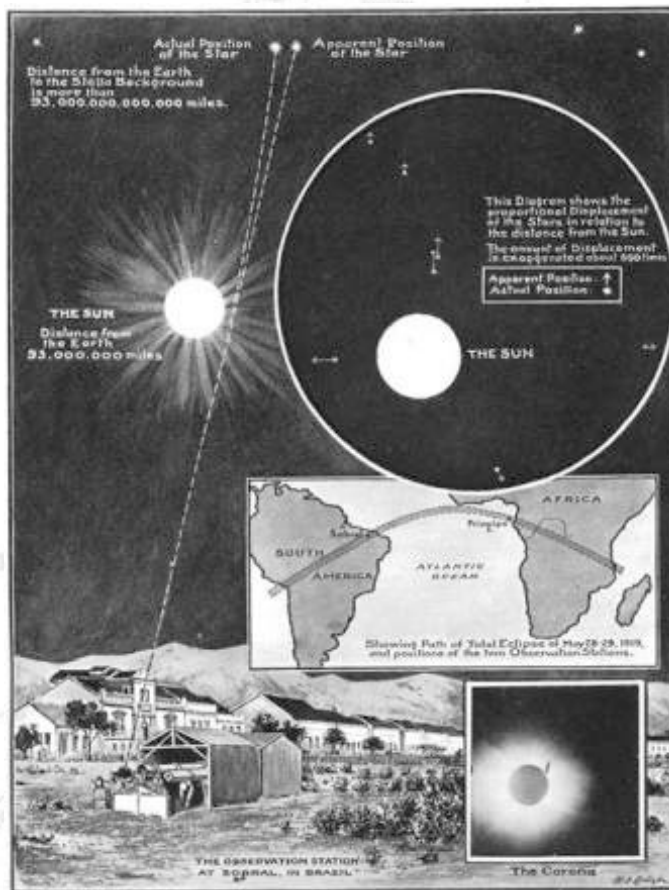
La conferma dalle osservazioni

Il famoso astronomo inglese Sir Arthur Eddington guidò una spedizione per fotografare l'eclissi solare del 29 Maggio 1919 con lo sfondo dell'ammasso delle Iadi



*Oh leave the Wise our measures to collate
One thing at least is certain, light has weight
One thing is certain and the rest debate
Light rays, when near the Sun, do not go straight.*

-- Arthur Eddington



	Deflessione misurata
Nessuna deflessione	0
Einstein	1.75"
Principe	1.61" ± 0.30"
Sobral	1.98" ± 0.12"

REVOLUTION IN SCIENCE.

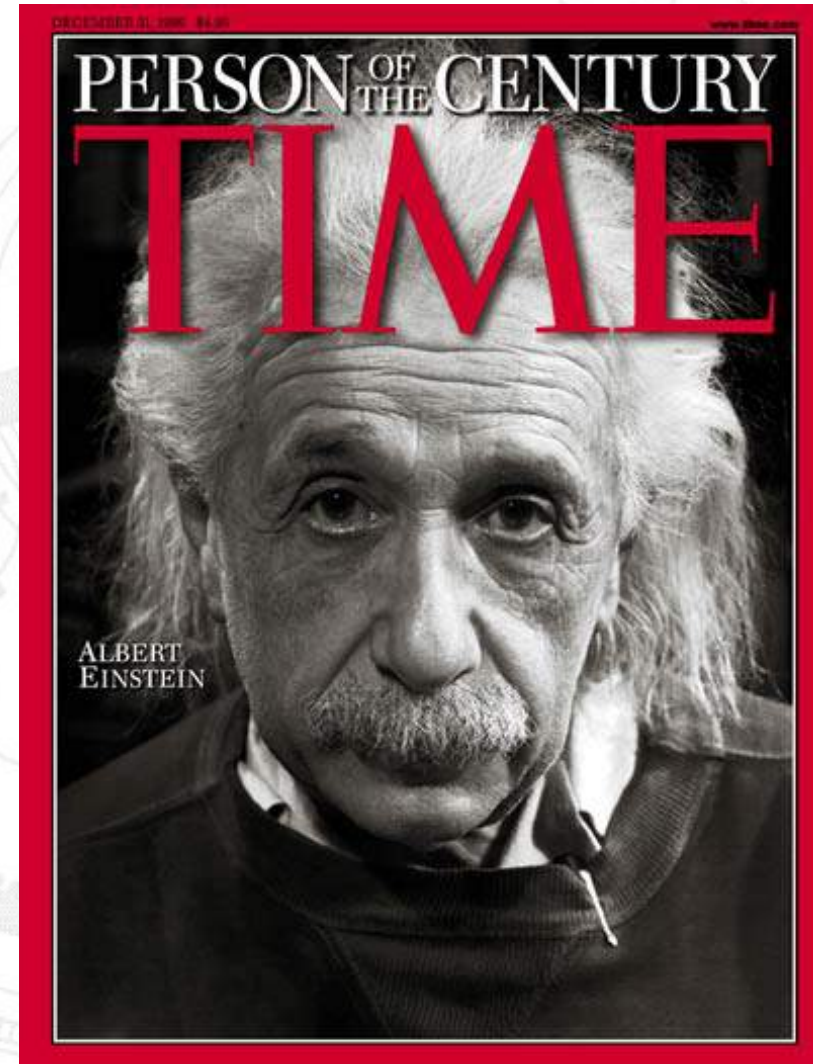
NEW THEORY OF THE UNIVERSE.

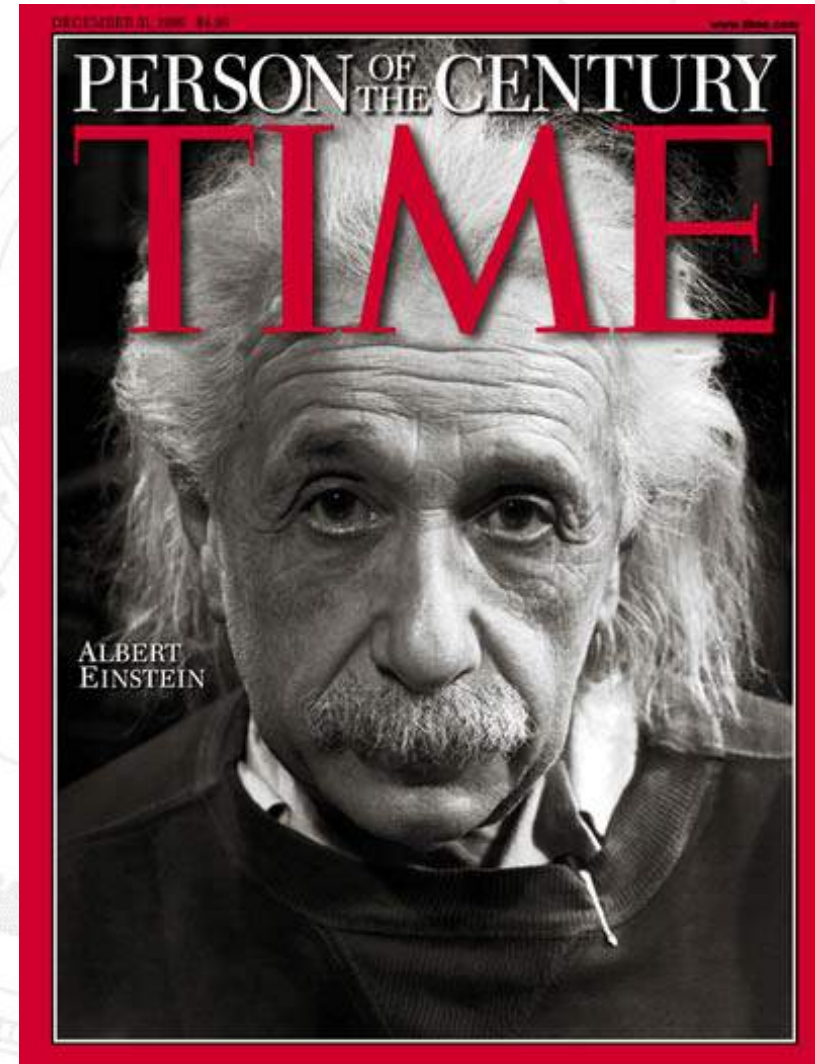
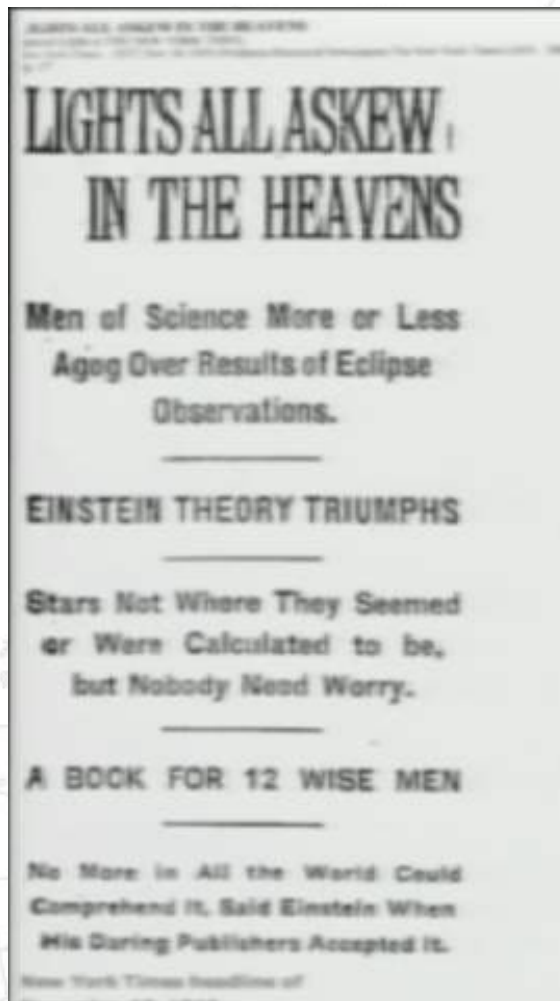
NEWTONIAN IDEAS OVERTHROWN.

Yesterday afternoon in the rooms of the Royal Society, at a joint session of the Royal and Astronomical Societies, the results obtained by British observers of the total solar eclipse of May 29 were discussed.

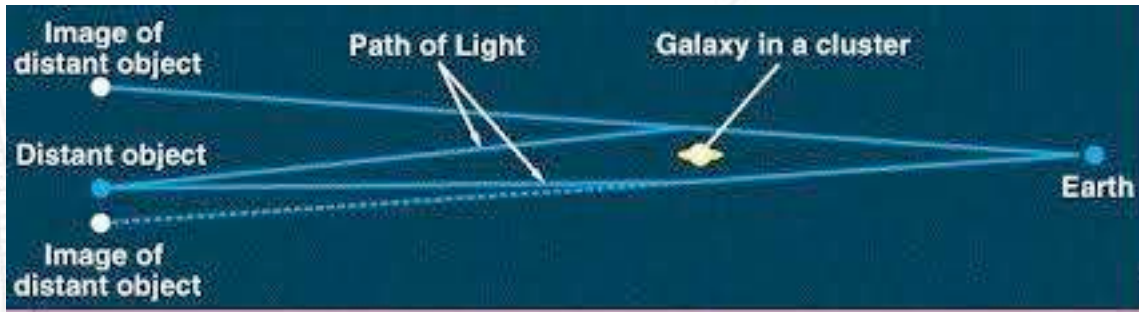
The greatest possible interest had been aroused in scientific circles by the hope that rival theories of a fundamental physical problem would be put to the test, and there was a very large attendance of astronomers and physicists. It was generally accepted that the observations were decisive in the verifying of the prediction of the famous physicist, Einstein, stated by the President of the Royal Society as being the most remarkable scientific event since the discovery of the predicted existence of the planet Neptune. But there was differ-

London Times, 6
Novembre 1919

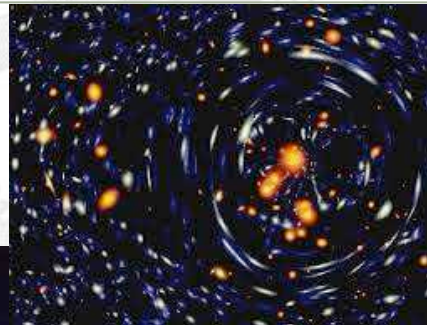
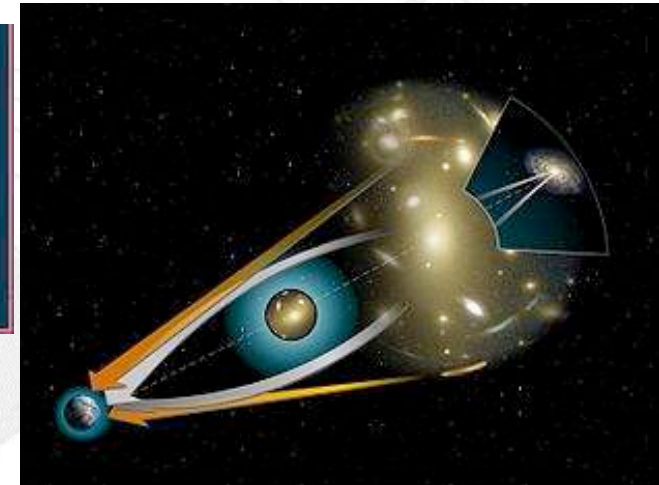




Un'applicazione della deflessione della luce: le lenti gravitazionali



Diverse immagini apparenti a seconda della posizione relativa della sorgente e della lente gravitazionale



Effetti della relatività generale sul tempo

Il tempo scorre più lentamente all'aumentare del campo gravitazionale



La Relatività Generale nel taschino: il GPS

HOW GPS WORKS

GPS IS A CONSTELLATION OF 24 OR MORE SATELLITES FLYING 20,350 KM ABOVE THE SURFACE OF THE EARTH. EACH ONE CIRCLES THE PLANET TWICE A DAY IN ONE OF SIX ORBITS TO PROVIDE CONTINUOUS, WORLDWIDE COVERAGE.

- GPS satellites broadcast radio signals providing their locations, status, and precise time $\{t_1\}$ from on-board atomic clocks.
- The GPS radio signals travel through space at the speed of light $\{c\}$, more than 299,792 km/second.
- A GPS device receives the radio signals, noting their exact time of arrival $\{t_2\}$, and uses these to calculate its distance from each satellite in view.

To calculate its distance from a satellite, a GPS device applies this formula to the satellite's signal:
distance = rate x time
 where **rate** is $\{c\}$ and **time** is how long the signal traveled through space.
 The signal's travel **time** is the difference between the time broadcast by the satellite $\{t_1\}$ and the time the signal is received $\{t_2\}$.
- Once a GPS device knows its distance from at least four satellites, it can use geometry to determine its location on Earth in three dimensions.

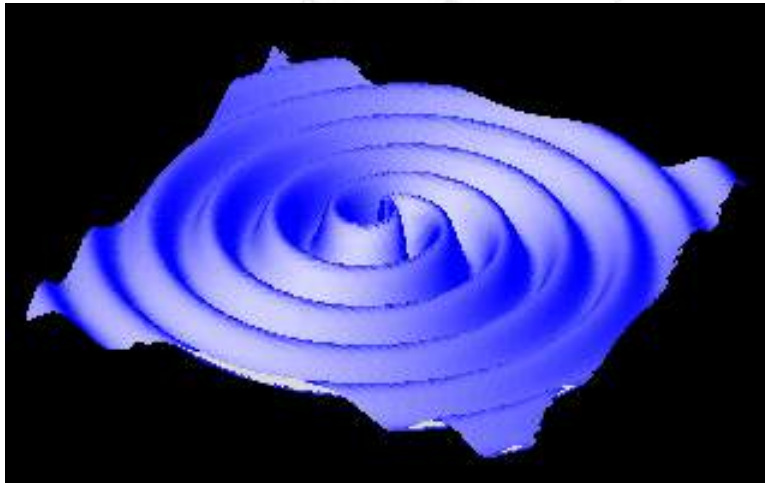
The GPS Master Control Station tracks the satellites via a global monitoring network and manages their health on a daily basis. Ground antennas around the world send data updates and operational commands to the satellites.

The Air Force launches new satellites to replace aging ones when needed. The new satellites offer upgraded accuracy and reliability.

How does GPS help farmers? Learn more about the Global Positioning System and its many applications at WWW.GPS.GOV

This poster is a product of the National Commission Office for Space Status Publications, New System, with funding and advice from the United States Government. Stock image courtesy of NASA.

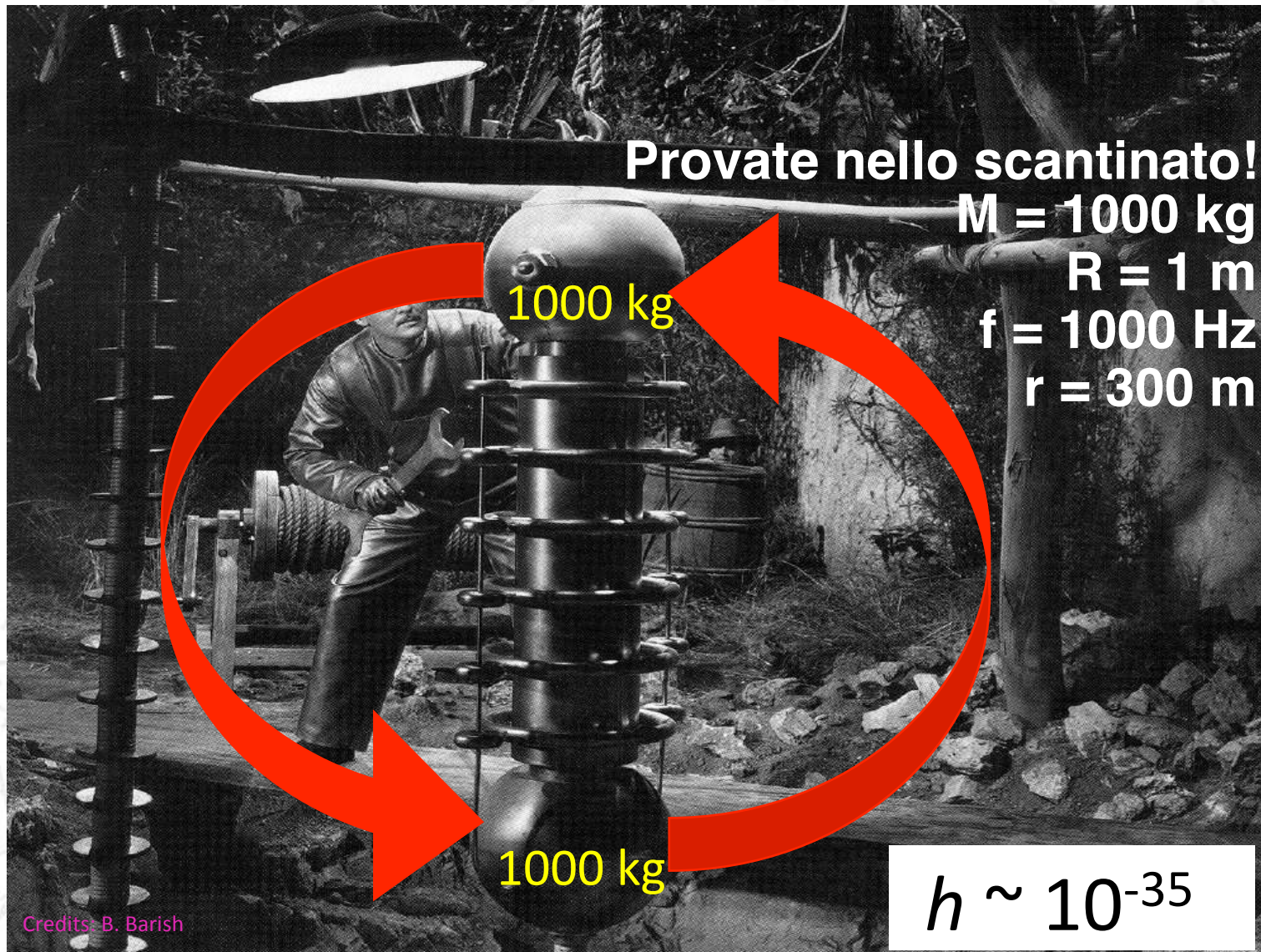
Un altro effetto della Relatività: le onde gravitazionali



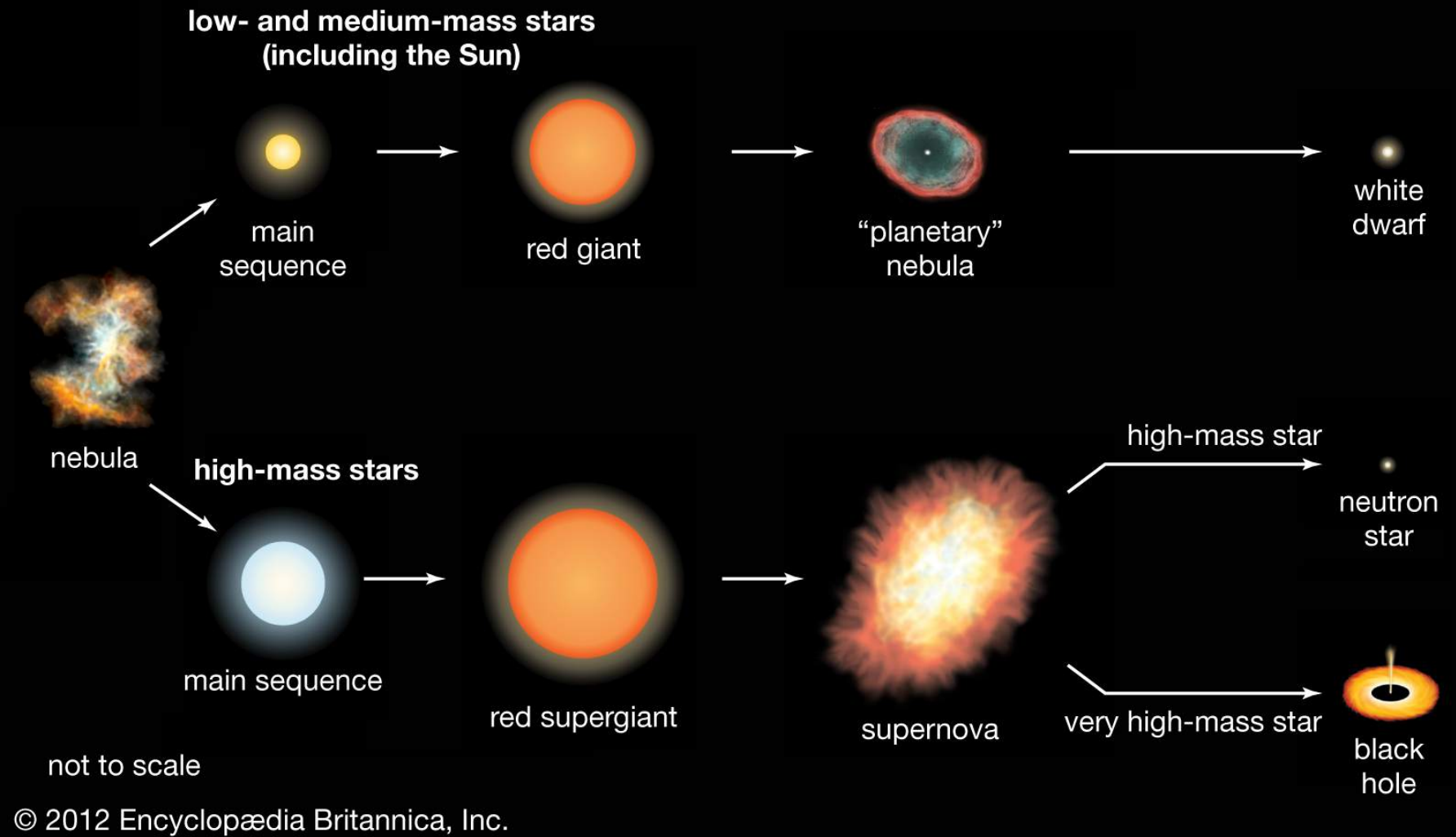
Increspature dello spazio-tempo che si propagano alla velocità della luce

Le onde gravitazionali sono generate da masse accelerate

Come generare onde gravitazionali (in casa...)



Stellar evolution



Sorgenti di Onde Gravitazionali

Collasso gravitazionale

Alla fine della sua vita, una stella esplode → **supernova**
Emissione di onde gravitazionali



Sorgenti di Onde Gravitazionali

Stelle di neutroni (pulsar)

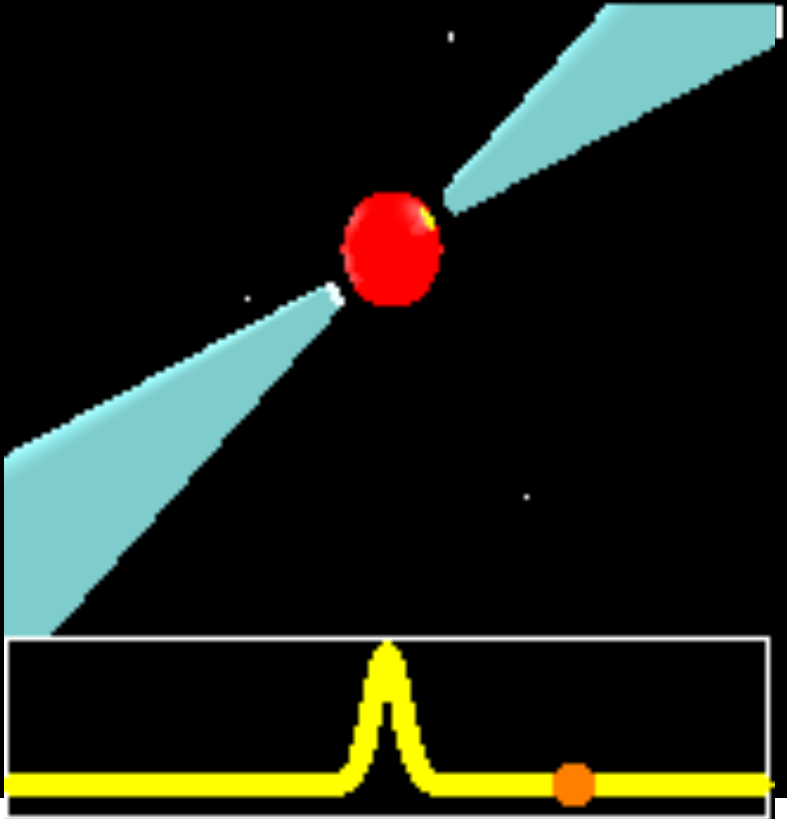
- Massa $\sim 1,4$ massa del sole, in un raggio di ~ 10 km \rightarrow oggetti molto densi

MPIfR-Bonn Pulsar Group

Campi magnetici molto intensi (10^9 Tesla)
+
Rapida rotazione

\rightarrow

emissione di onde elettromagnetiche (luce visibile, onde radio) e *onde gravitazionali*



The diagram shows a central red sphere representing a pulsar. Two cyan beams of light emanate from the poles of the sphere, forming a lighthouse-like pattern. Below the pulsar, a yellow line graph shows a sharp peak, representing the emission of electromagnetic waves. A small orange dot is also visible on the yellow line to the right of the peak.

Sistemi binari



Sistemi binari: due pulsar

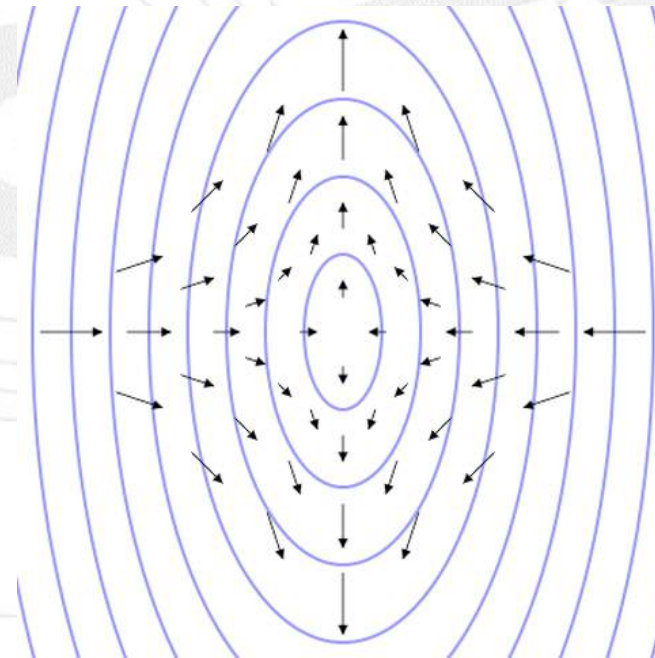
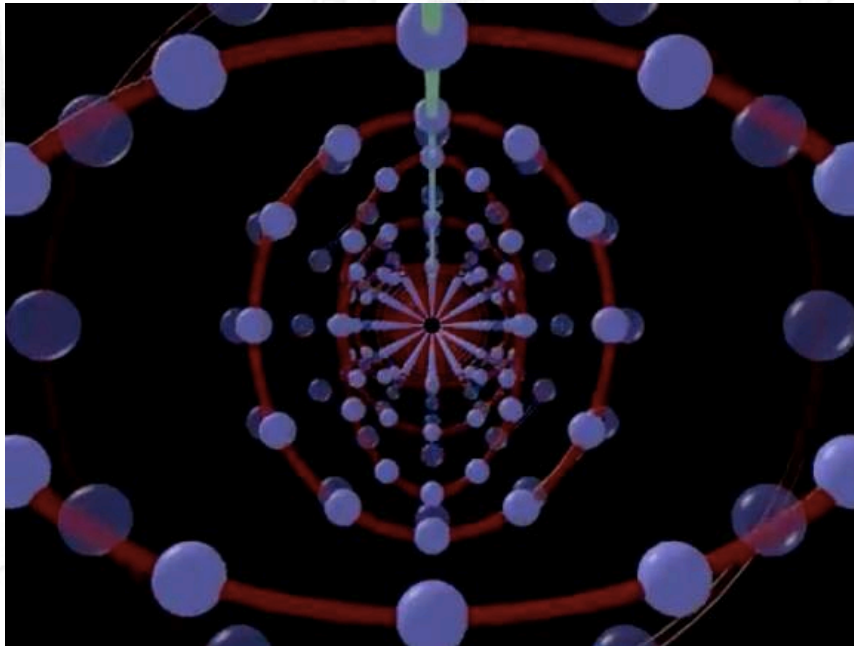


Sorgenti di Onde Gravitazionali

Sistemi binari: una stella di neutroni e un buco nero (stadio finale di una stella di grande massa)



Effetto dell'onda gravitazionale



Nell'oblio per circa 40 anni...

Il fatto che non sia possibile produrre onde gravitazionali di intensità rilevabile in laboratorio, fece per lungo tempo credere ai fisici che si trattasse di una semplice curiosità matematica, priva di significato fisico...

Fino al 1957, quando un fisico americano (Felix Pirani) dimostra che le onde gravitazionali trasportano energia e che questa può essere assorbita.



Questo stimola Joseph Weber (il primo a delineare i principi fisici alla base del funzionamento del laser e del maser) ad iniziare una concreta attività di ricerca.

La ricerca di Weber

Dobbiamo a Weber i primi rivelatori funzionanti e la messa a punto di molte idee negli algoritmi per l'analisi dei dati (in uso ancora oggi).



Nel 1969, il primo annuncio (non confermato da esperimenti simili) della rivelazione di onde gravitazionali da parte di Weber.

La ricerca a livello internazionale

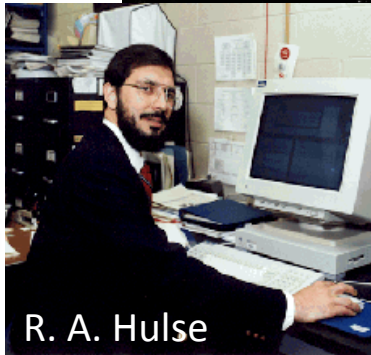
Per confermare o confutare i risultati di Weber, diversi gruppi di ricerca nel mondo iniziano programmi per la rivelazione delle onde gravitazionali.

L'Italia è tra questi con il lavoro di Edoardo Amaldi e Guido Pizzella

G. Pizzella

E. Amaldi

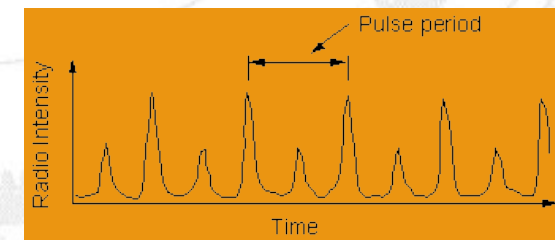
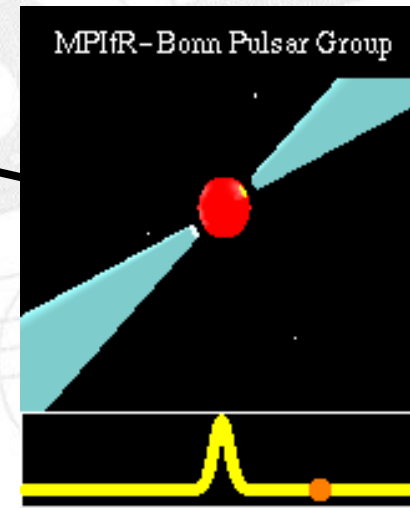
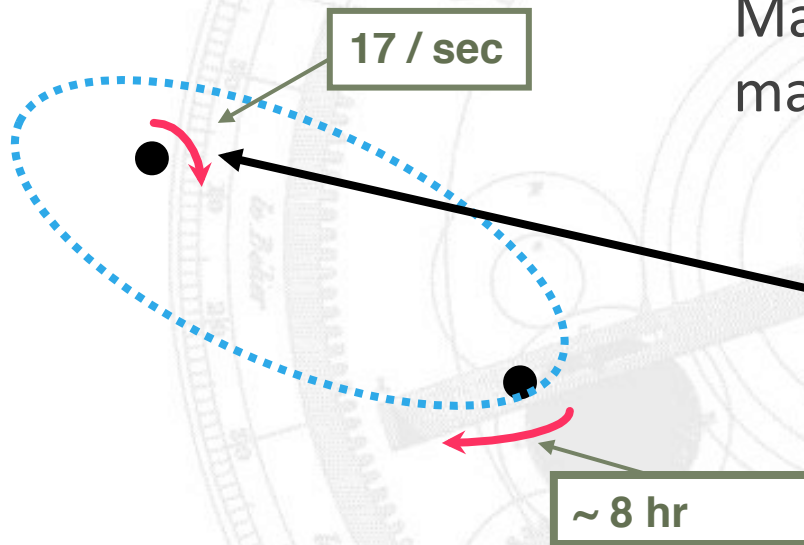




Scoprono e studiano
il Sistema binario
PSR 1913 + 16



Massa simile al nostro sole
ma in un diametro di soli 20 km



Due stelle di neutroni in orbita

- Separazione = 1,000,000 km

Previsione della Relatività Generale

- Si avvicinano di 3 mm/orbita
- Periodo orbitale cambia nel tempo

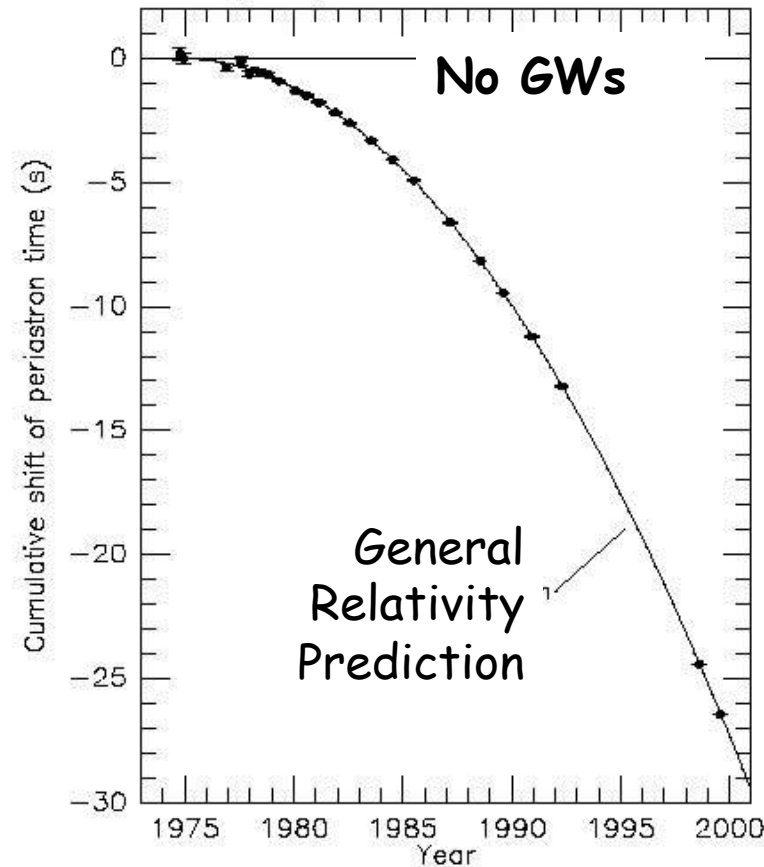
Dimostrazione dell'esistenza delle onde grav.



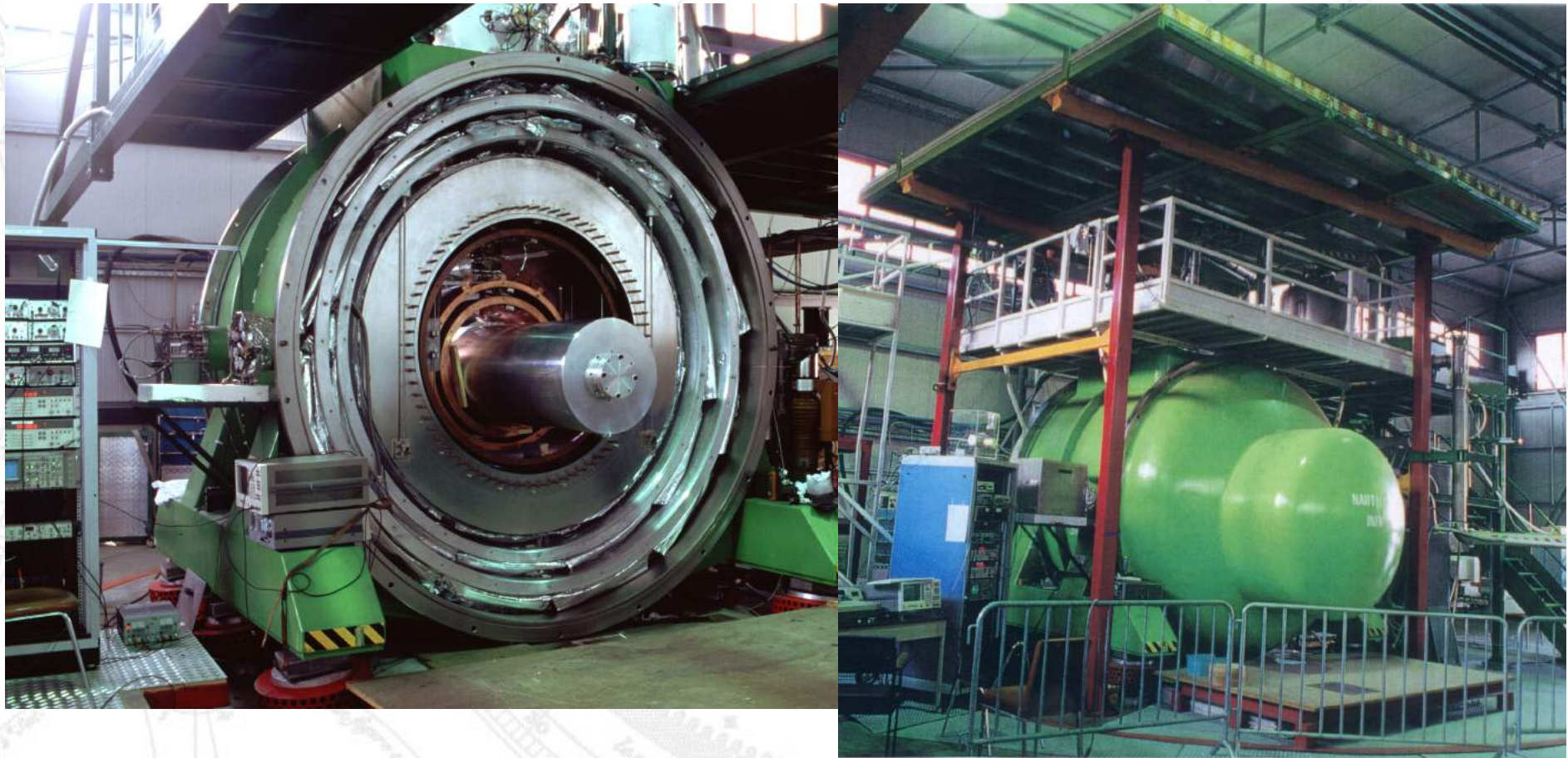
Premio Nobel nel 1993



Comparison between observations of the binary pulsar PSR1913+16, and the prediction of general relativity based on loss of orbital energy via gravitational waves

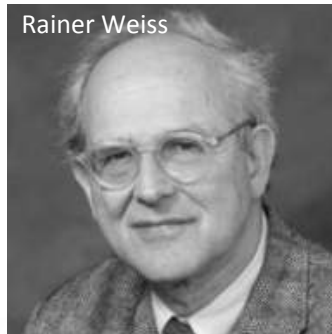


From J. H. Taylor and J. M. Weisberg, unpublished (2000)

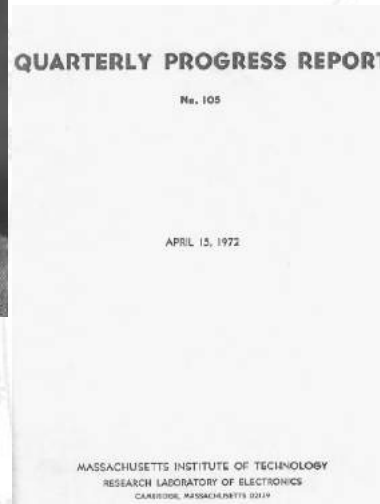


Maggior isolamento del rivelatore dai disturbi esterni
Raffreddato a temperature prossime allo zero assoluto: $T \sim 0.1 \text{ K}$
Migliaia di volte più sensibile dei rivelatori di Weber

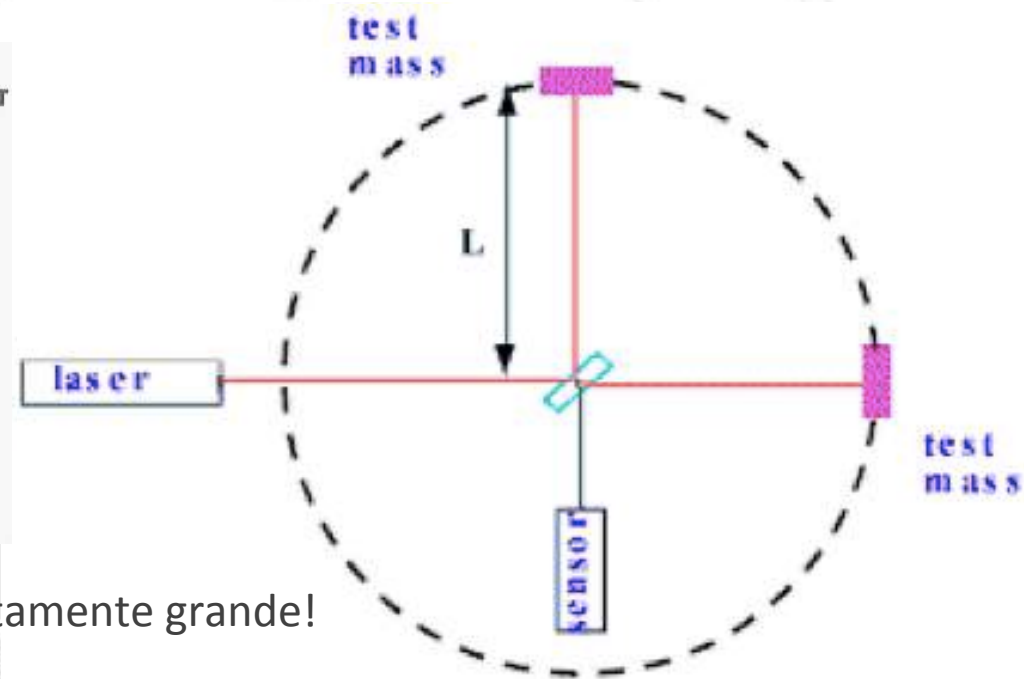
Rivelare le onde gravitazionali con la luce



Rainer Weiss
Interferometro di
Michelson



Effetto esageratamente grande!



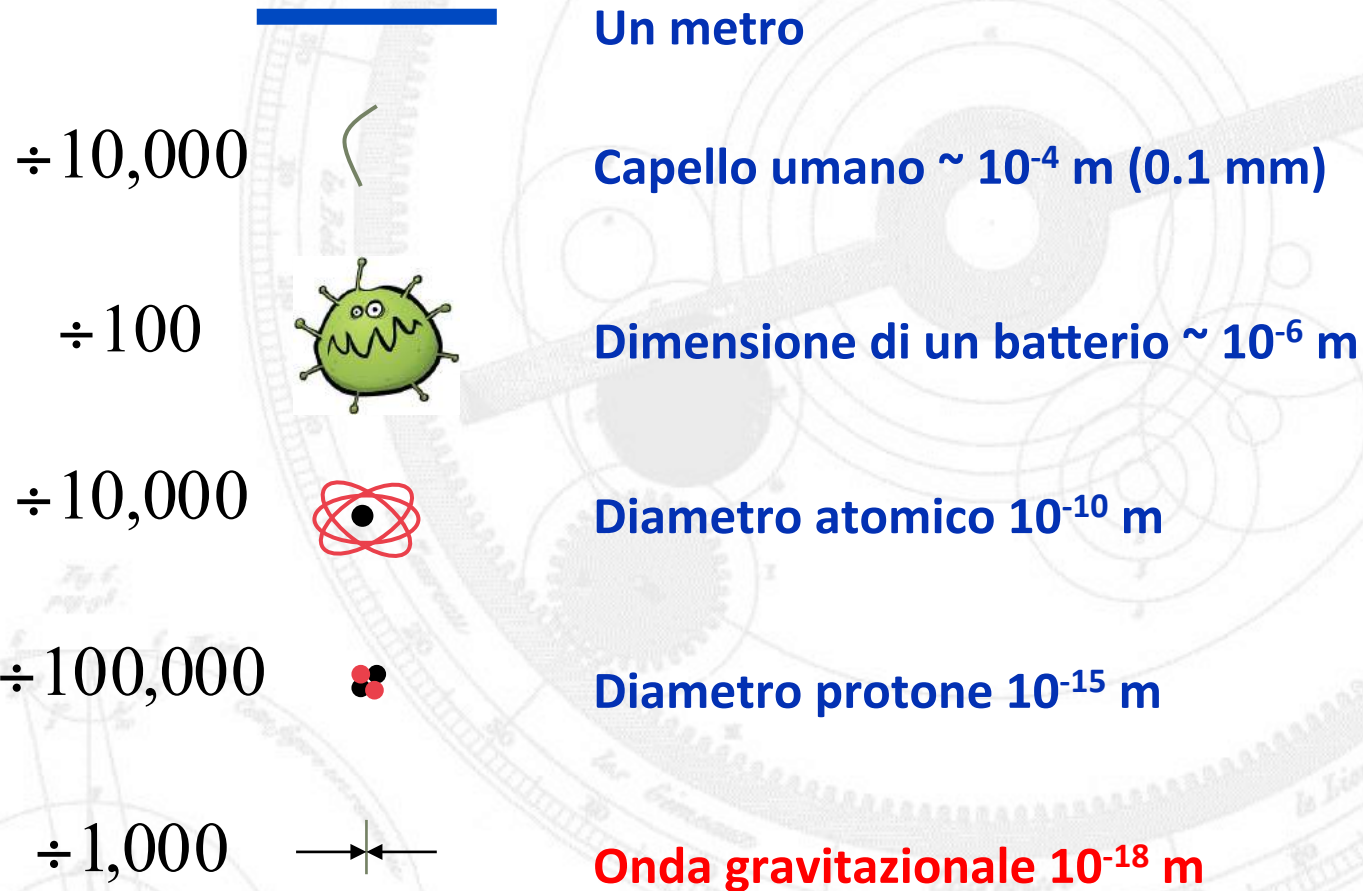
L'effetto prodotto sul rivelatore è proporzionale alla lunghezza dei bracci dell'interferometro

$$\Delta L \approx hL \rightarrow \text{servono bracci molto lunghi}$$

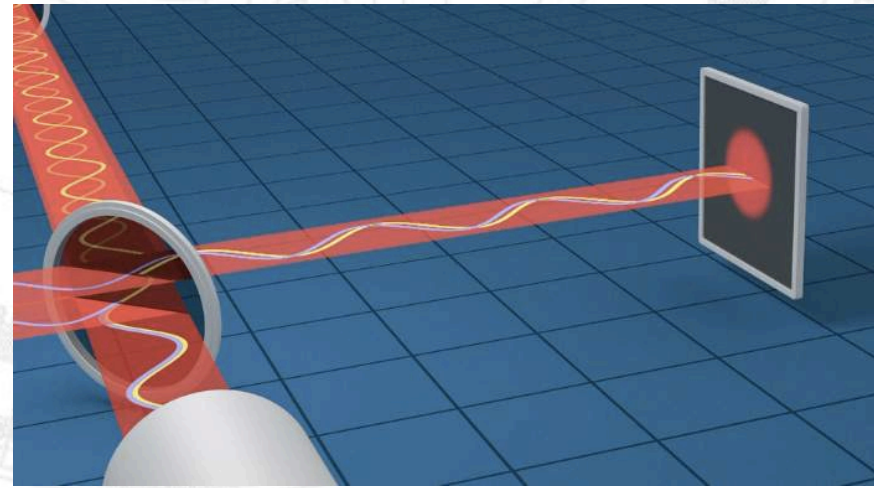
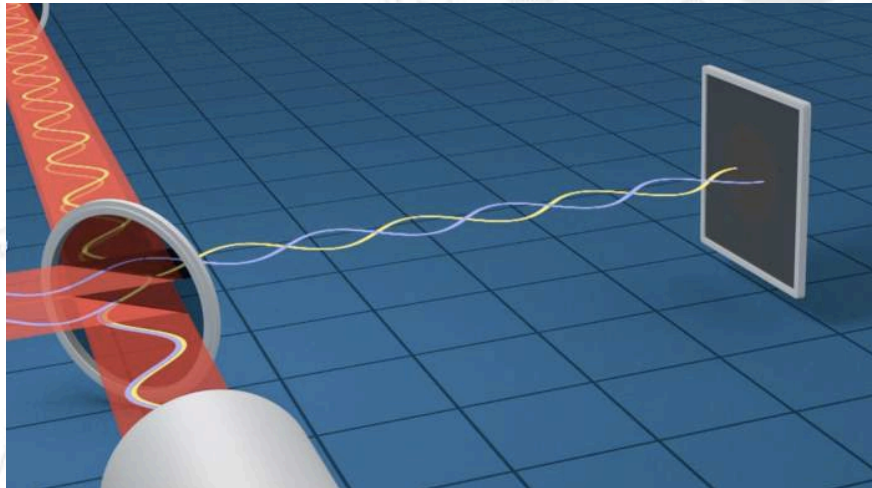
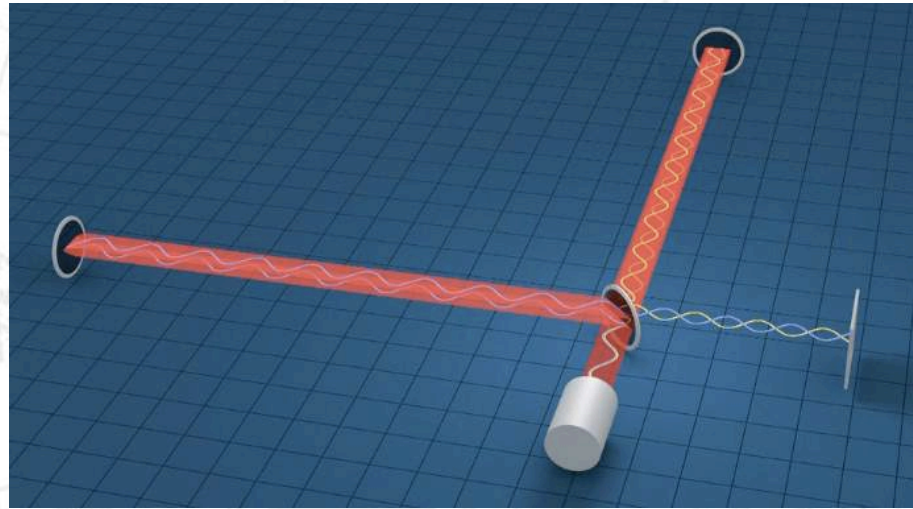
- ampiezza dell'onda $\sim 10^{-21}$
- $L = 1 \text{ km}$

$$\rightarrow \Delta L \sim 10^{-18} \text{ m}$$

Quanto è piccolo 10^{-18} m?



Rivelare le onde gravitazionali con la luce



Il rivelatore Virgo (Cascina, Pisa)



La Collaborazione Virgo

- 5 paesi europei, 19 laboratori, ~250 membri
- Scienziati da Italia e Francia (fondatori di Virgo), Olanda, Polonia e Ungheria



APC Paris
ARTEMIS Nice
EGO Cascina
INFN Firenze-Urbino
INFN Genova
INFN Napoli
INFN Perugia
INFN Pisa
INFN Roma La Sapienza
INFN Roma Tor Vergata
INFN Trento-Padova
LAL Orsay – ESPCI Paris
LAPP Annecy
LKB Paris
LMA Lyon
NIKHEF Amsterdam
POLGRAW(Poland)
RADOUD Uni. Nijmegen
RMKI Budapest

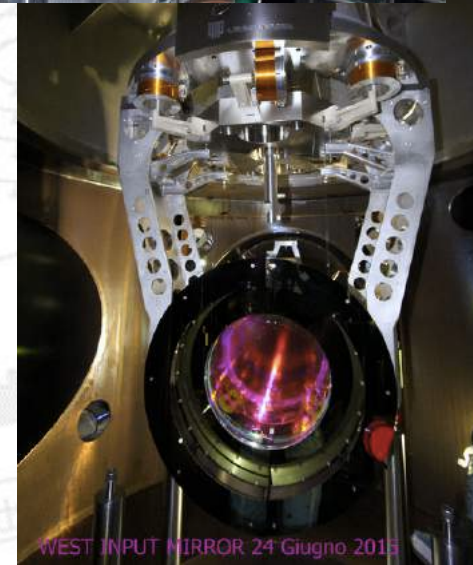
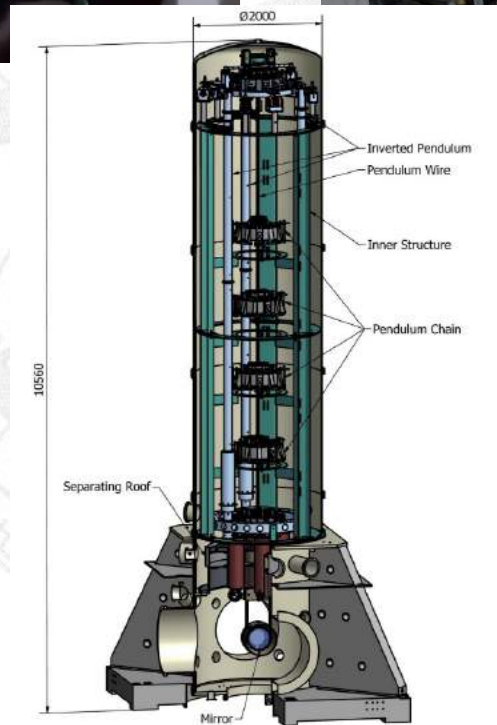
LIGO Scientific Collaboration



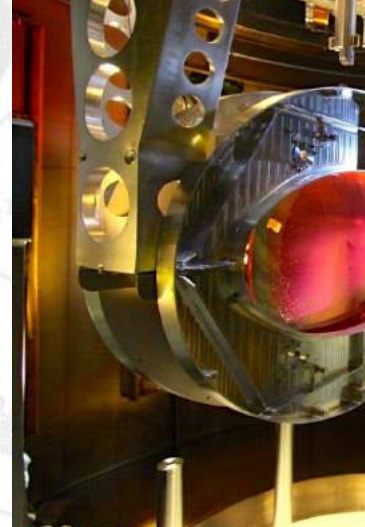
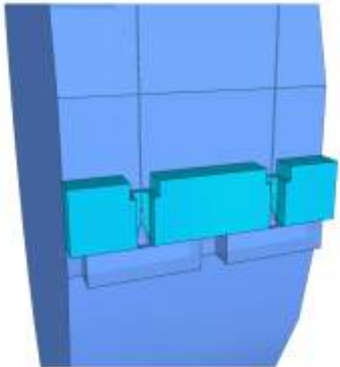
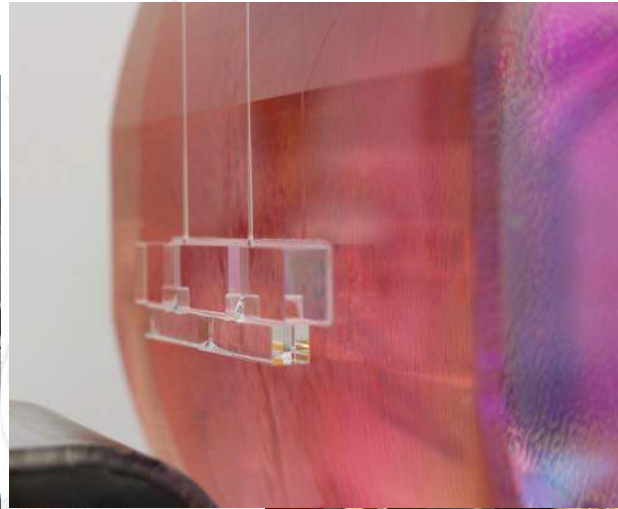
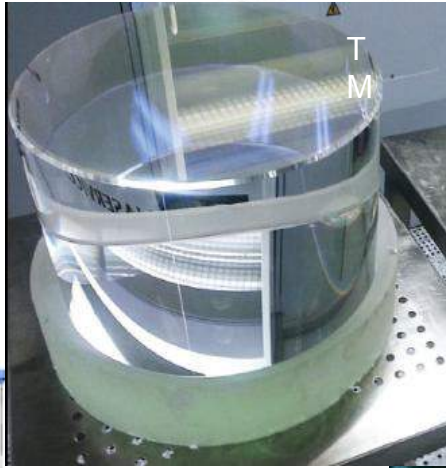
www.ligo.org

900+ members, 80+ institutions, 16 countries

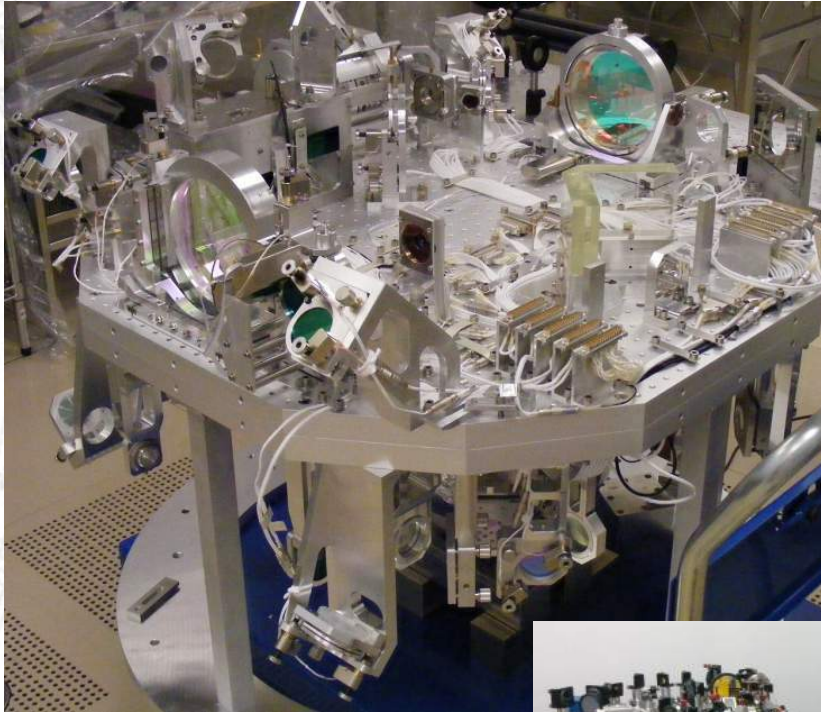
Isolamento dalle vibrazioni della terra



Gli specchi e le loro sospensioni



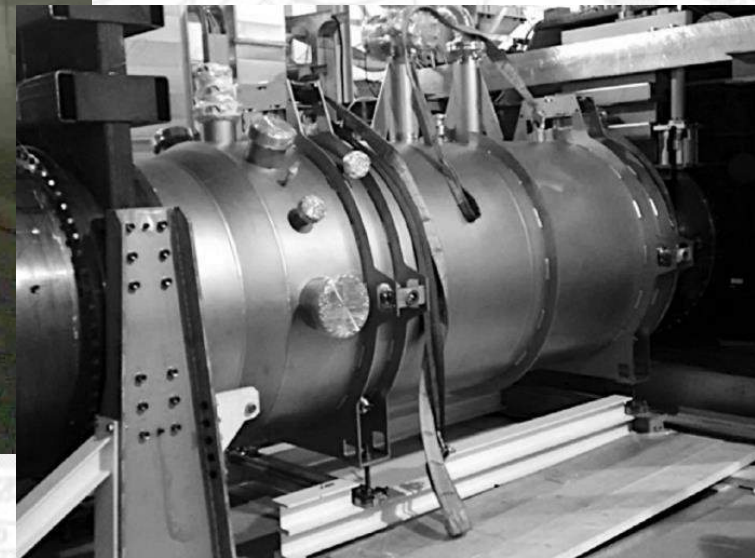
Sistemi ottici di grandissima precisione

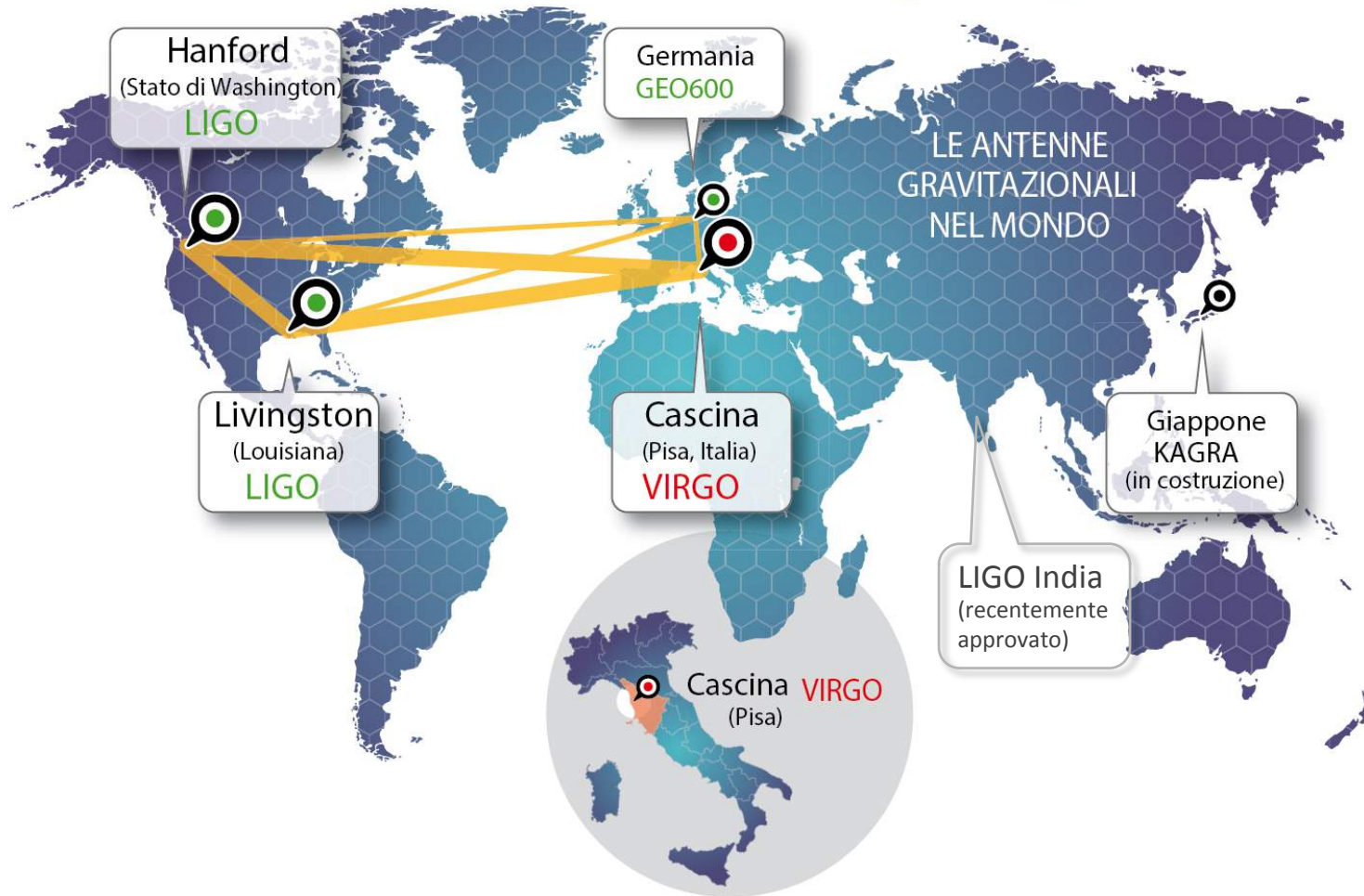


Il sistema da vuoto più grande d'Europa

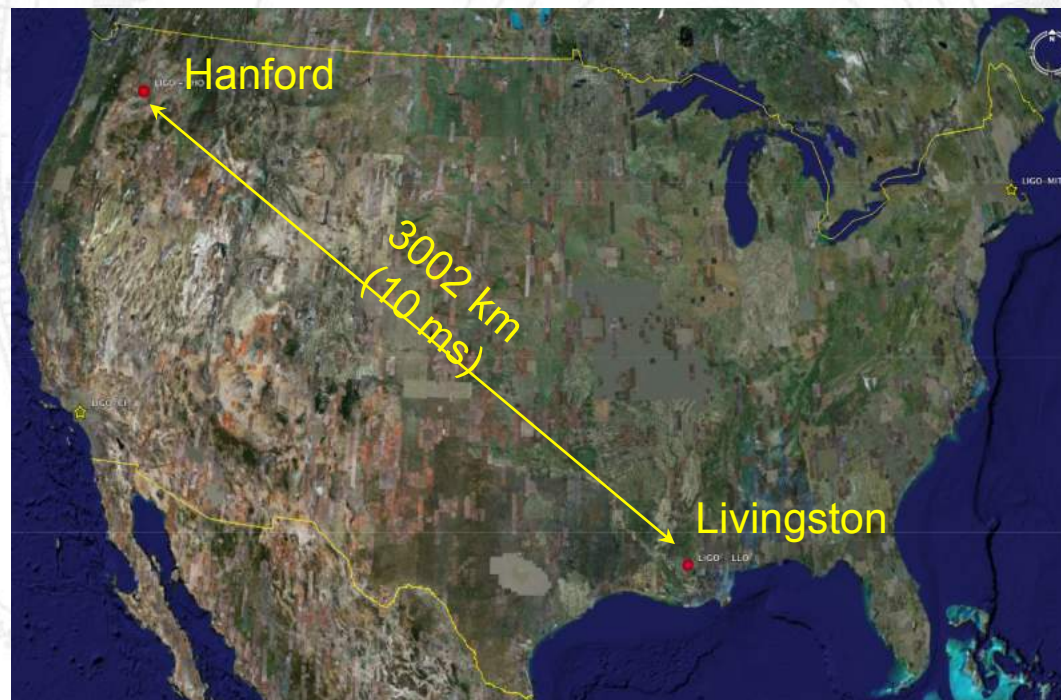


Trappole criogeniche all'azoto liquido



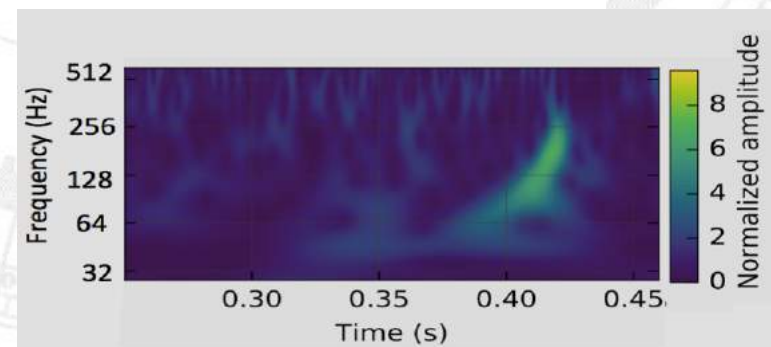
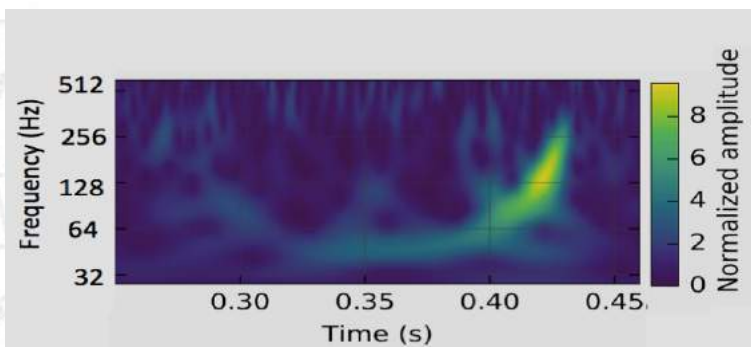
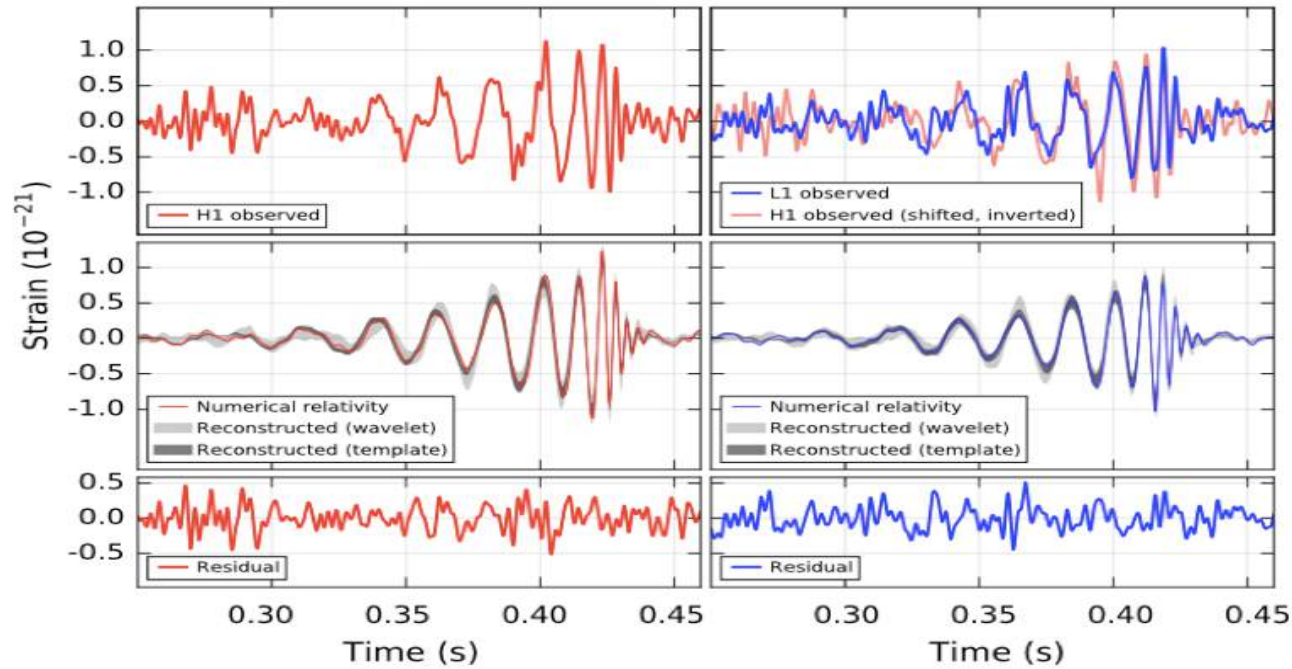


14 Settembre 2015 alle 10:50:45 ora Italiana

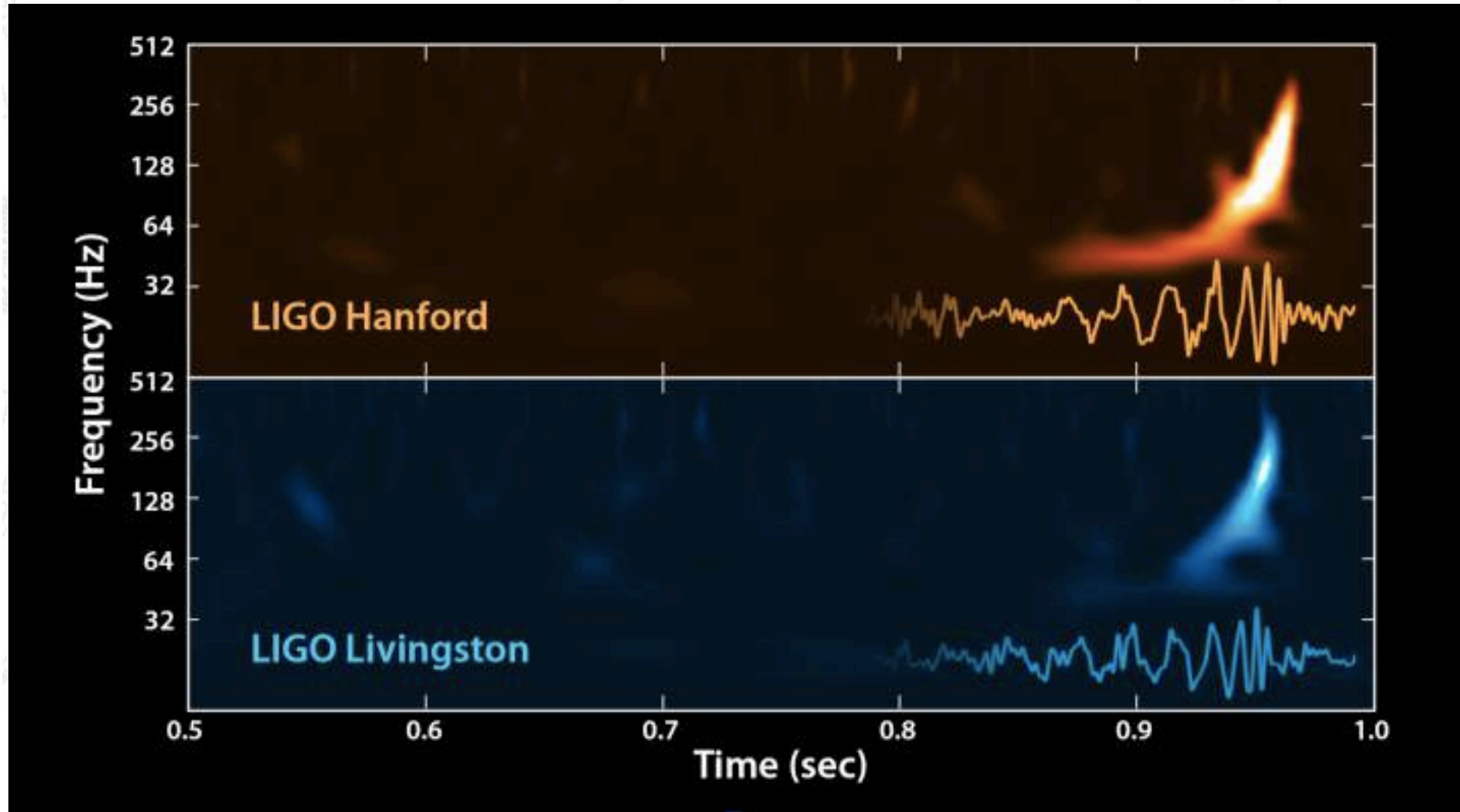


Hanford

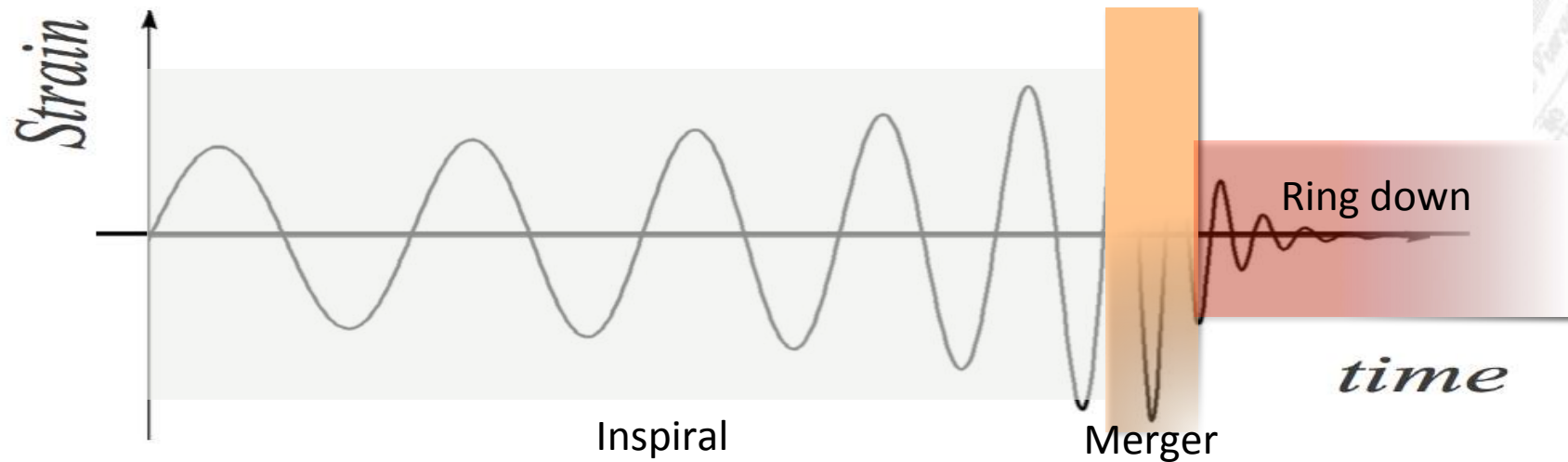
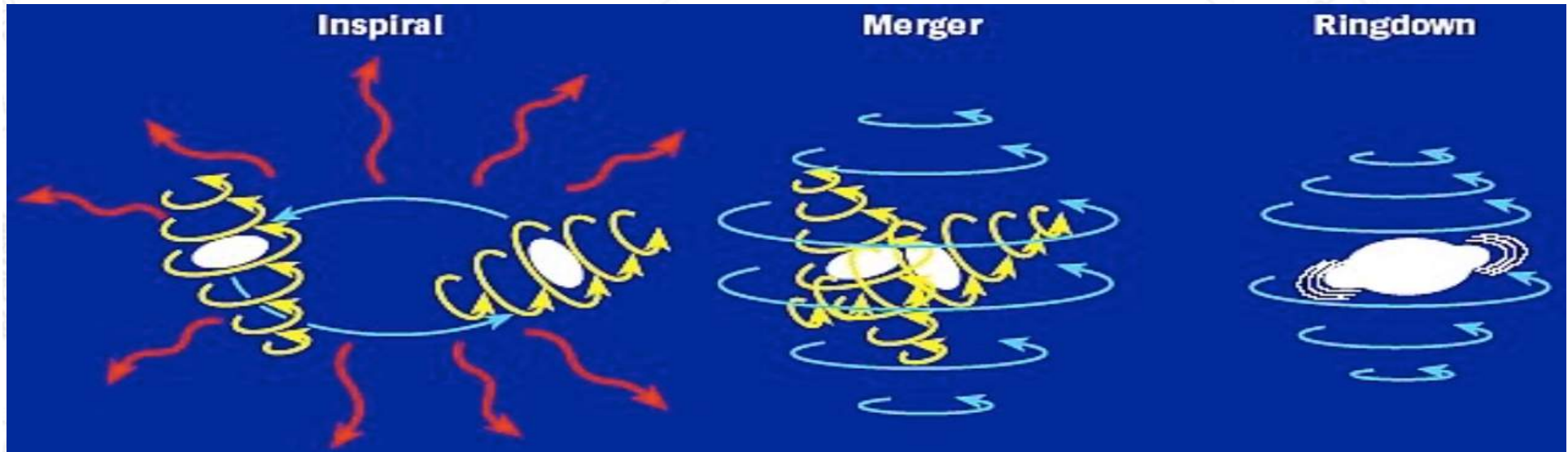
Livingston



Il segnale rivelato dagli osservatori LIGO



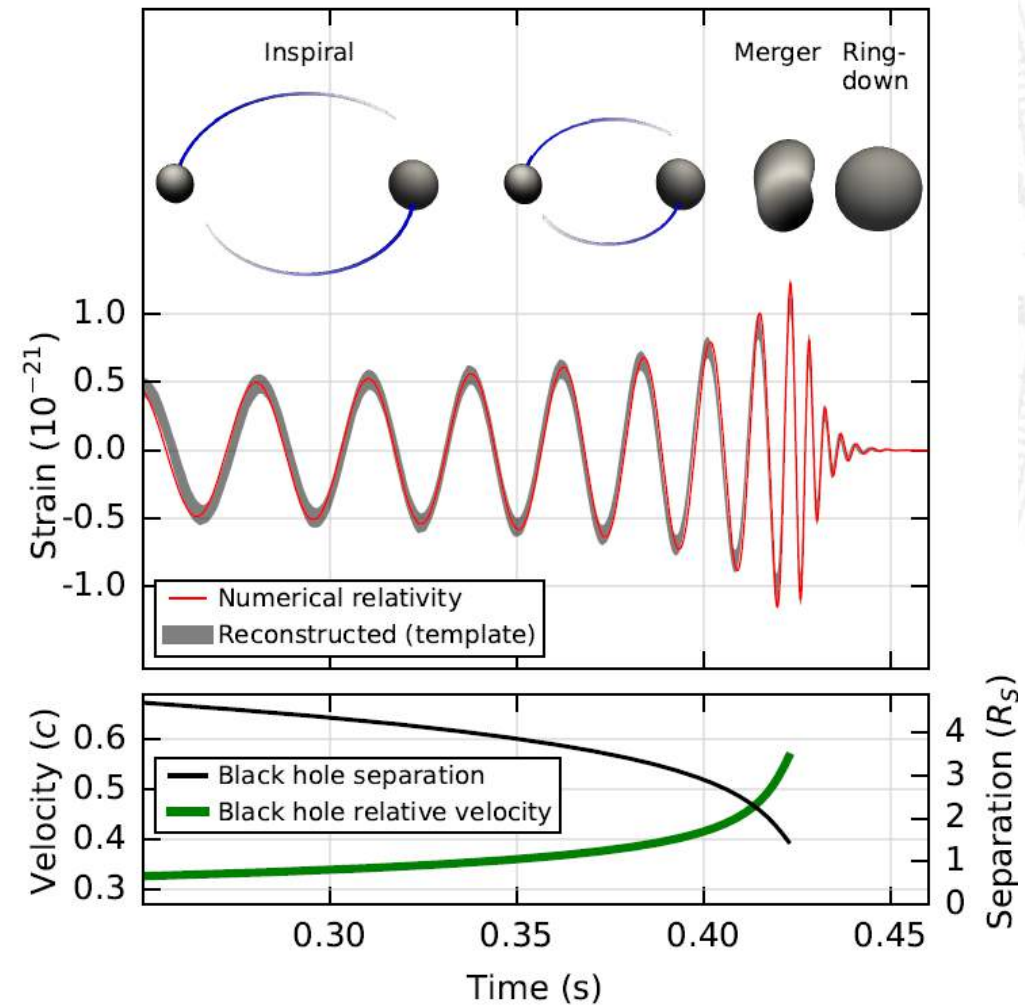
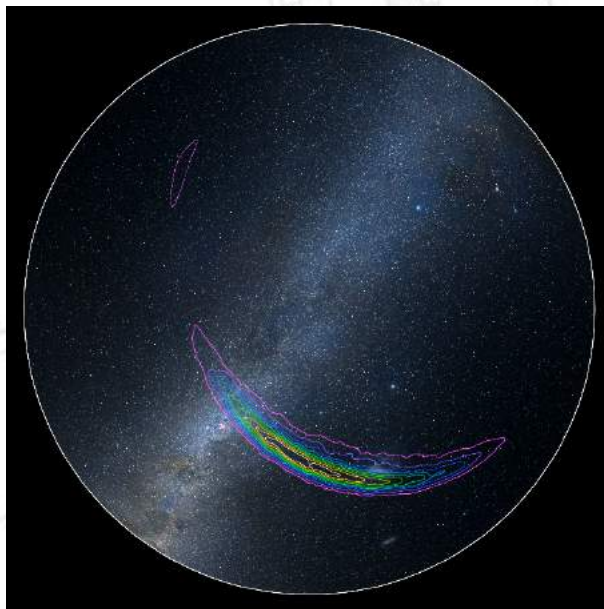
Il segnale e la sorgente

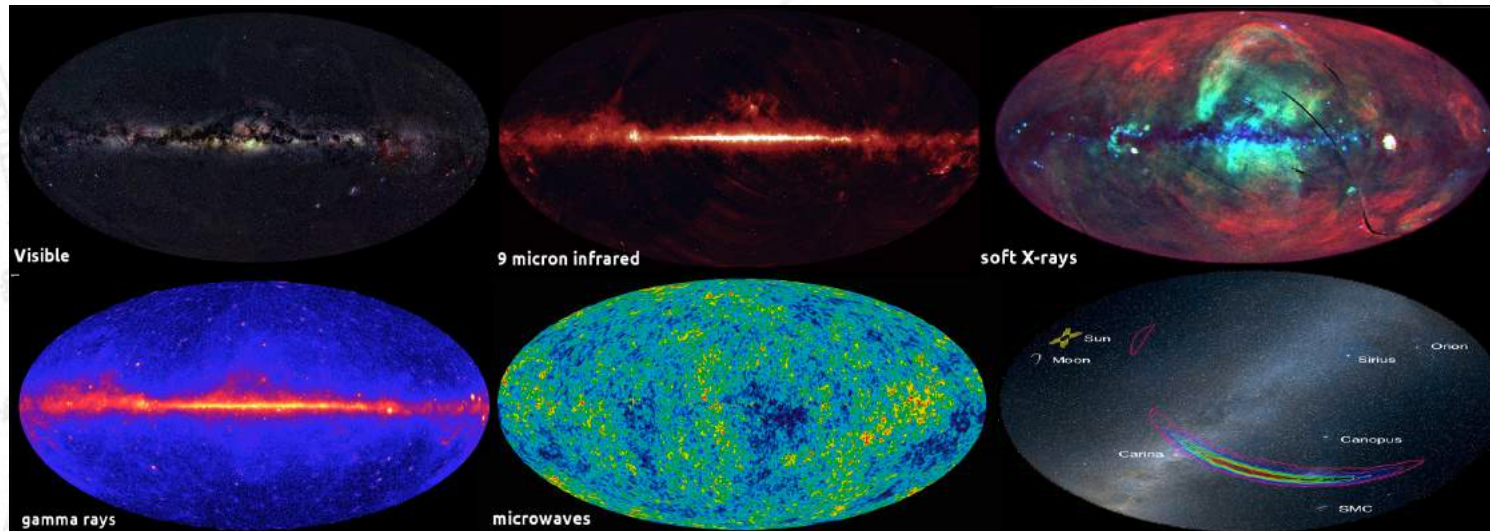


La sorgente (l'osservazione)

Sistema binario di buchi neri

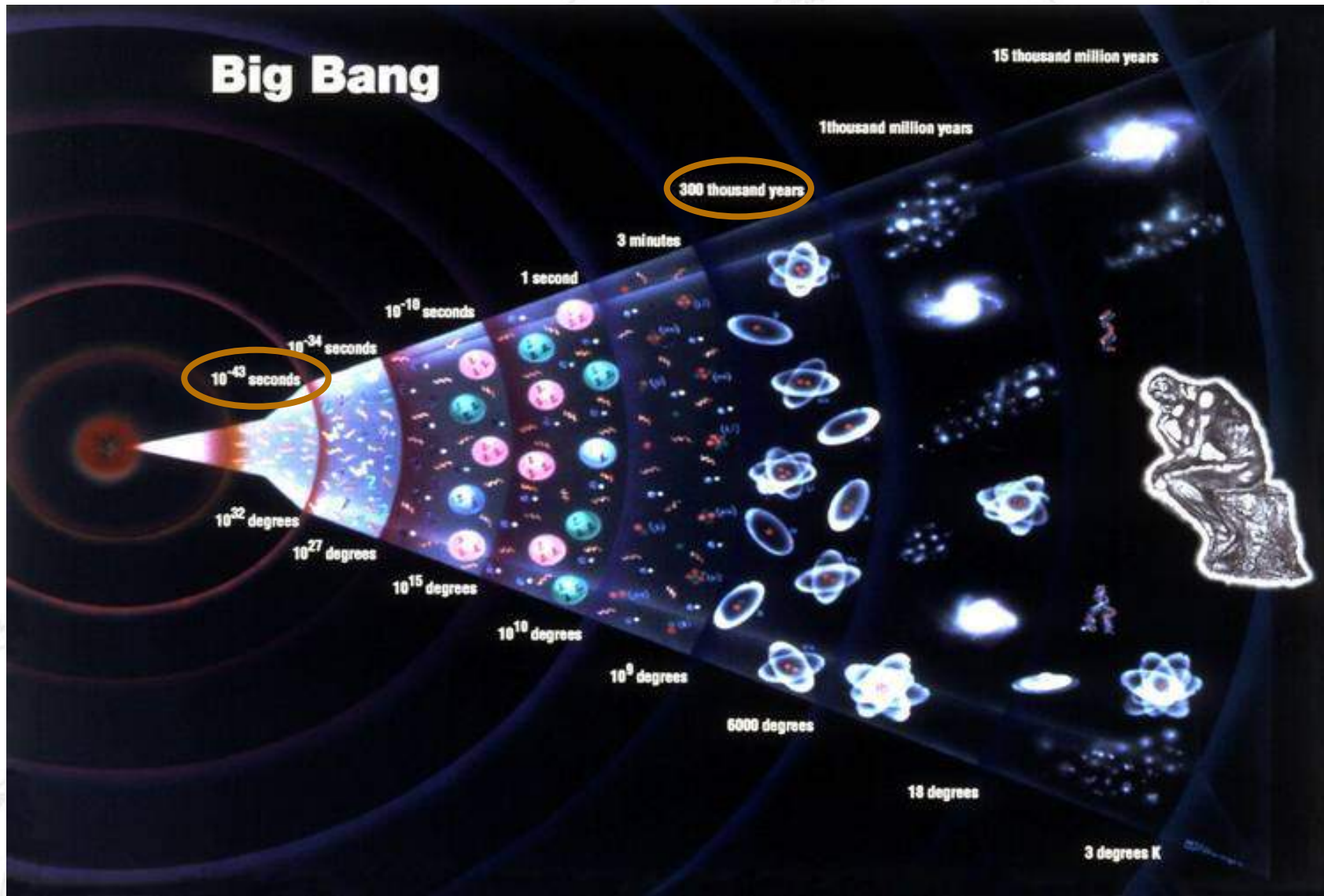
- $M_1 = 36 M_{\text{sol}}$
- $M_2 = 29 M_{\text{sol}}$
- Massa finale = $62 M_{\text{sol}}$
- Distanza = 410 MPc \sim 1,3 Miliardi di anni-luce





Le Onde Gravitazionali sono in grado di rivelare delle caratteristiche delle sorgenti che non possono essere ricavate dalle osservazioni con le onde elettromagnetiche, i raggi cosmici o i neutrini





- **1915** Einstein pubblica la teoria della Relatività Generale
- **1916** Einstein predice l'esistenza delle onde gravitazionali
- **1960** Weber costruisce i primi rivelatori
- **1974** Taylor e Hulse dimostrano l'esistenza delle onde gravitazionali (Nobel nel 1993)
- **1990** Rivelatori barre risonanti criogenici in funzione
- **2005** Rivelatori interferometrici in operazione
- **2015** Rivelatori interferometrici avanzati in presa dati
- **2015, Settembre** Prima rivelazione diretta

Ci aspetta un futuro ricco di nuove scoperte!



Grazie per la vostra
attenzione