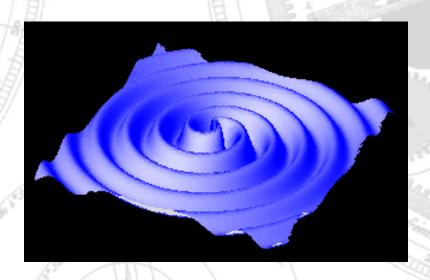
La teoria della Relatività e le Onde Gravitazionali Un nuovo modo di guardare l'Universo

Alessio Rocchi e Viviana Fafone

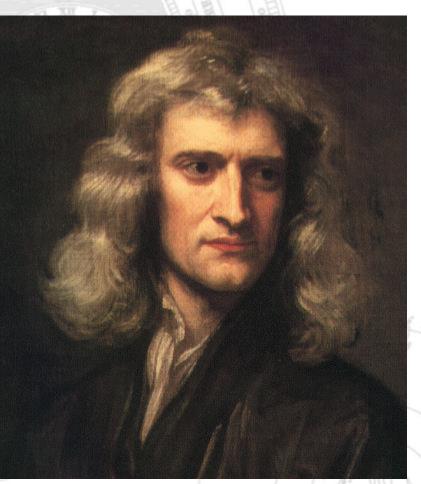
Universita' di Roma Tor Vergata e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare







Gravitazione universale di Newton (1686)







8 ottobre 2015

PHILOSOPHIÆ

V. Bendavi

NATURALIS

PRINCIPIA

MATHEMATICA.

Autore J.S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Mathefeos Professore Lucafiano, & Societatis Regalis Sodali.

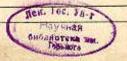
IMPRIMATUR.

S. PEPYS, Reg. Soc. PRESES.

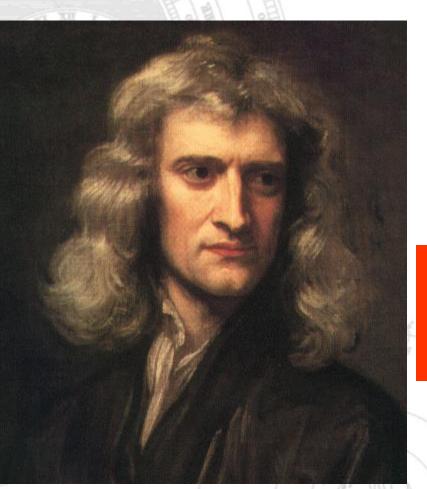
Julii 5. 1686.

LONDINI,

Jussu Societatis Regia ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.



Gravitazione universale di Newton (1686)

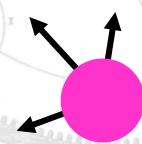


 Forze uguali ed opposte tra coppie di corpi





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

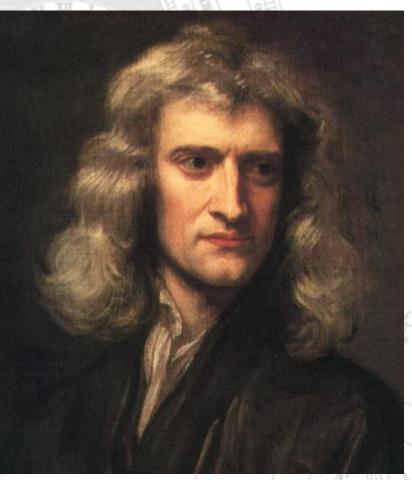








Gravitazione universale di Newton (1686)

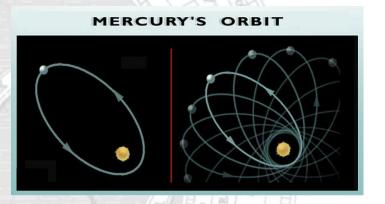


- Teoria di grande successo
- Risolve molti dei problemi noti in astronomia e fisica terrestre
 - Le orbite eccentriche delle comete
 - Le maree e le loro variazioni
 - Le perturbazioni del moto della luna dovute alla gravità del Sole
- Unisce il lavoro di Galileo, Copernico e Keplero
- Porta alla scoperta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





Rimangono dei fatti inspiegati...



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"

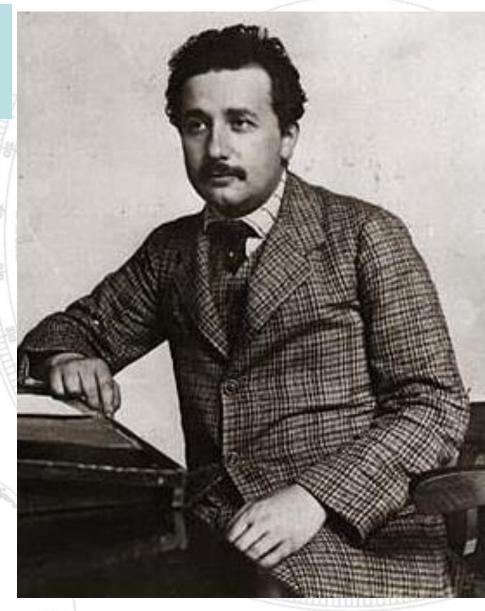
Sir Isaac Newton (1692)





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

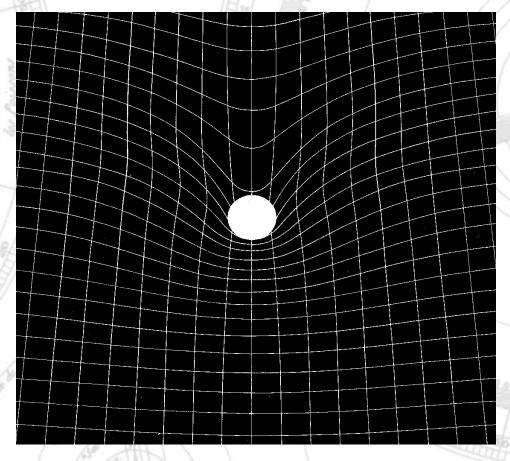
- La materia definisce la geometria dello spazio-tempo
- La geometria determina il moto della materia
- La distribuzione di materia ed il suo moto non possono essere descritti indipendentemente dal campo gravitazionale da essi prodotto





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

(J. Wheeler)





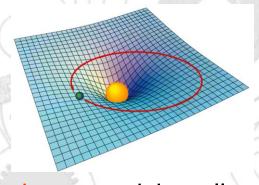


Newton: gravità è una forza



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 (≈ ellisse) in questo ambiente deformato

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





Alcune verifiche classiche della relatività generale

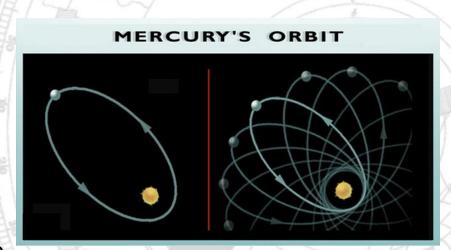
- Precessione del perielio di Mercurio
- Deflessione raggi luminosi





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

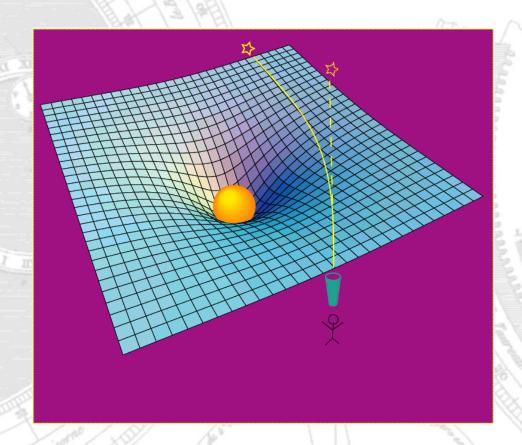


 In una lettera che Einstein scrisse verso la fine del 1915 a Sommerfeld dicerva: "L'ultimo mese e' stato uno dei piu' emozionanti e intensi della mia vita. Quello che mi rende cosi' felice non e' solo il fatto che la teoria di Newton si ottiene come prima approssimazione, ma che la precessione del perielio di Mercurio si ottiene come seconda approssimazione".





Deflessione dei raggi luminosi





Osservabile durante un'eclissi

Gravitational Lensing

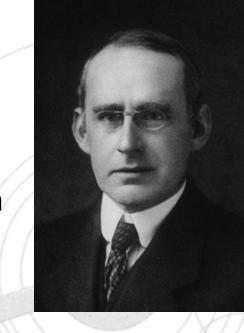
Conferma della previsione: Eddington (1919)





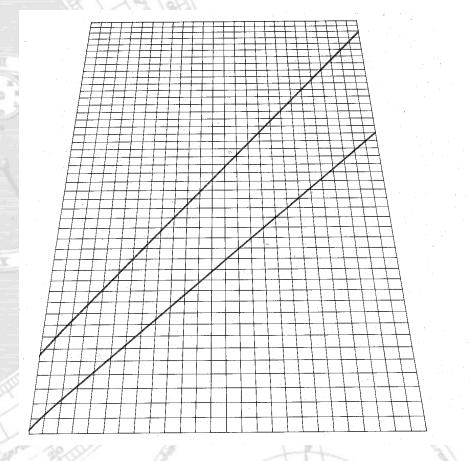
Confirming Einstein

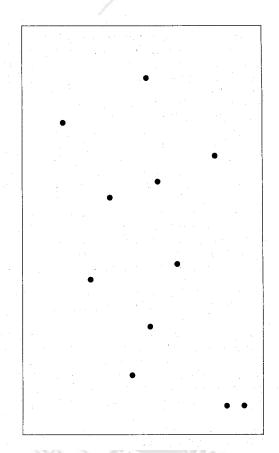
Famous British astronomer Sir Arthur
 Eddington led an expedition to photograph
 the solar eclipse of
 29 May 1919 against Hyades star cluster





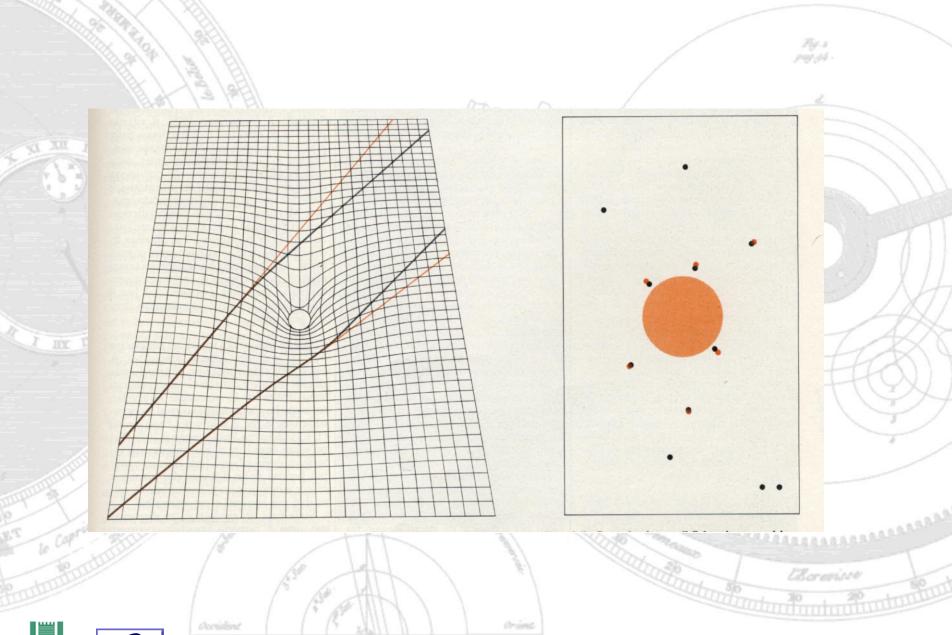
	Measured Deflection
Einstein	1.75"
Principe	1.61" ± 0.30"
Sobral	1.98" ± 0.12"















Stunning Confirmation for Relativity

REVOLUTION IN SCIENCE.

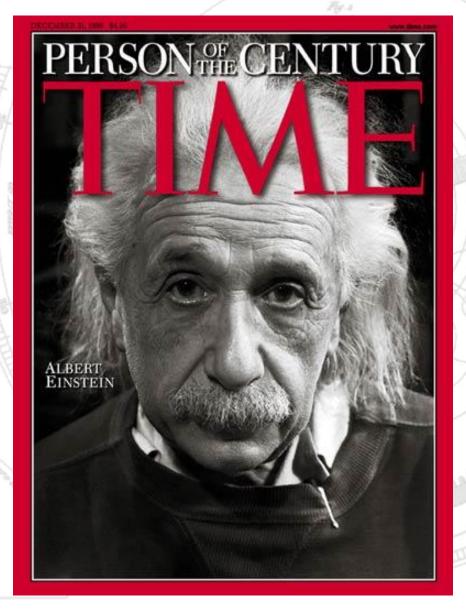
NEW THEORY OF THE UNIVERSE.

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

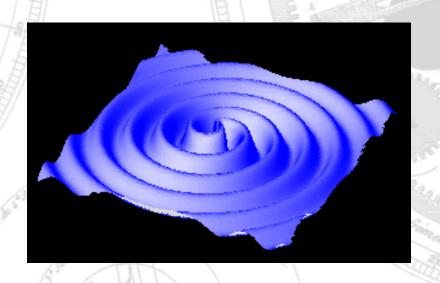






Le onde gravitazionali

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

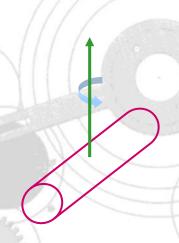






- Non possono essere prodotte in laboratorio
 - Massa di acciaio, 1 metro di raggio, lunga 20 metri, ruotante alla velocità di 4.4 rivoluzioni/s
 P = 10⁻³⁰ W

Cilindro rotante di massa M e lunghezza L



In un evento di Supernova, all'esplosione, potrebbe essere emessa energia pari a ~ 10⁴⁰ Joule in una frazione di secondo



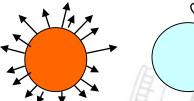


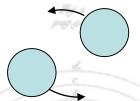
Symmetrical h=0











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

La radiazione elettromagnetica e' prodotta da una sovrapposizione incoerente di radiazione 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~10 km) composti da neutroni ad altissima densita' (10¹² - 10¹⁴ g/cm³) Il numero stimato di NS ruotanti nella Galassia e' di circa 10⁹, di cui 1000 osservate come pulsar e di queste, 5 a meno di 200 pc.

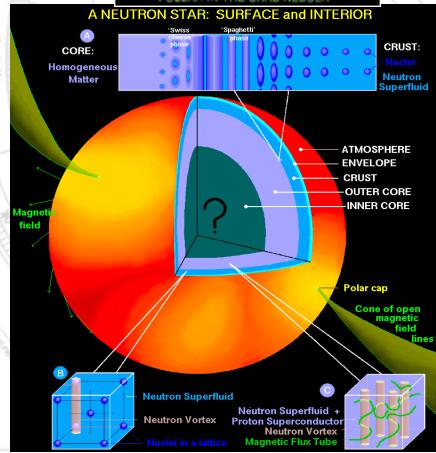
Campi magnetici molto forti
(10° Tesla)
+
Rapida rotazione
=

⇒ 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!



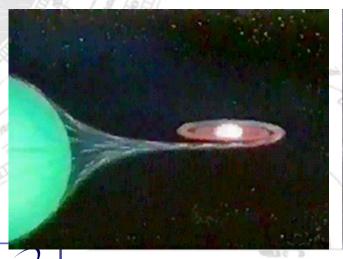






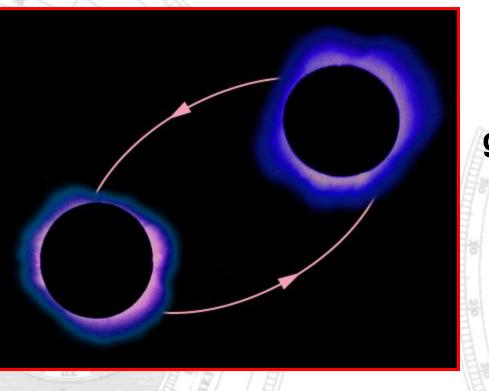
Sorgenti di onde gravitazionali

- 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 108-9 binarie galattiche con frequenze > 0.1mHz (la maggior parte WD/WD)
- Sistemi binari (BH-NS)
- Sistemi binari (BH-star / NS-star)



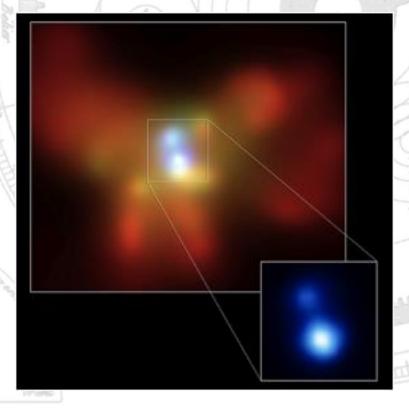






Sistemi binari di buchi neri massivi formati da nuclei galattici (10⁴-10⁶ masse solari)

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

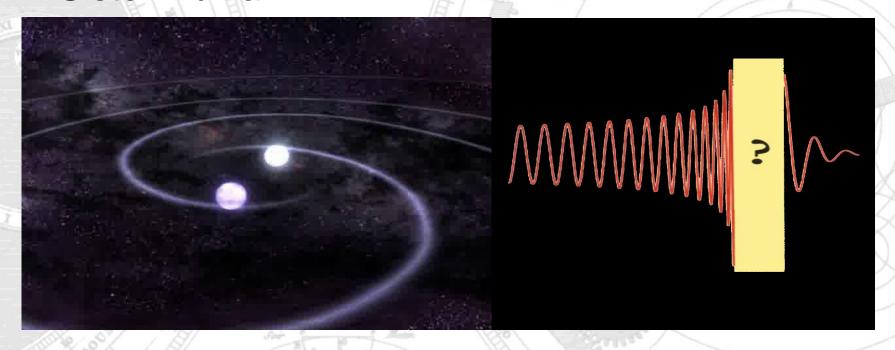






Sorgenti di onde gravitazionali

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)





Russell A. Hulse

Discovered and Studied
Pulsar System
PSR 1913 + 16

No Evidence For Gravitational Waves Until 1974



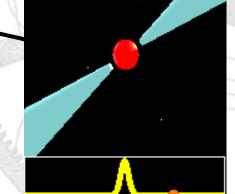
Joseph H.Taylor Jr

Neutron Binary System

PSR 1913 + 16

~ 8 hr





Pulse period

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

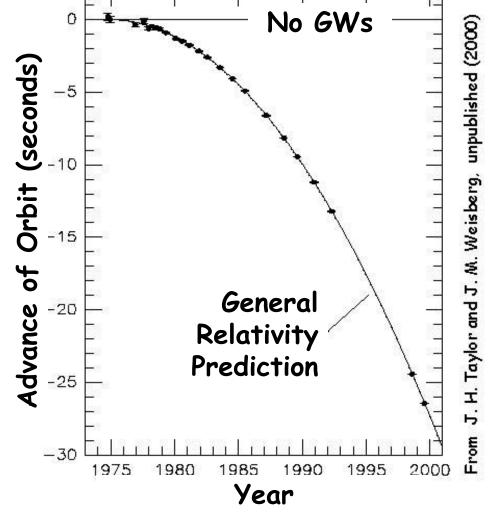






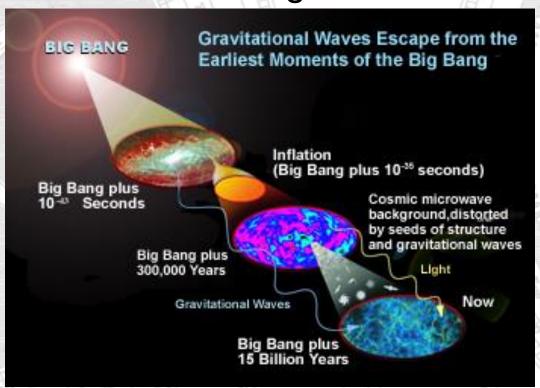
8 ottobre 2015

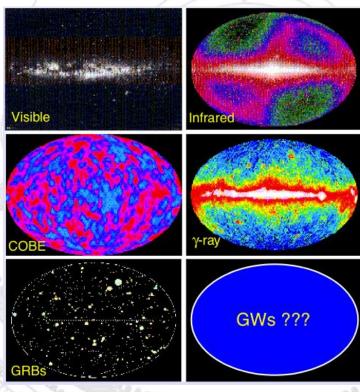
Comparison between observations of the binary pulsar PSR1913+16, and the prediction of general relativity based on loss of orbital energy via gravitational waves



Sorgenti di onde gravitazionali

Radiazione gravitazionale di fondo



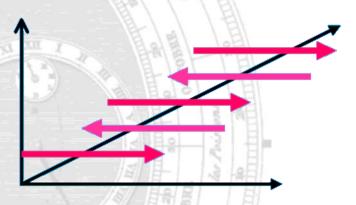


La misura di questo segnale può fornire informazioni sui primissimi istanti di vita dell'universo

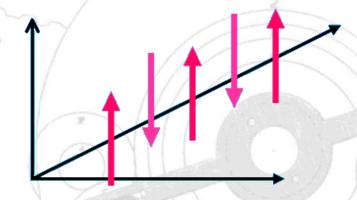




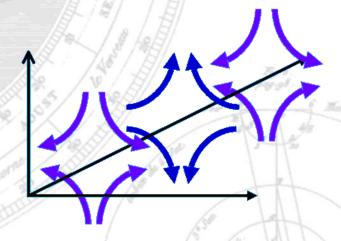
Confronto con le onde elettromagnetiche



Polarizzazione orizzontale



Polarizzazione verticale



Polarizzazione +

Polarizzazione x



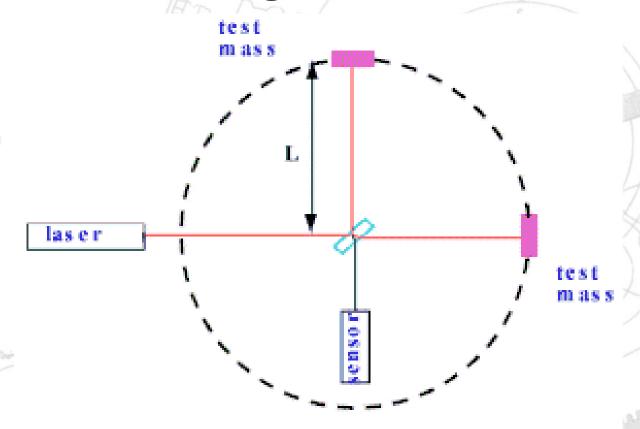


L'onda gravitazionale produce una deformazione dello spazio dipendente dal tempo. I rivelatori di onde gravitazionali misurano direttamente questa deformazione. Esempio: deformazione di un anello di particelle di prova dovuta ad un'onda gravitazionale che si propaga in direzione normale al piano dell'anello.



Detecting a Gravitational Wave with Light

Michelson Interferometer



Strength (Δ L/L) of a strong wave is about 10⁻²¹ For L = 1 km, => Δ L = 10⁻¹⁸ m





How Small is 10⁻¹⁸ Meter?

÷10,000



÷100



÷100,000

÷1,000



Human hair ~ 10⁻⁴ m (0.1 mm)

Wavelength of light ~ 10⁻⁶ m

Atomic diameter 10⁻¹⁰ m

Nuclear diameter 10⁻¹⁵ m

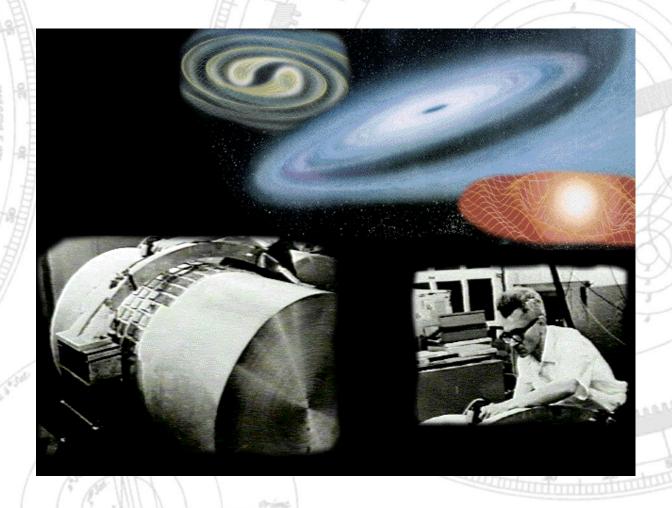
GW detector 10⁻¹⁸ m





Detecting a Gravitational Wave with an Elastic Body

Bar detectors

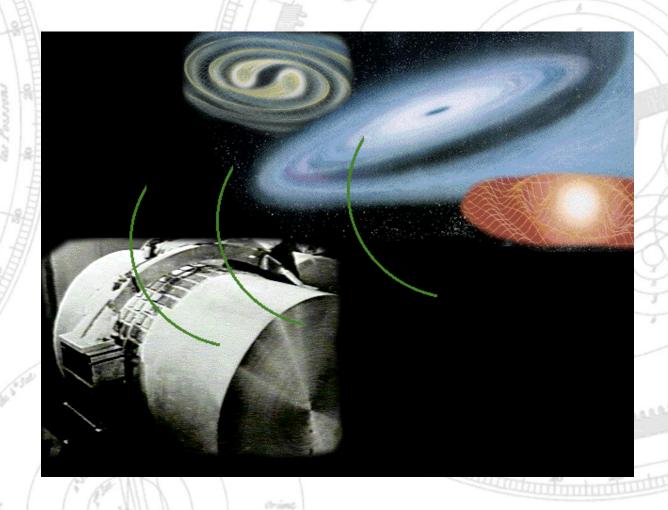






Detecting a Gravitational Wave with an Elastic Body

Bar detectors

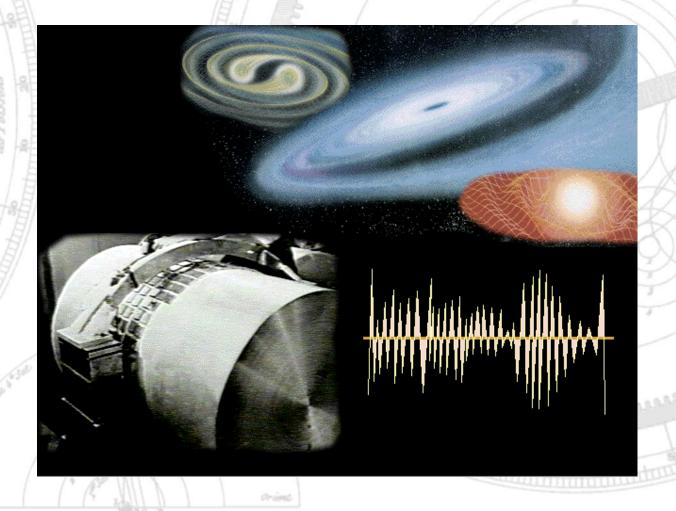






Detecting a Gravitational Wave with an Elastic Body

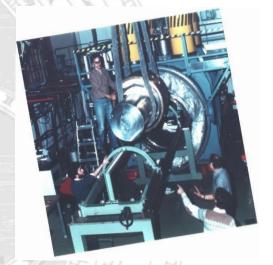
Bar detectors







La rete mondiale di antenne risonanti





ALLEGRO AURIGA EXPLORER NAUTILUS





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.

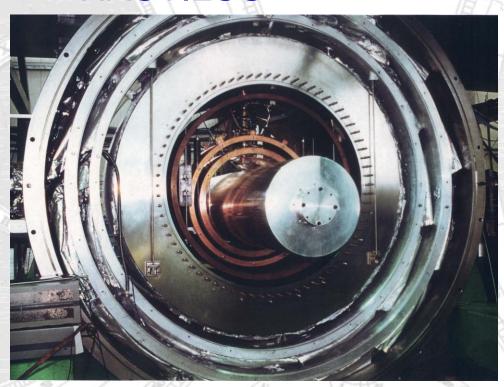
 $h \sim \delta L/L \sim 10^{-21}$





Barre risonanti ai giorni d'oggi

NAUTILUS





Length = 3 m

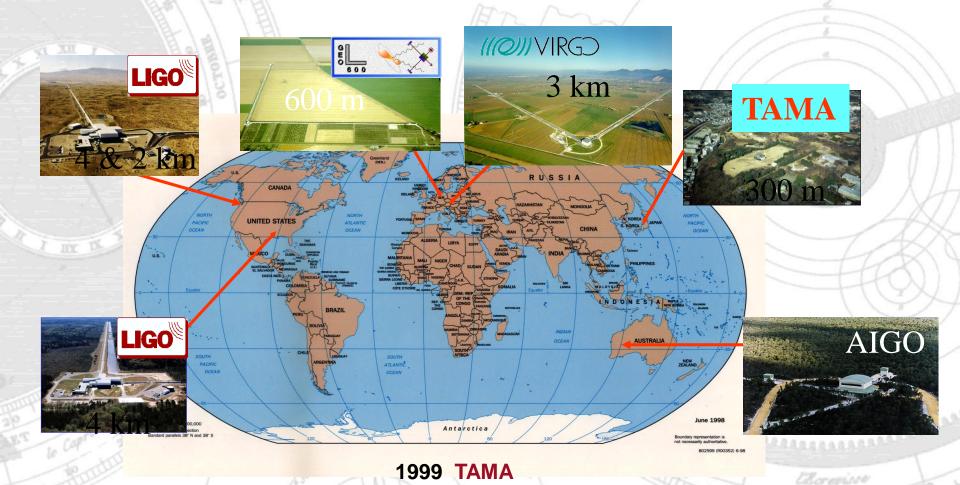
 $h \sim \delta L/L \sim 10^{-21} \rightarrow \delta L = 10^{-21} m$

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





La rete mondiale di interferometri



2001 LIGO GEO

2004 VIRGO





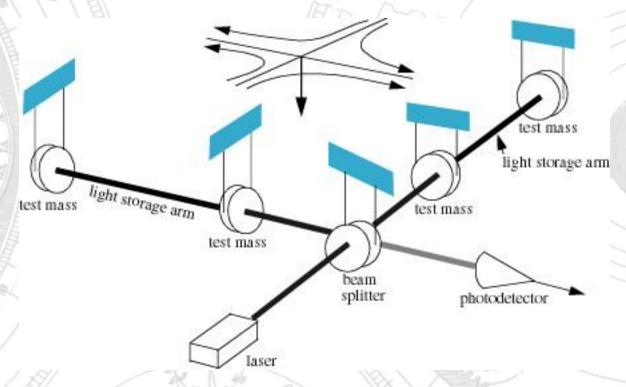
The Virgo detector







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



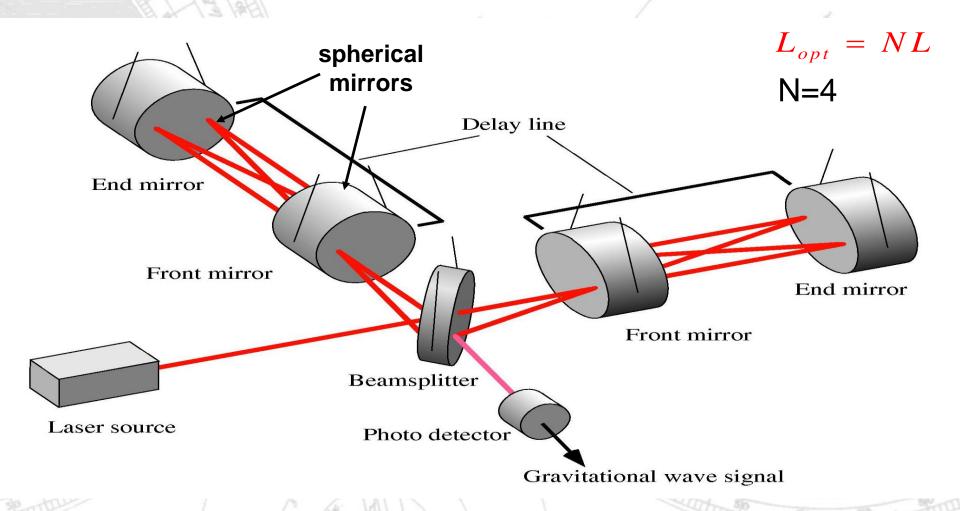
Also with L=3 km the displacement of the mirrors is 3 x 10⁻¹⁸ m: One million times smaller than the dimensions of a proton!!!!

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





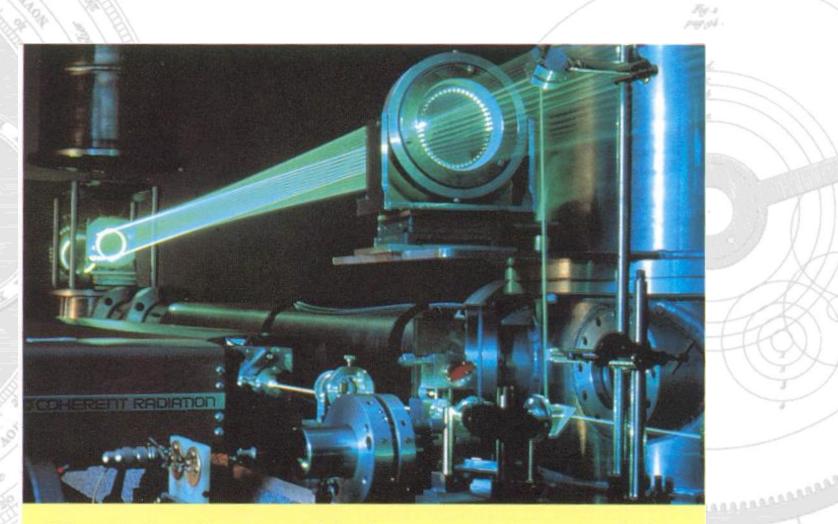
Linea di ritardo







arriand



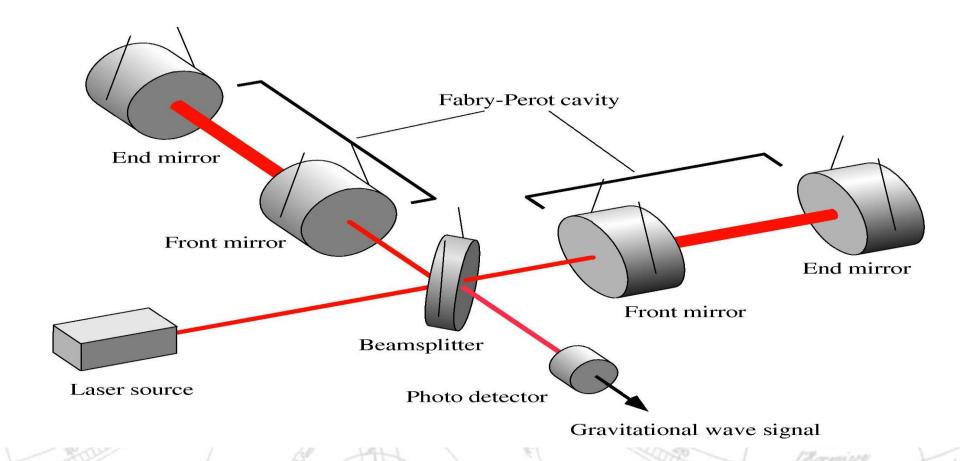
Un prototipo di antenna interferometrica sviluppato al Max Planck Institute di Garching (Germania).

drient





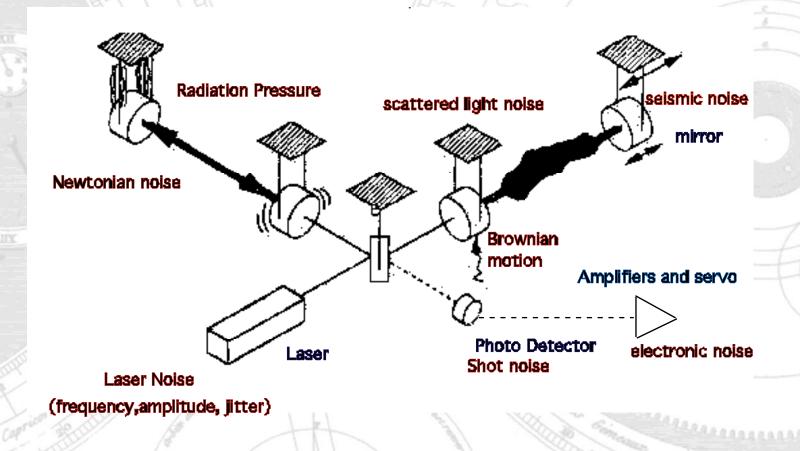
Cavita' Fabry-Perot







Primo

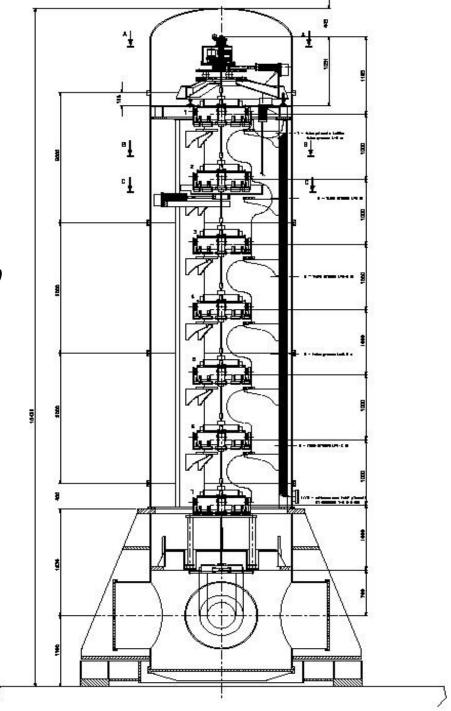






Riduzione del rumore sismico: Superattenuatori

•E' necessaria un'attenuazione di 10¹¹ attenuation @ 10 Hz



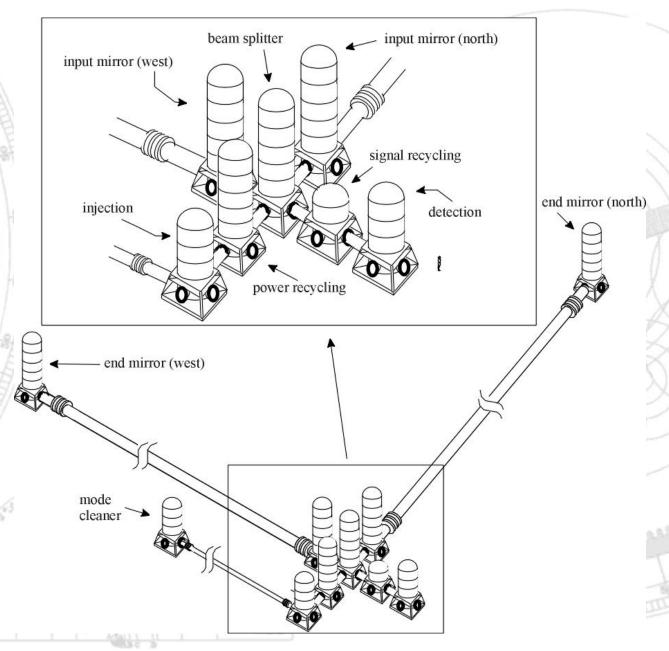




8 ot

Virgo

Sistema da vuoto e superattenuatori







Virgo - all'interno dell'edificio centrale













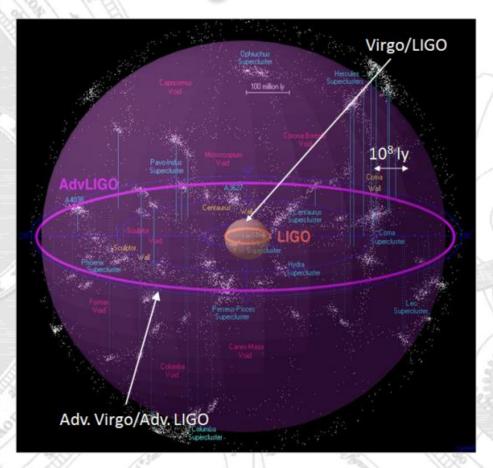
Virgo - Il tubo da vuoto di 3 km del braccio NORD







Da Virgo ad Advanced Virgo



ADVANCED VIRGO IS AT PRESENT UNDER CONSTRUCTION

Credit: R.Powell, B.Berger

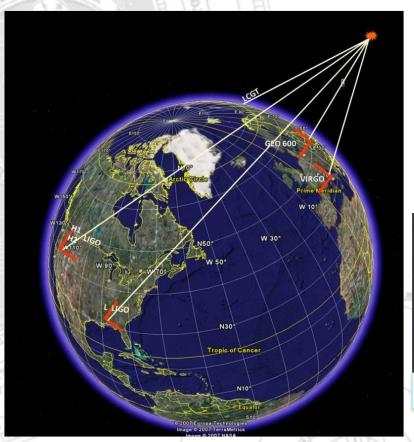
- It will be able to detect GW sources at a distance up to hundreds of Mpc (1pc=3.26 anni luce)
- □ Detection rate: ~1000x better than previous detectors
- Many GW events per year expected





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



8 ottobre 2015

- 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, ...)



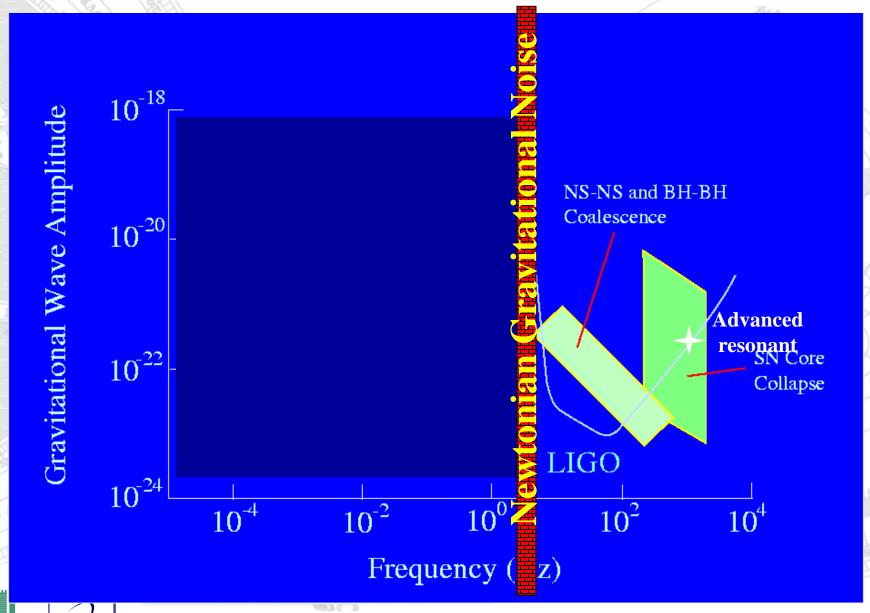
Crab pulsar



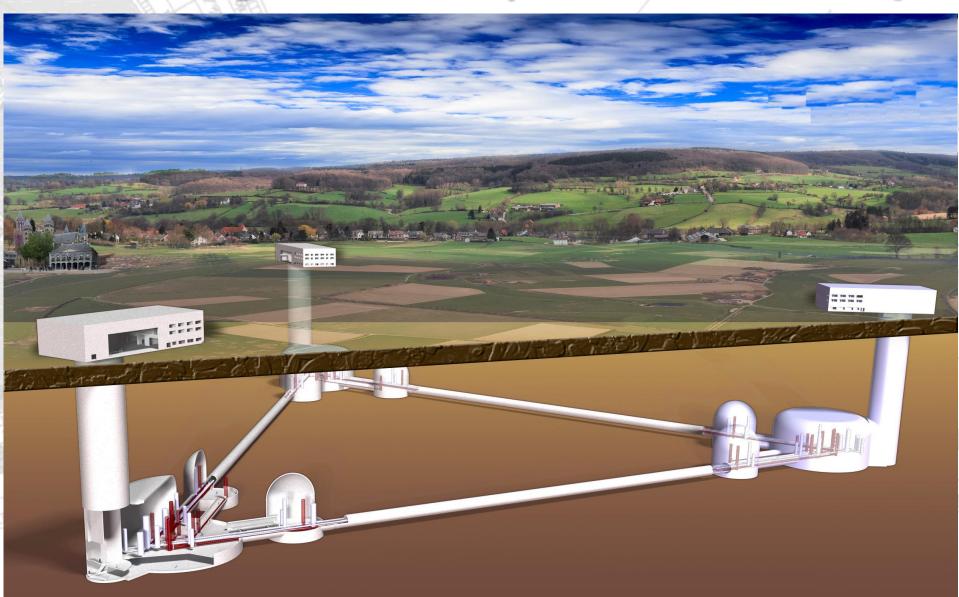


Strong connections with v and EM detectors: a global network for MULTI-MESSENGER SCIENCE

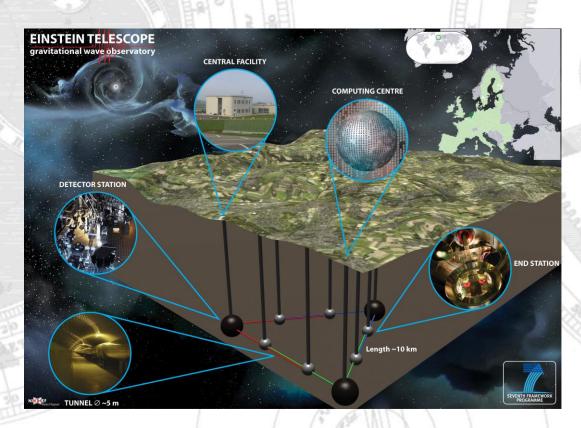


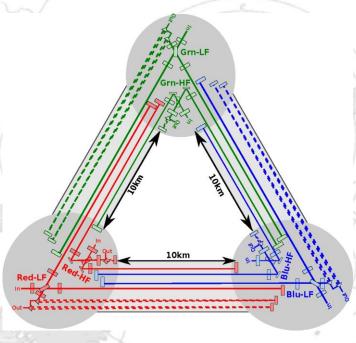


Go underground: ET (Einstein Telescope



Go underground: ET (Einstein Telescope

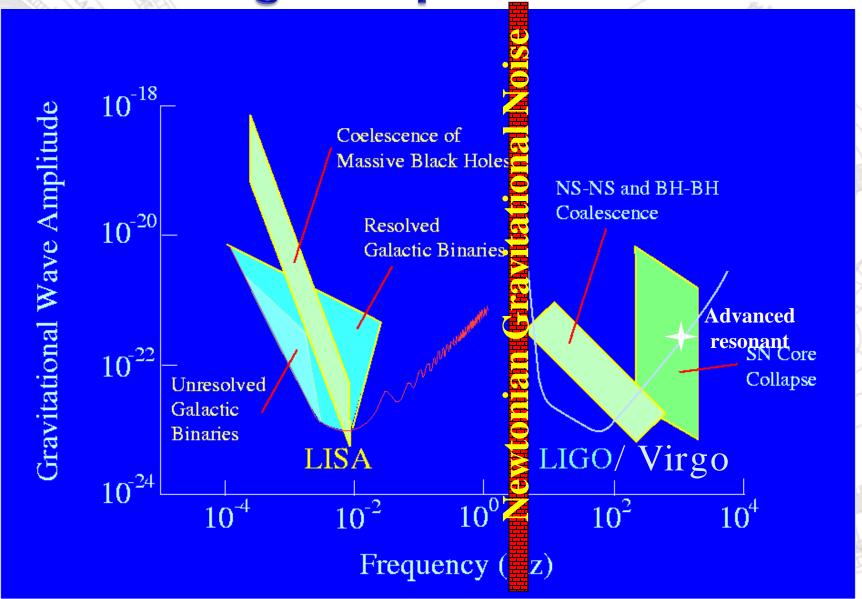








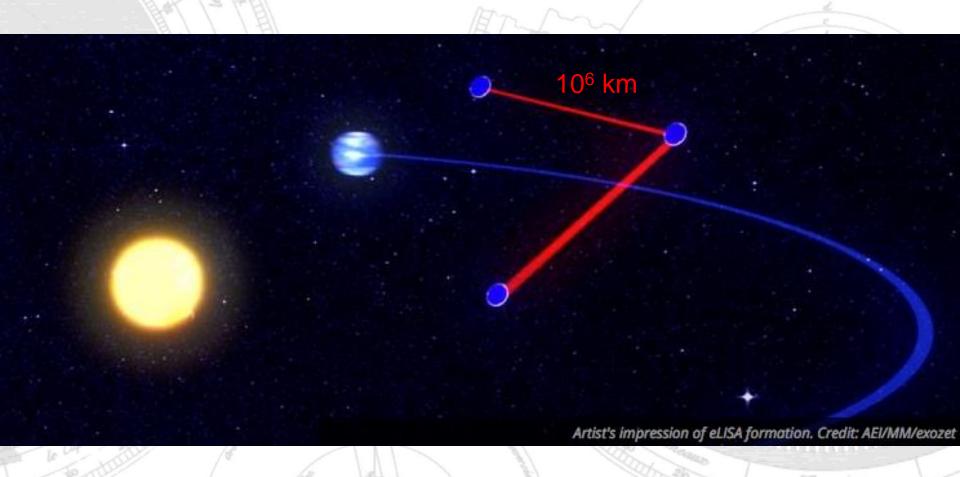
... or go to Space: e-LISA







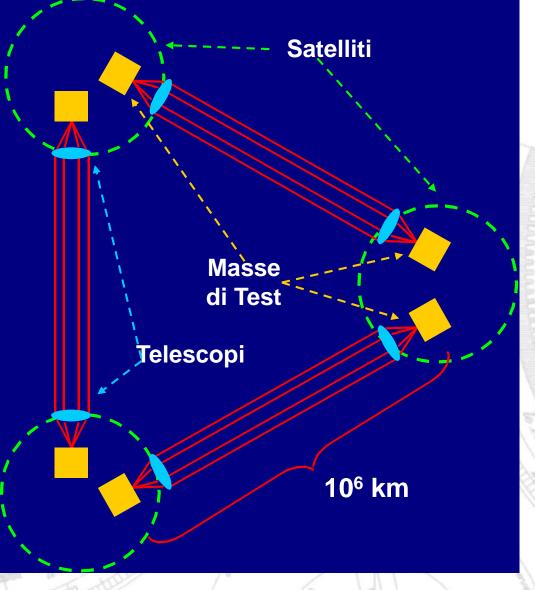








A project for the future



3 coppie di masse di test in "caduta libera"

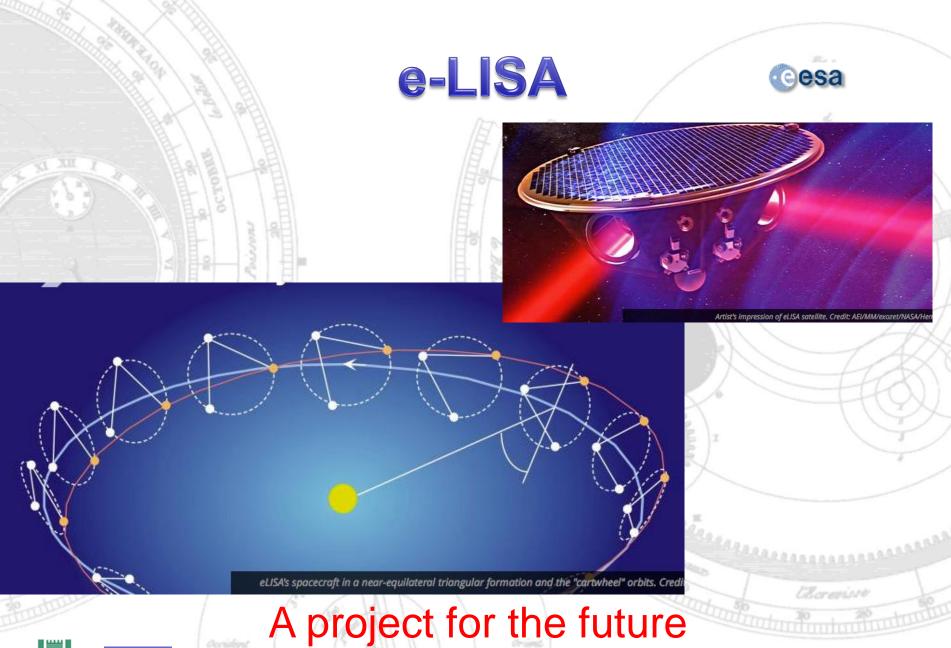
3 satelliti di schermo "solidali con le masse di test"

2 interferometri semiindependenti di Michelson da 10⁶ km con Trasmettitori Laser

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





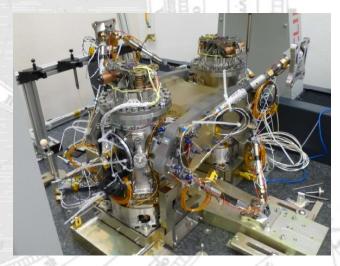






Il programma di eLISA:

LISA Pathfinder: dimostratore tecnologico Lancio nel Novembre 2015





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?





Quali informazioni di Fisica?

Fundamental Physics

- Is the nature of gravitational radiation as predicted by Einstein?
- Is Einstein theory the correct theory of gravity?
- Are black holes in nature black holes of GR?

Astrophysics

- What is the nature of gravitational collapse?
- What is the origin of gamma ray bursts?
- What is the structure of neutron stars and other compact objects?

Cosmology

- How did massive black holes at galactic nuclei form and evolve?
- What is dark energy?
- What phase transitions took place in the early Universe?
- What were the physical conditions at the big bang?







- Properties of gravitational waves
 - Testing GR beyond the quadrupole formula
 - Binary pulsars consistent with quadrupole formula; they don't measure properties of GW
 - How many polarizations are there?
 - In Einstein's theory only two polarizations; a scalar-tensor theory could have six
 - Do gravitational waves travel at the speed of light?
 - There are strong motivations from string theory to consider massive gravitons
 - · Binary pulsars constrain the speed to few parts in a thousand
 - GW observations can constrain to 1 part in 10¹⁸
- EoS of supra-nuclear matter
 - Signature of EoS in GW emitted when neutron stars merge
- An independent constraint/measurement of neutrino mass
 - Delay in the arrival times of neutrinos and gravitational waves









