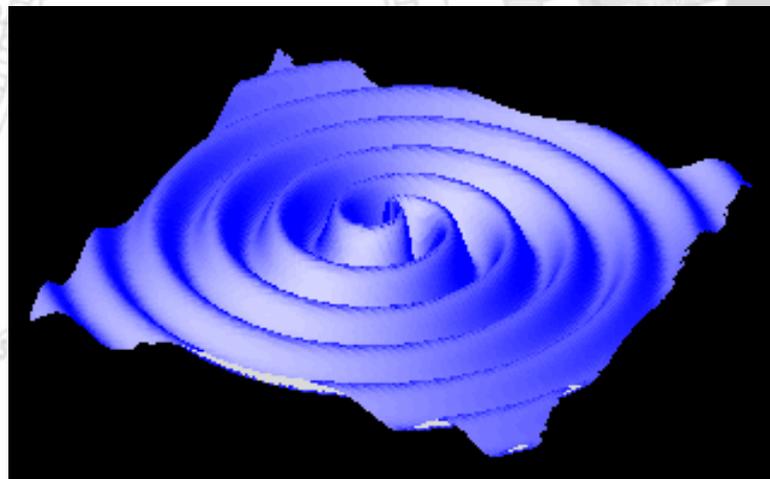


# La teoria della Relatività e le Onde Gravitazionali

*Un nuovo modo di guardare l'Universo*

Alessio Rocchi e Viviana Fafone

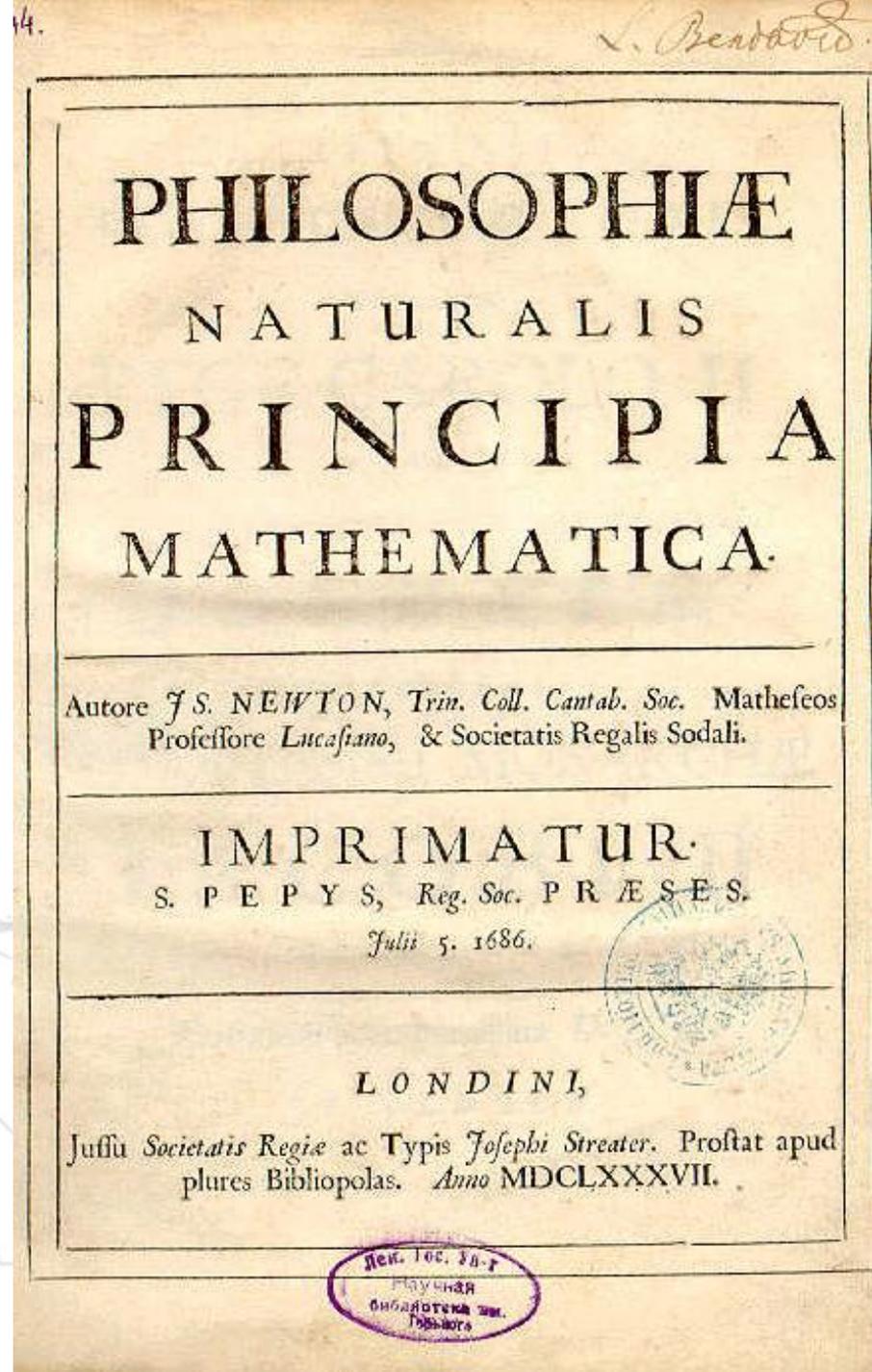
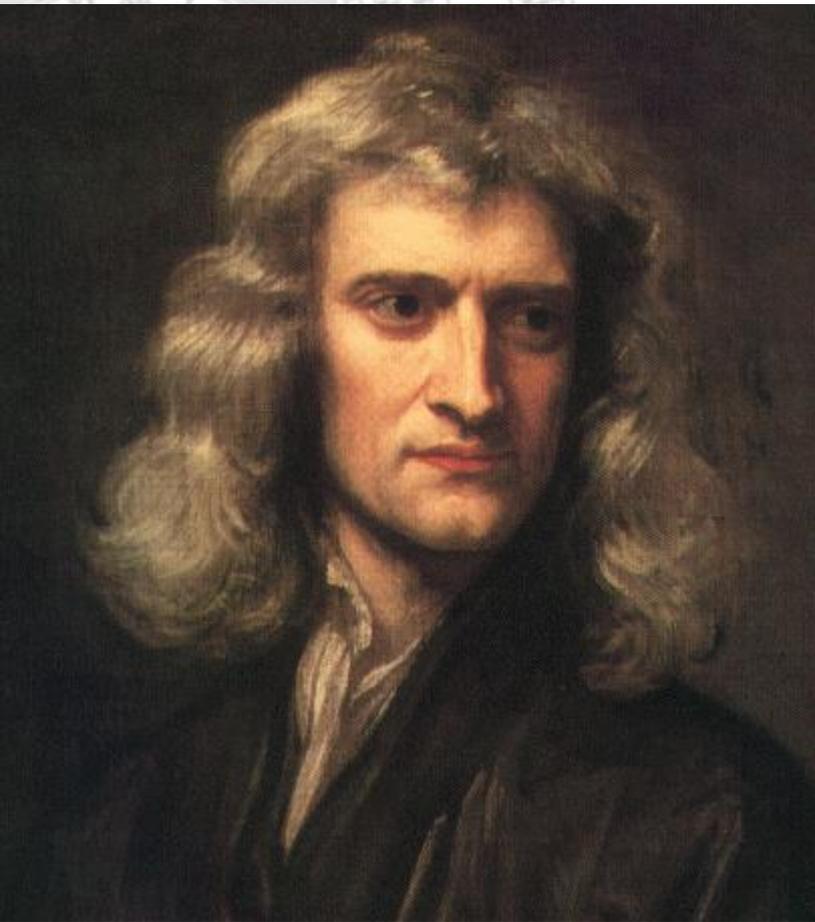
Universita' di Roma Tor Vergata  
e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



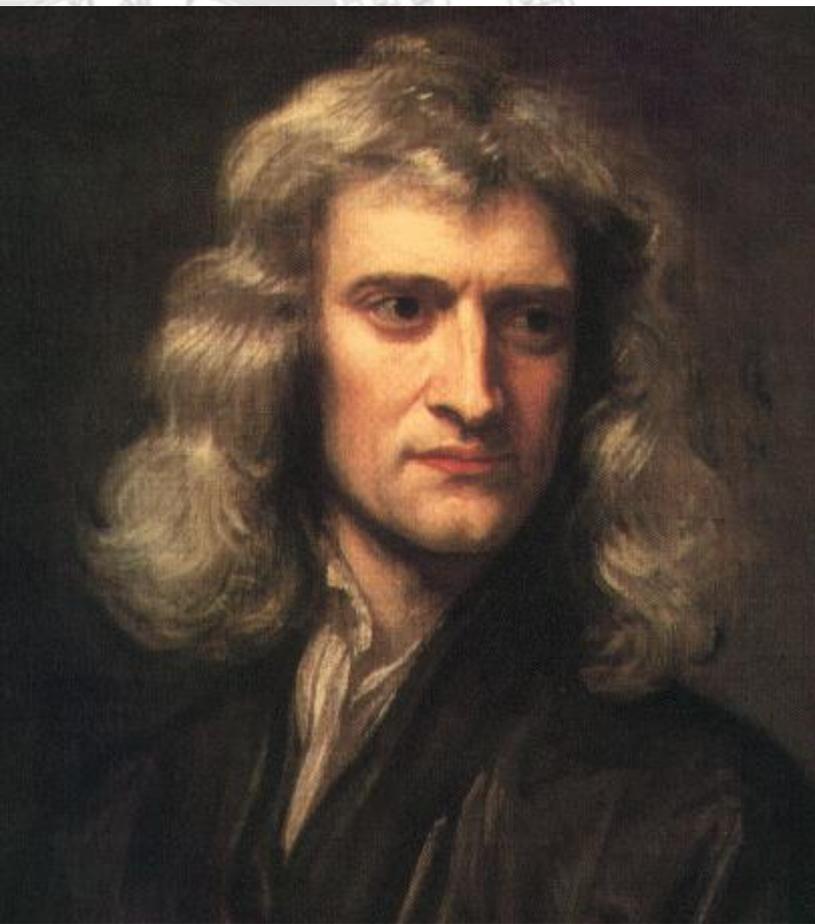
UNIVERSITA' degli STUDI di ROMA  
TOR VERGATA



# Gravitazione universale di Newton (1686)

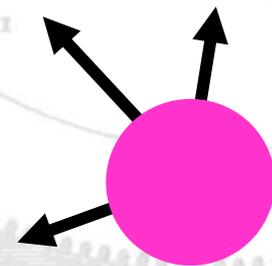
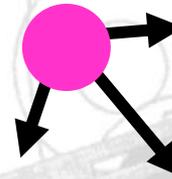


# Gravitazione universale di Newton (1686)

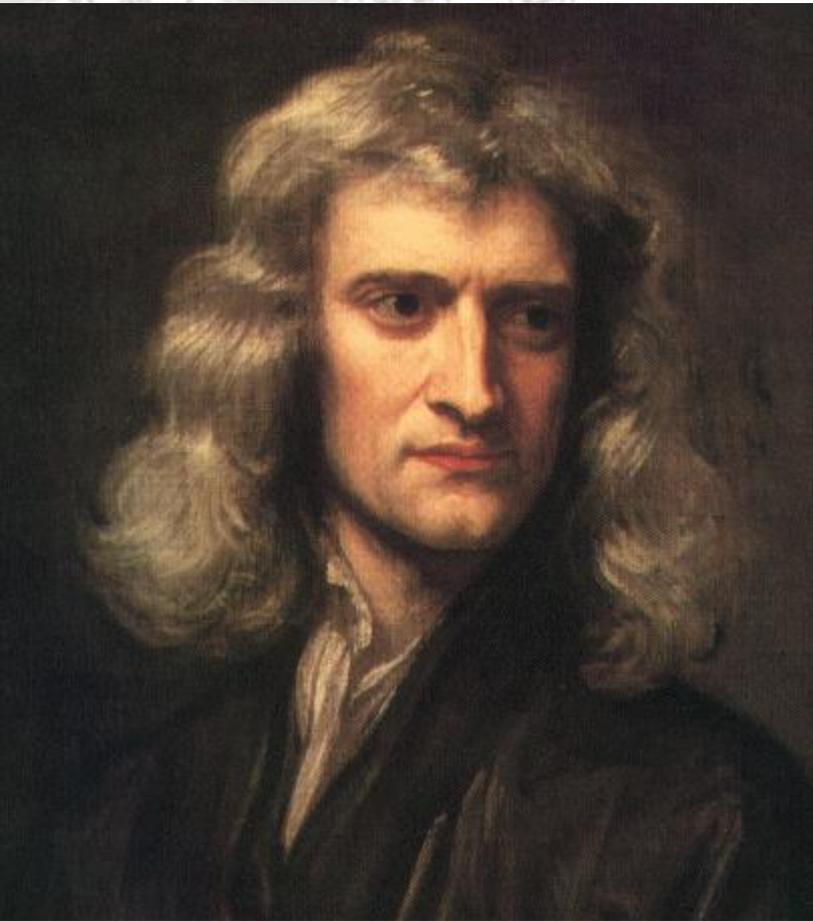


- Forze uguali ed opposte tra coppie di corpi

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



# Gravitazione universale di Newton (1686)

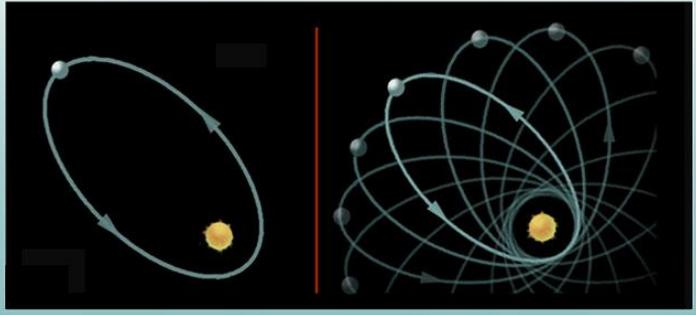


- Teoria di grande successo
- Risolve molti dei problemi noti in astronomia e fisica terrestre
  - Le orbite eccentriche delle comete
  - Le maree e le loro variazioni
  - Le perturbazioni del moto della luna dovute alla gravità del Sole
- Unisce il lavoro di Galileo, Copernico e Keplero
- Porta alla scoperta del pianeta Nettuno (1846)



# Rimangono dei fatti inspiegati...

MERCURY'S ORBIT



**Precessione del perielio di Mercurio:  
43"/secolo non spiegati dalla teoria di  
Newton**

**Qual è la causa della forza di Newton?**

**Come è possibile che un corpo conosca la posizione di tutti gli oggetti  
dell'universe istantaneamente?**

*"Che nel vuoto un corpo possa agire a distanza su di un altro senza la mediazione di qualsiasi altra cosa, per mezzo e attraverso la quale la loro azione e la loro forza possano essere trasferite dall'uno all'altro, è per me un'assurdità così grande a cui, credo, nessun uomo con competenze in questioni filosofiche potrebbe mai credere"*

*Sir Isaac Newton (1692)*



# Relatività Generale (1916)

- La teoria di Newton viene messa in discussione quando viene formulata la teoria di Maxwell sull'elettromagnetismo
- La relatività scardina i concetti di spazio e tempo assoluti
- Spaziotempo = 3 dimensioni spaziali + tempo
- La percezione dello spazio e del tempo è relativa



# Equazione di Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R \cdot g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

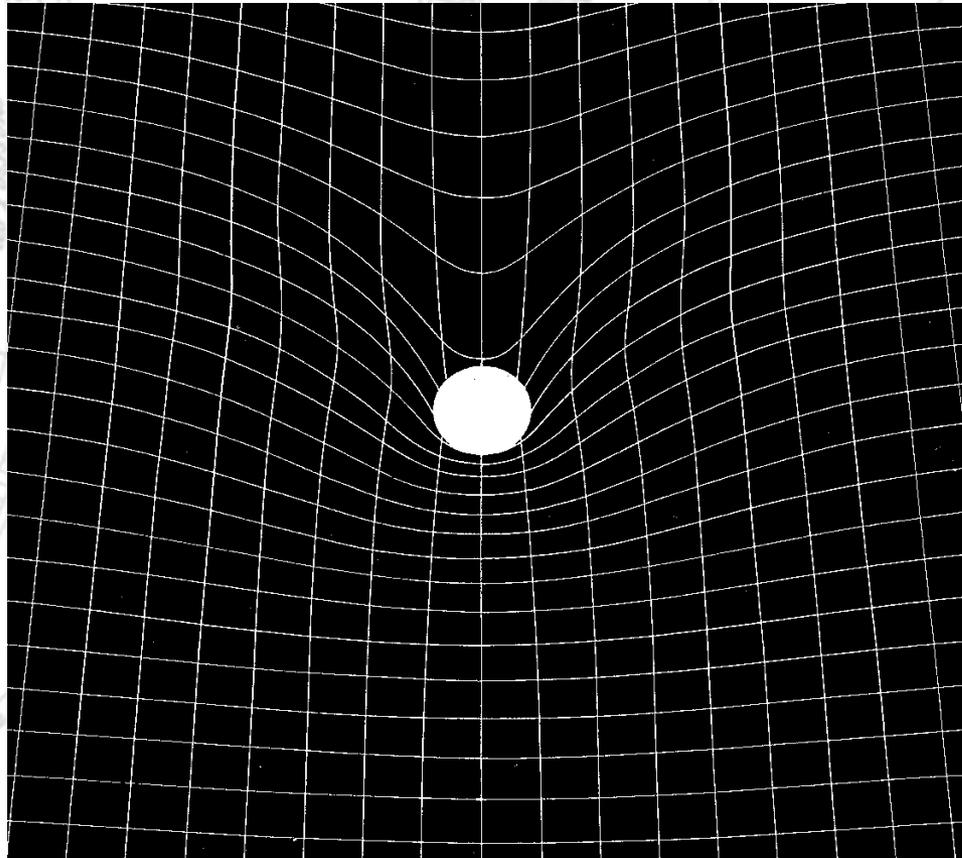
Spazio-tempo **Materia**

- La materia definisce la geometria dello spazio-tempo
- La geometria determina il moto della materia
- La distribuzione di materia ed il suo moto non possono essere descritti indipendentemente dal campo gravitazionale da essi prodotto



**spaziotempo dice alla materia come muoversi;  
materia dice allo spaziotempo come distorcersi**

(J. Wheeler)



9 ottobre 2014

La teoria della Relatività e le Onde Gravitazionali

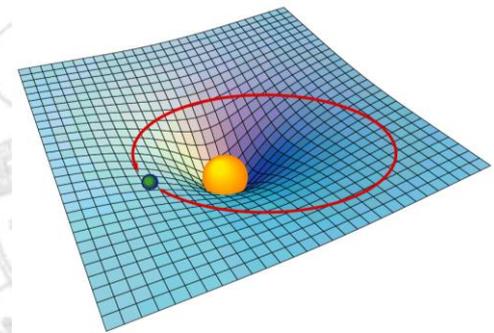
8

## Newton: gravità è una forza



La Terra si muove su orbita curva intorno al Sole perché la gravità solare la costringe ad allontanarsi dal suo cammino rettilineo naturale

## Einstein: gravità è curvatura



massa del Sole **distorce geometria dello spaziotempo** vicino alla Terra e questa si muove **liberamente** lungo il cammino il più possibile rettilineo ( $\approx$  **ellisse**) in questo ambiente deformato

## Gravità NON è una forza ma la manifestazione della geometria dello spaziotempo

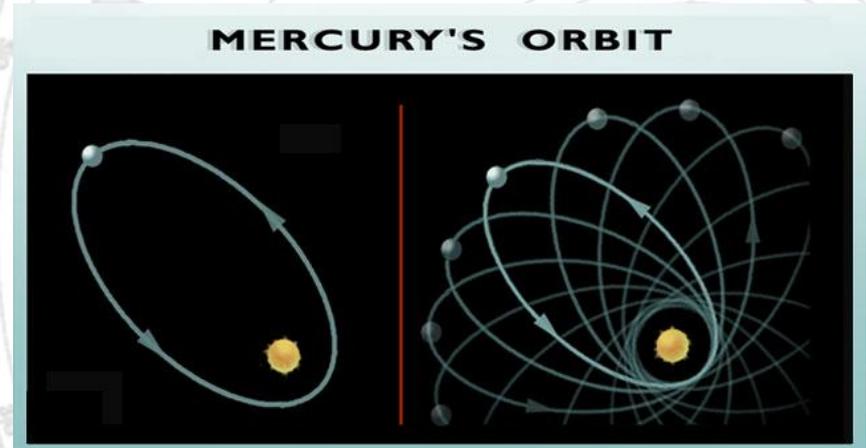
# Alcune verifiche classiche della relatività generale

- Precessione del perielio di Mercurio
- Deflessione raggi luminosi

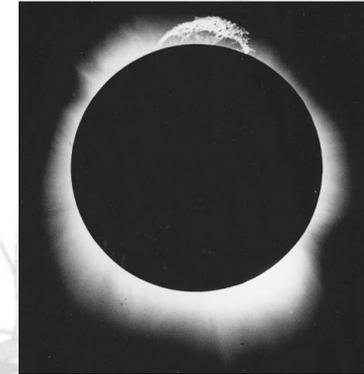
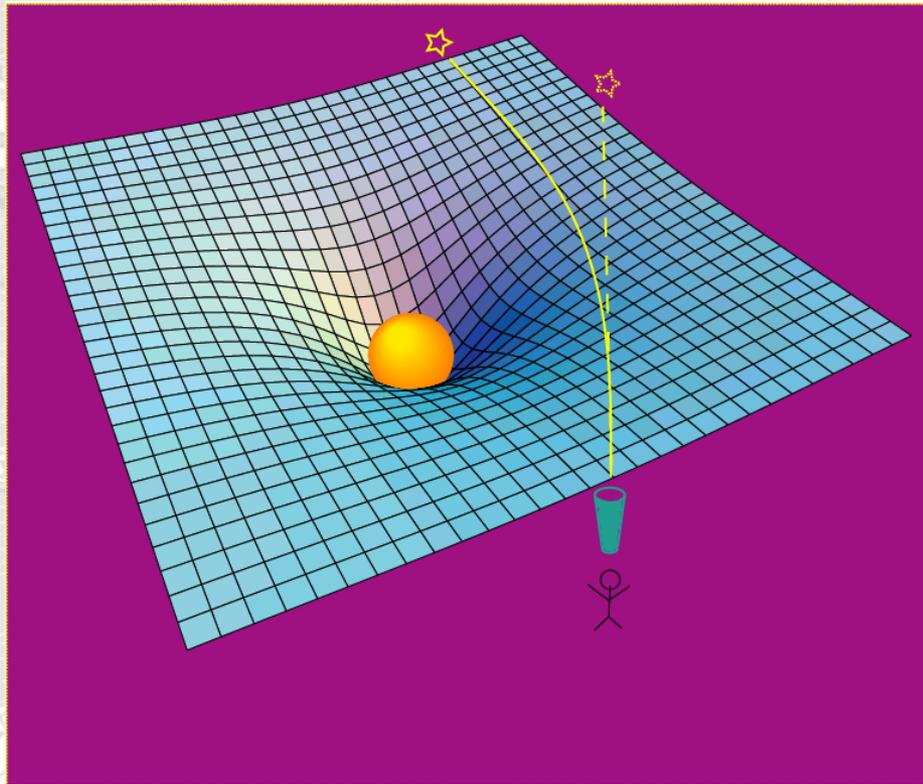


# Precessione del perielio di Mercurio

- Il perielio avanza di  $574''$  al secolo. Di questi,  $531''$  sono dovuti a perturbazioni gravitazionali da parte degli altri pianeti, soprattutto Venere, la Terra e Giove.
- La differenza,  $43''$  al secolo, fu spiegata dalla relatività generale
- In una lettera che Einstein scrisse verso la fine del 1915 a Sommerfeld diceva: “L’ultimo mese e’ stato uno dei piu’ emozionanti e intensi della mia vita. Quello che mi rende cosi’ felice non e’ solo il fatto che la teoria di Newton si ottiene come prima approssimazione, ma che la precessione del perielio di Mercurio si ottiene come seconda approssimazione”.



# Deflessione dei raggi luminosi



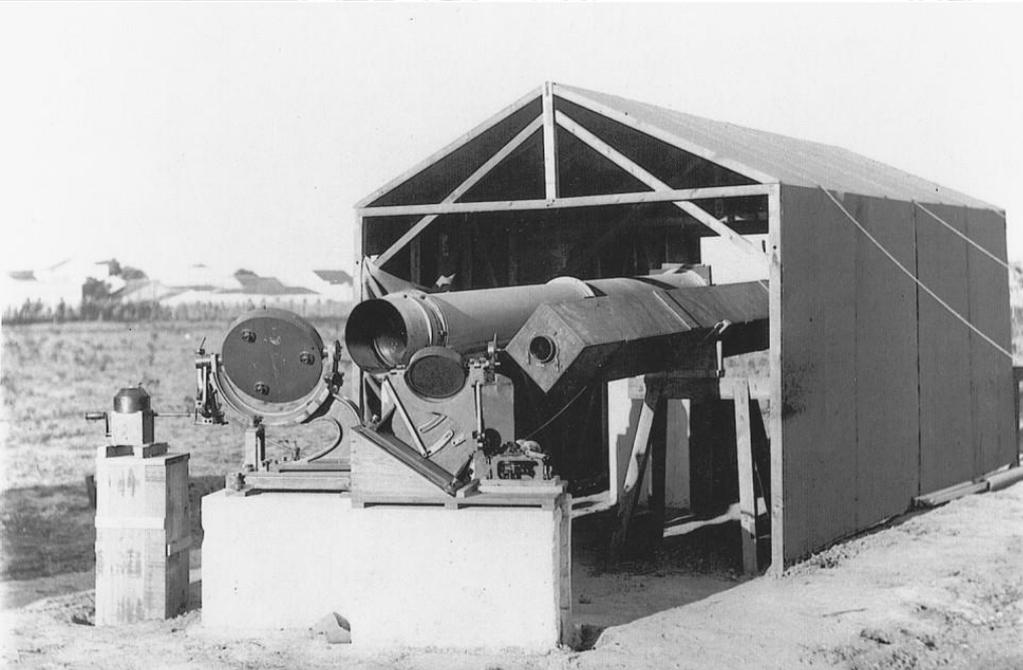
Osservabile durante un'eclissi

**Gravitational Lensing**

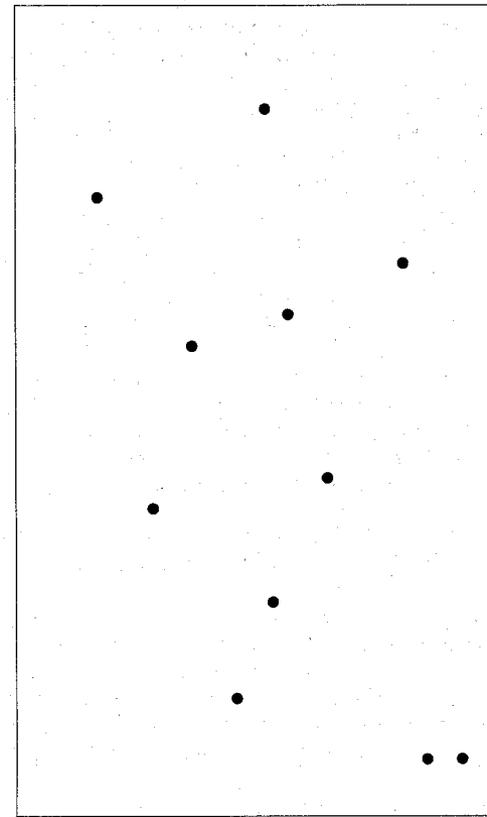
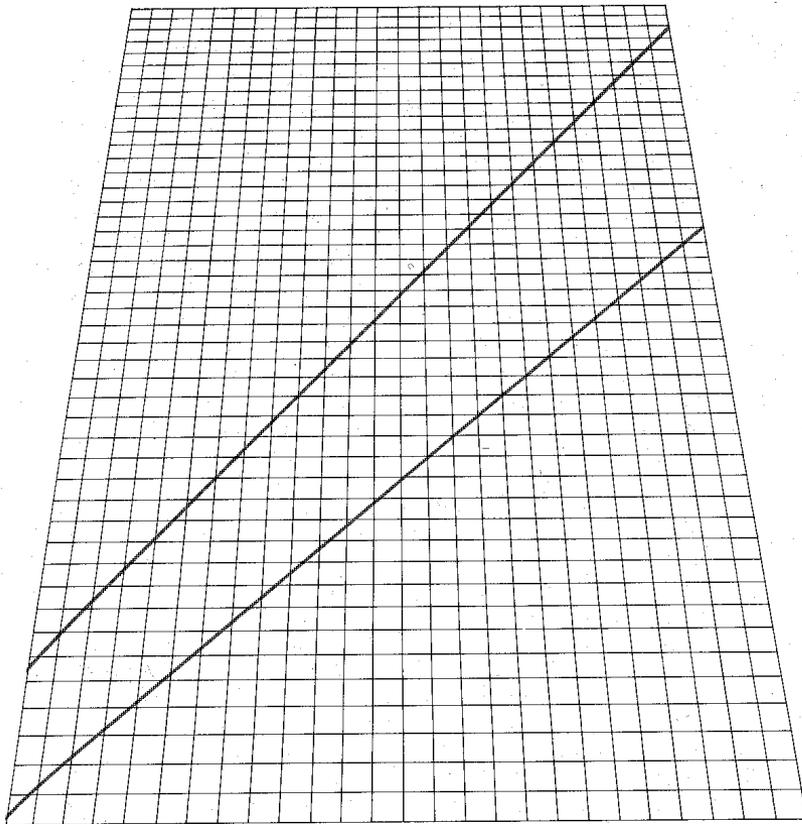
- Conferma della previsione: Eddington (1919)

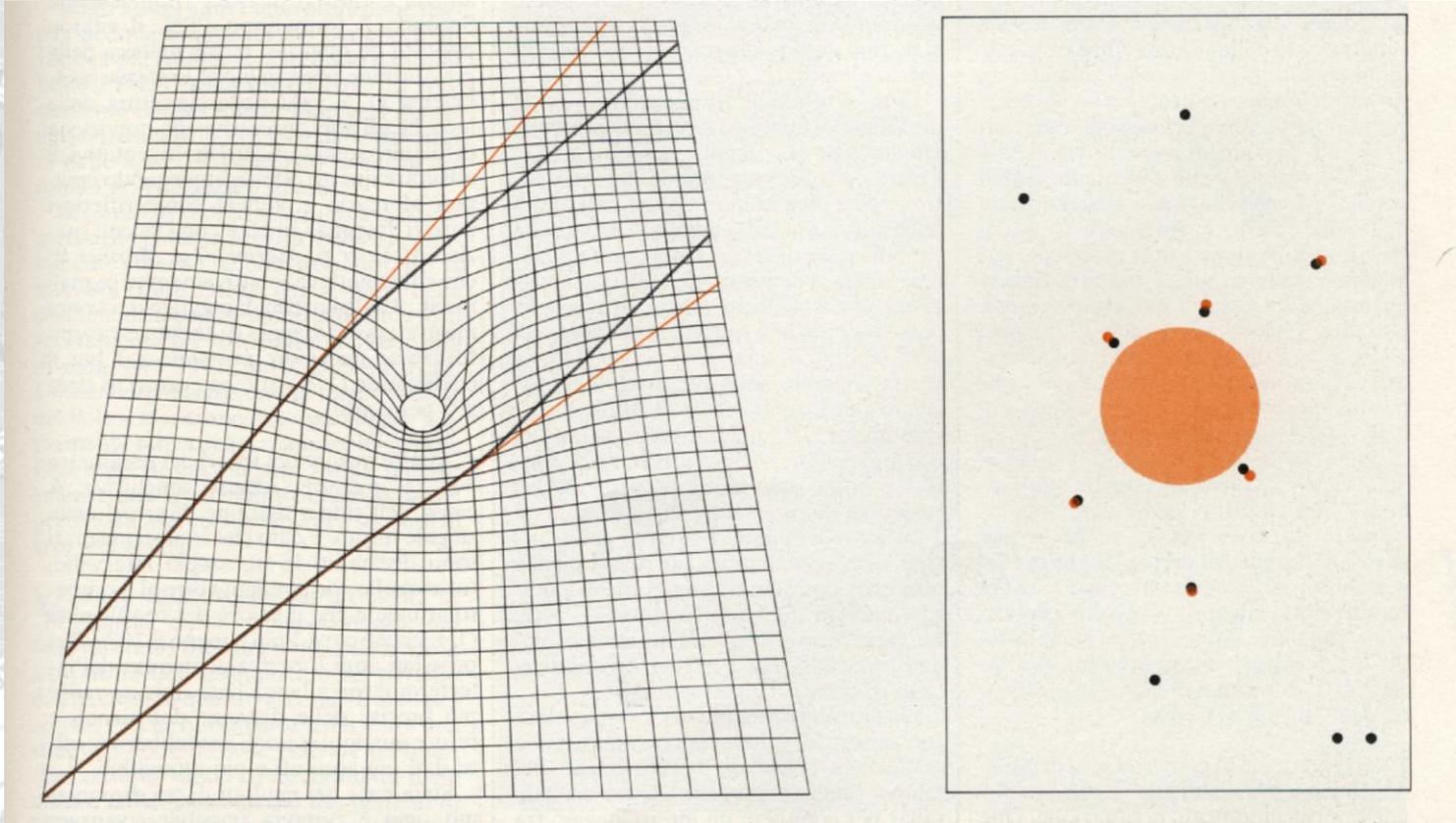
# Confirming Einstein ....

- Famous British astronomer Sir Arthur Eddington led an expedition to photograph the solar eclipse of 29 May 1919 against Hyades star cluster



	Measured Deflection
<b>Einstein</b>	<b>1.75''</b>
<b>Principe</b>	<b>1.61'' ± 0.30''</b>
<b>Sobral</b>	<b>1.98'' ± 0.12''</b>





# Stunning Confirmation for Relativity

## REVOLUTION IN SCIENCE.

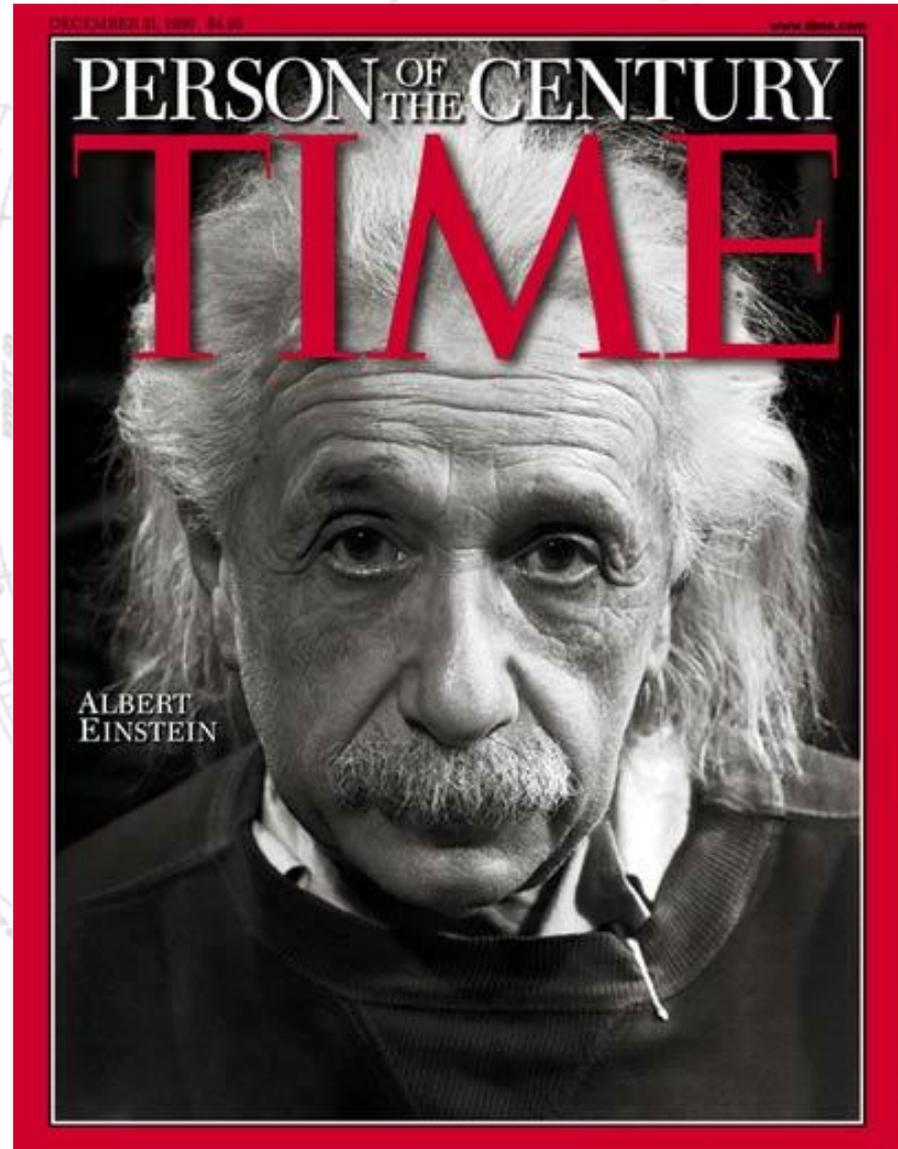
## NEW THEORY OF THE UNIVERSE.

## 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  
November 1919



## Croce di Einstein

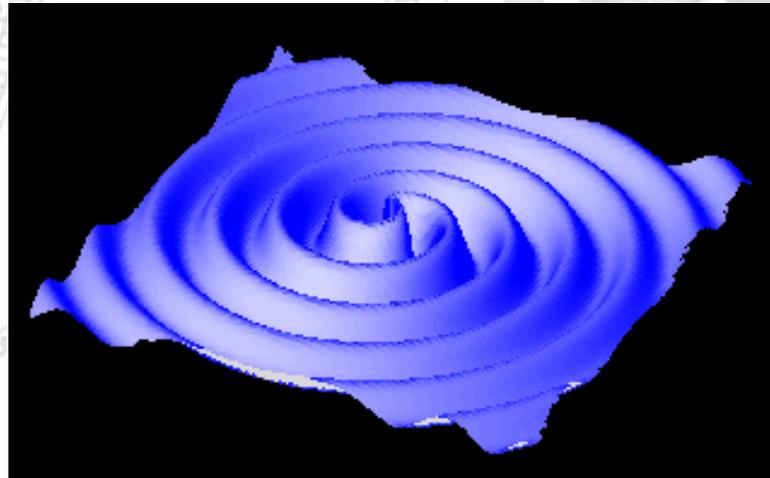
Immagine di un quasar appare “moltiplicata” per la presenza di una galassia che si trova interposta tra la Terra e la posizione del quasar

Nell’Astronomia moderna queste immagini dovute al **gravitational lensing** sono utilizzate per rivelare concentrazioni estese di ‘**materia oscura**’ di natura astrofisica



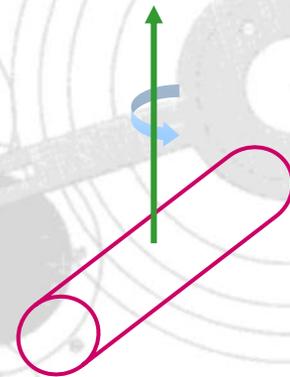
# Le onde gravitazionali

- Sono una soluzione delle equazioni di Einstein
- Sono deformazioni dello spazio-tempo che si propagano con la velocità della luce



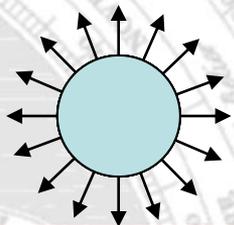
- Non possono essere prodotte in laboratorio
    - Massa di acciaio, 1 metro di raggio, lunga 20 metri, ruotante alla velocità di 4.4 rivoluzioni/s
- $P = 10^{-30} \text{ W}$

Cilindro rotante di massa  $M$  e lunghezza  $L$

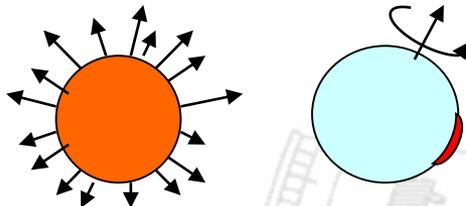


In un evento di Supernova, all'esplosione, potrebbe essere emessa energia pari a  $\sim 10^{40}$  Joule in una frazione di secondo

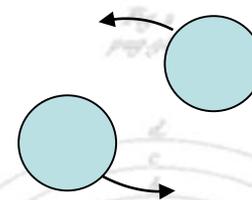
Symmetrical  $h=0$



Low Asymmetry



Max. Asymmetry



L'osservazione della radiazione gravitazionale fornisce informazioni uniche, complementari a quelle derivate dalla radiazione elettromagnetica.

La radiazione elettromagnetica è prodotta da una sovrapposizione incoerente di radiazioni da elettroni, atomi e molecole.

La radiazione gravitazionale deriva da una sovrapposizione coerente di movimenti di massa.

La radiazione elettromagnetica interagisce fortemente con la materia, e' indebolita dall'assorbimento quando viaggia verso il rivelatore.

La radiazione gravitazionale si propaga "liberamente". Ci possono portare informazioni provenienti dalle zone piu' interne del nucleo stellare.

*GWs can reveal features of their sources that cannot be learnt by electromagnetic, cosmic rays or neutrino studies (Kip Thorne)*



# Sorgenti di onde gravitazionali

- **Collassi gravitazionali**

Stella che ha esaurito il combustibile nucleare collassa sotto l'effetto della propria gravità. Il collasso del **core** della stella è accompagnato dall'espulsione degli strati più esterni della stella → **supernova (SN)**



When a massive star explodes, it creates a shell of hot gas that glows brightly in X-rays. These X-rays reveal the dynamics of the explosion.



# Sorgenti di onde gravitazionali

- Pulsars: oggetti compatti ( $R \sim 10$  km) composti da neutroni ad altissima densità ( $10^{12}$  -  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>) Il numero stimato di NS ruotanti nella Galassia è di circa  $10^9$ , di cui 1000 osservate come pulsar e di queste, 5 a meno di 200 pc.

$f = 10 - 100$  Hz

MPIfR - Bonn Pulsar Group

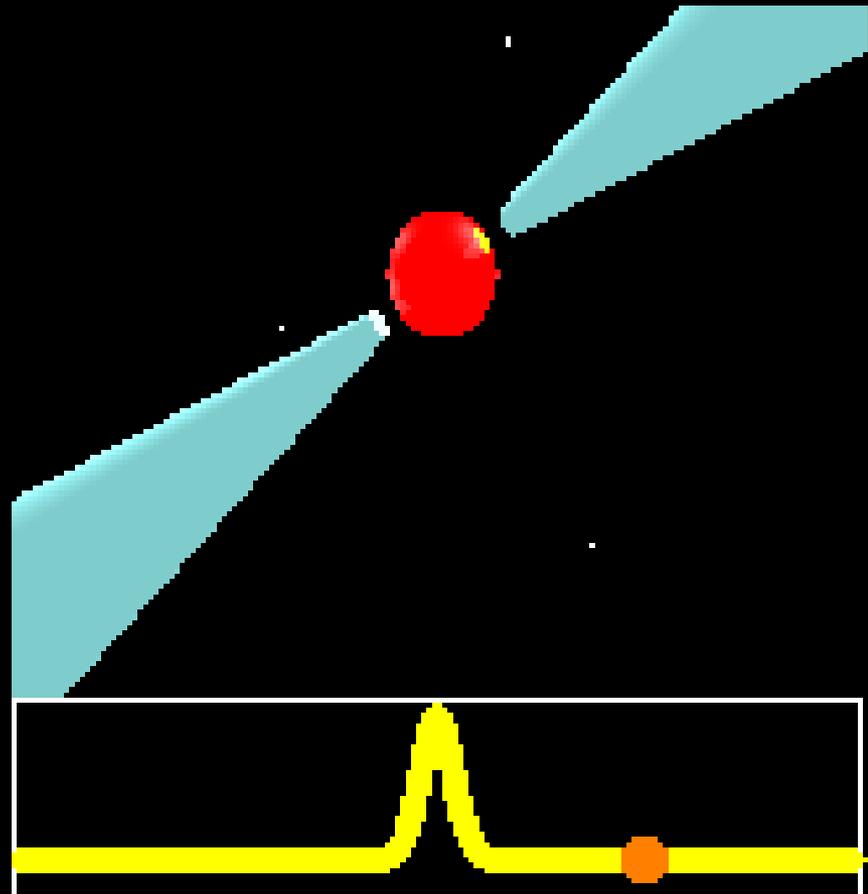
**Campi magnetici molto forti  
( $10^9$  Tesla)**

+

**Rapida rotazione**

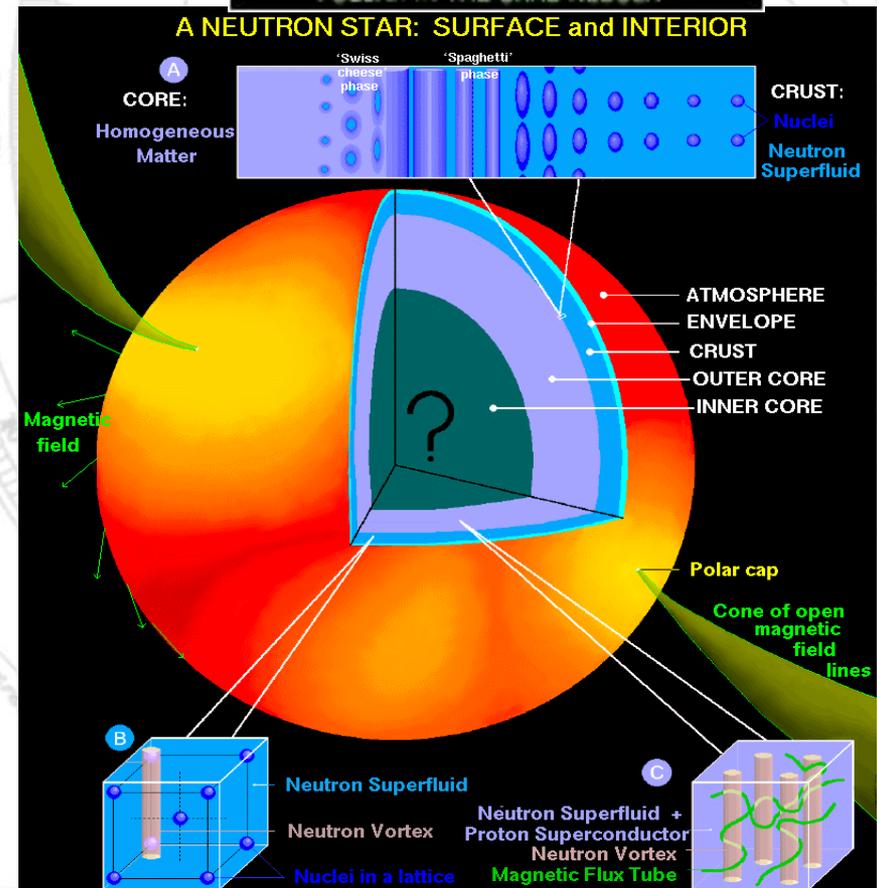
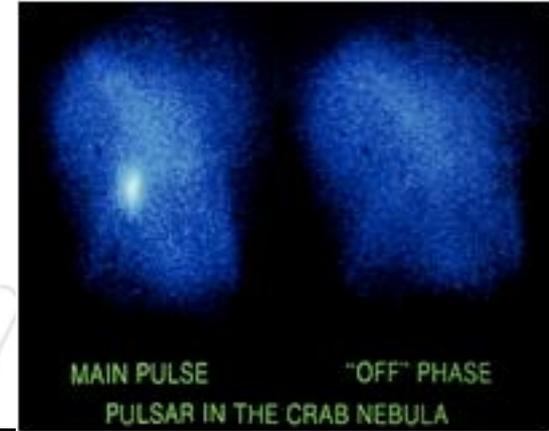
=

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



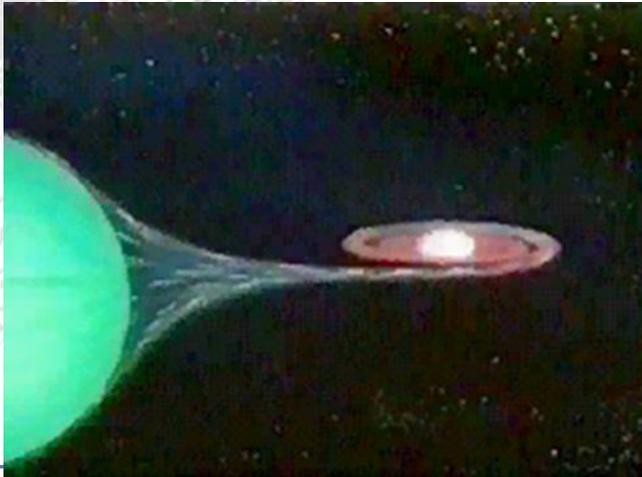
# Stelle di neutroni

- La fisica di queste stelle non e' ancora ben compresa
  - Dopo 40 anni non sappiamo cosa fa pulsare le pulsar.
  - Le proprieta' dell'interno non sono ben comprese: equazione di stato, superfluidita', superconduttivita', nucleo solido, sorgente di campo magnetico.
  - Potrebbero perfino non essere stelle di neutroni, ma composte di materia strana!

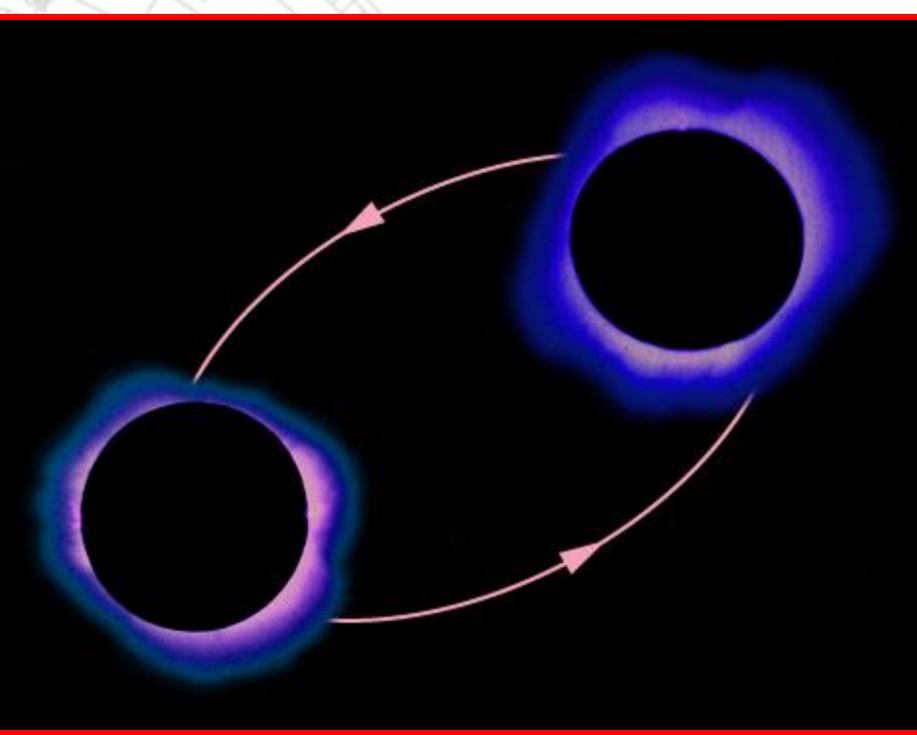


# Sorgenti di onde gravitazionali

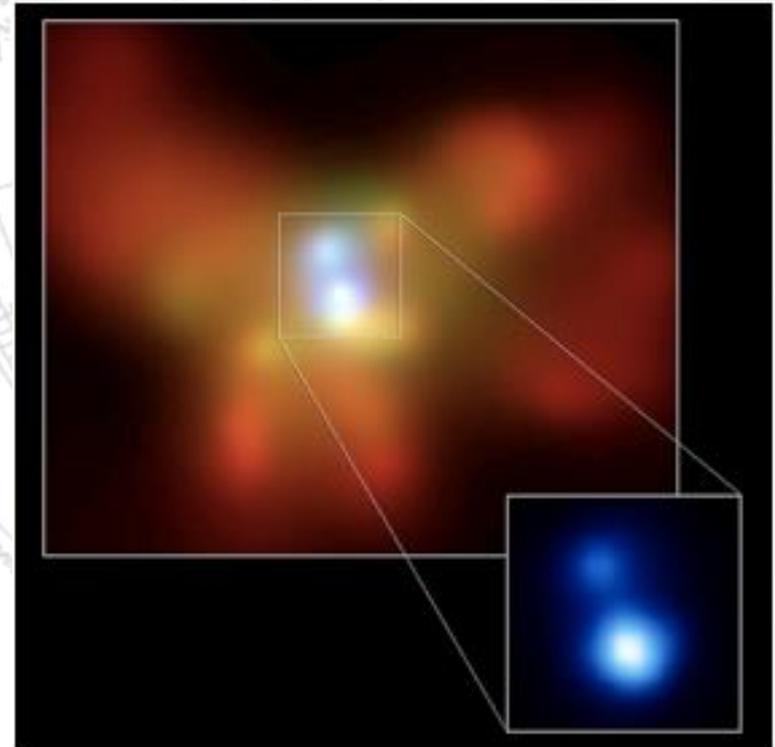
- Buchi neri: stadio terminale della vita di una stella molto massiva (maggiore di 1.4 Masse solari)
- Sistemi binari (NS-NS / WD-WD) - Si stimano circa  $10^{8-9}$  binarie galattiche con frequenze  $> 0.1\text{mHz}$  (la maggior parte WD/WD)
- Sistemi binari (BH-NS)
- Sistemi binari (BH-star / NS-star)



# Sistemi binari di buchi neri massivi formati da nuclei galattici ( $10^4$ - $10^6$ masse solari)

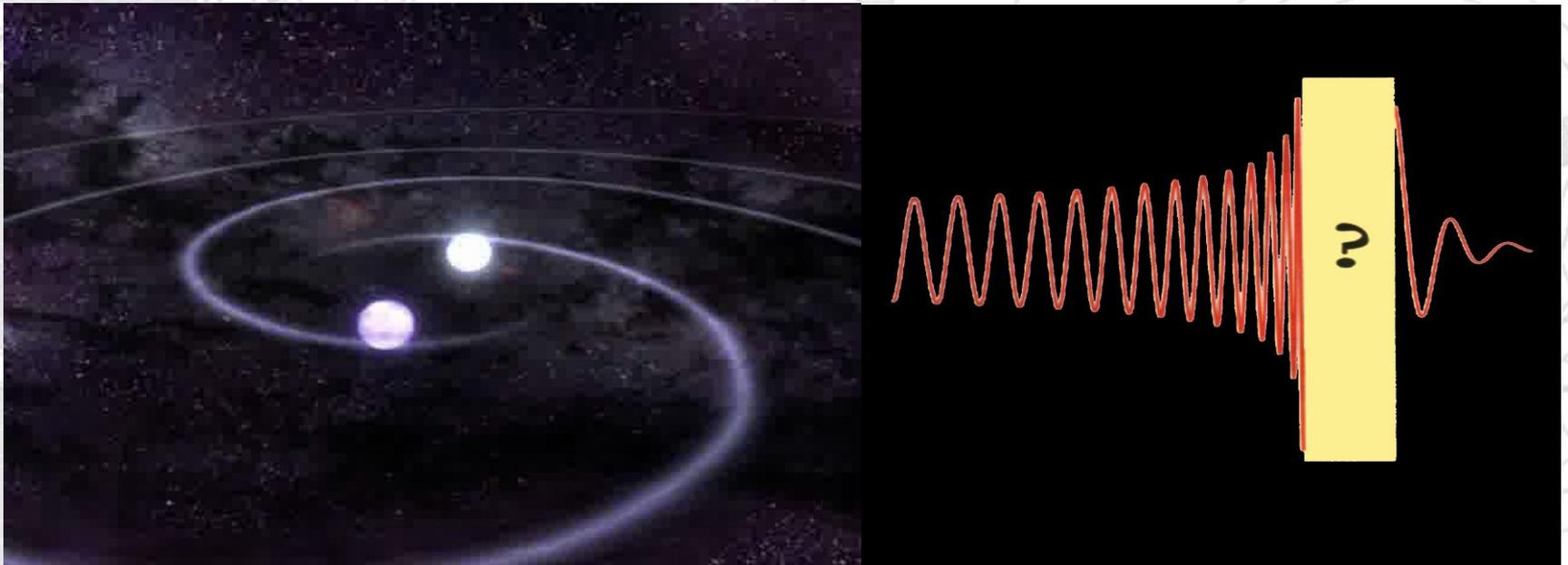


NGC 6240, galassia massiva formata dal merger di due galassie piu' piccole. D~122 Mpc. I due BH distano circa 900 pc. Osservati da Chandra X-Ray



# Sorgenti di onde gravitazionali

- Sistemi binari



Il segnale emesso nella fase di spiraleggiamento puo' essere calcolato con grande precisione (candidato per una prima rivelazione)

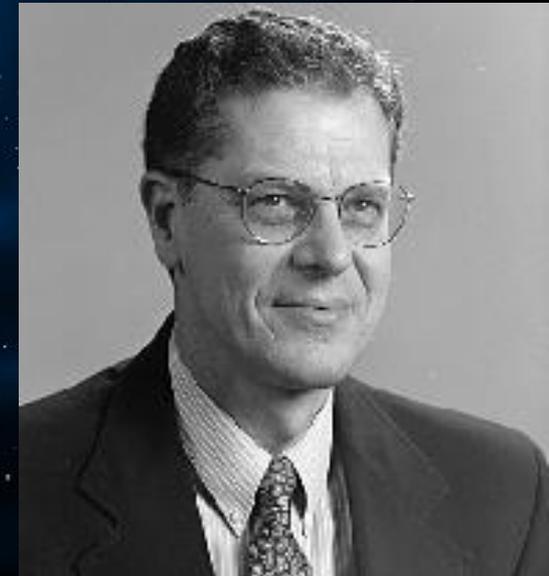
Questi sistemi sono stati molto importanti perche' hanno permesso la prima osservaizone indiretta delle onde gravitazionali (Hulse e Taylor, premio Nobel nel 1993)

# No Evidence For Gravitational Waves Until 1974



**Russell A. Hulse**

**Discovered and Studied  
Pulsar System  
PSR 1913 + 16**

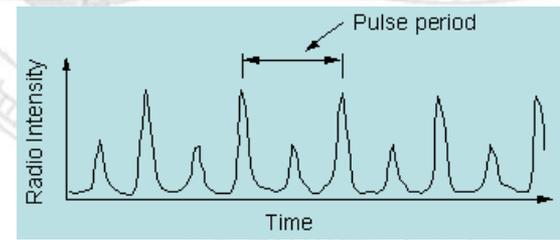
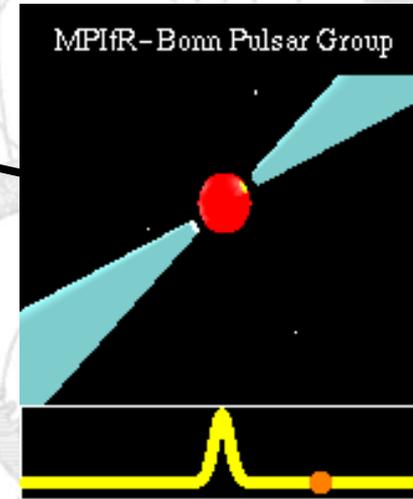
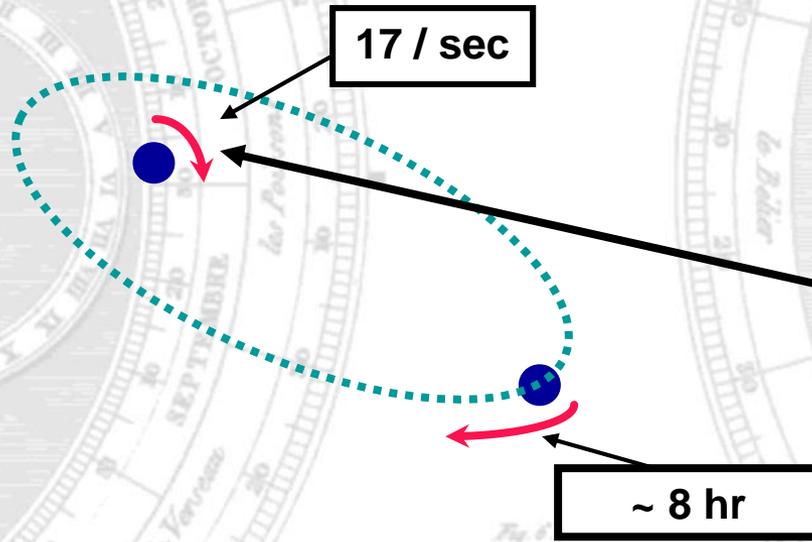


**Joseph H. Taylor Jr**

# Neutron Binary System

## PSR 1913 + 16

Similar mass to our sun  
but only 20 km in diameter



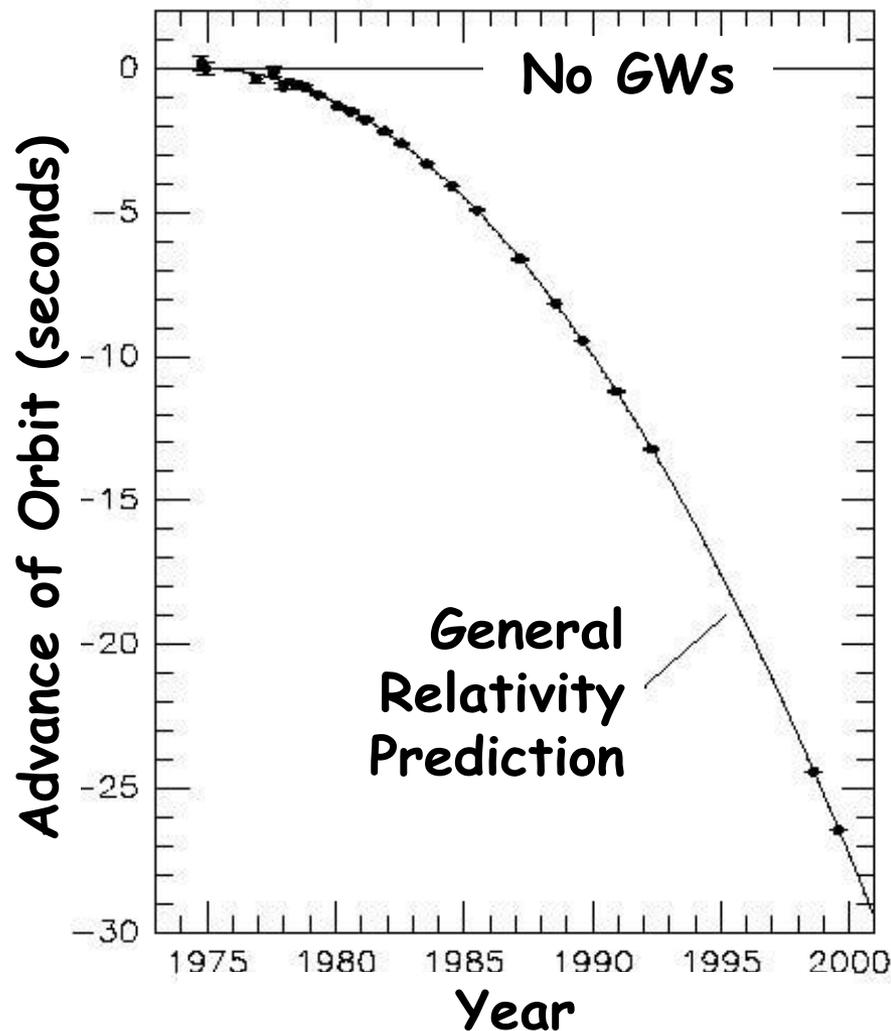
- Two Neutron Stars in Orbit
  - Separated by 1,000,000 km
- Prediction from General Relativity
- Spiral in by 3 mm/orbit
  - Rate of change orbital period

# Evidence for gravitational waves!

**Nobel Prize in 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)



UNIVERSITA' degli STUDI di ROMA  
TOR VERGATA

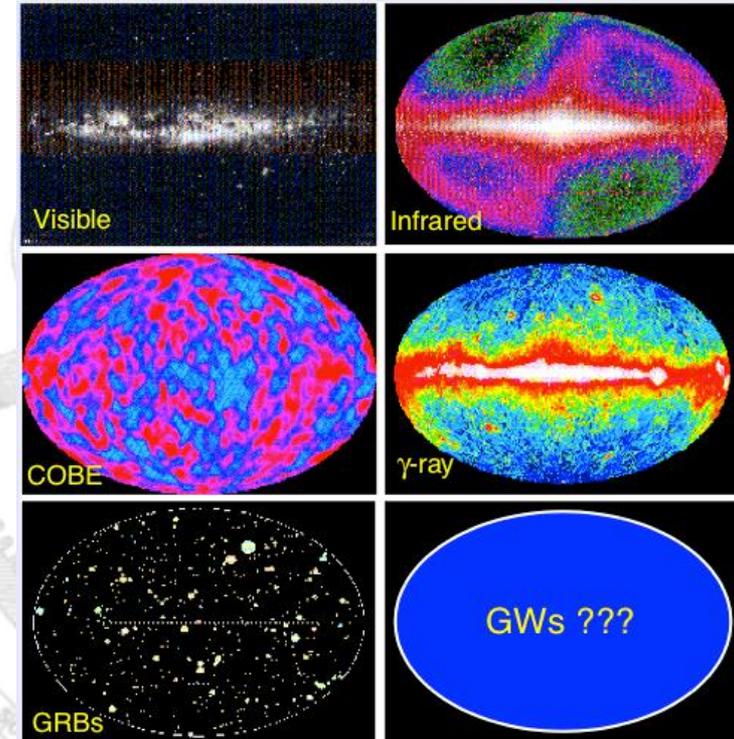
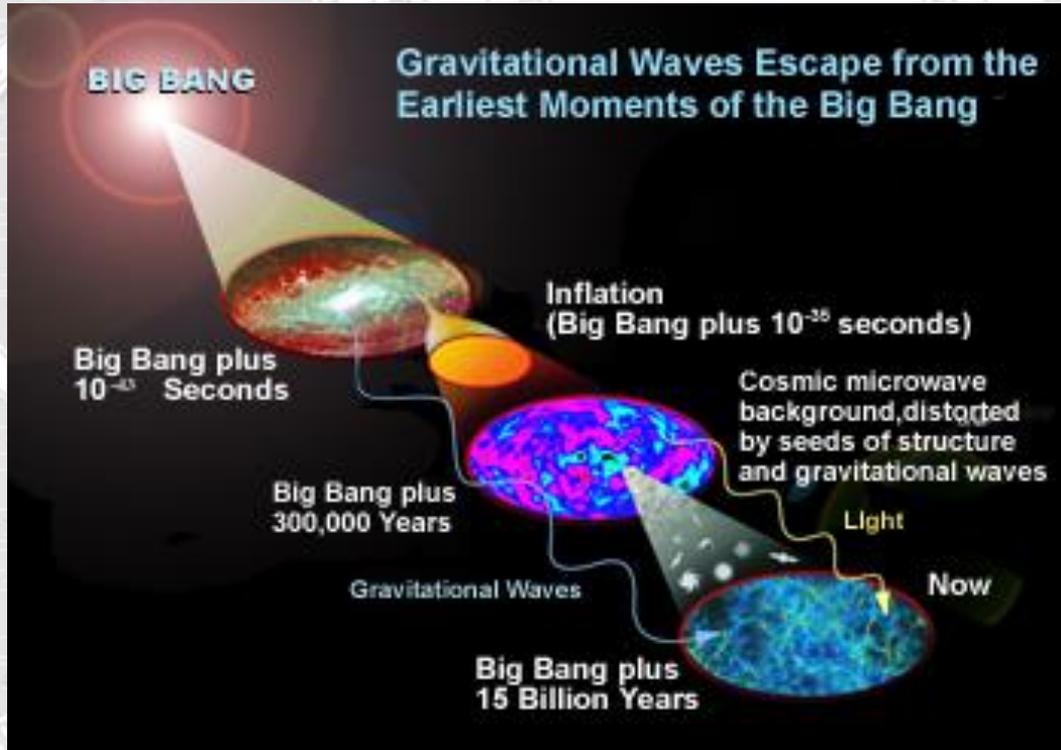


9 ottobre 2014

La teoria della Relatività e le Onde Gravitazionali

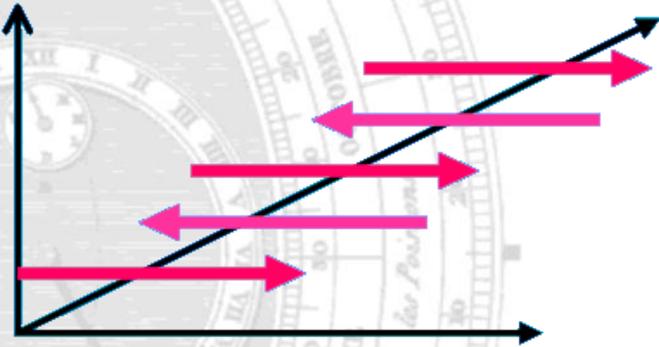
# Sorgenti di onde gravitazionali

- Radiazione gravitazionale di fondo

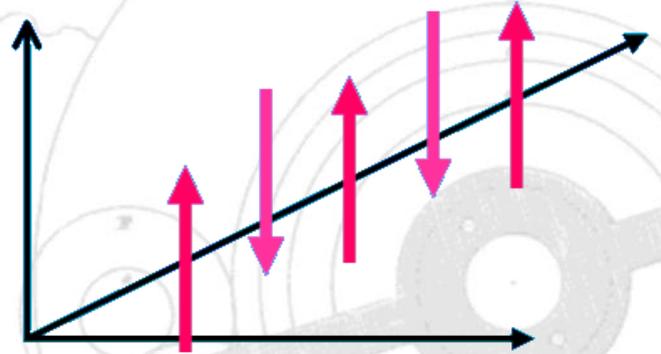


La misura di questo segnale può fornire informazioni sui primissimi istanti di vita dell'universo

# Confronto con le onde elettromagnetiche



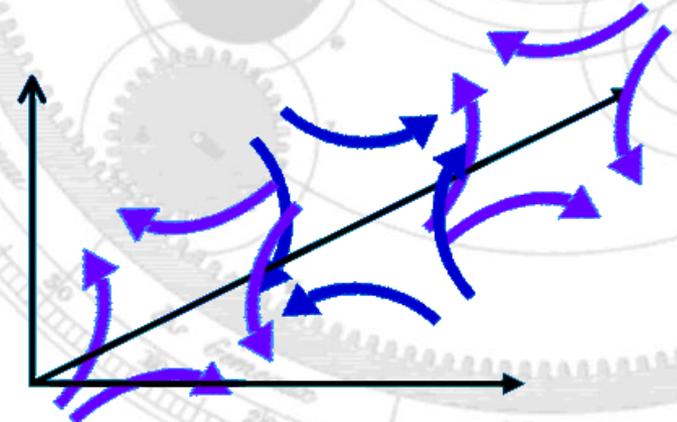
Polarizzazione orizzontale



Polarizzazione verticale



Polarizzazione +



Polarizzazione x

L'onda gravitazionale produce una deformazione dello spazio dipendente dal tempo. I rivelatori di onde gravitazionali misurano direttamente questa deformazione. Esempio: deformazione di un anello di particelle di prova dovuta ad un'onda gravitazionale che si propaga in direzione normale al piano dell'anello.

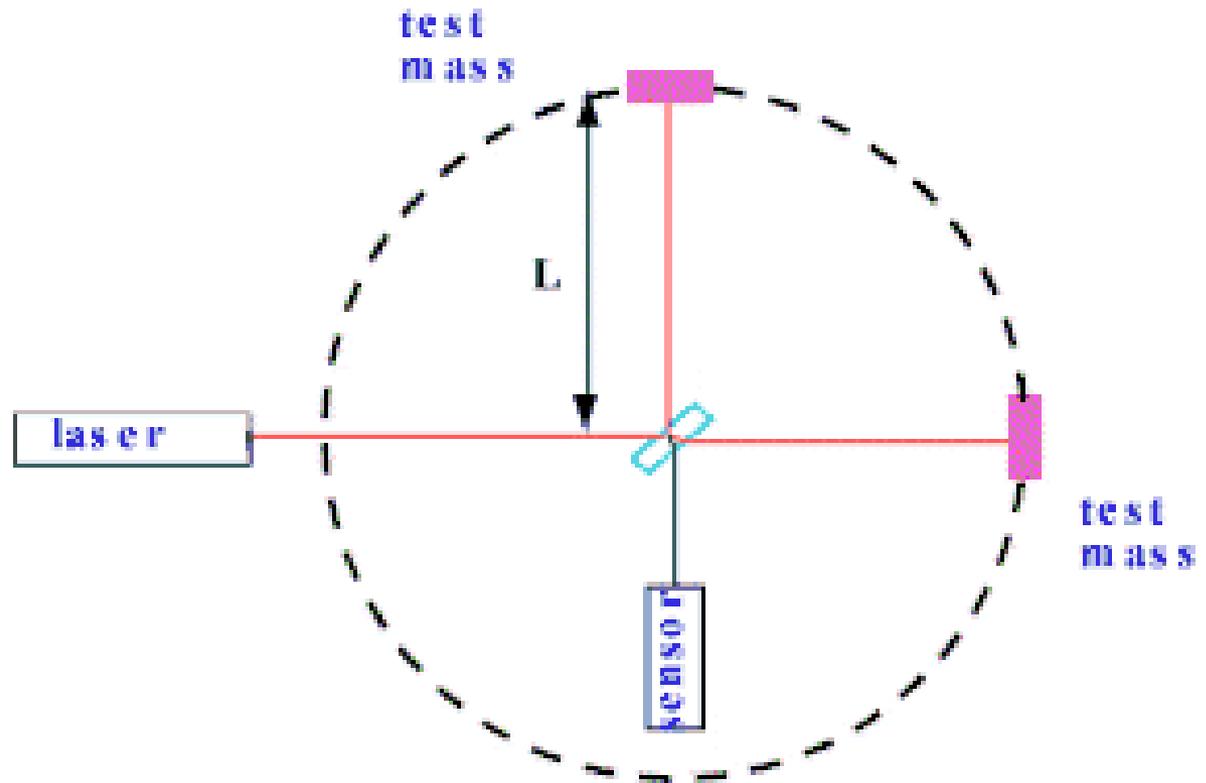


Polarizzazione +

Polarizzazione x

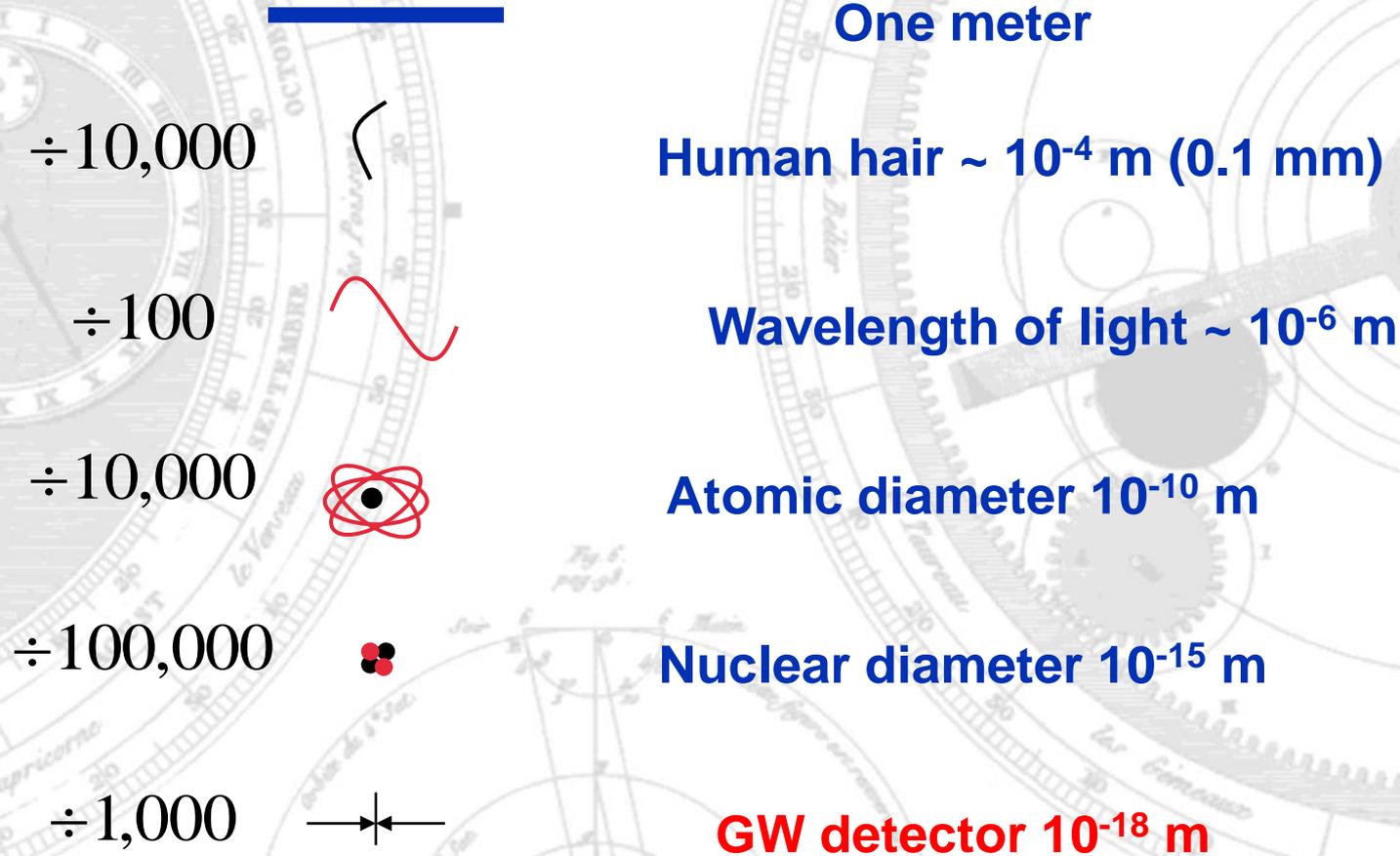
# Detecting a Gravitational Wave with Light

## Michelson Interferometer



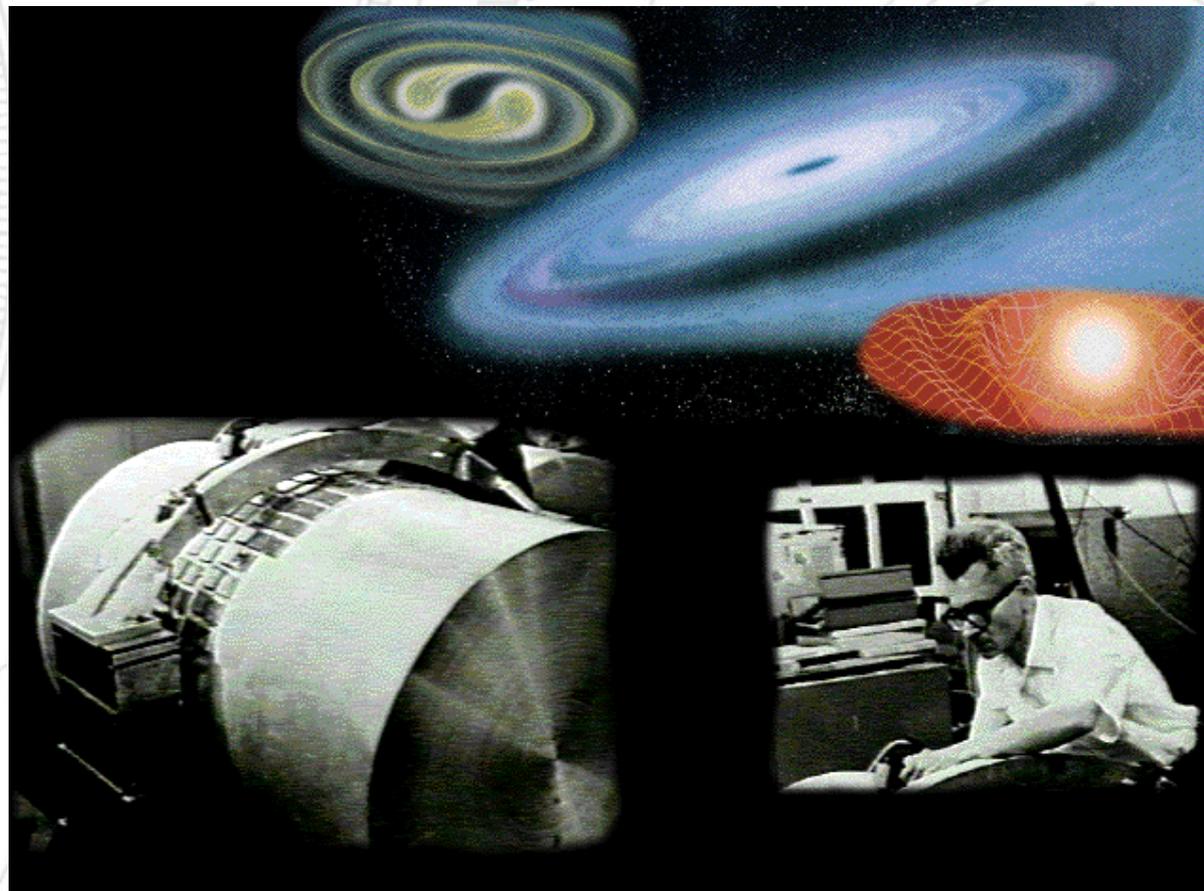
**Strength ( $\Delta L/L$ ) of a strong wave is about  $10^{-21}$**   
**For  $L = 1$  km,  $\Rightarrow \Delta L = 10^{-18}$  m**

# How Small is $10^{-18}$ Meter?



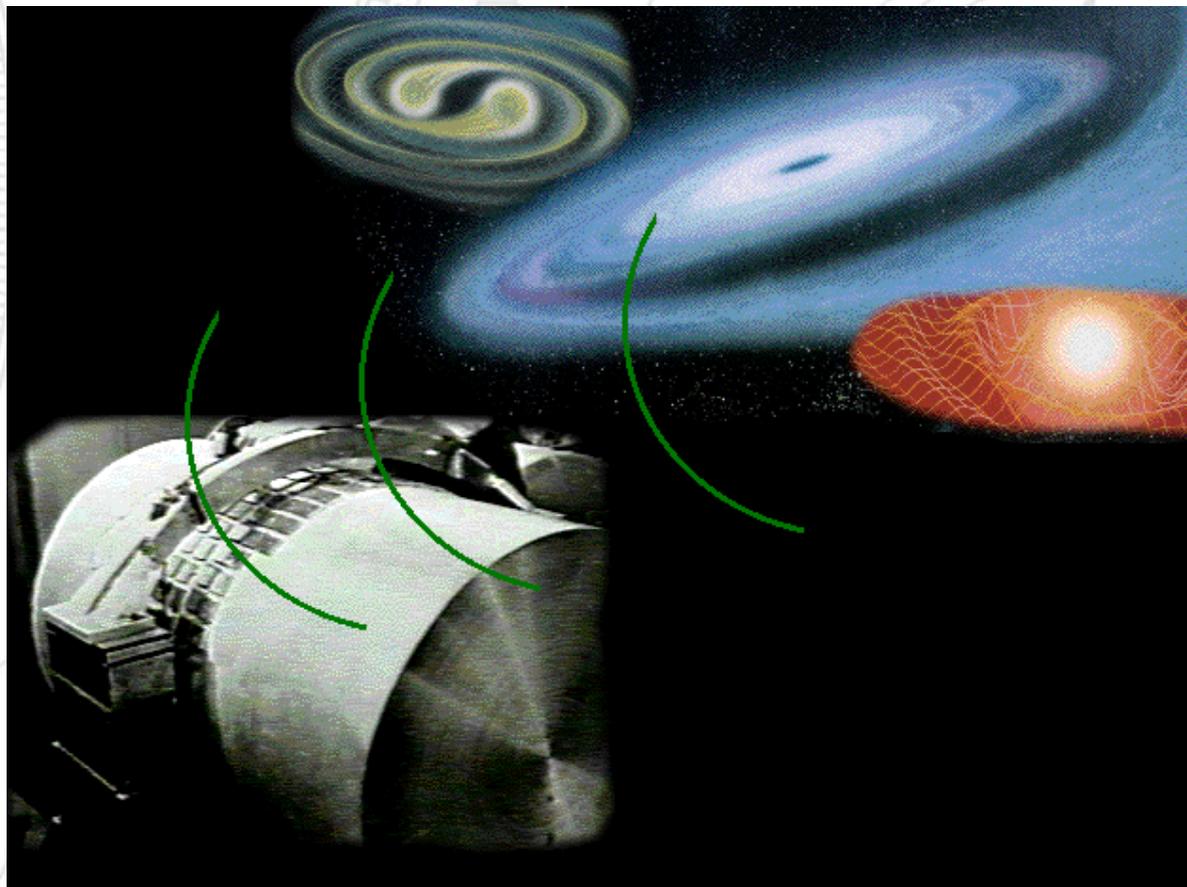
# Detecting a Gravitational Wave with an Elastic Body

Bar detectors



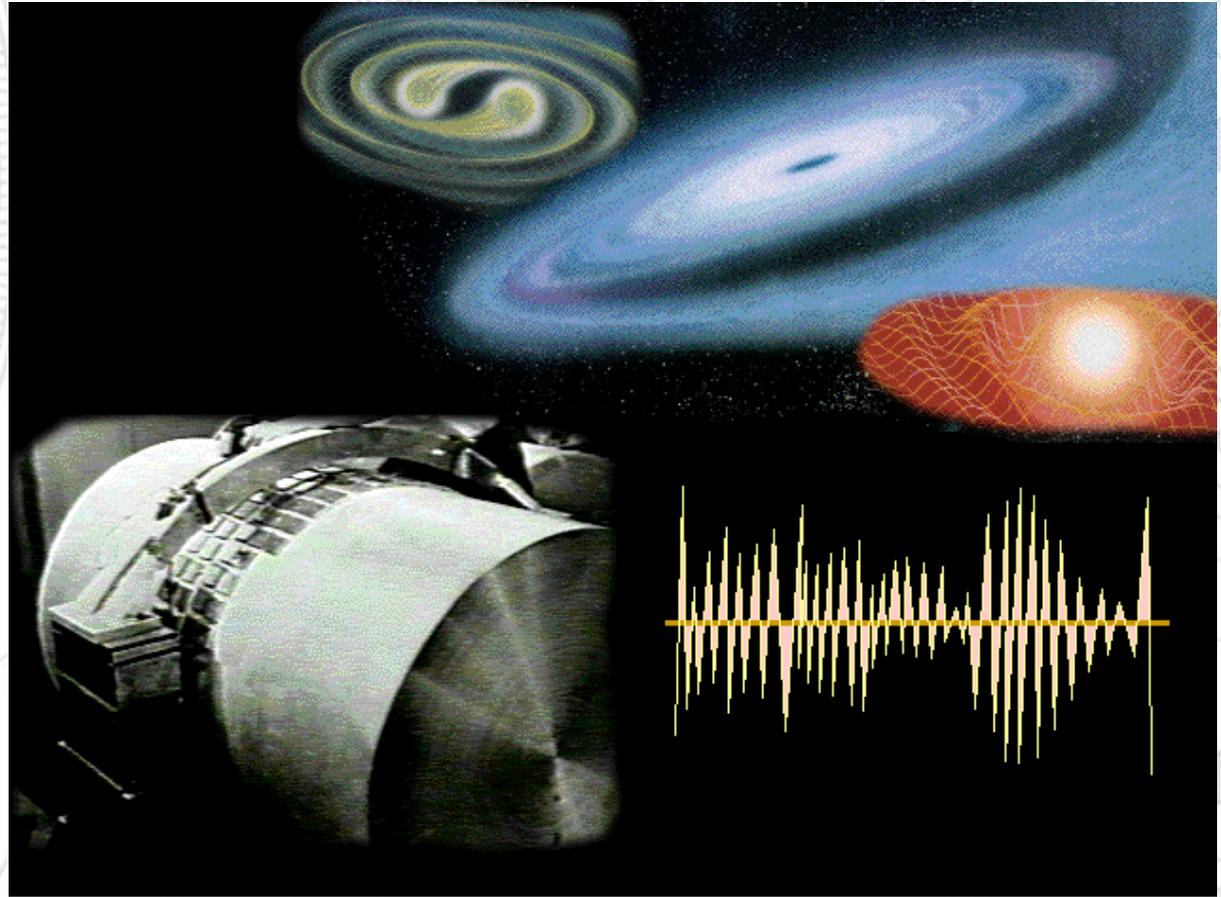
# Detecting a Gravitational Wave with an Elastic Body

Bar detectors

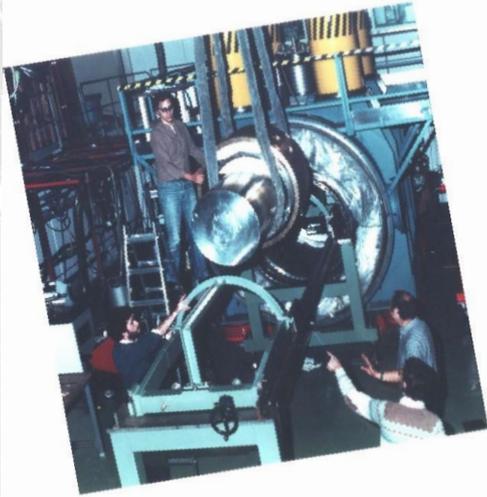


# Detecting a Gravitational Wave with an Elastic Body

Bar detectors



# La rete mondiale di antenne risonanti

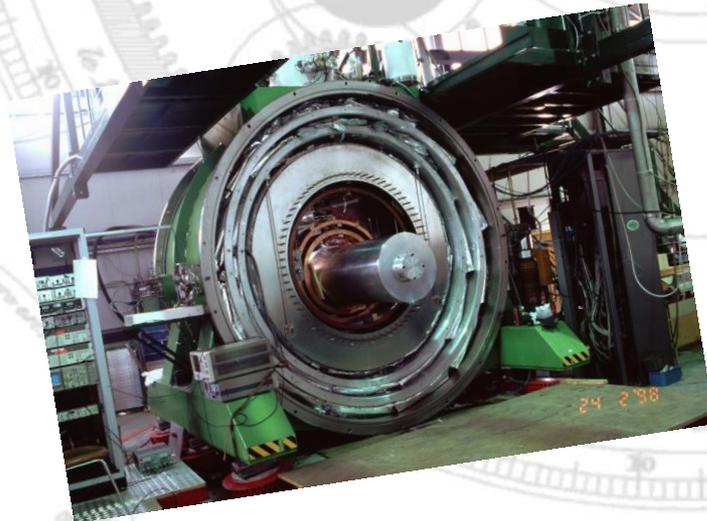
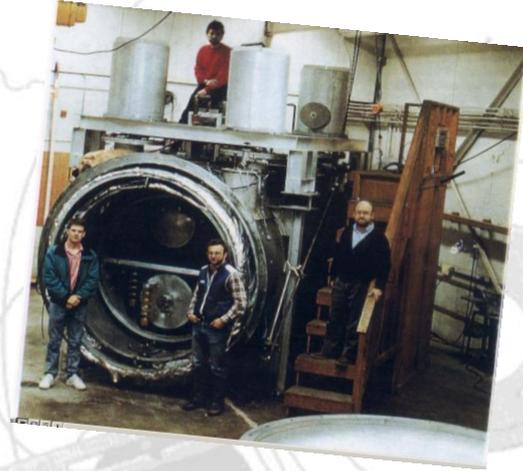


ALLEGRO

AURIGA

EXPLORER

NAUTILUS



# Gravitational Wave Detectors

- Interferometric
- Resonant-Mass



9 ottobre 2014

La teoria della Relatività e le Onde Gravitazionali

- Lo scambio d'energia tra Onde Gravitazionali e Materia è debolissimo.  
L'Onda Gravitazionale attraversa la Materia senza essere significativamente attenuata.
- Il Sole , la Terra ed in generale i corpi celesti sono trasparenti alle Onde Gravitazionali.



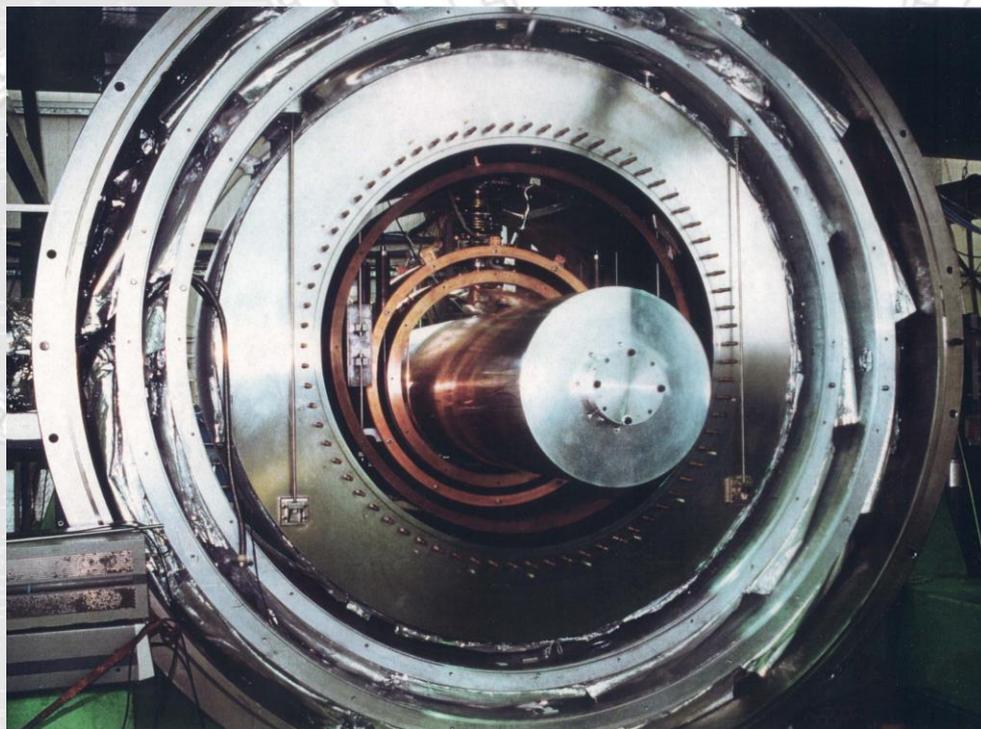
$$h \sim \delta L/L \sim 10^{-21}$$

# Dai primi rivelatori a barra negli anni '70-'80...



... ai giorni d'oggi

- NAUTILUS



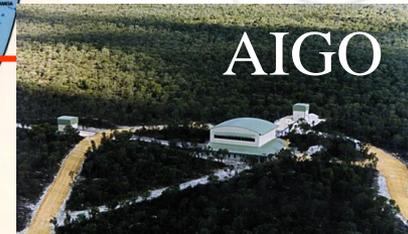
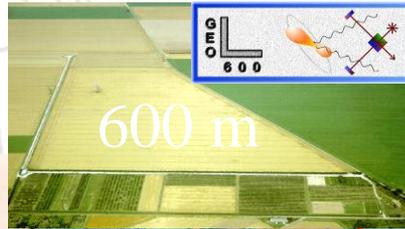
Length = 3 m

$$h \sim \delta L/L \sim 10^{-21} \rightarrow \delta L = 10^{-21} \text{ m}$$

*Thousand million times smaller than the dimensions of a proton!!!!*



# La rete mondiale di interferometri

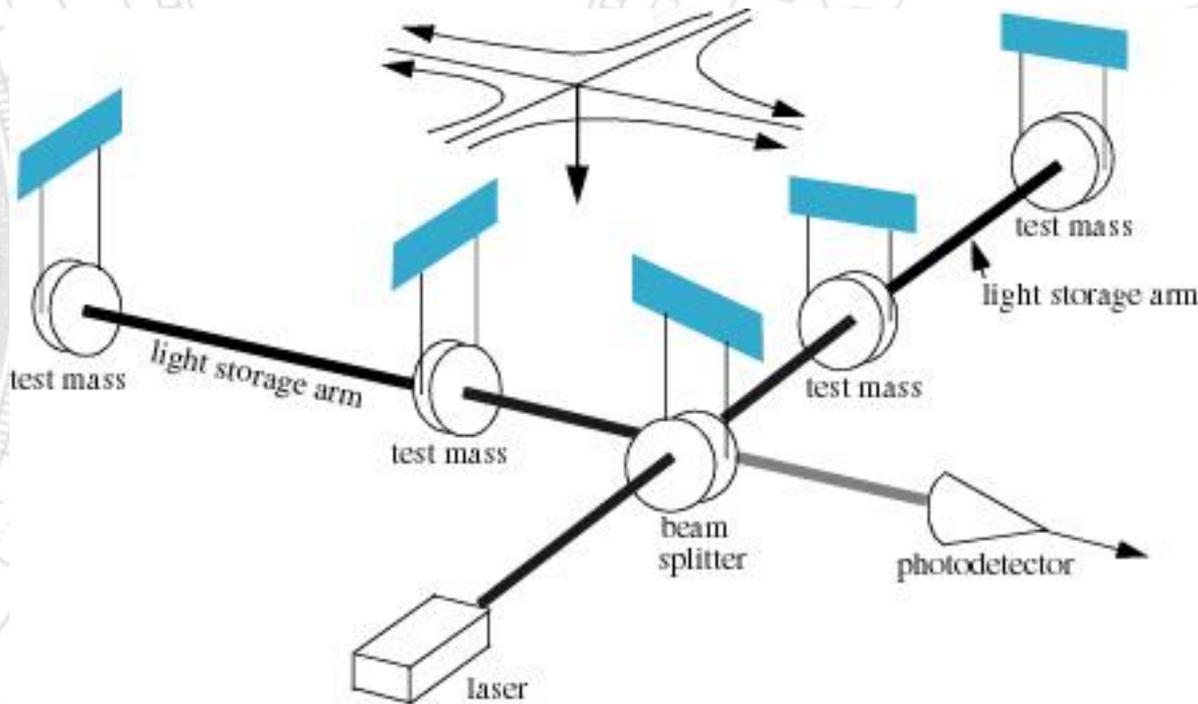


- 1999 TAMA
- 2001 LIGO GEO
- 2004 VIRGO

# The Virgo detector



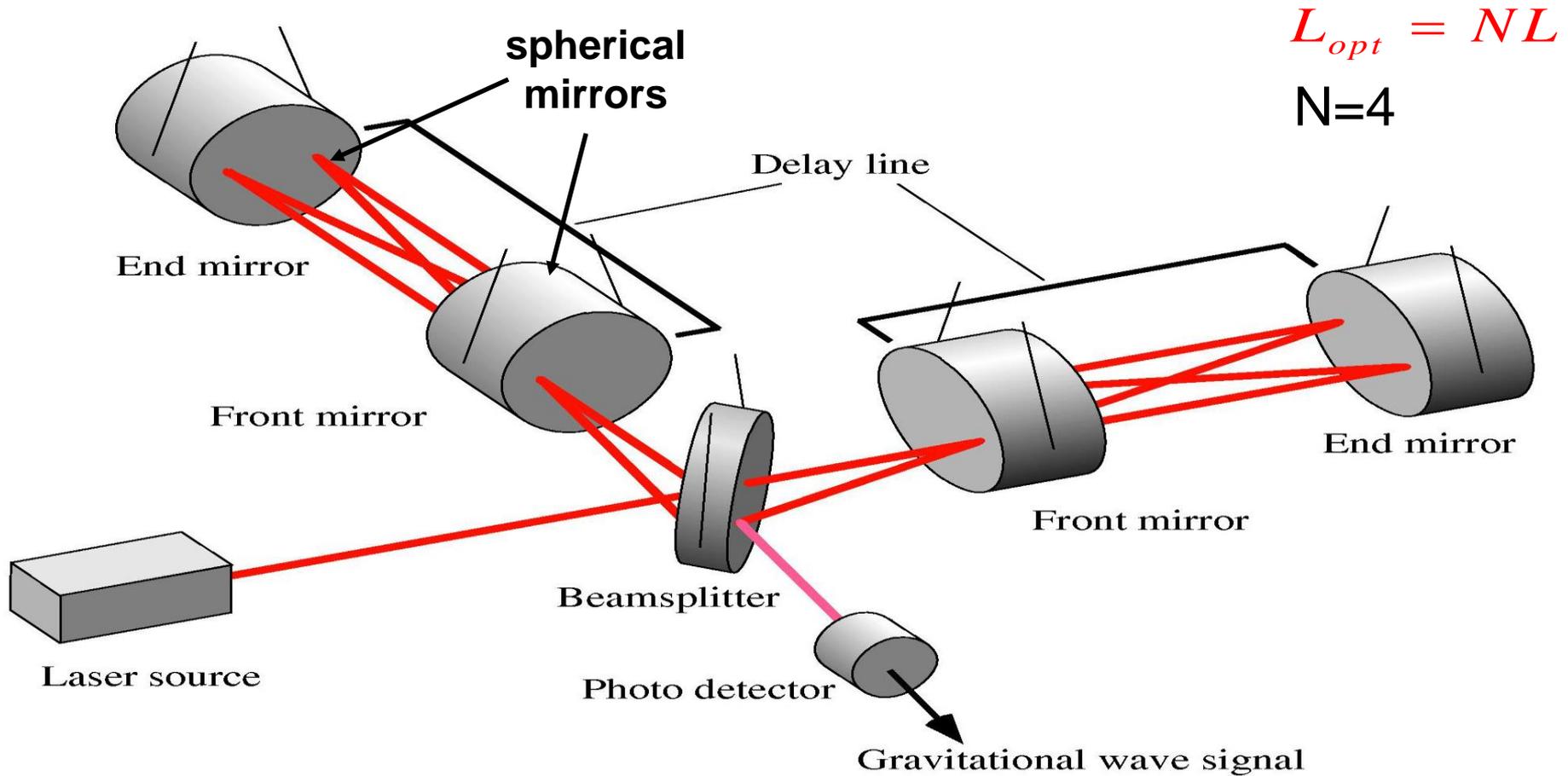
The effect of the GW is proportional to the length of the interferometer arms → long arms are needed (3 km)

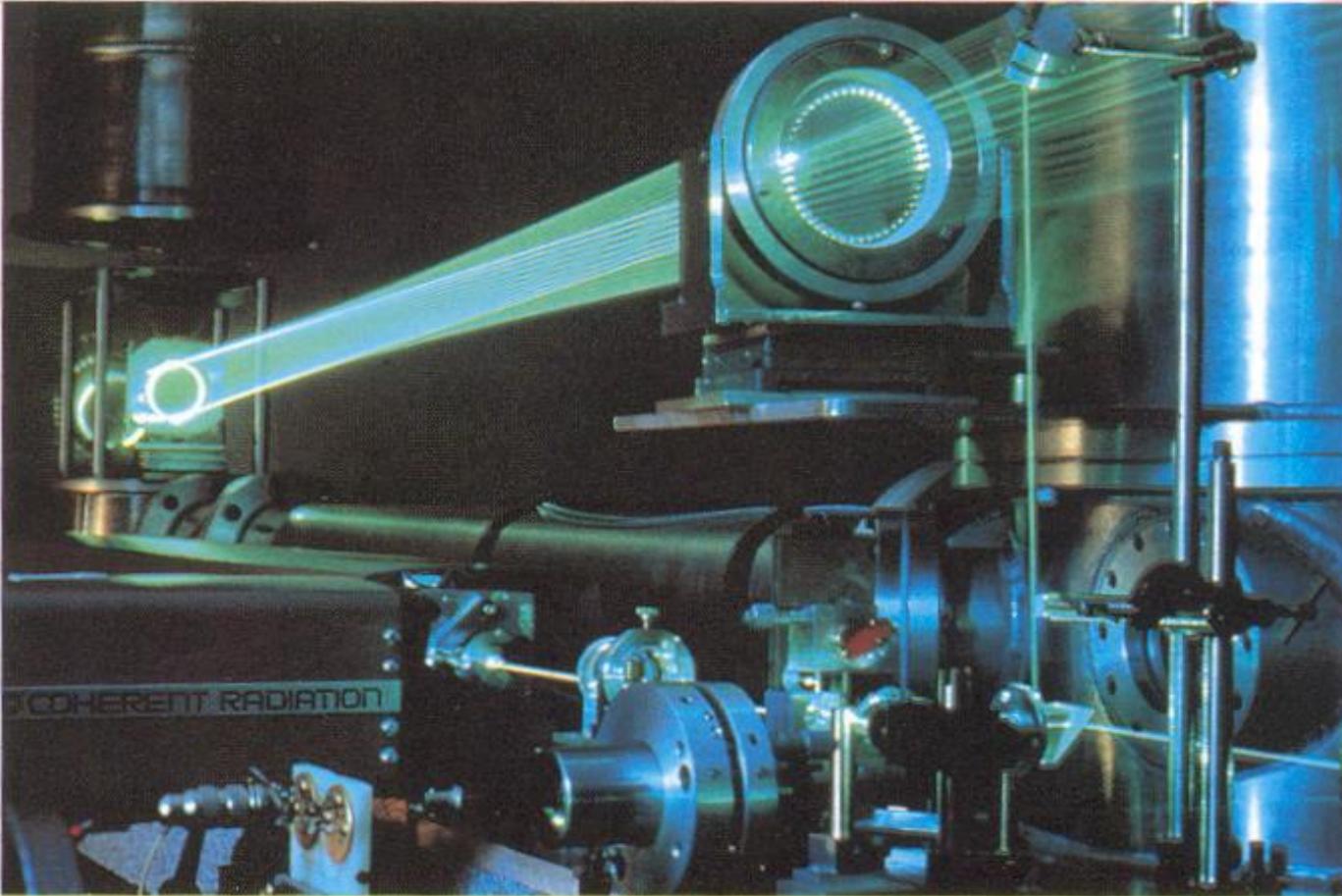


**Also with  $L=3$  km the displacement of the mirrors is  $3 \times 10^{-18}$  m:  
One million times smaller than the dimensions of a proton!!!!**

Is it possible to increase the length traveled by the light?

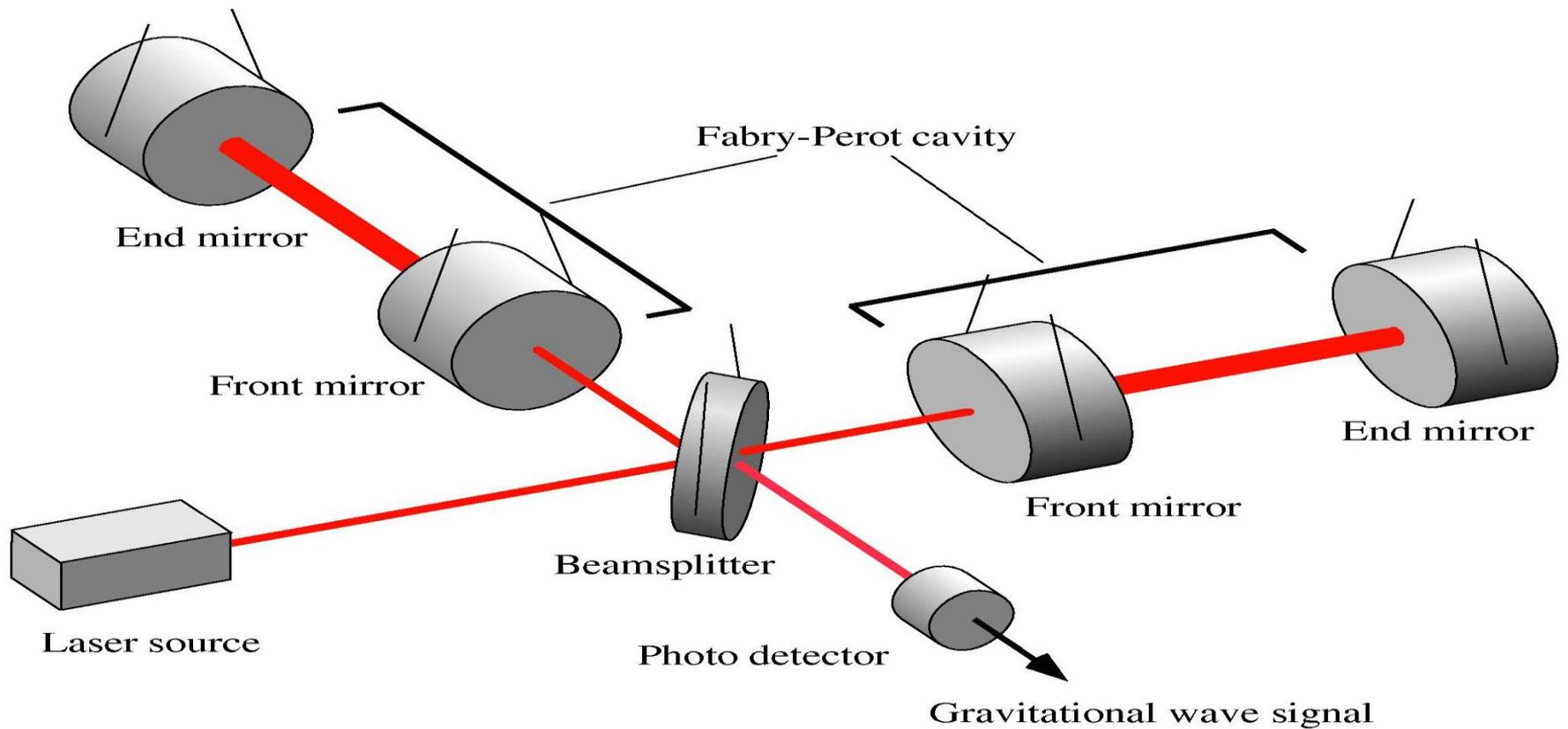
# Linea di ritardo

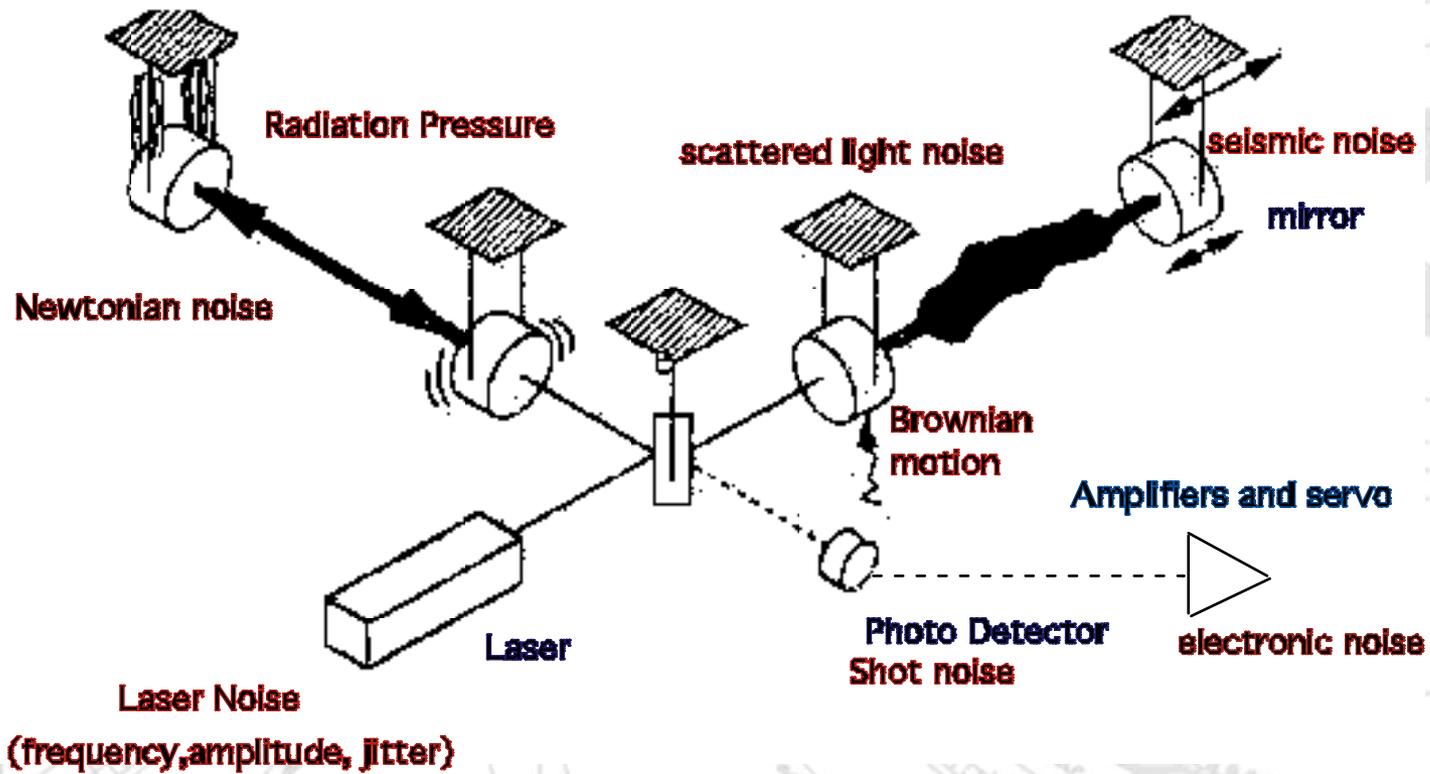




*Un prototipo di antenna interferometrica sviluppato al Max Planck Institute di Garching (Germania).*

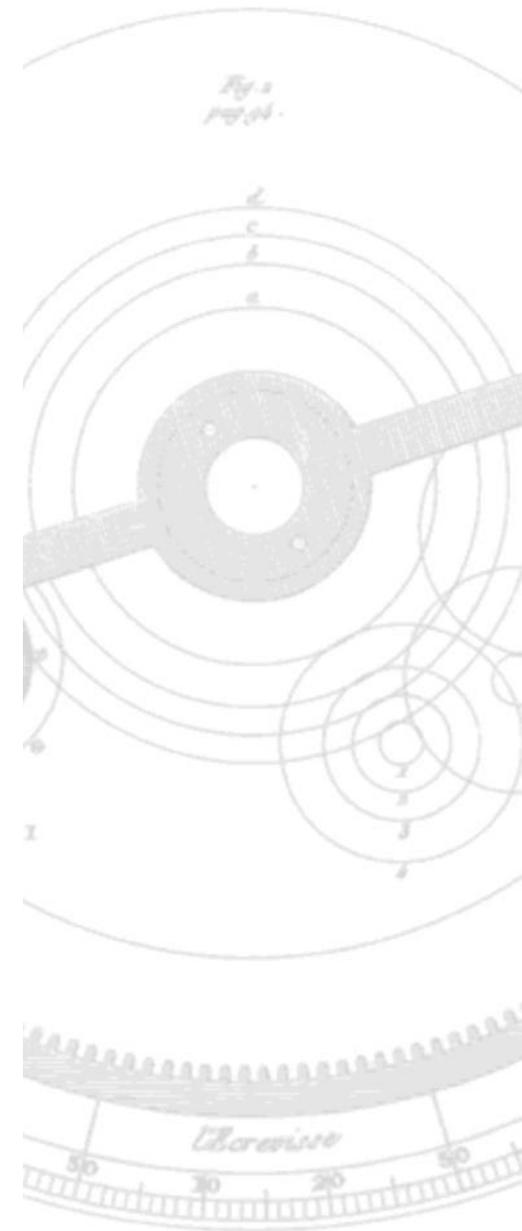
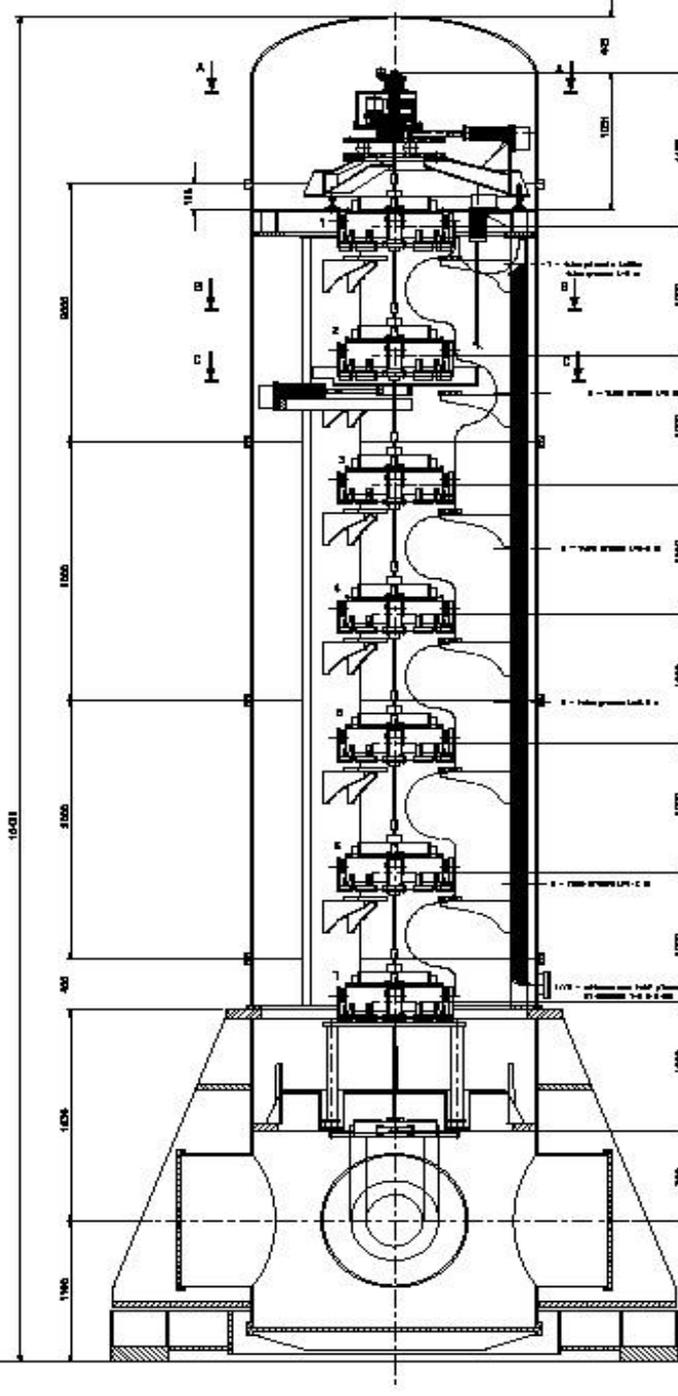
# Cavita' Fabry-Perot





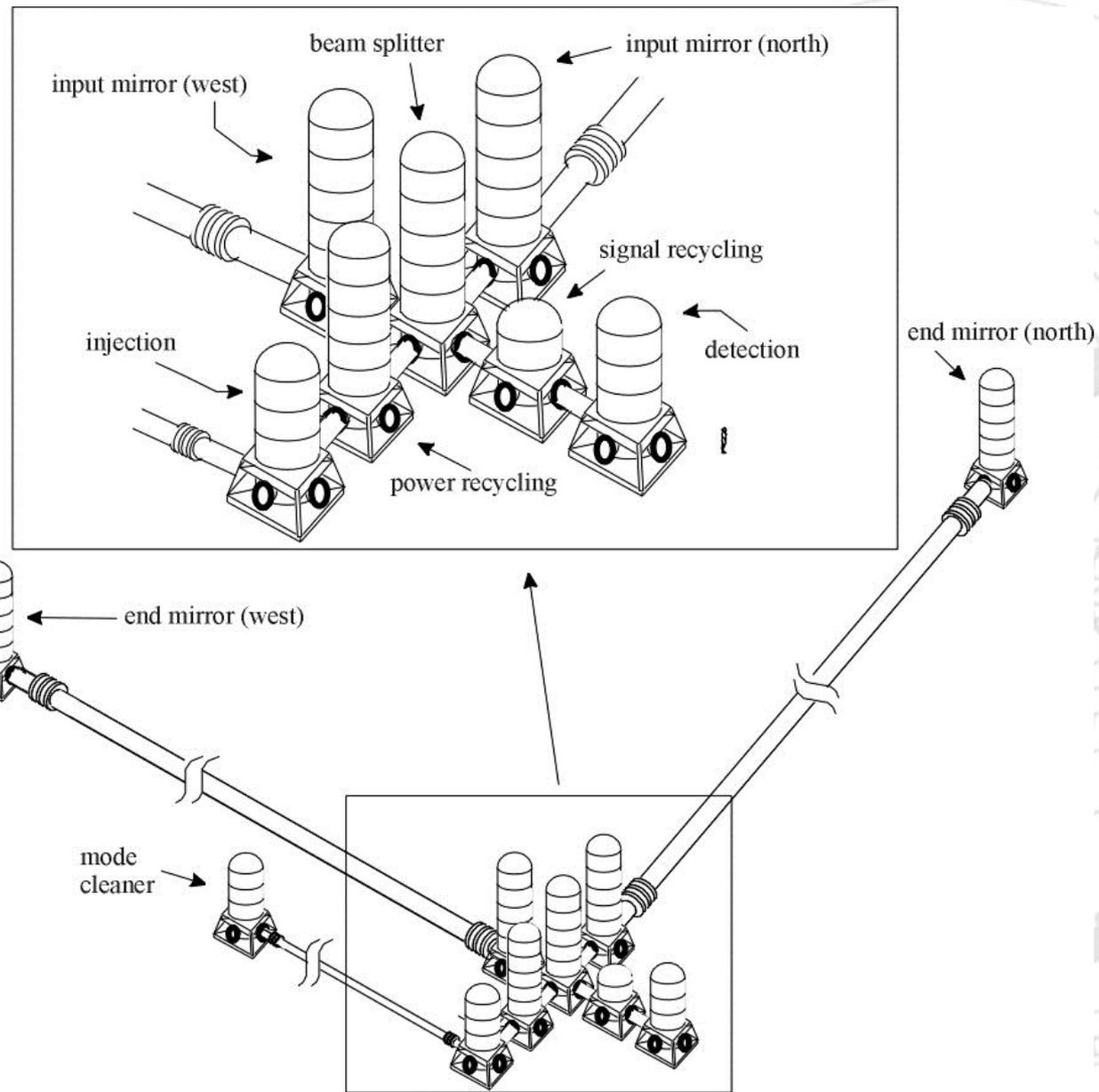
# Riduzione del rumore sismico: Superattenuatori

- E' necessaria un'attenuazione di  $10^{11}$  attenuation @ 10 Hz



# Virgo

Sistema da vuoto e superattenuatori



# Virgo - all'interno dell'edificio centrale

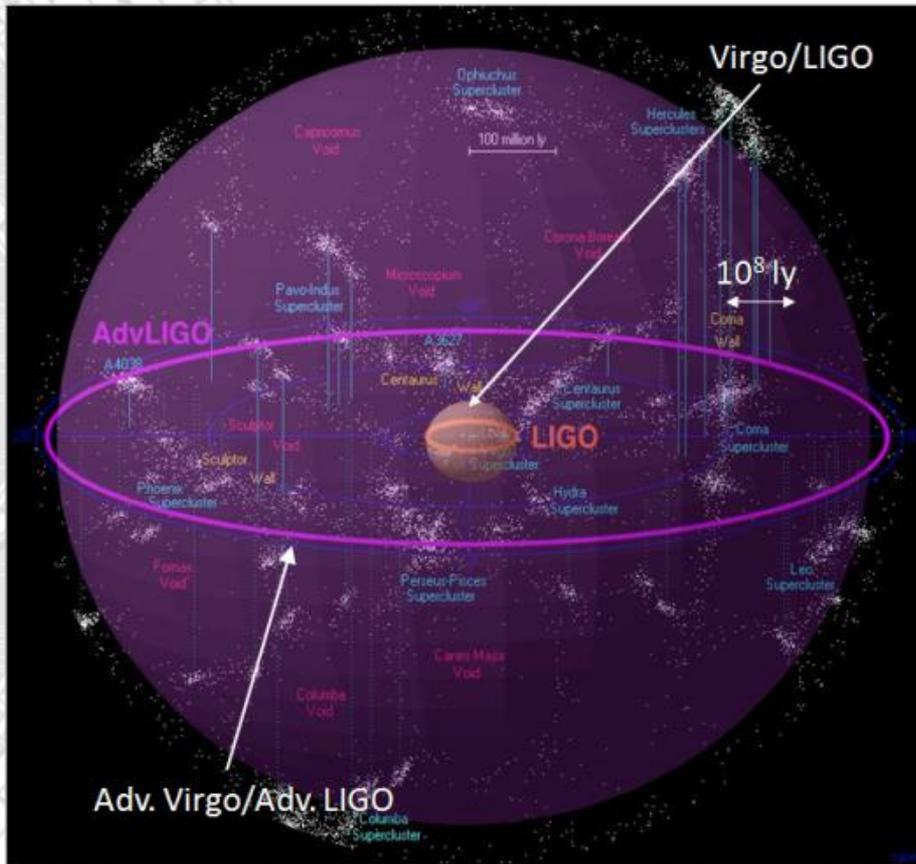




# Virgo - Il tubo da vuoto di 3 km del braccio NORD



# Da Virgo ad Advanced Virgo



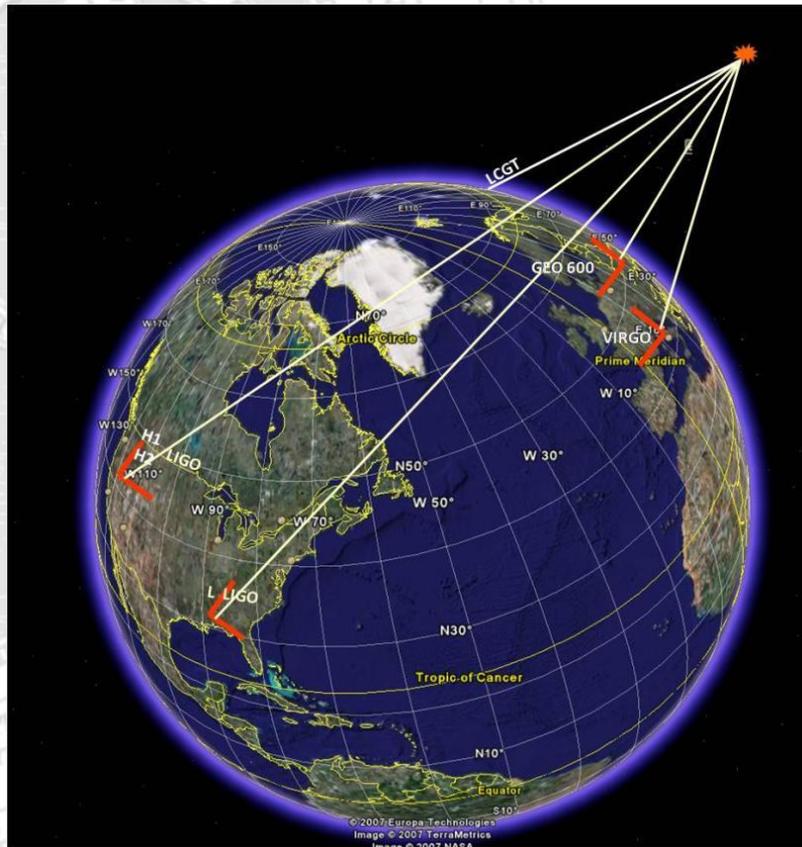
ADVANCED VIRGO IS AT  
PRESENT UNDER  
CONSTRUCTION

Credit: R.Powell, B.Berger

- ❑ It will be able to detect GW sources at a distance up to hundreds of Mpc (1pc=3.26 anni luce)
- ❑ Detection rate: ~1000x better than previous detectors
- ❑ Many GW events per year expected

# GW detectors network

- A network of GW interferometers is in operation: besides Virgo, 2 large scale detectors in the US (+ shorter interferometers in Germany and Japan). Within a few years 2 large scale interferometers in India and Japan will start data taking



- Network detection capability: up to 200 Mpc for GW from binary neutron star systems. Detection rate: several events/year
- Other sources: binary black hole systems, isolated neutron stars, Super Nova collapses, stochastic background (associated with cosmological processes, e.g. inflation, cosmic strings, ...)



Crab pulsar



SN 1987A



# Strong connections with $\nu$ and EM detectors: a global network for MULTI-MESSENGER SCIENCE

LIGO  
Livinston



LCGT



GEO



LIGO Hanford



Virgo



Antares



Fermi



Swift



LVD

QUEST



TAROT



Super-K



IceCube



Arecibo



Green Bank



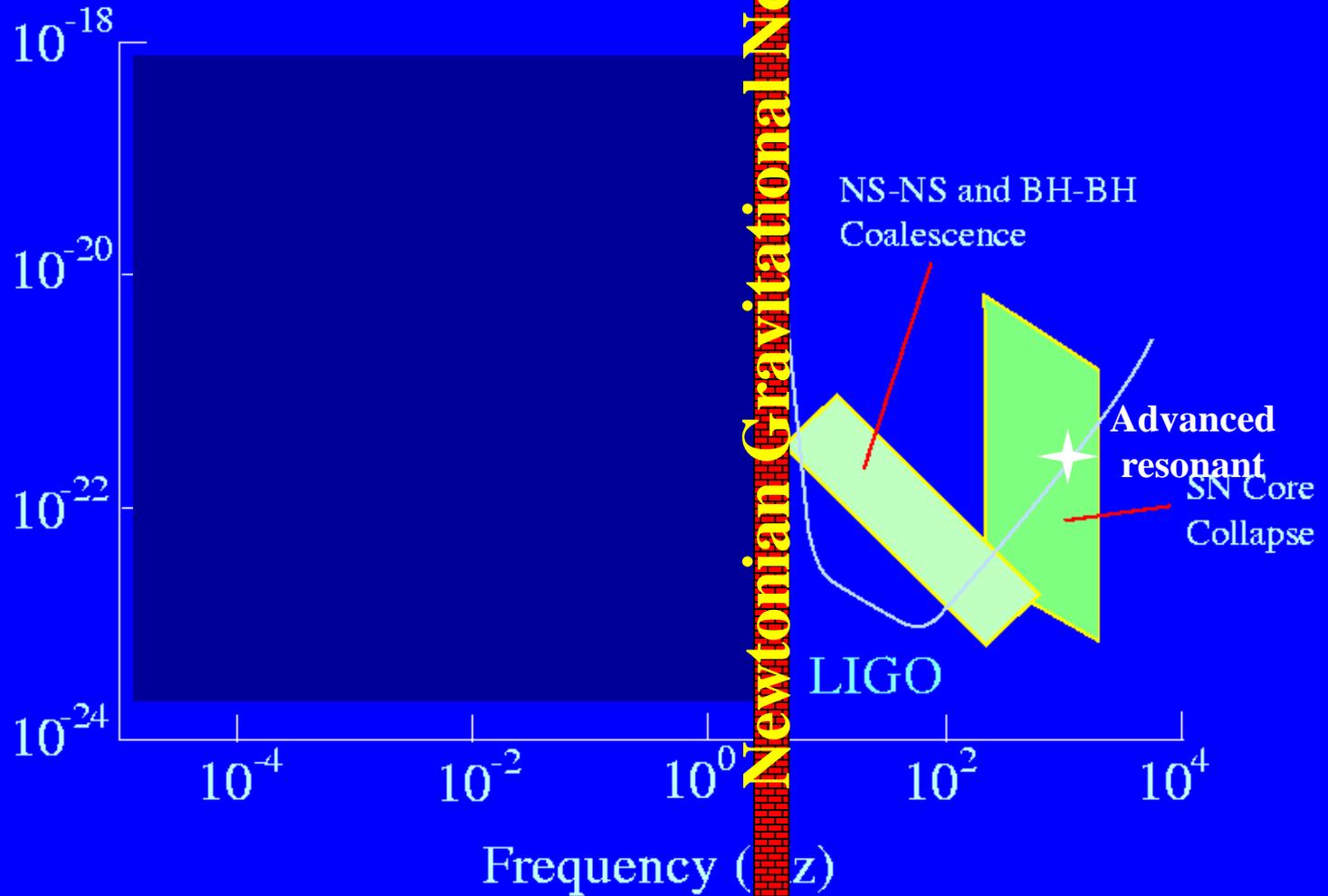
LOFAR



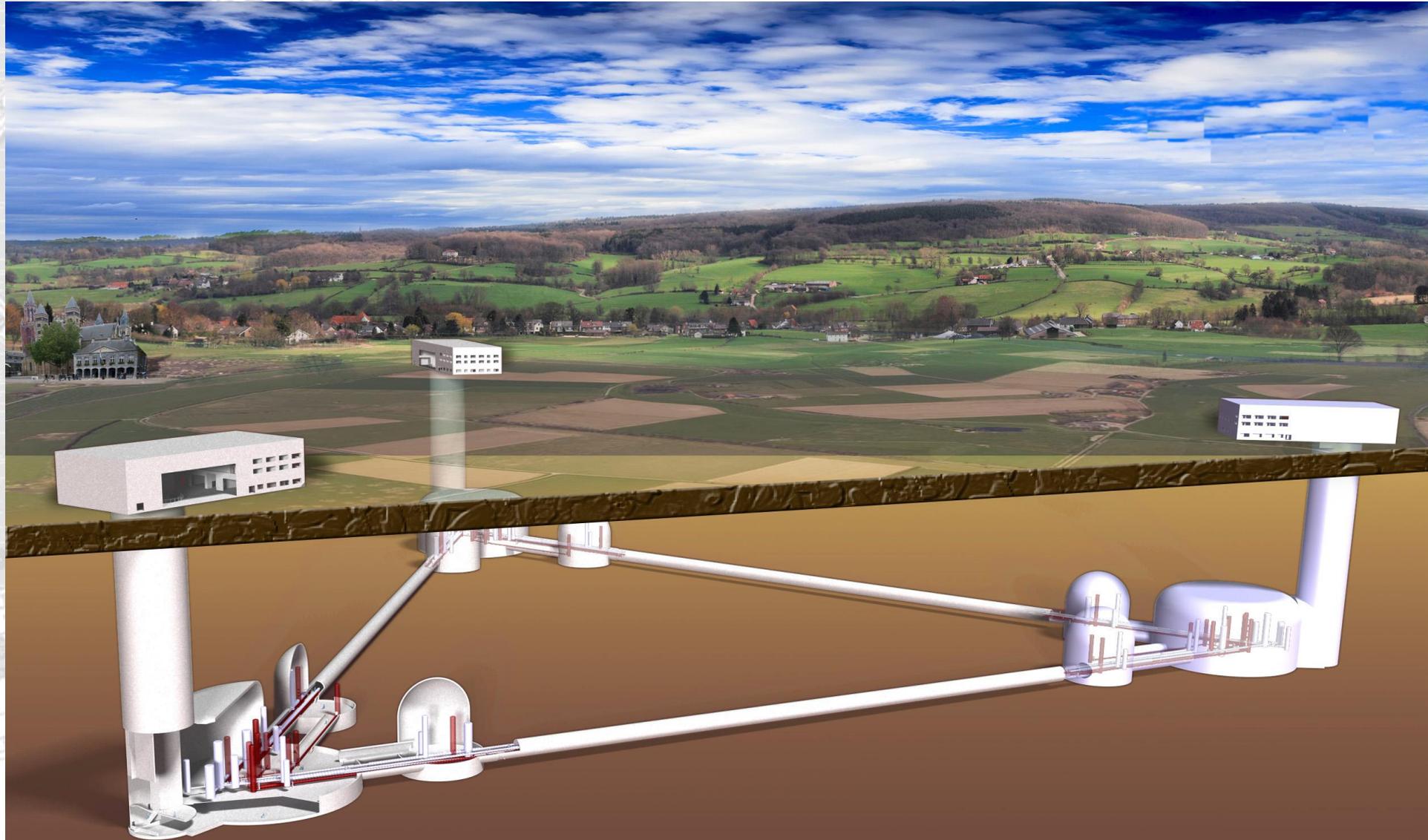
9 ottobre 2014

La teoria della relatività e le Onde Gravitazionali

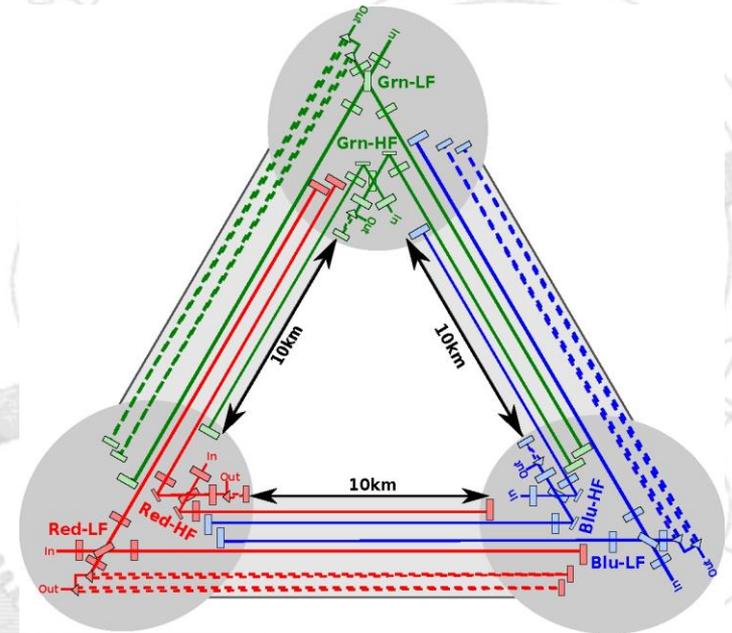
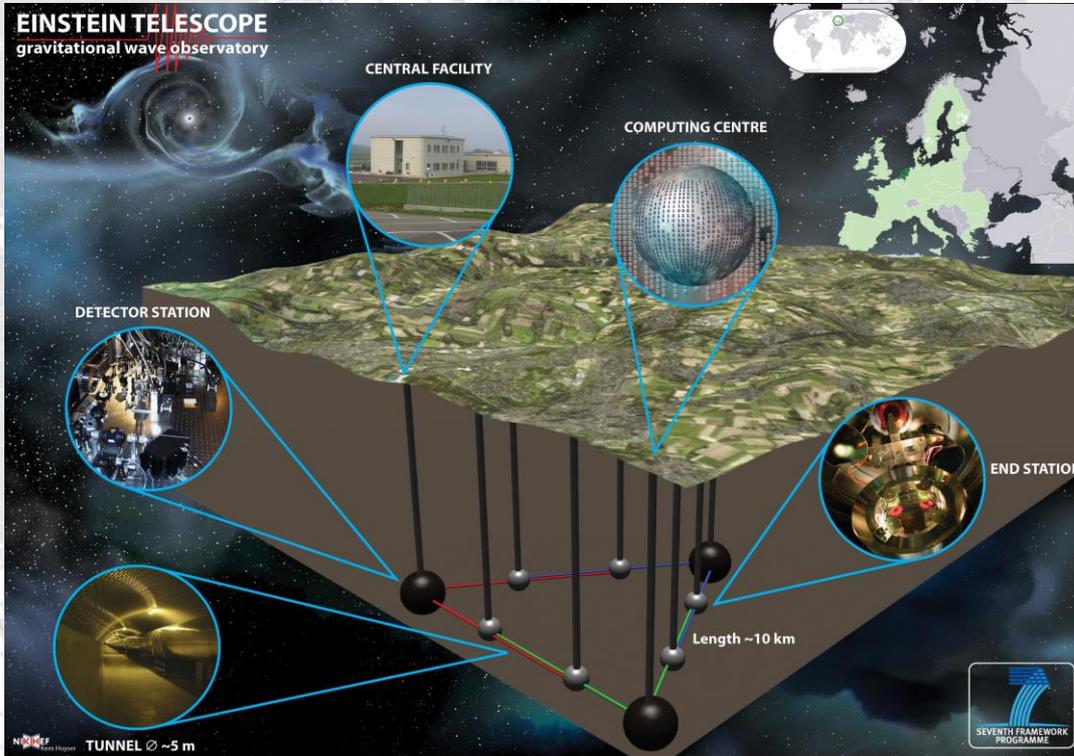
Gravitational Wave Amplitude



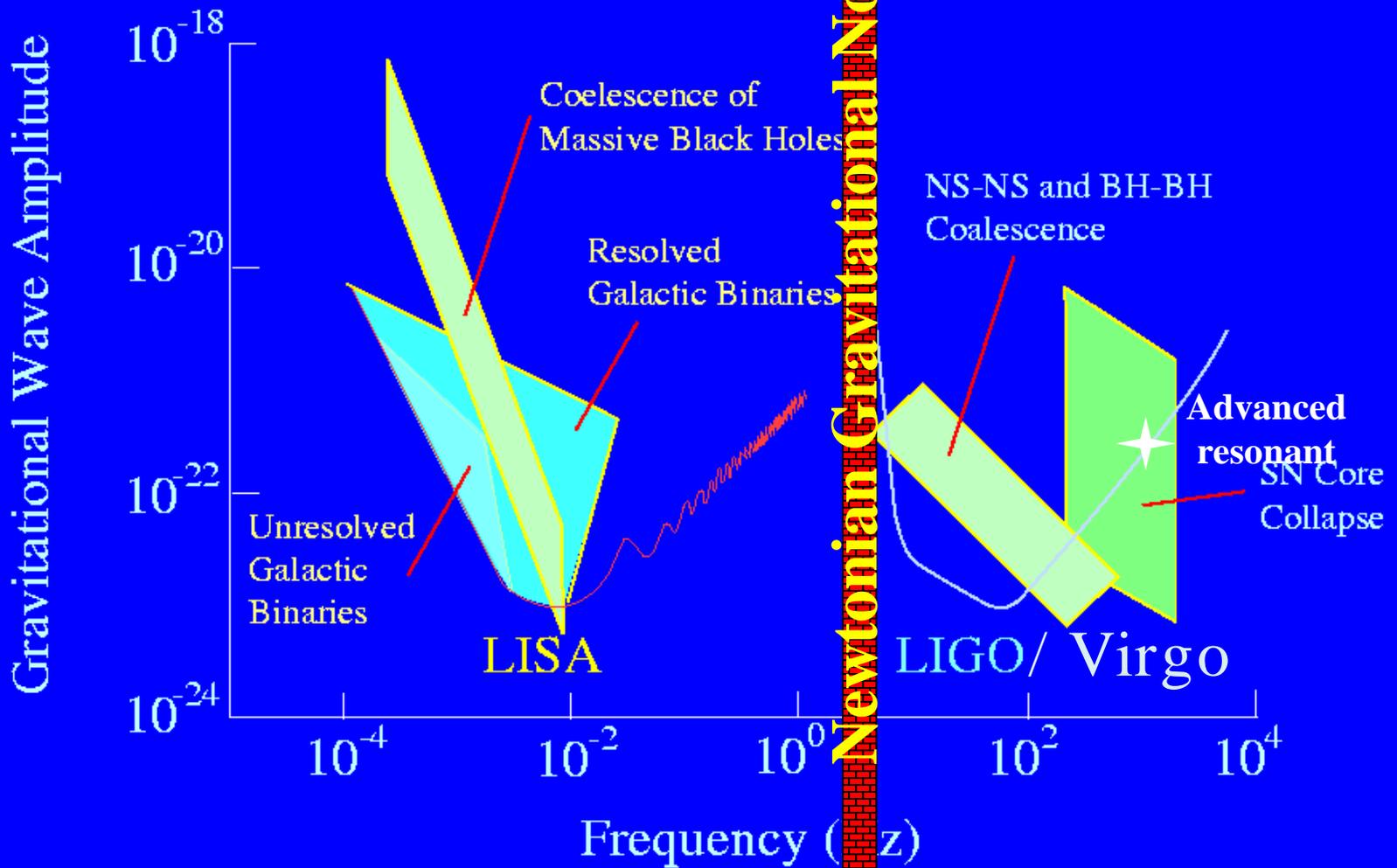
# Go underground: ET (Einstein Telescope)



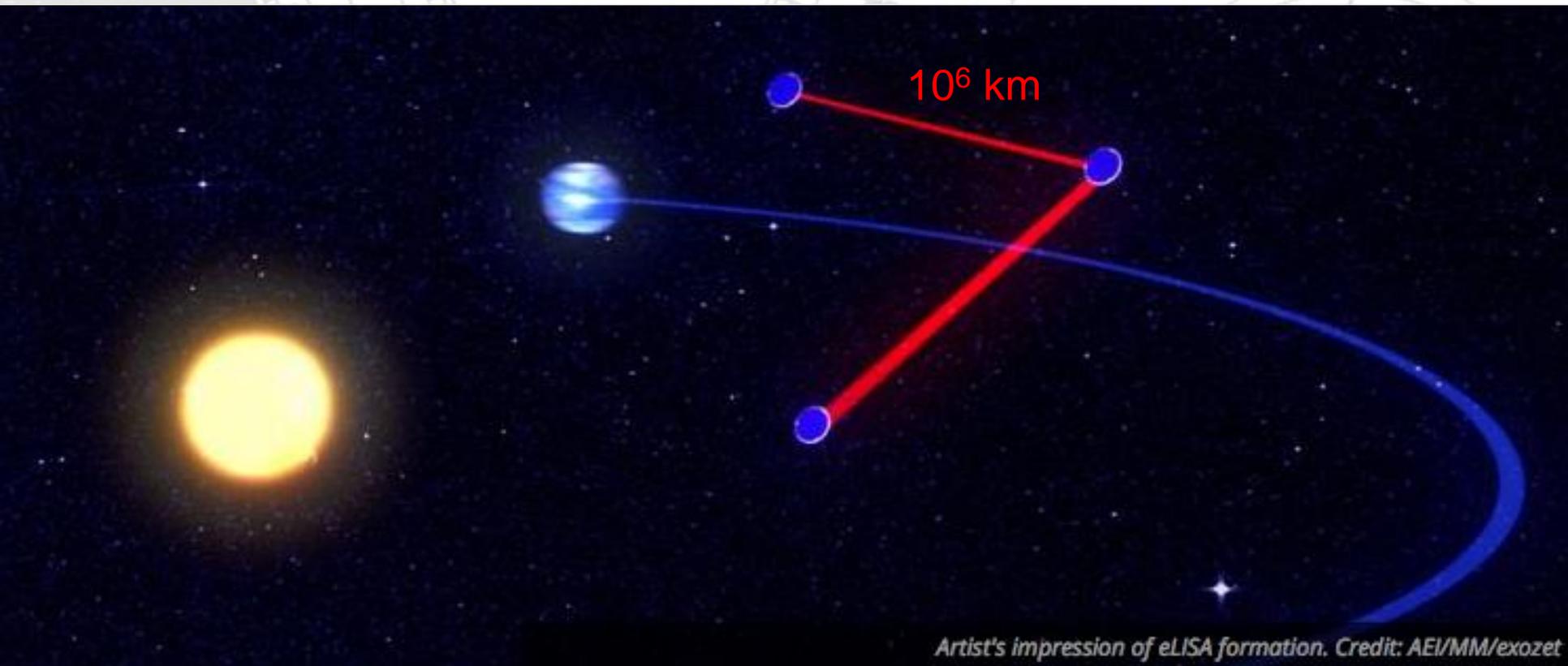
# Go underground: ET (Einstein Telescope)



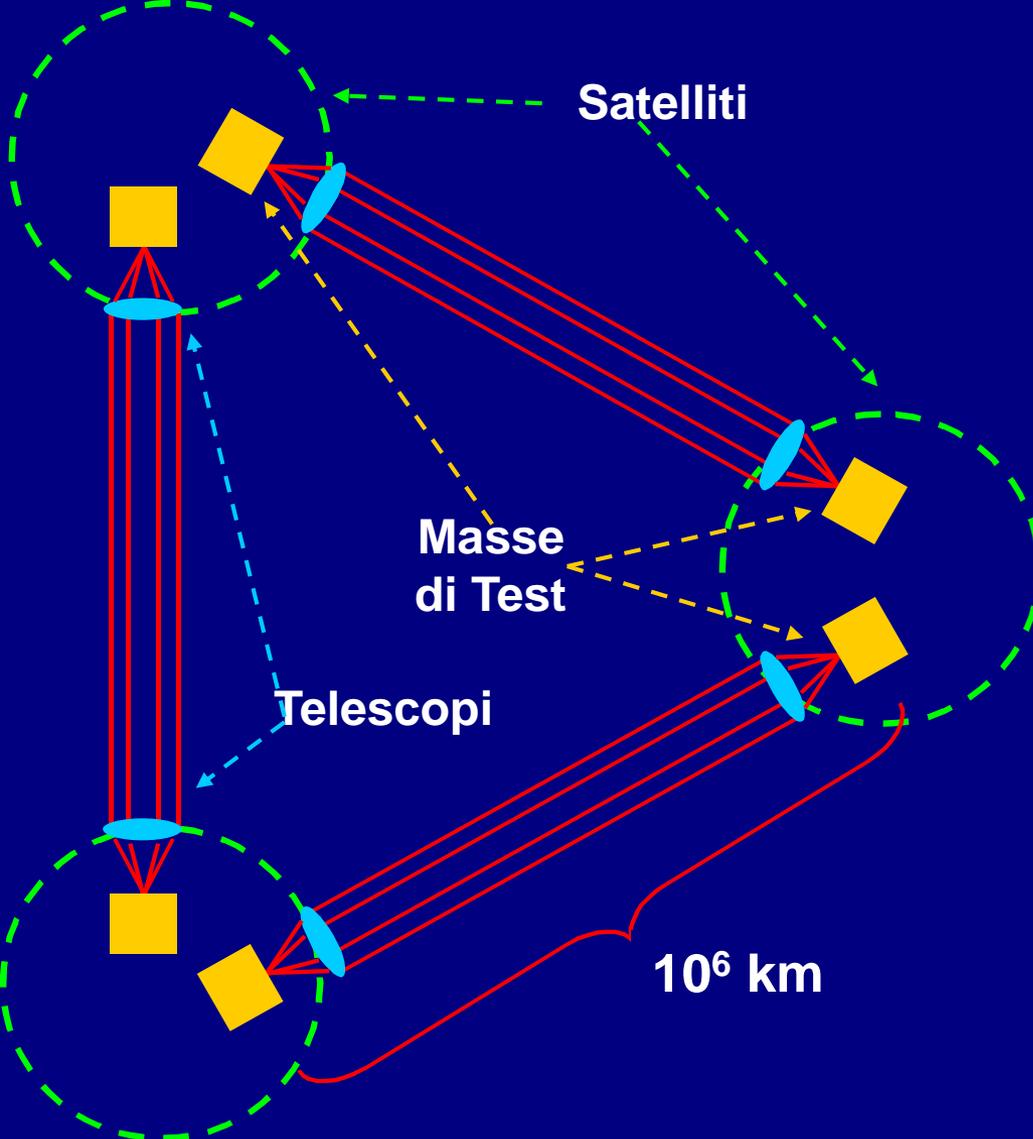
# ... or go to Space: e-LISA



# e-LISA



## A project for the future



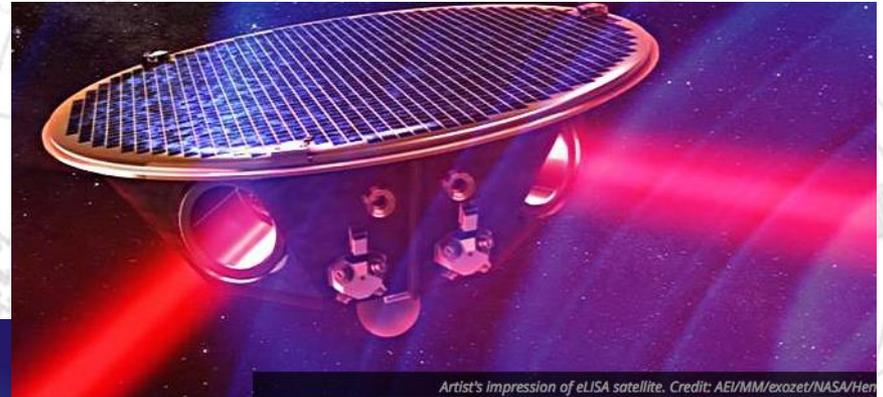
**3 coppie di masse di test in  
“caduta libera”**

**3 satelliti di schermo  
“solidali con le masse di  
test”**

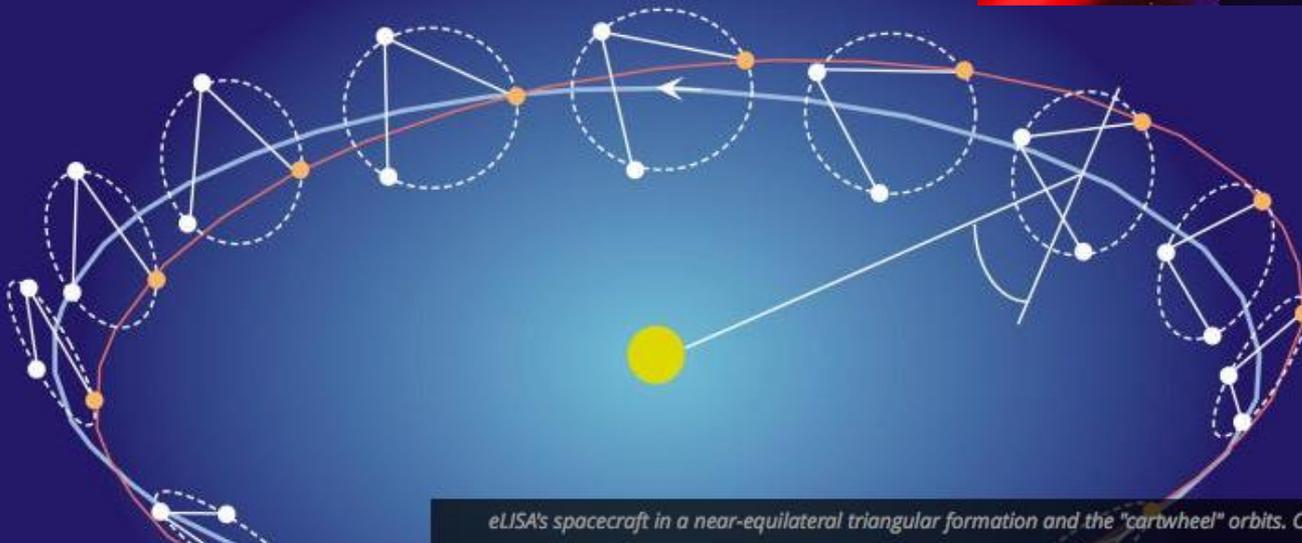
**2 interferometri semi-  
indipendenti di Michelson da  
10<sup>6</sup> km con Trasmettitori  
Laser**

**Obiettivo: rivelare onde  
gravitazionali nell'intervallo  
di frequenze 0.1 mHz – 0.1  
Hz**

# e-LISA



Artist's impression of eLISA satellite. Credit: AEI/MM/exozet/NASA/Hen



eLISA's spacecraft in a near-equilateral triangular formation and the "cartwheel" orbits. Credit

## A project for the future

## Il programma di eLISA:

**LISA Pathfinder: dimostratore tecnologico**

**Lancio previsto nel 201?**

**eLISA: missione ESA**

**Lancio previsto nel 203?**



- **1915** Teoria della Relatività Generale
- **1916** Einstein predice le onde gravitazionali
- **1960** Weber realizza il primo rivelatore
- **1970** Inizia la costruzione dei rivelatori criogenici
- **1984** Taylor e Hulse trovano la prima prova indiretta delle onde gravitazionali (Premio Nobel nel 1993)
- **1990** rivelatori risonanti in misura
- **2005** Prima operazione di un grande interferometro
- **2015** interferometri avanzati in presa dati

**Il 2016 sarà il centenario della pubblicazione della teoria della Relatività Generale: quale migliore occasione per festeggiare con la prima rivelazione diretta?**

# The End