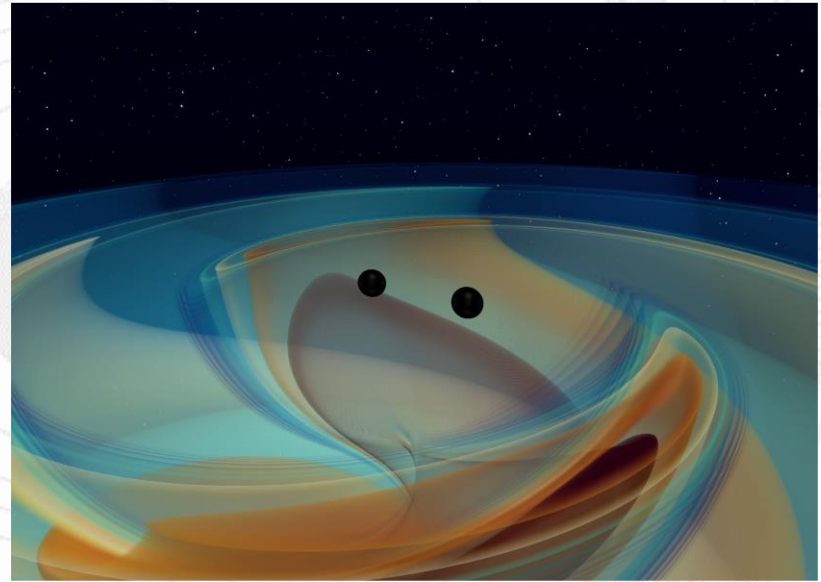


---

# In ascolto del cosmo con le onde gravitazionali



---

Alessio Rocchi

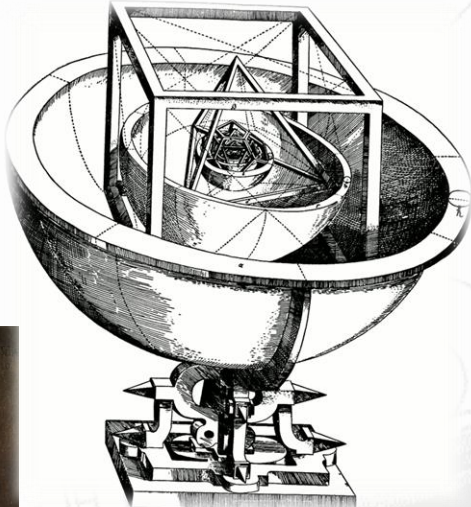
Istituto Nazionale Di Fisica Nucleare – Roma Tor Vergata



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
Sezione di Roma Tor Vergata

# L'uomo e l'universo

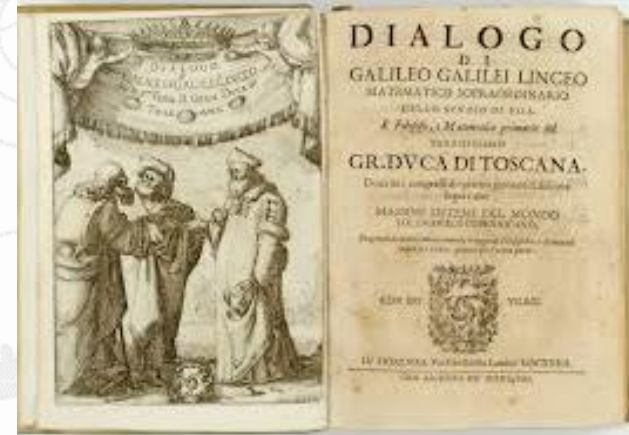
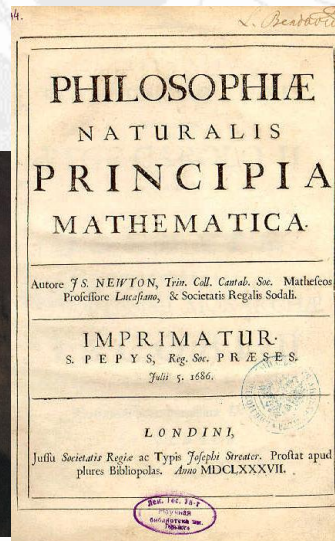
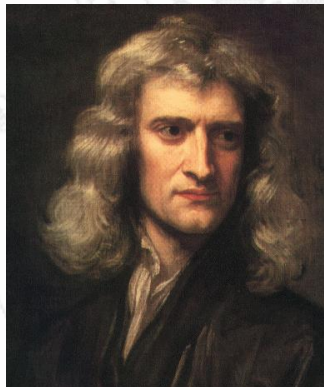
1571-1630



1564 – 1642



1642-1727



# Gravitazione Universale (1686 – Isaac Newton)

Teoria di grandissimo successo

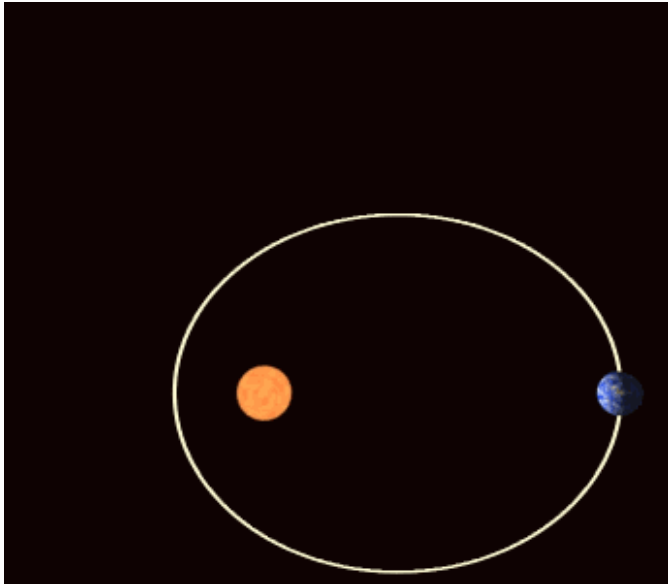
Spiegava molti problemi irrisolti in astronomia e fisica terrestre

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


$$F = G \frac{m_1 \times m_2}{d^2}$$



# Alcuni punti «aperti» nella teoria di Newton



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

(2) Come è possibile che un corpo conosca istantaneamente la posizione di tutti gli altri corpi nell'universo?

$$F = G \frac{m_1 \times m_2}{d^2}$$



# La Relatività di Einstein

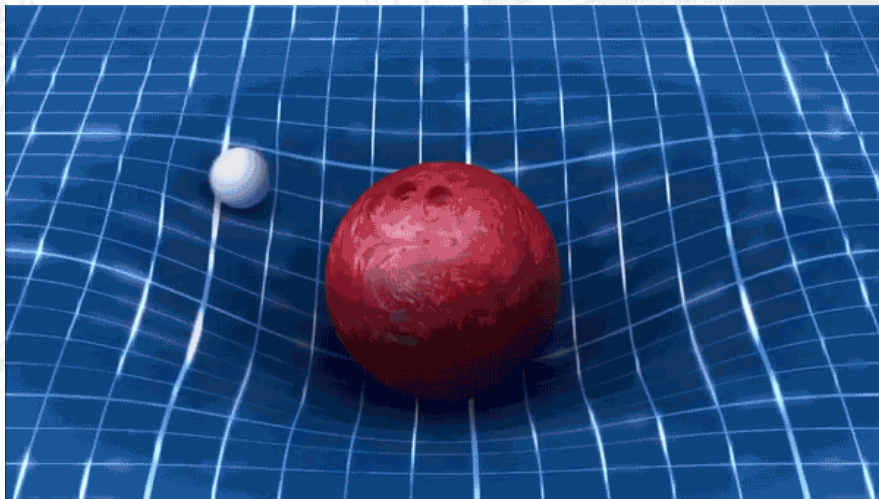
Sorpassa definitivamente il concetto di tempo e spazio assoluti.

Introduce il concetto di Spazio-Tempo =

3 dimensioni spaziali + 1 temporale.

La percezione dello spazio **e** del tempo è relativa.

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



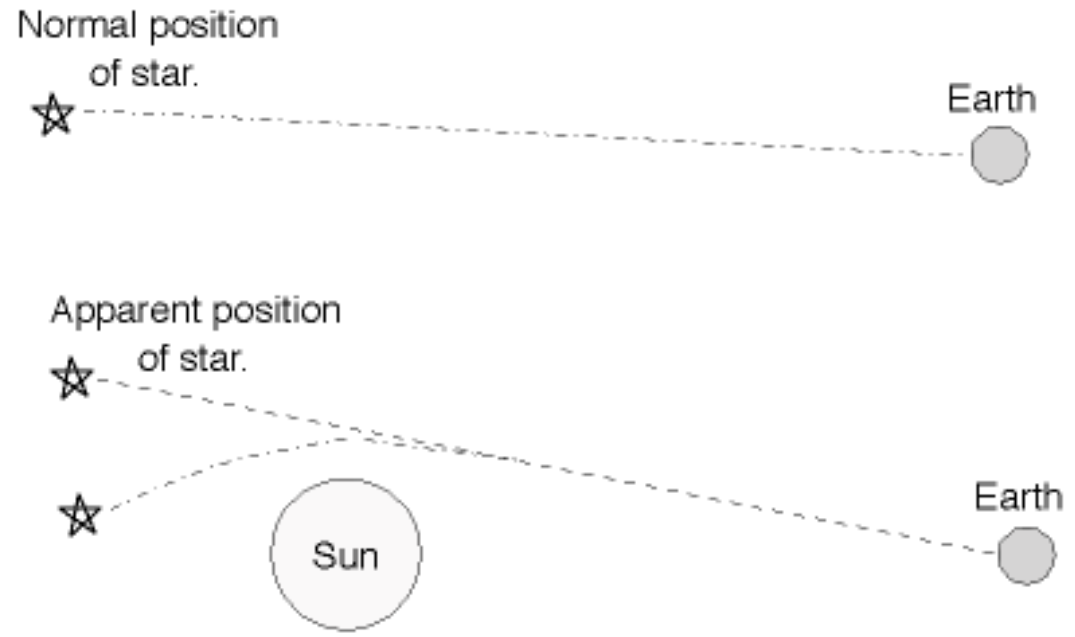
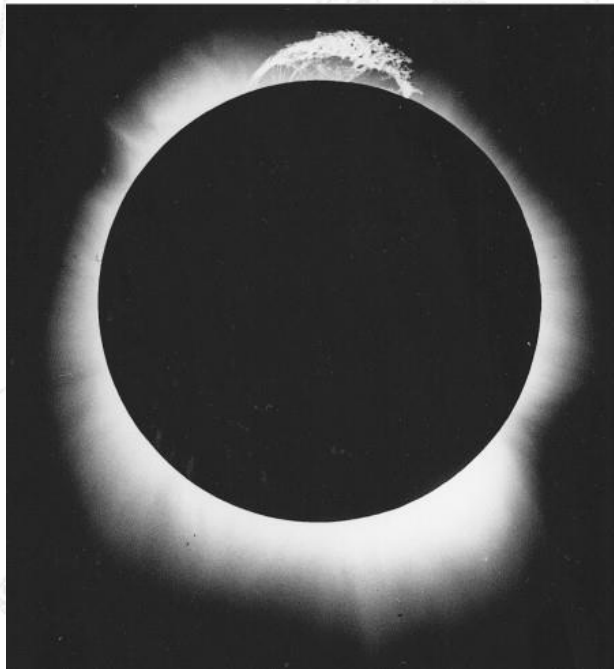
Lo spazio-tempo viene curvato dai corpi dotati di massa

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

La Relatività spiega la precessione del perielio di Mercurio

# Una nuova previsione della Relatività Generale

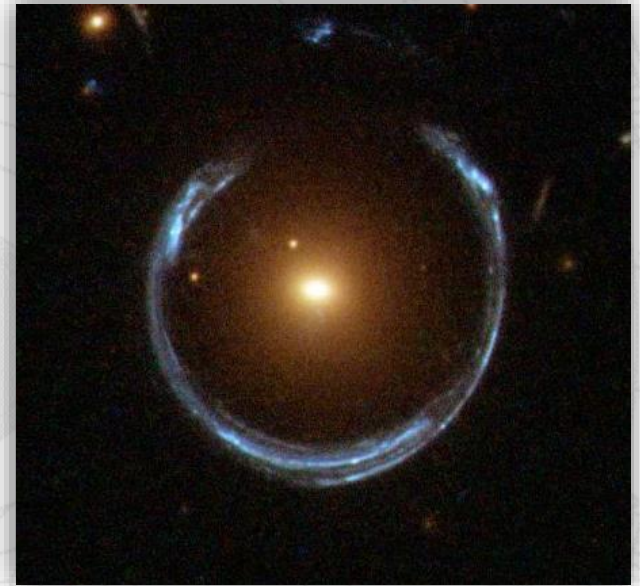
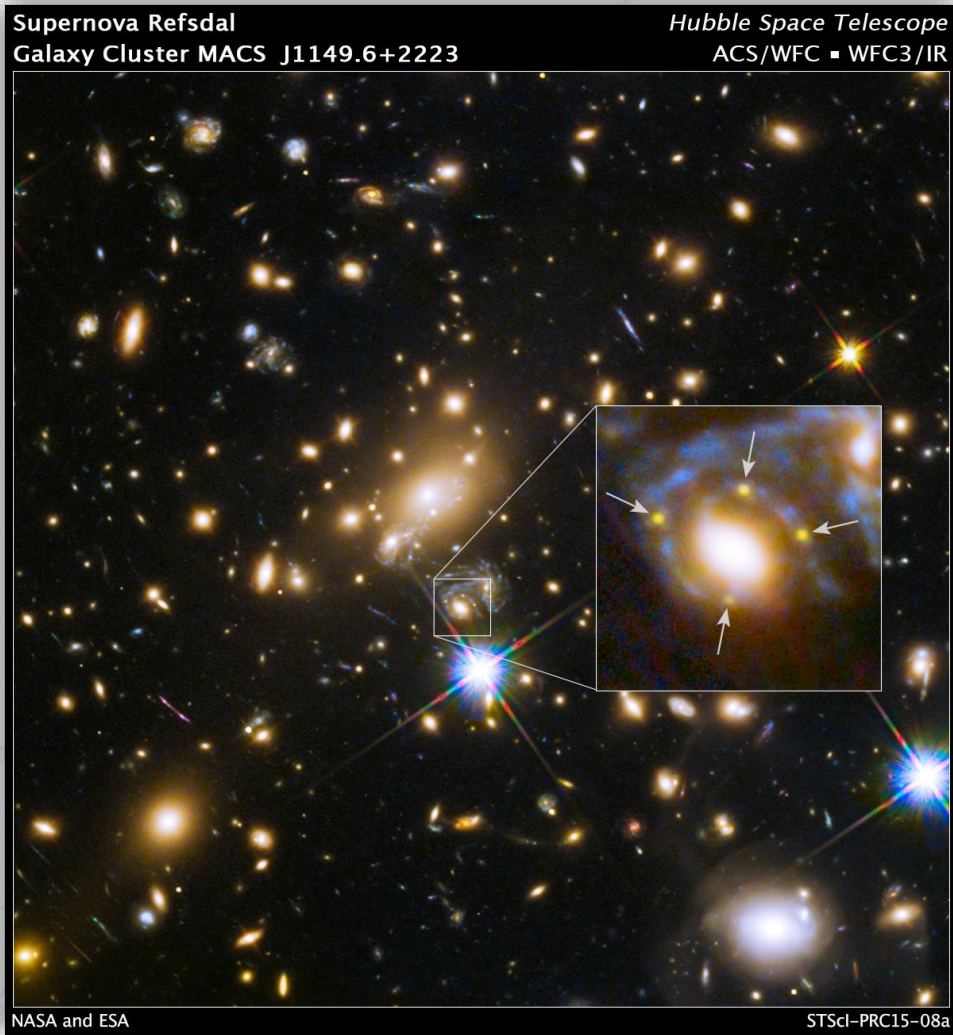
Il percorso della luce viene “piegato” quando questa passa vicino ad un oggetto dotato di massa (come il Sole)



Confermata dall’astronomo inglese Sir Arthur Eddington durante una spedizione per fotografare l’eclissi solare del 29 Maggio 1919



# Le lenti gravitazionali





# La conferma dalle osservazioni

## REVOLUTION IN SCIENCE.

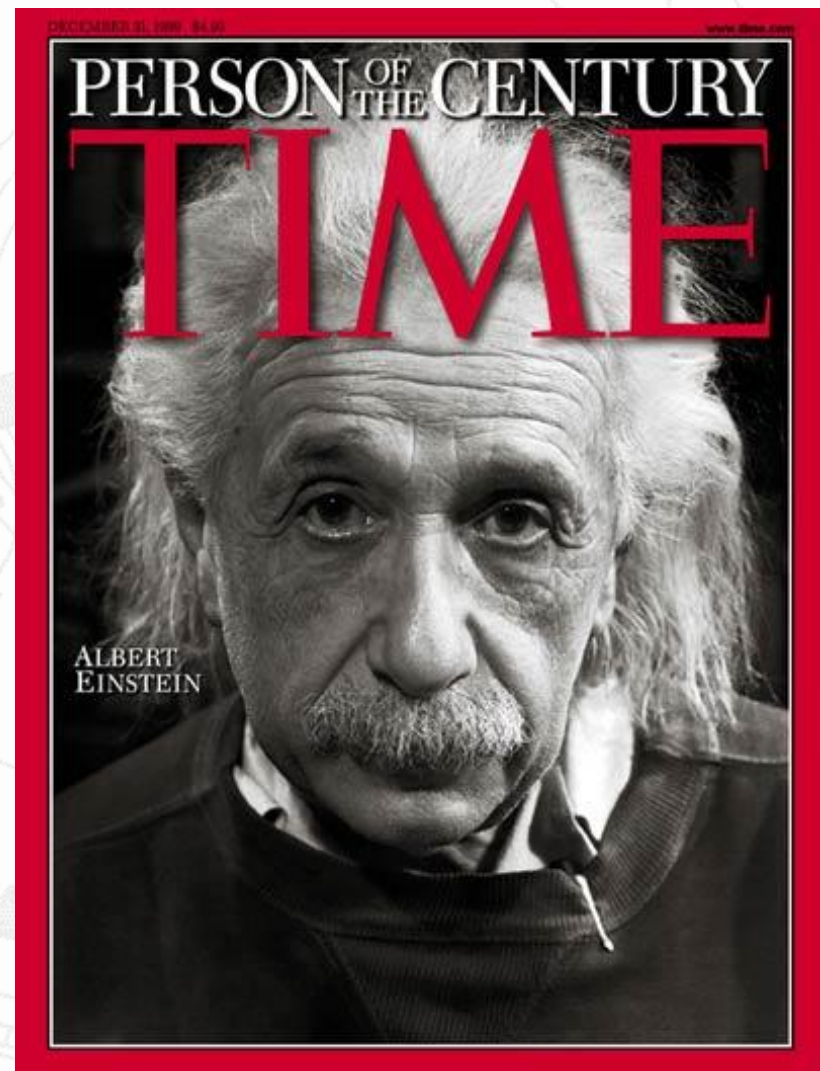
### NEW THEORY OF THE UNIVERSE.

#### 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-

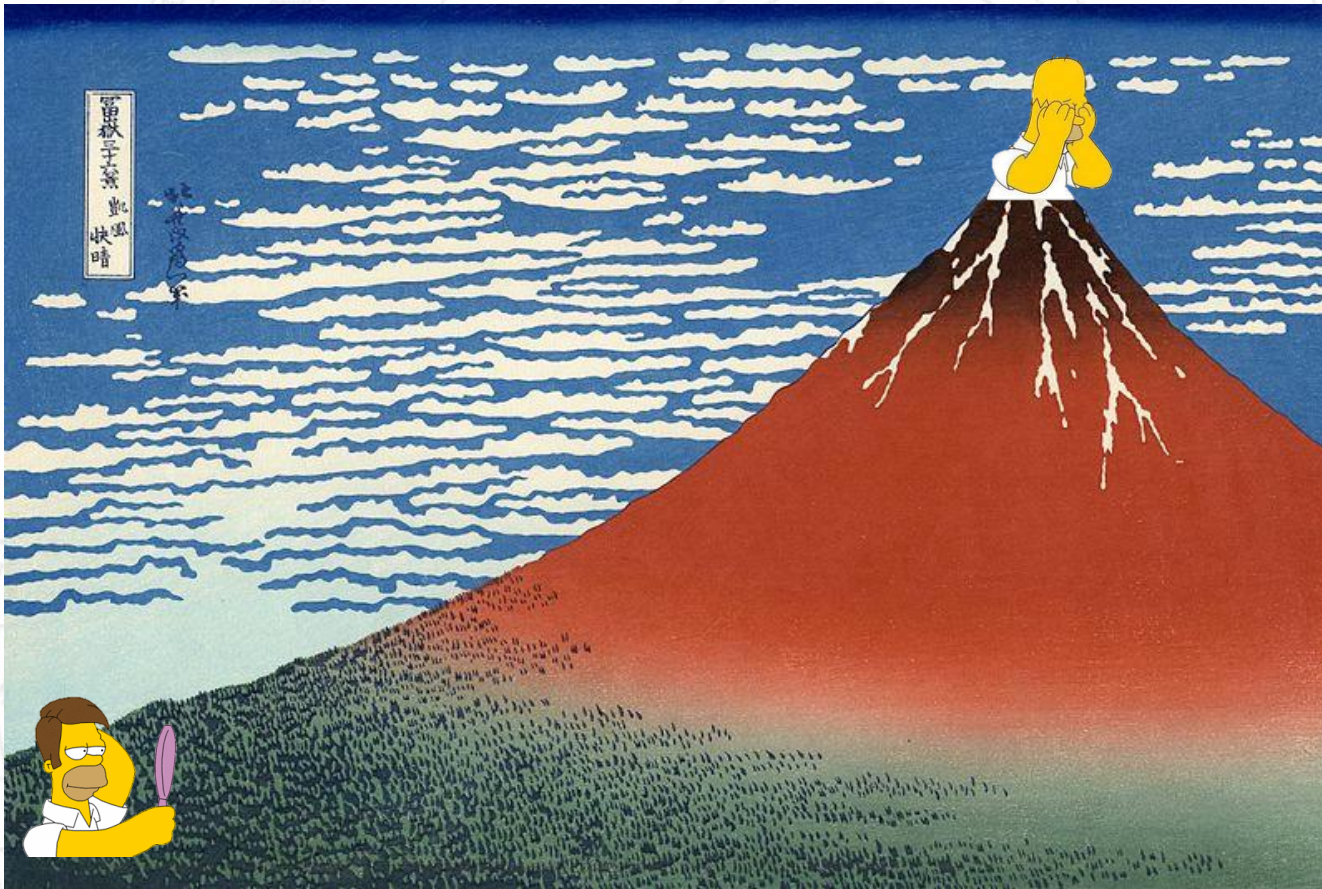
London Times, 6  
Novembre 1919





# 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.

1 GPS satellites broadcast radio signals providing their locations, status, and precise time  $\{t_1\}$  from on-board atomic clocks.

2 The GPS radio signals travel through space at the speed of light  $\{c\}$ , more than 299,792 km/second.

3 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  $\{t_2\}$ .

4 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](http://WWW.GPS.GOV)

This poster is a product of the Mission Coordination Office for Space-Based Positioning, Navigation, and Timing, an affiliate of the United States Command, under license of USA.



# Un altro effetto della Relatività: le onde gravitazionali

## COSA SONO LE ONDE GRAVITAZIONALI

COS'È UN'ONDA GRAVITAZIONALE?

È UN'INCRESPATURA NEL TESSUTO DELLO SPAZIO-TEMPO.

IMMAGINA CHE LO SPAZIO SIA UN GIGANTESCO TAPPETO DI GOMMA:



SICCOME LA GRAVITÀ È MOLTO DEBOLE RISPETTO ALLE ALTRE FORZE NELL'UNIVERSO...

COPPIA DI STELLE DI NEUTRONI

COPPIA DI BUCHI NERI

BUCO NERO E STELLA DI NEUTRONI

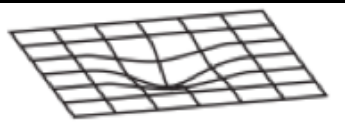
...OCCORRONO OGGETTI MOLTO, MOLTO MASSICCI CHE SI MUOVONO MOLTO, MOLTO VELOCEMENTE PER PRODURRE DELLE INCRESPATURE ABBASTANZA GRANDI DA ESSERE RILEVATE.



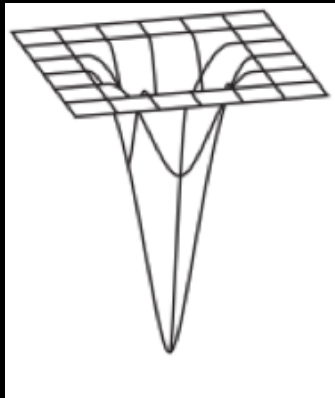
# Stelle di neutroni e buchi neri sono oggetti densissimi

Un cucchiaino di una stella di neutroni (raggio 10 km) pesa 10 milioni di tonnellate

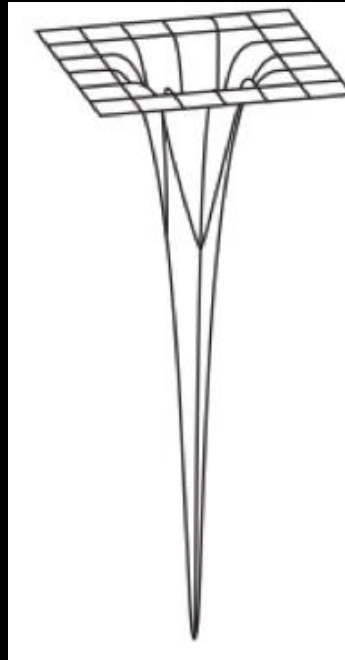
Sole



Stella di neutroni



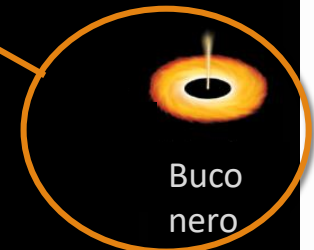
Buco nero



Stella di neutroni

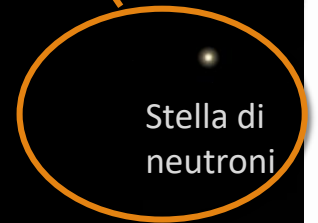
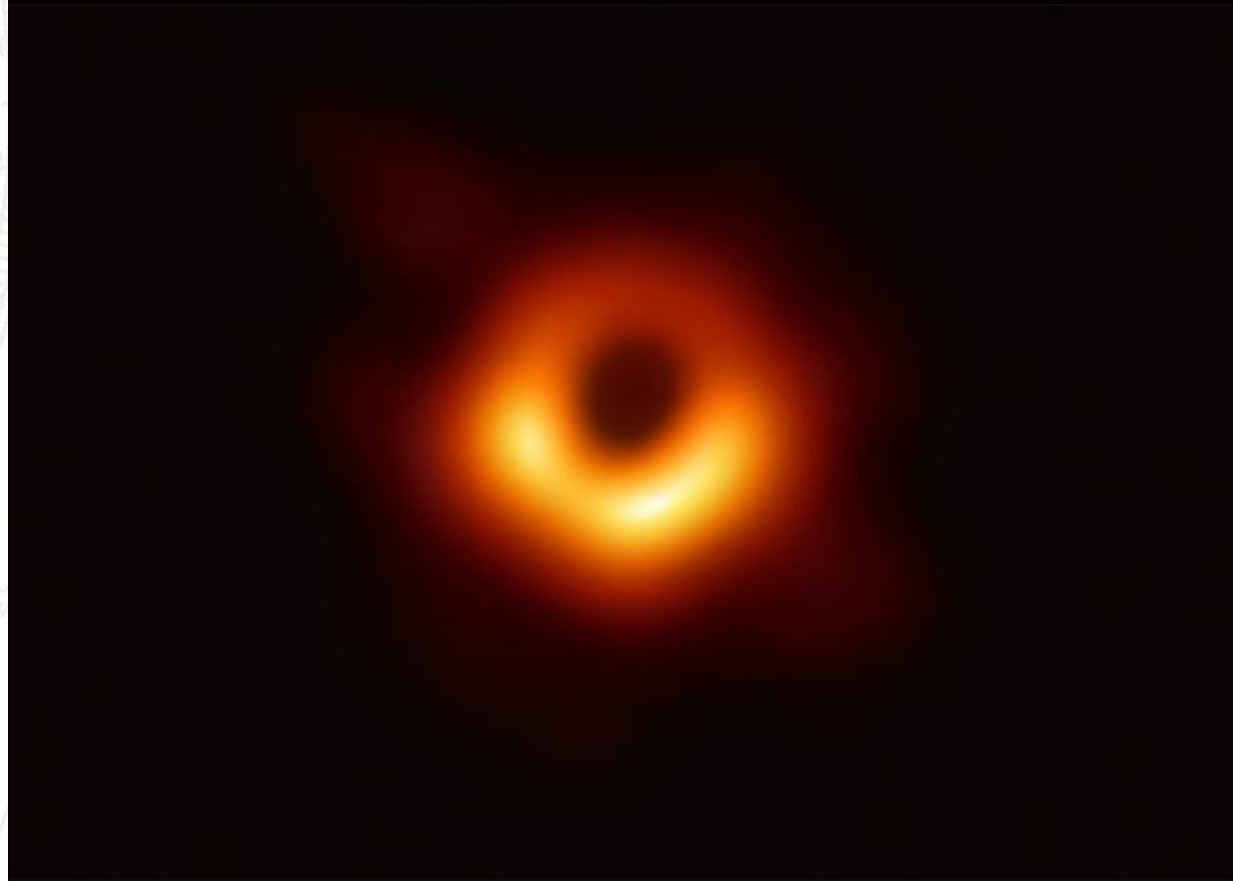


Buco nero

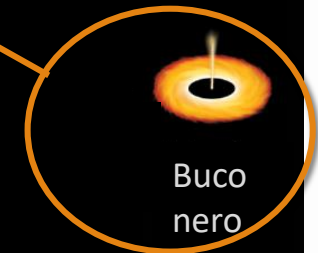


# Stelle di neutroni e buchi neri sono oggetti densissimi

Un cucchiaio di una stella di neutroni  
(raggio 10 km) pesa 10 milioni di tonnellate



Stella di  
neutroni



Buco  
nero

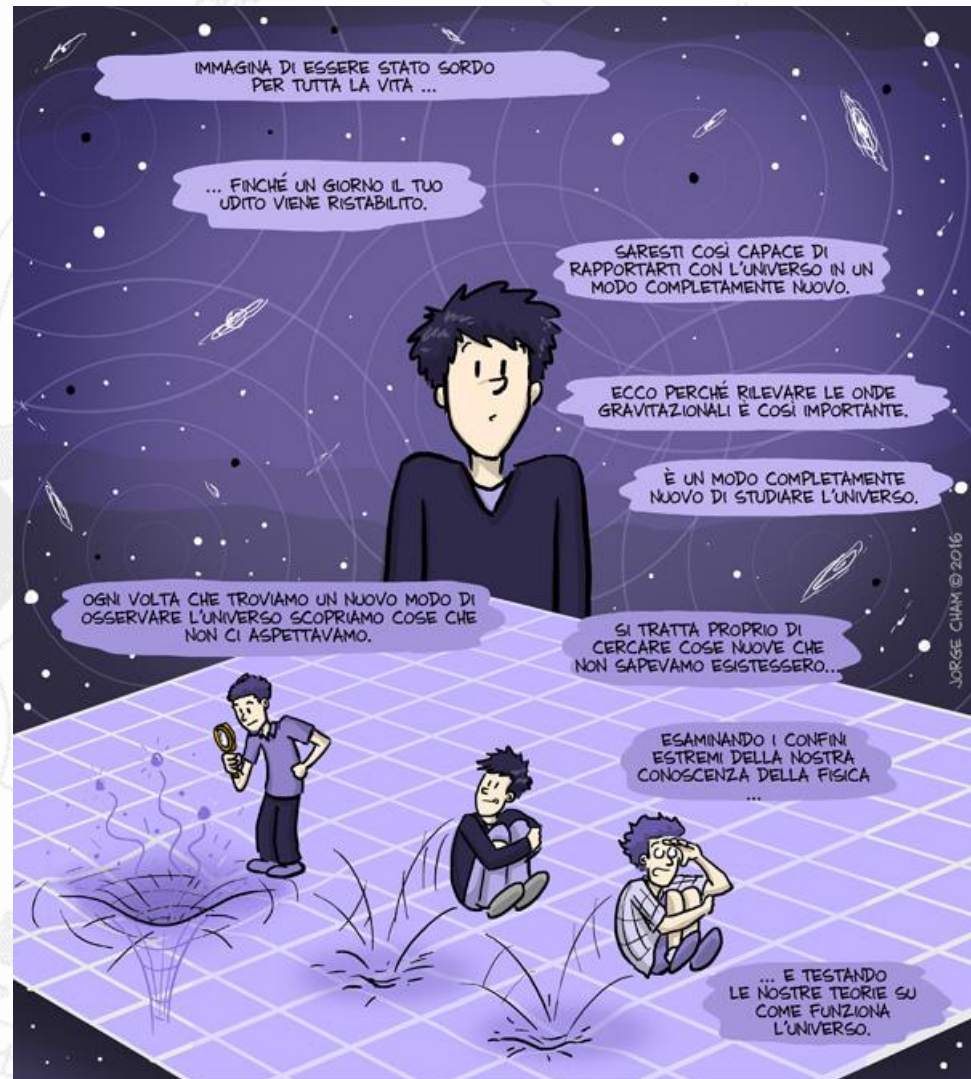
# Onde Gravitazionali: il «suono dell'universo»

La sfera celeste è stata studiata per mezzo di radiazioni elettromagnetiche, dovute a temperatura, carica, magnetismo delle stelle:

**l'immagine dell'universo**

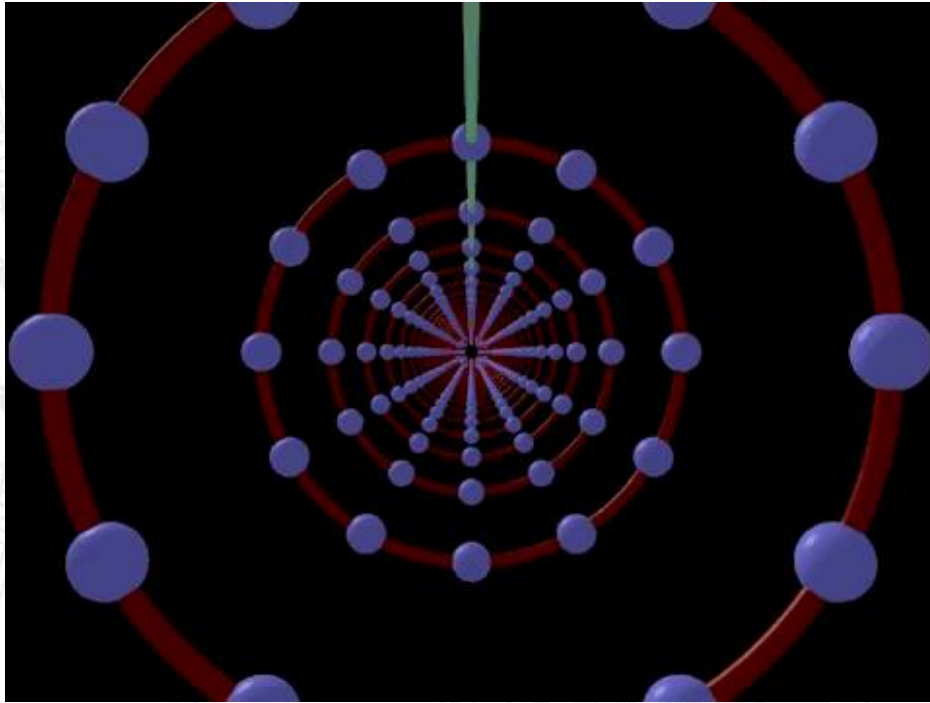
Le onde gravitazionali, di natura completamente diversa, sono dovute alla massa dei corpi celesti. Possono portare informazioni totalmente nuove e sconosciute:

**il suono dell'universo**





# Effetto dell'onda gravitazionale

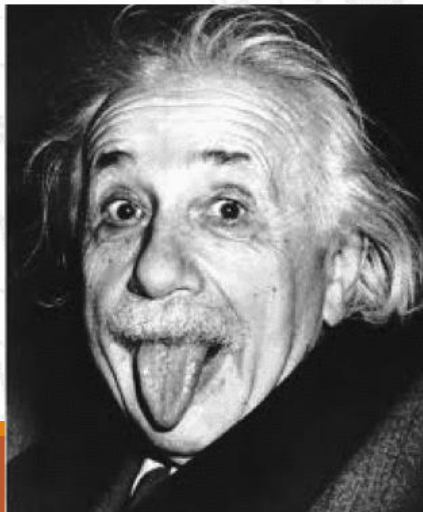


L'effetto dell'onda gravitazionale è tanto maggiore quanto maggiore è la distanza tra le masse

Se la distanza è di 1 km → un'onda gravitazionale «forte» produce una **variazione di distanza è di circa  $10^{-18}$  m**

ovvero

0,00000000000000000001 metri



# Quanto è piccolo $10^{-18}$ m?

Supponiamo di versare un bicchiere di vino (o di acqua) in mare....

Superficie dell'oceano (S):

$$\begin{aligned} &70\% \times 4\pi \times R_{\text{terra}}^2 = \\ &0.7 \times 4 \times 3.14 \times (6.37 \times 10^6 \text{ m})^2 \\ &\sim 3.6 \times 10^{14} \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Volume di un bicchiere (V):

$$\sim 0.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

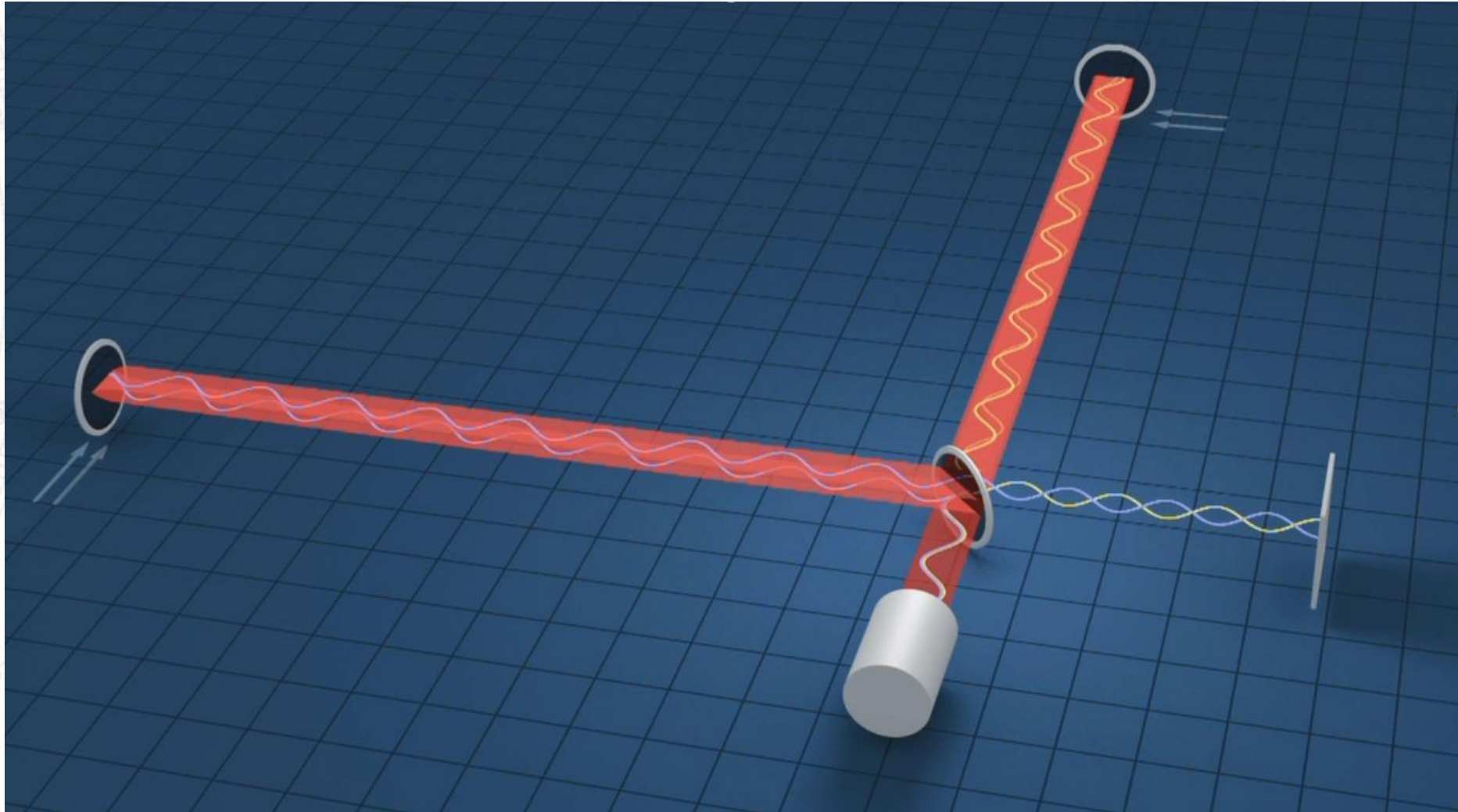


**Innalzamento prodotto:**

$$h \sim V / S \sim \mathbf{10^{-18} \text{ m}}$$

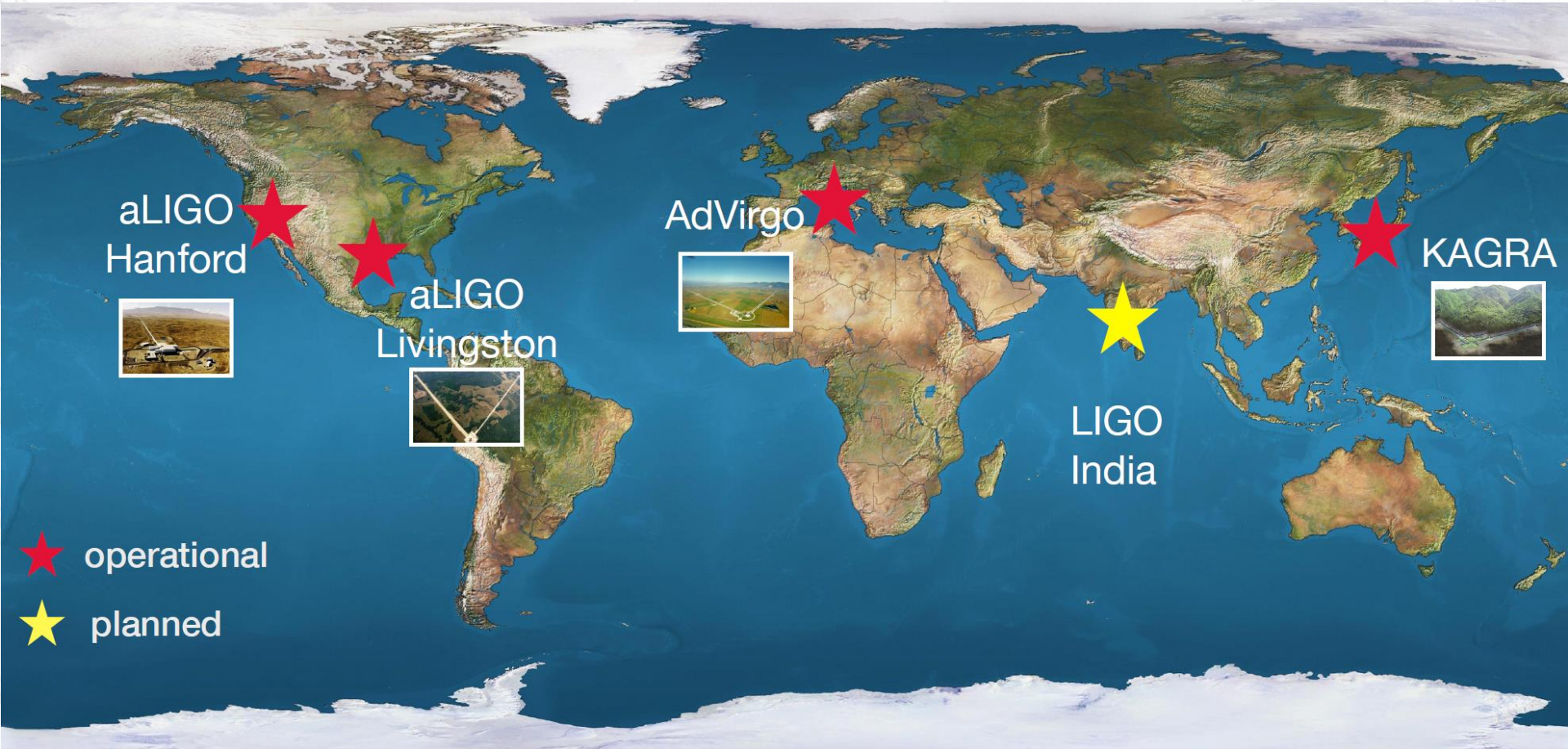
Quello che possiamo misurare con Virgo è dello stesso ordine di grandezza!!

# Rivelare le onde gravitazionali con la luce





# La rete mondiale di interferometri





# Il rivelatore Virgo (Cascina, Pisa)



9 Paesi europei  
Più di 400 tra fisici,  
ingegneri e tecnici



# Una sfida tecnologica

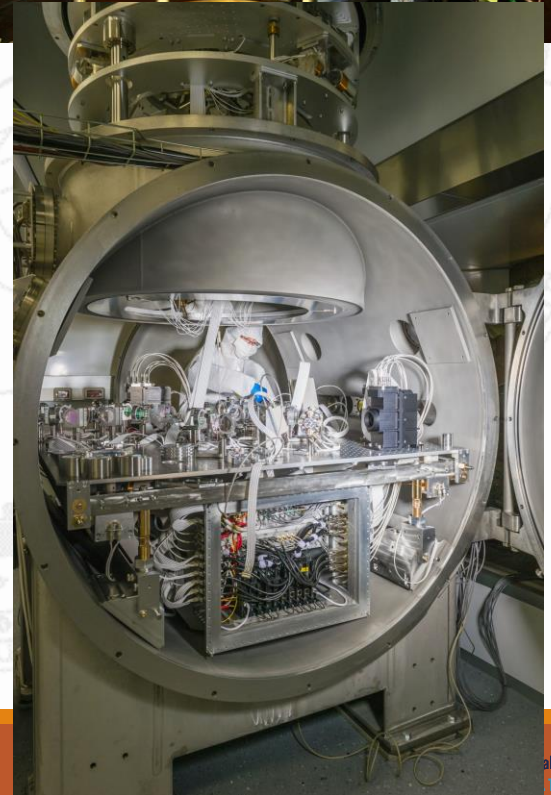
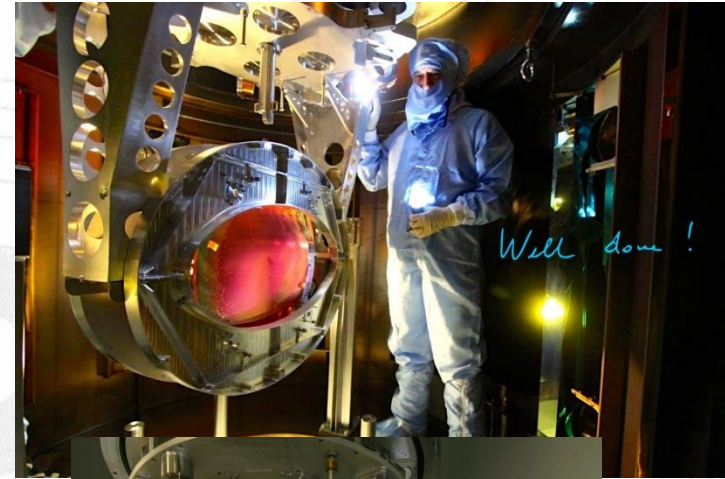
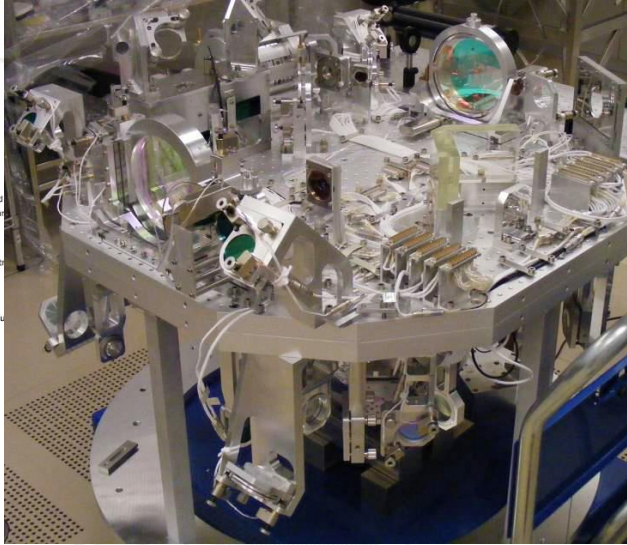
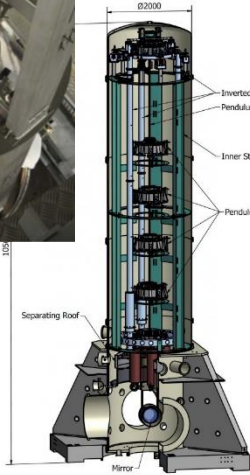
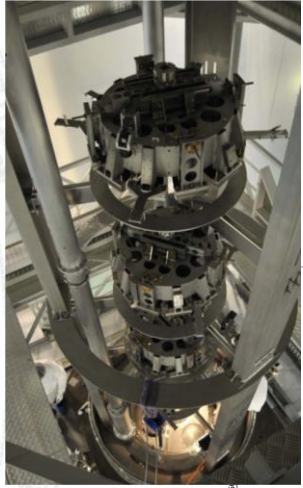
Misurare spostamenti di  $10^{-18}$  metri → una misura estremamente “difficile”

Per **Virgo** sono state sviluppate tecnologie estreme per battere i “rumori” che possono produrre falsi segnali, molto più grandi di quelli generati dalle onde gravitazionali.





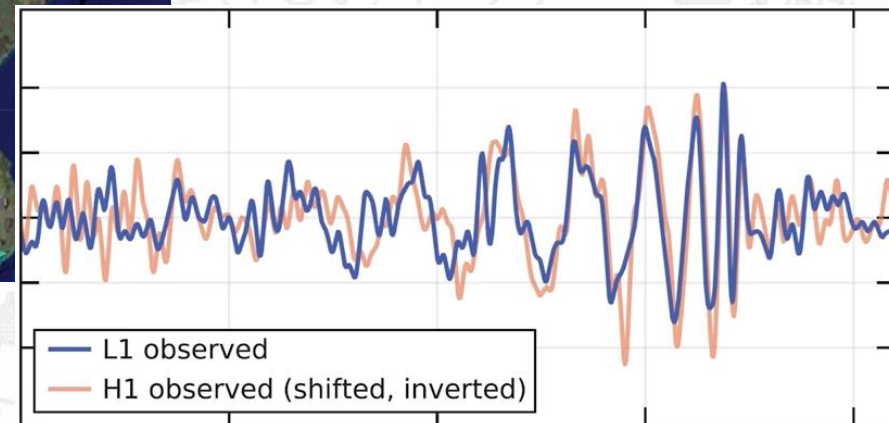
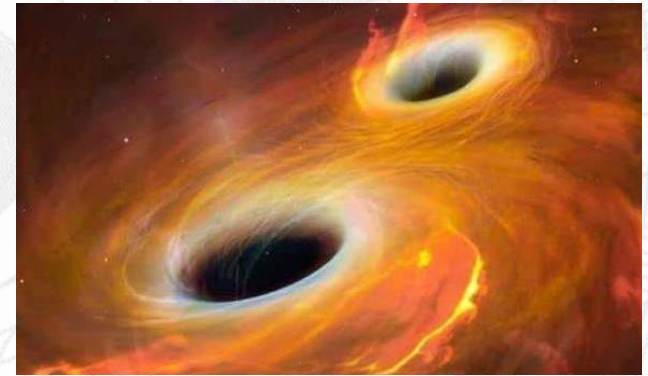
# La tecnologia in Virgo





# Il primo segnale rilevato

**14 Settembre 2015 alle 10:50:45 ora italiana**



- Masse iniziali dei due buchi neri:  $36 M_{\text{sol}}$  and  $29 M_{\text{sol}}$
- massa finale =  $62 M_{\text{sol}}$
- 3 masse solari sono state trasformate in energia gravitazionale

$$E = mc^2$$

In pochi decimi di secondo, 50 volte la luce emessa da tutte le  
stelle dell'Universo

- Distanza = 1,3 miliardi di anni luce



# La notizia fa il giro del mondo...

**The Telegraph**  
Gravitational waves: Einstein was right - and this announcement is the scientific highlight of the decade  
A century after Albert Einstein explained his General Theory of Relativity, scientists are expected to announce that they have found gravitational wave ripples created by the collisions of black holes

**CNN**  
Gravitational waves are real, say physicists, proving Einstein's theory to be true.  
**Einstein theory proved right**

**The New York Times**  
Cosmic Chirp From Black Holes Colliding Vindicates Einstein  
The sound of the collision ripples a billion light years away is the first direct evidence of gravitational waves, the ripples in the fabric of space-time that Einstein predicted a century ago.

**De Telegraaf**  
**Einstein had gelijk**  
Van groot rooibloed van het hoois is opgeleid. De rijksoverheid zwaart met het geven van een prijs voor Albert Einstein vanwege zijn vooruitziende gedachte. De ontdekking gaat naar het fundament van het heelal.

**Rai News**  
ULTIMO: MATTARELLA: IS MINACCIA PIÙ DIROMPENTE

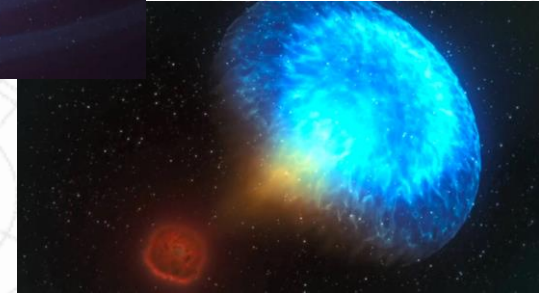
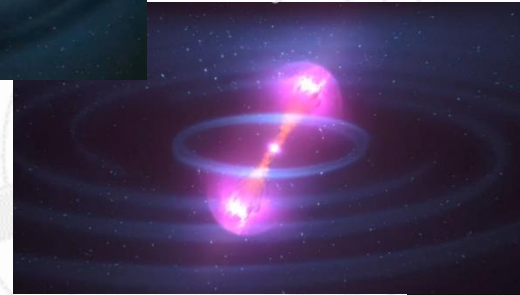
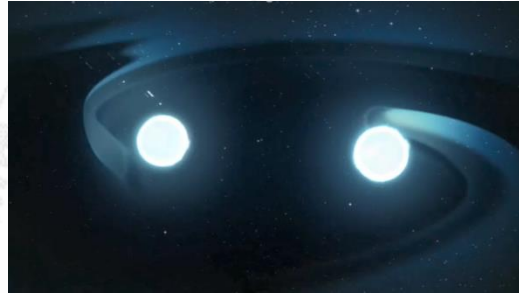
**Le Monde**  
ONDES GRAVITATIONNELLES, PREMIÈRE COLLISION DE 2 BUCHI NERES  
Un événement historique a été enregistré, une onde gravitationnelle causée par la collision de deux trous noirs.

**la Repubblica**  
"Abbiamo visto le onde gravitazionali" finestra sull'universo sconosciuto - diretta tv  
Vengono da collisione tra 2 buchi neri, un miliardo di anni fa  
Video Cattaneo: "Einstein aveva ragione" / La simulazione  
Che cosa sono, domande e risposte

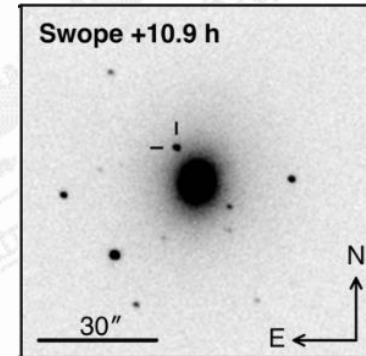
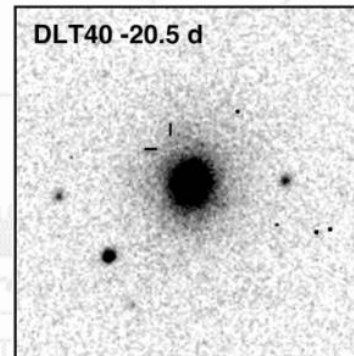
**Bild**  
Astronomie-Sensation  
**Physiker belegen Einsteins Gravitationswellen!**

**Press Release**  
3 October 2017  
**The Nobel Prize in Physics 2017**  
The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2017 with one half to and the other half jointly to  
**Rainer Weiss** LIGO/VIRGO Collaboration  
**Barry C. Barish** and **Kip S. Thorne** LIGO/VIRGO Collaboration  
*"for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves"*

# Onde gravitazionali da stelle di neutroni (17.08.2017)



L'evento (GW170817) è avvenuto nella galassia NGC4993 a 130 milioni di anni luce dalla Terra





# La nascita dell'astronomia multimessaggera

## Cosa abbiamo imparato:

- (i) Prima sono arrivate le onde gravitazionali e dopo pochi secondi il lampo gamma  
→ la fusione di due stelle di neutroni è il progenitore dei lampi gamma brevi e intensi
- (ii) Poi sono state emesse onde nell'ultravioletto, nel visibile e nell'infrarosso  
→ abbiamo capito dove si formano gli elementi pesanti presenti nell'Universo

Iridio



Platino



Oro



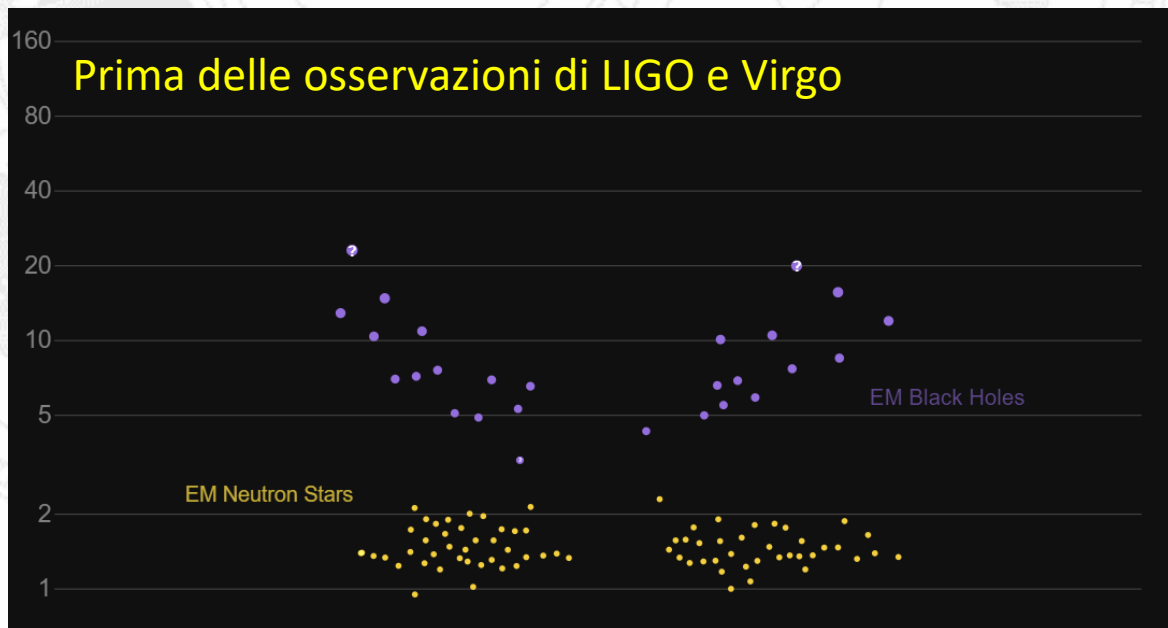
Piombo

- (iii) Infine abbiamo avuto emissione di raggi X e di onde radio  
→ abbiamo potuto studiare meglio alcune proprietà del lampo gamma



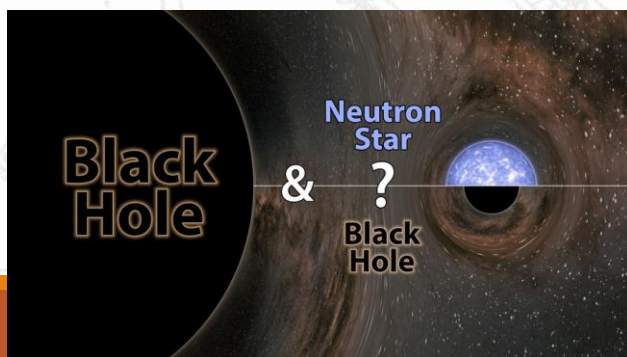
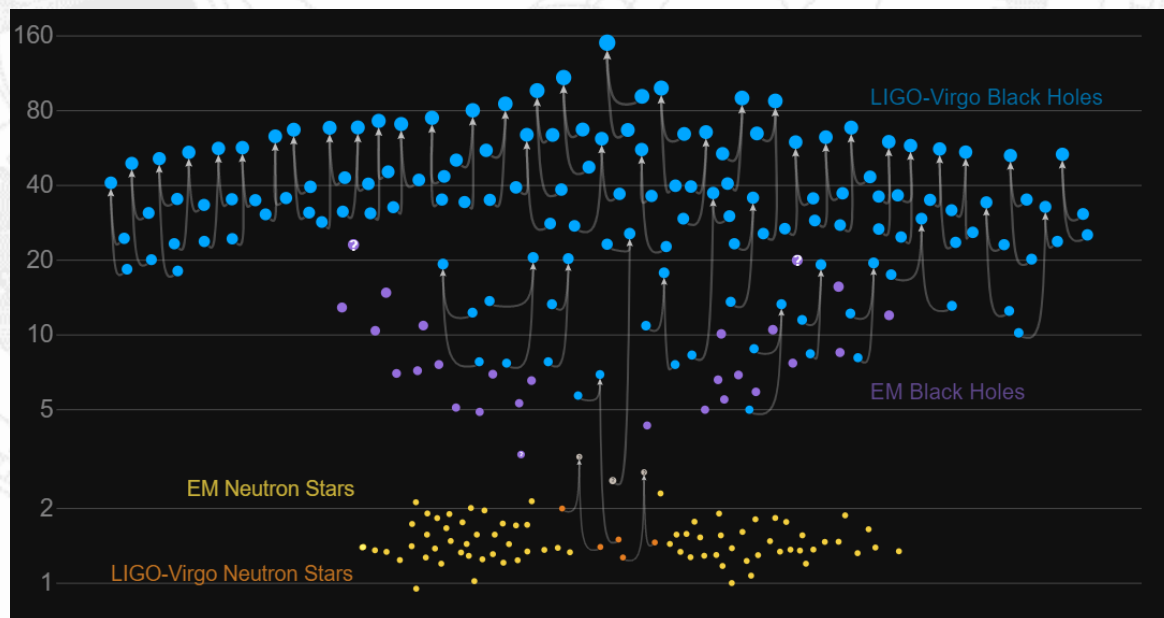
# Altre osservazioni

Nel 2020 si è concluso il terzo periodo osservativo che ha visto aumentare moltissimo il numero degli eventi rivelati.



# Altre osservazioni

Nel 2020 si è concluso il terzo periodo osservativo che ha visto aumentare moltissimo il numero degli eventi rivelati.



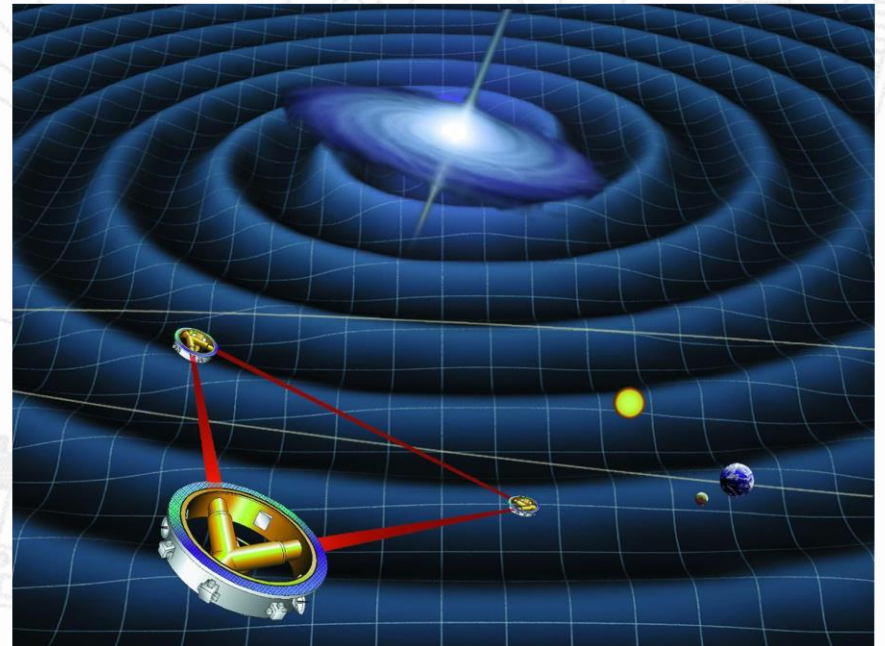
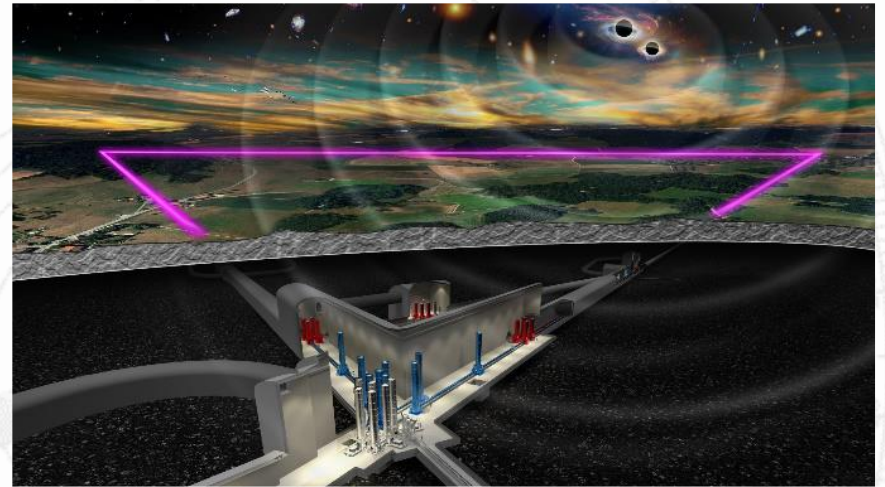
# Il futuro dell'astronomia gravitazionale

LIGO, Virgo (e KAGRA) continueranno l'osservazione dell'universo con le onde gravitazionali nei prossimi anni (a partire da metà 2022) e, a più lungo termine, ci saranno altri due importanti progetti finanziati dall'INFN:

**Einstein Telescope** – un interferometro sotterraneo, criogenico e con bracci di 10 km (forse in Sardegna!);

**LISA** – interferometro spaziale, con bracci di 5 milioni di km!

Entrambi entreranno in funzione negli anni 2030-2040.







# Grazie per la vostra attenzione

Se siete interessati a visitare Virgo:

<https://www.ego-gw.it/visit-us/guided-tour/>

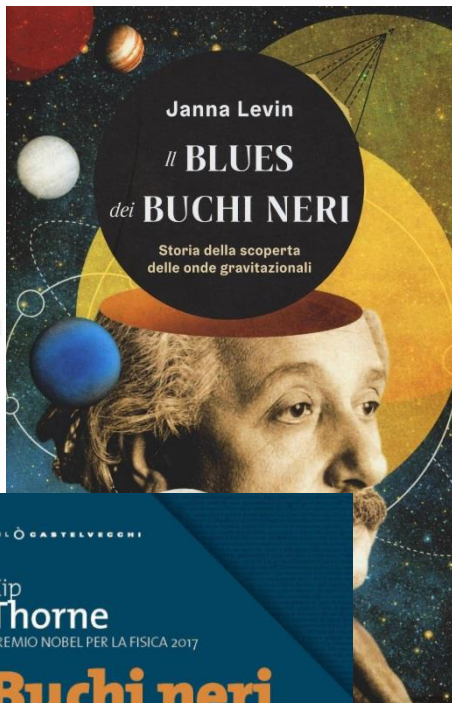
Alessio Rocchi

INFN Roma Tor Vergata

[alessio.rocchi@roma2.infn.it](mailto:alessio.rocchi@roma2.infn.it)

[people.roma2.infn.it/~rocchi](http://people.roma2.infn.it/~rocchi)

# Per saperne di più



il Mulino Farsi un'idea 266

Federico Ferrini  
**Le onde gravitazionali**  
Una nuova porta sul cosmo



**ADALBERTO  
GIAZZOTTO**  
**LA MUSICA  
NASCOSTA  
DELL'UNIVERSO**  
LA MIA VITA A CACCIA DELLE ONDE GRAVITAZIONALI

A CURA DI ANDREA PARLANGELI



U come Universo. Un universo la cui struttura più intima Adalberto Giazotto ha contribuito a svelare, con intuizioni che ci permettono oggi di «ascoltare» le onde gravitazionali previste da Einstein.

