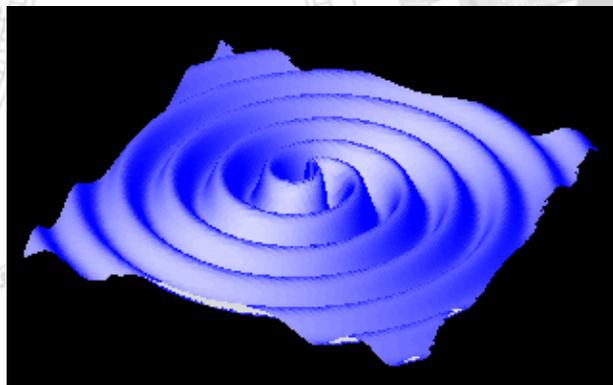


La teoria della Relatività e le Onde Gravitazionali

Un nuovo modo di guardare l'Universo

Alessio Rocchi e Viviana Fafone

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



Equazione di Einstein

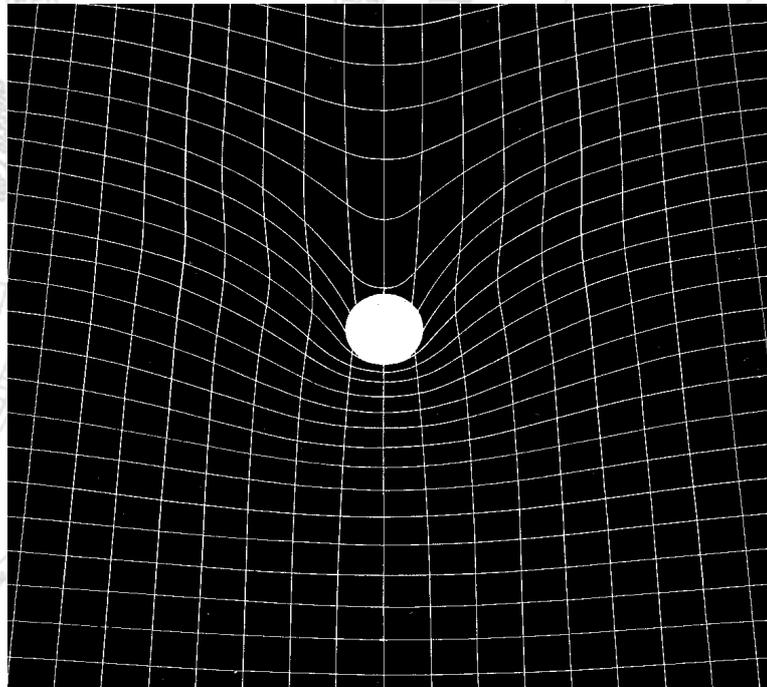
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R \cdot g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

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)



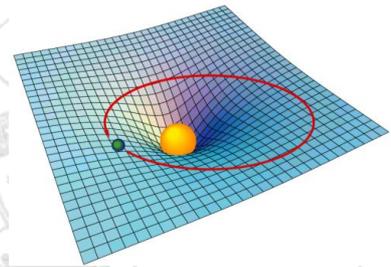
Newton: gravità è una forza

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** (\approx **ellisse**) in questo ambiente deformato



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

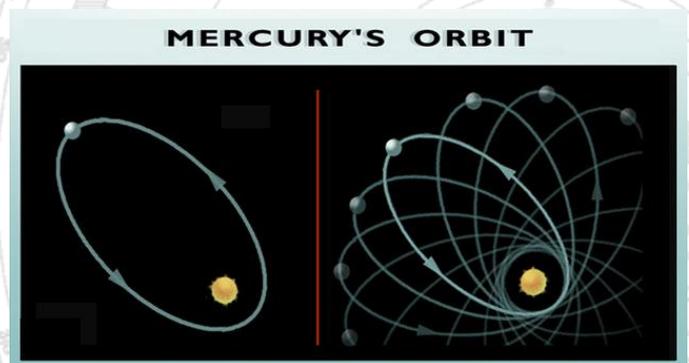
Alcune verifiche classiche della relatività generale

- Precessione del perielio di Mercurio
- Deflessione raggi luminosi

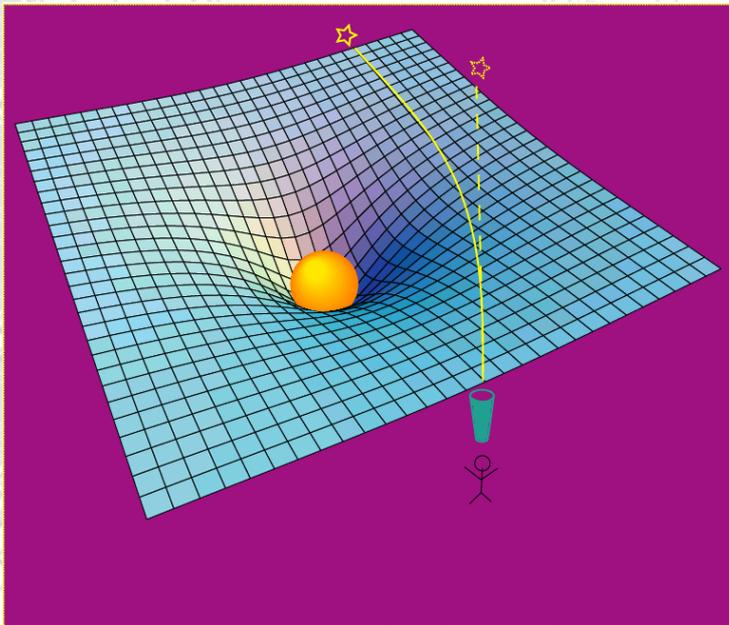


Precessione del perielio di Mercurio

- 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”.

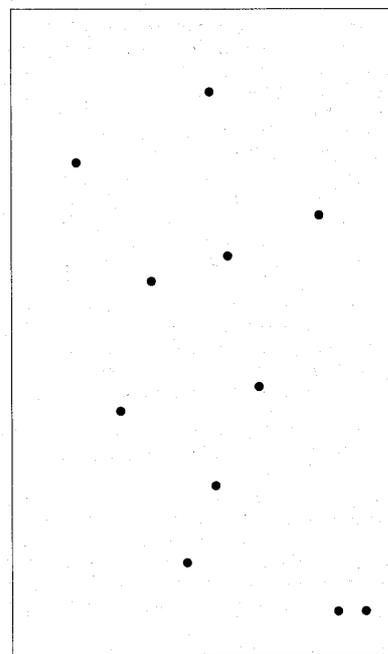
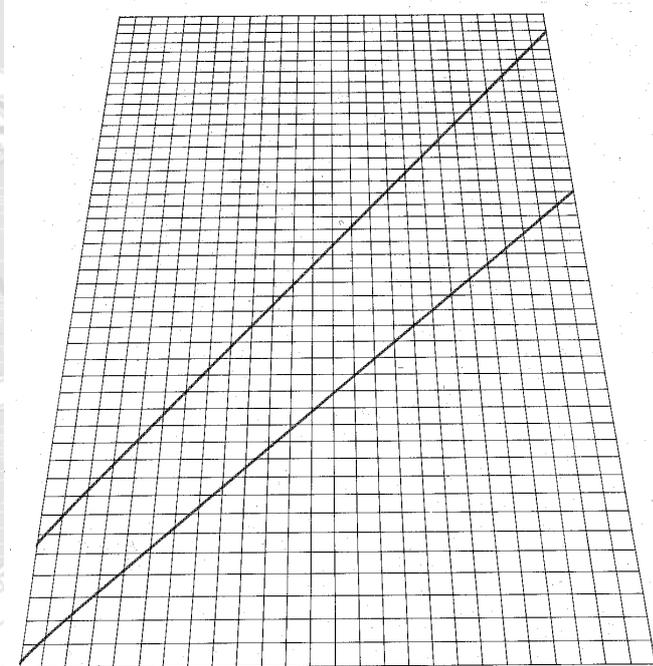


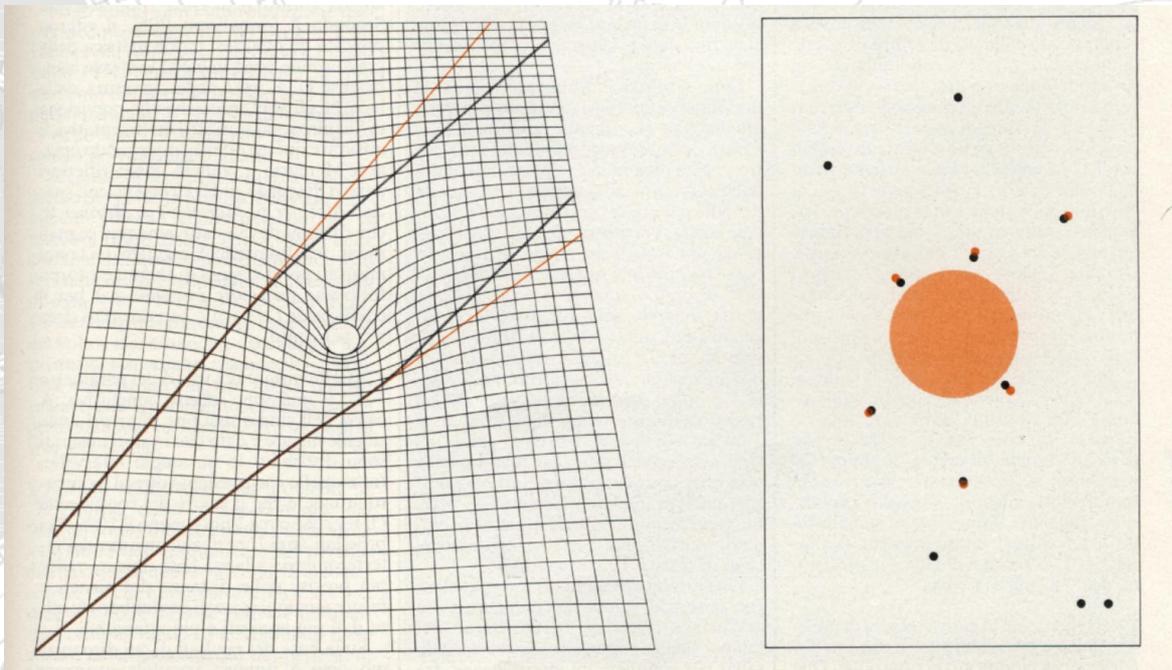
Deflessione dei raggi luminosi



Gravitational Lensing

- Conferma della previsione: Eddington (1919)

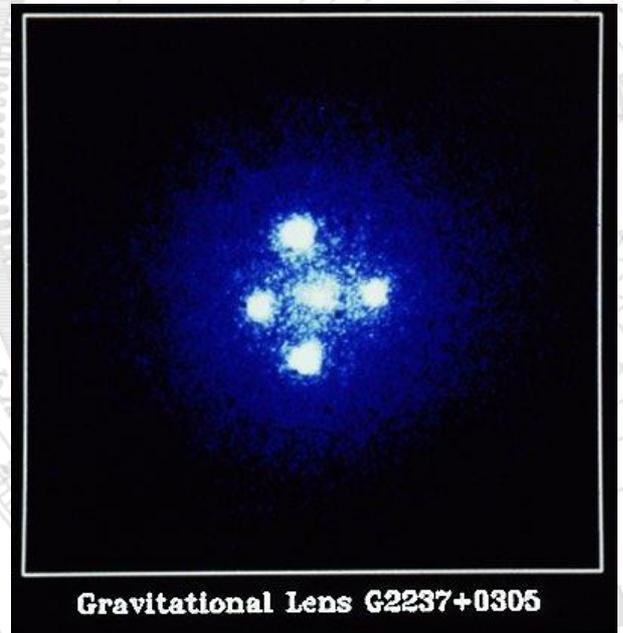




Croce di Einstein

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

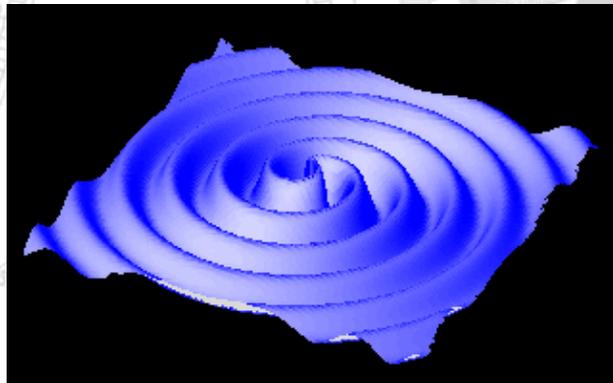
Nell’Astronomia moderna queste immagini dovute al **gravitational lensing** sono utilizzate per rivelare concentrazioni estese di ‘**materia oscura**’ di natura astrofisica



Gravitational Lens G2237+0305

Le onde gravitazionali

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



- Vengono emesse da momenti di quadrupolo di massa variabili nel tempo
 - 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

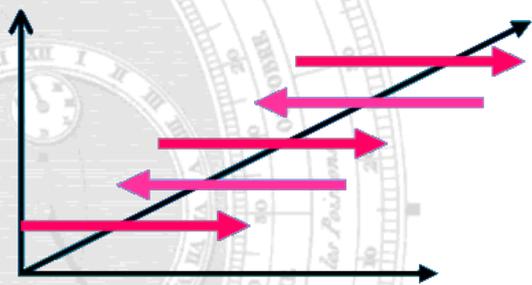
In un evento di Supernova, a seconda del grado di asimmetria del collasso gravitazionale associato all'esplosione, potrebbe essere emessa energia pari a $\sim 10^{40} \text{ Joule}$

Caratteristiche principali delle O.G.

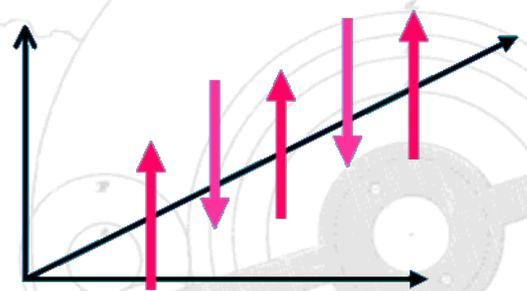
- Sono deformazioni dello spazio-tempo che si propagano con la velocità della luce
- Sono onde trasverse
- Hanno due stati di polarizzazione



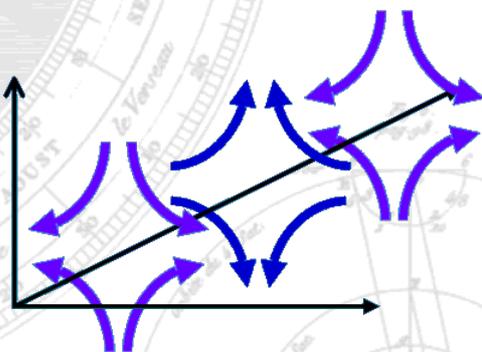
Confronto con le onde elettromagnetiche



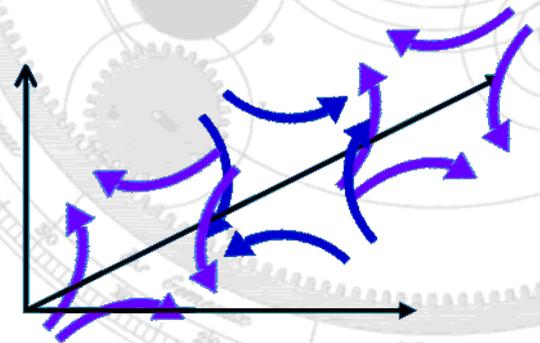
Polarizzazione orizzontale



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

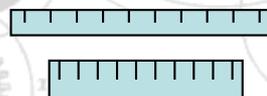


- La variazione δL della distanza L tra due particelle e' proporzionale all'intensità dell'onda gravitazionale

$$h = \frac{\delta L}{L}$$

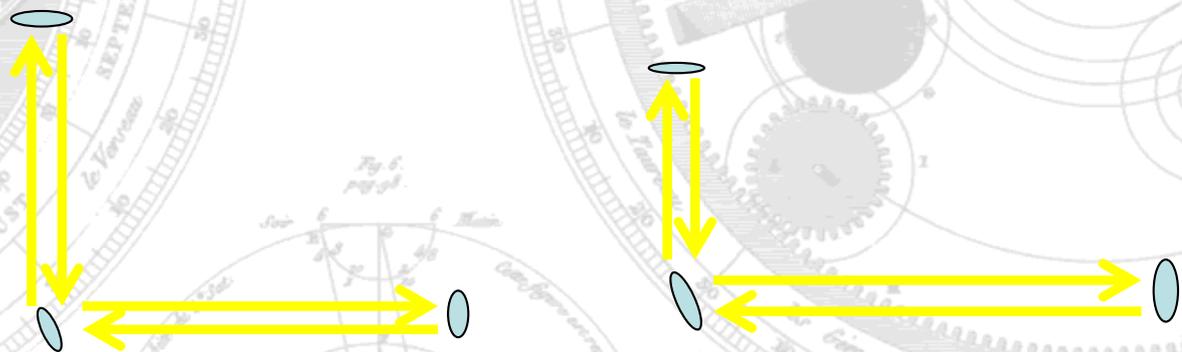
- Come possiamo renderci conto che stanno cambiando le proprietà geometriche dello spazio?

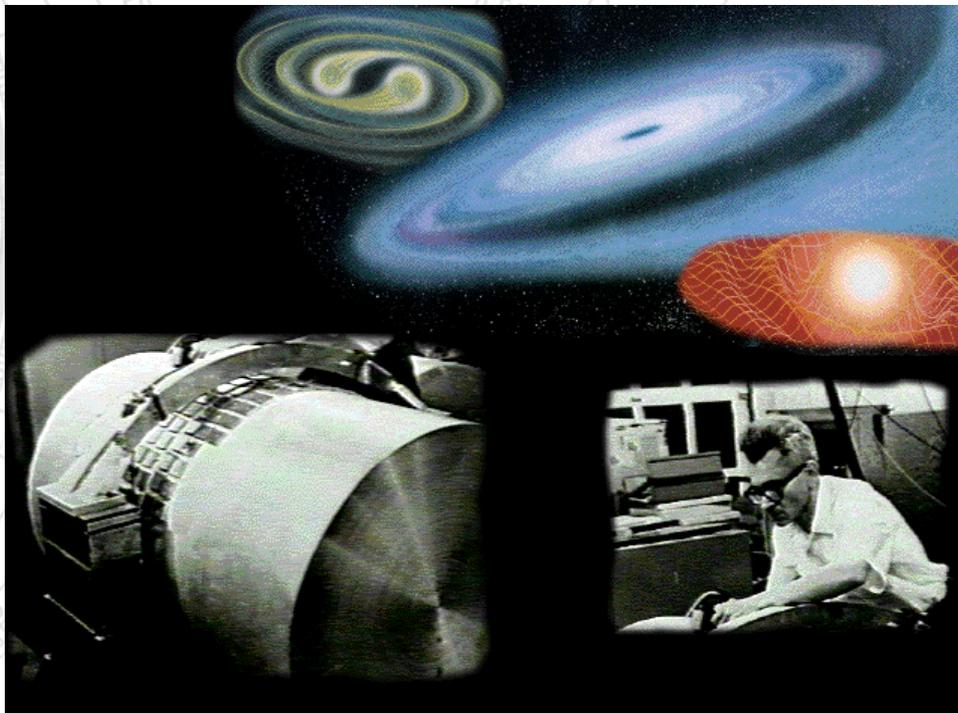
Anche il nostro metro campione si deforma!!

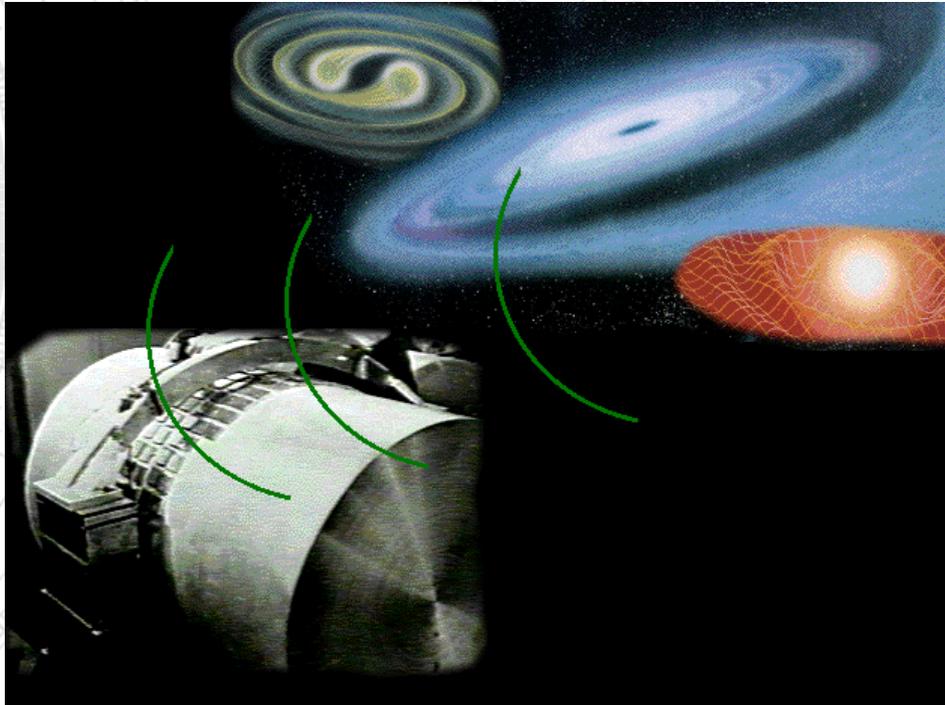


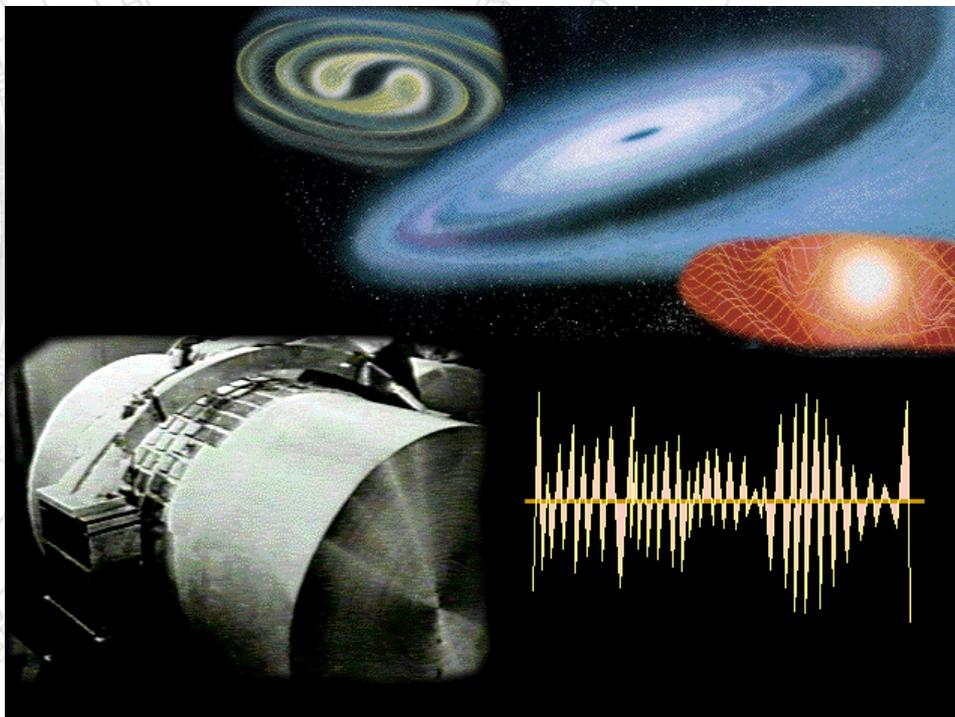
- Possiamo misurare il tempo che luce impiega a fare un viaggio di andata e ritorno tra due punti, perchè la velocità della luce è sempre pari a c .
- Se ho tre corpi ai vertici di una L, al passaggio di un'onda gravitazionale, quando un tratto si allunga, l'altro si accorcia e viceversa

$$h = 2 \delta L / L$$









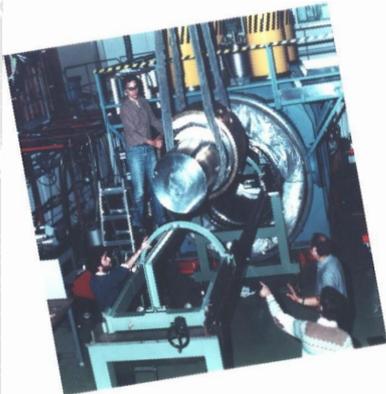
•Lo scambio d'energia tra Onde Gravitazionali e Materia è debolissimo.

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.

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

La rete mondiale di antenne risonanti



ALLEGRO

AURIGA

EXPLORER

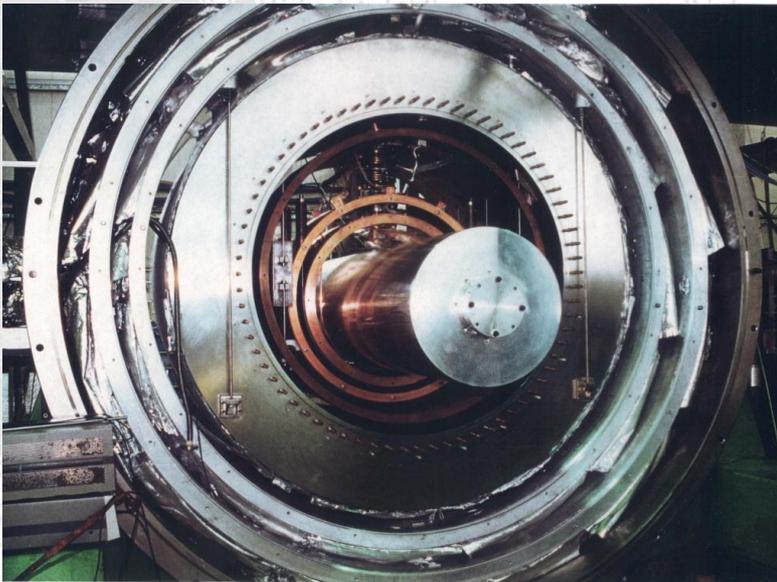


NAUTILUS

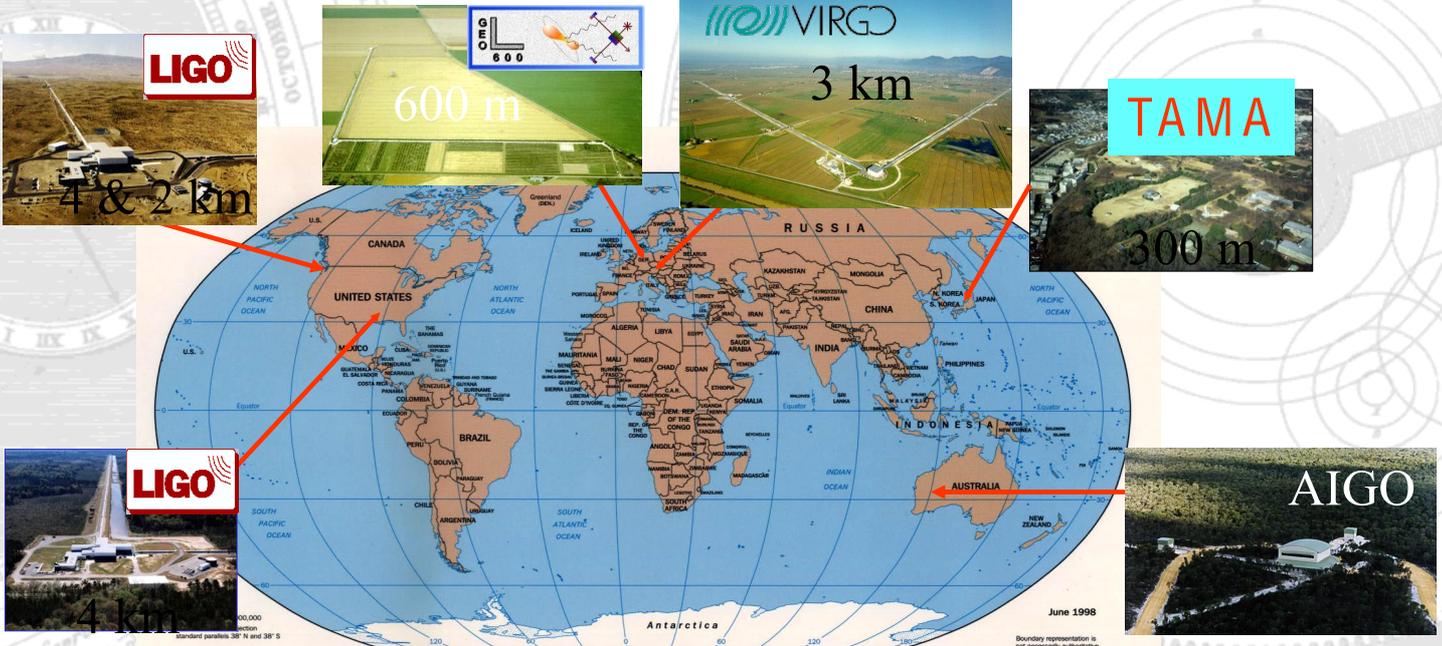


Rivelatori risonanti

- NAUTILUS

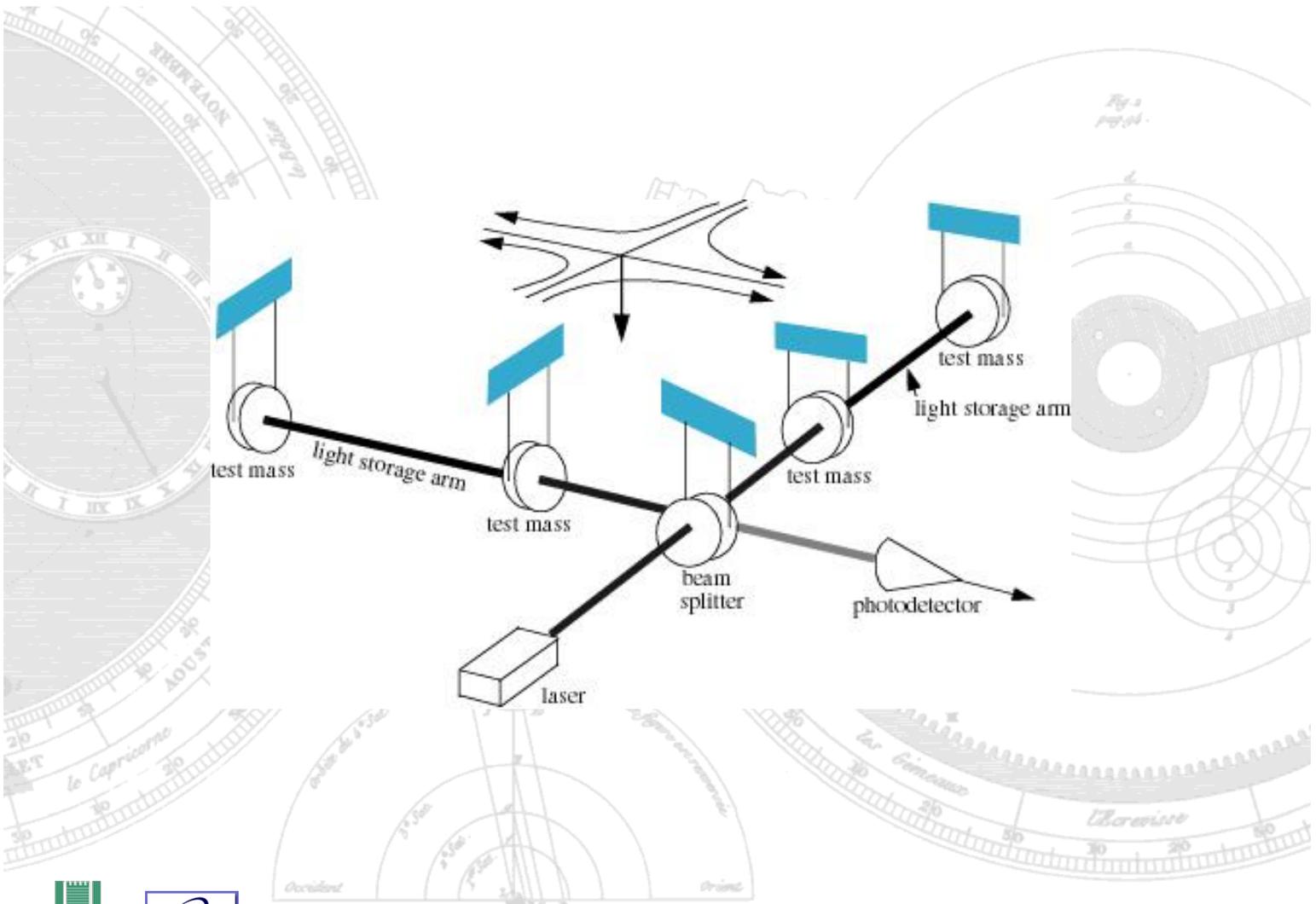


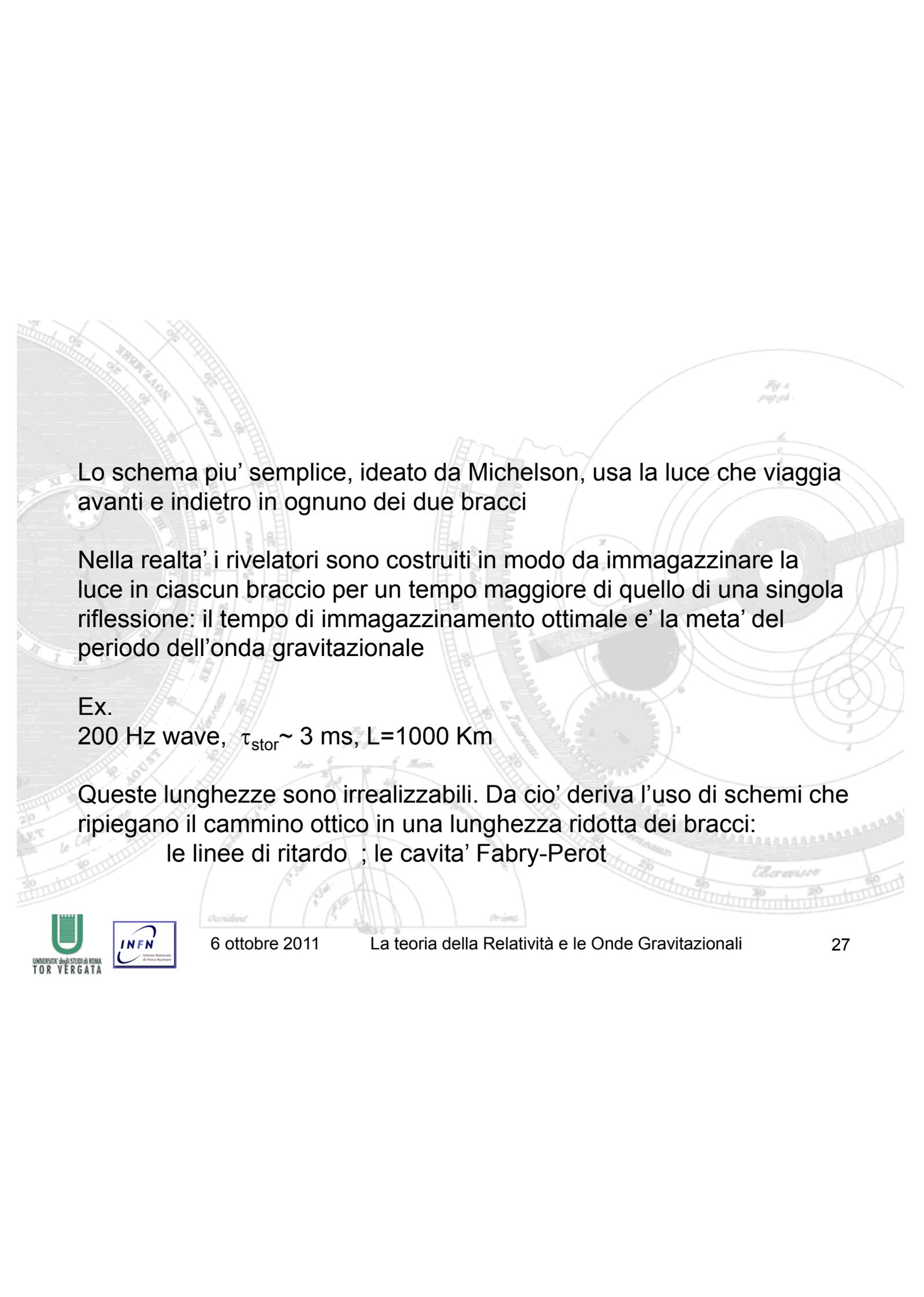
La rete mondiale di interferometri



1999 **TAMA**
2001 **LIGO GEO**
2004 **VIRGO**







Lo schema piu' semplice, ideato da Michelson, usa la luce che viaggia avanti e indietro in ognuno dei due bracci

Nella realta' i rivelatori sono costruiti in modo da immagazzinare la luce in ciascun braccio per un tempo maggiore di quello di una singola riflessione: il tempo di immagazzinamento ottimale e' la meta' del periodo dell'onda gravitazionale

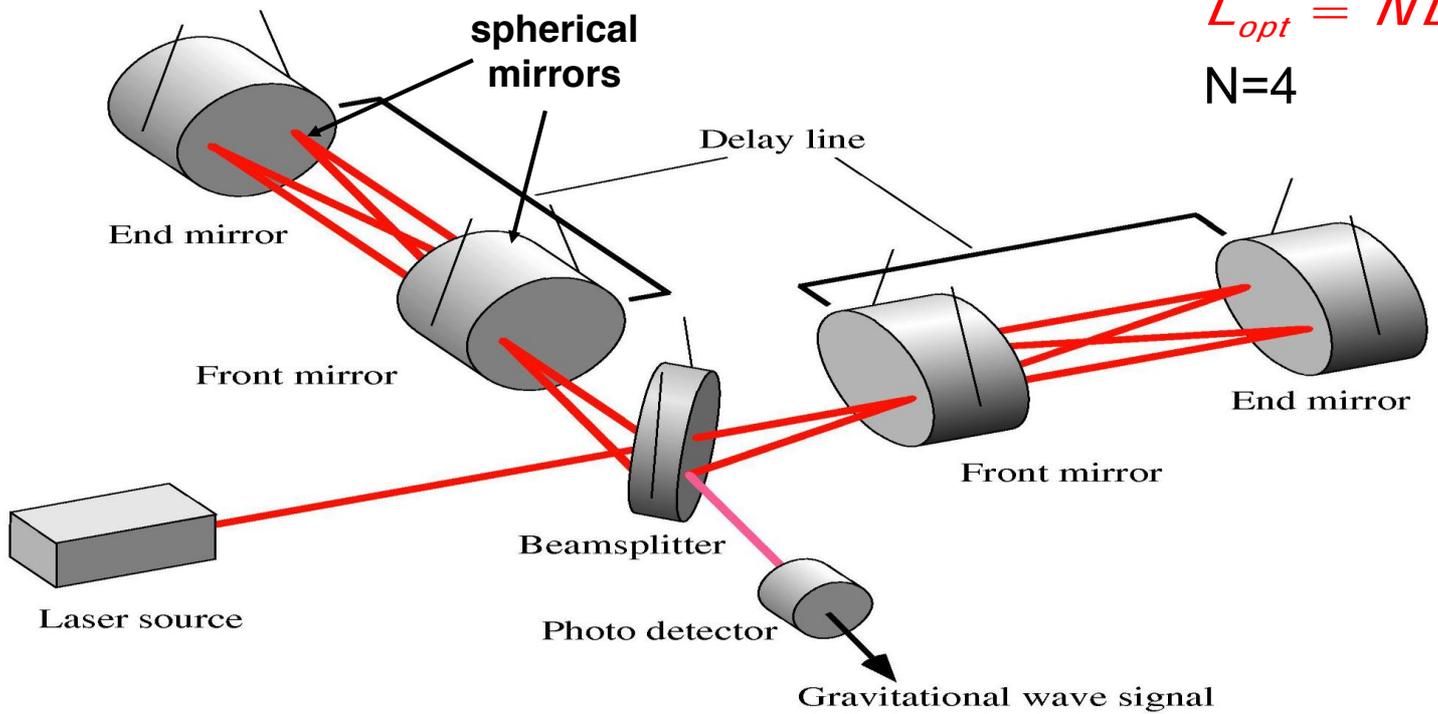
Ex.
200 Hz wave, $\tau_{\text{stor}} \sim 3 \text{ ms}$, $L=1000 \text{ Km}$

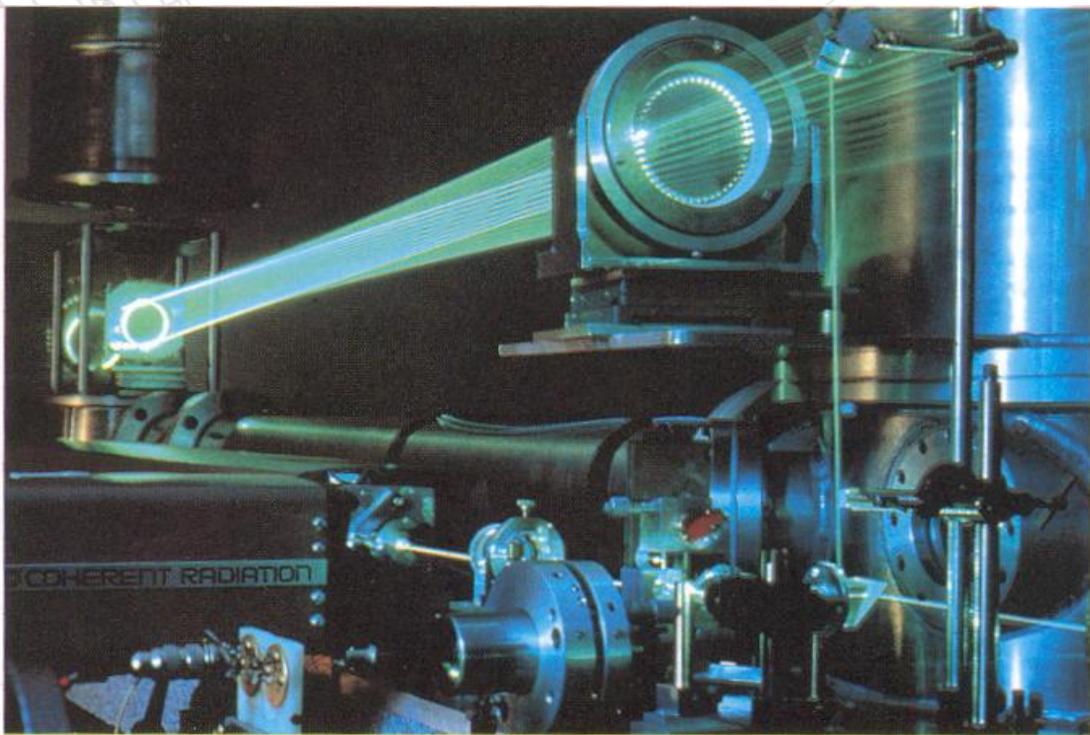
Queste lunghezze sono irrealizzabili. Da cio' deriva l'uso di schemi che ripiegano il cammino ottico in una lunghezza ridotta dei bracci:
le linee di ritardo ; le cavitá Fabry-Perot

Linea di ritardo

$$L_{opt} = NL$$

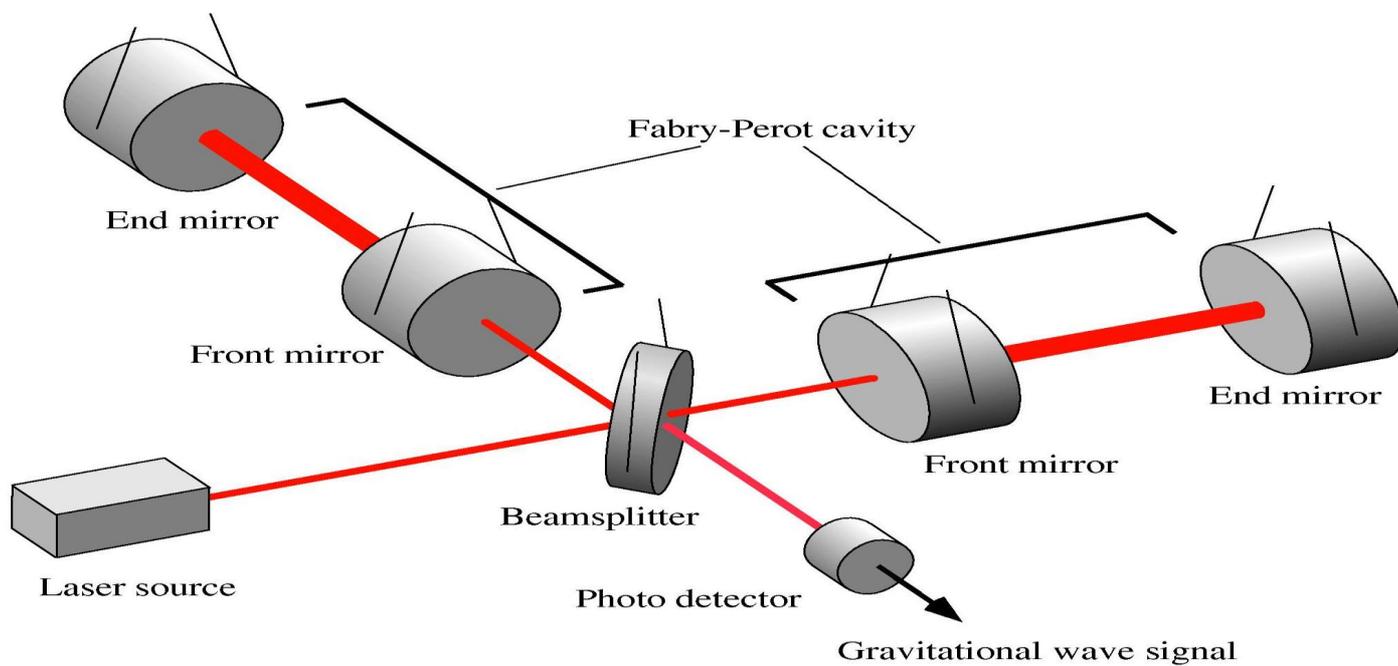
N=4

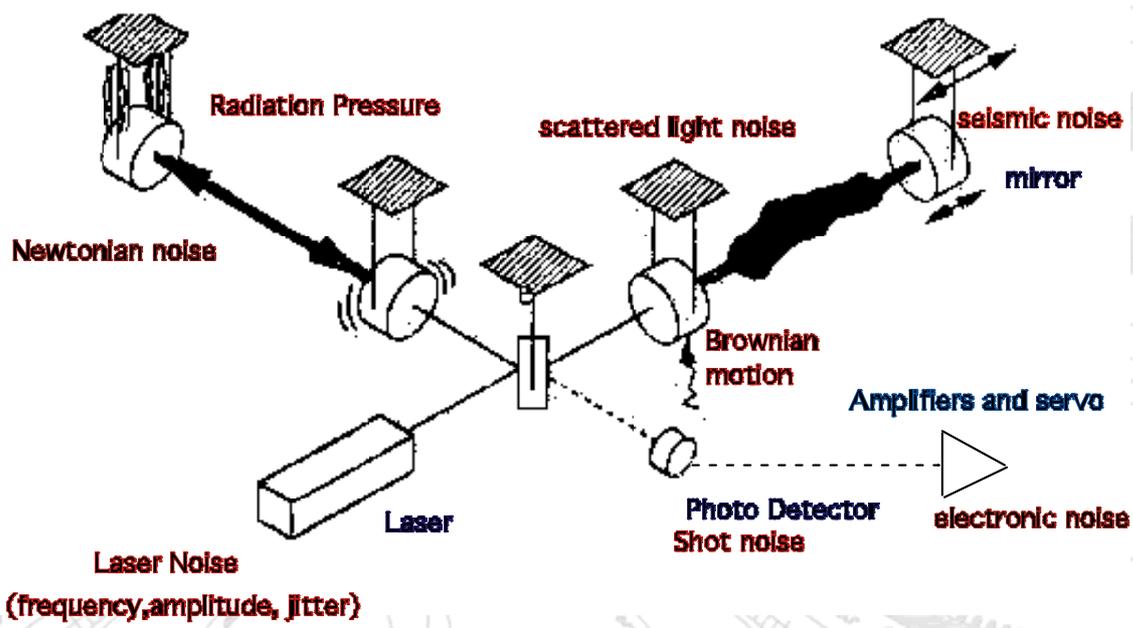




Un prototipo di antenna interferometrica sviluppato al Max Planck Institute di Garching (Germania).

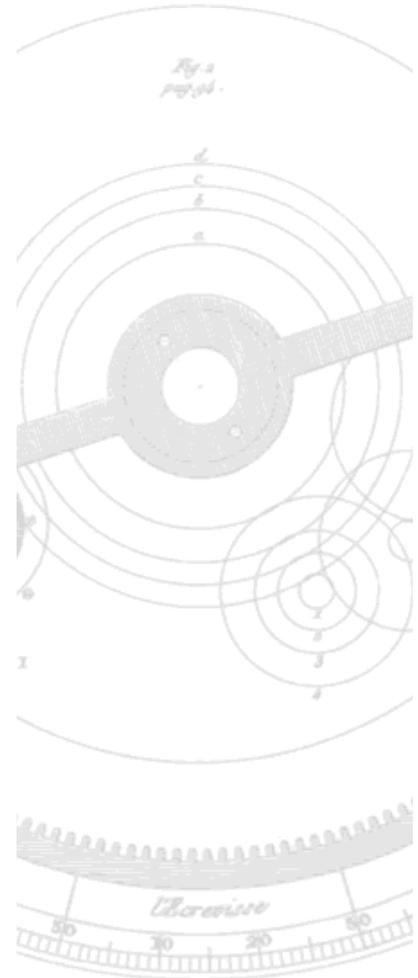
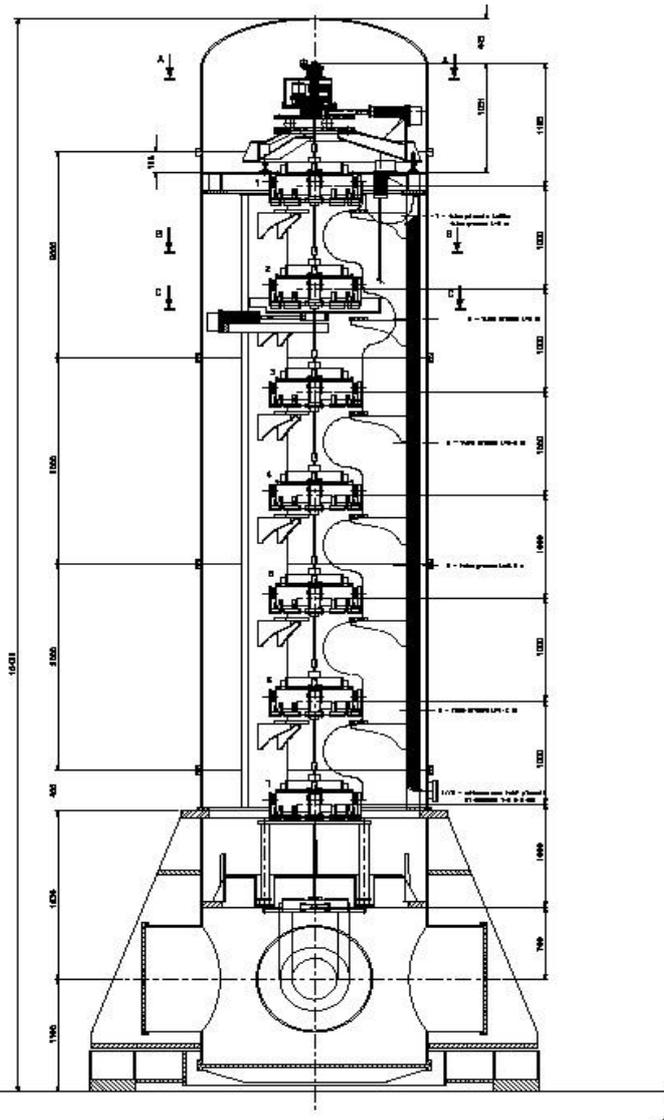
Cavita' Fabry-Perot





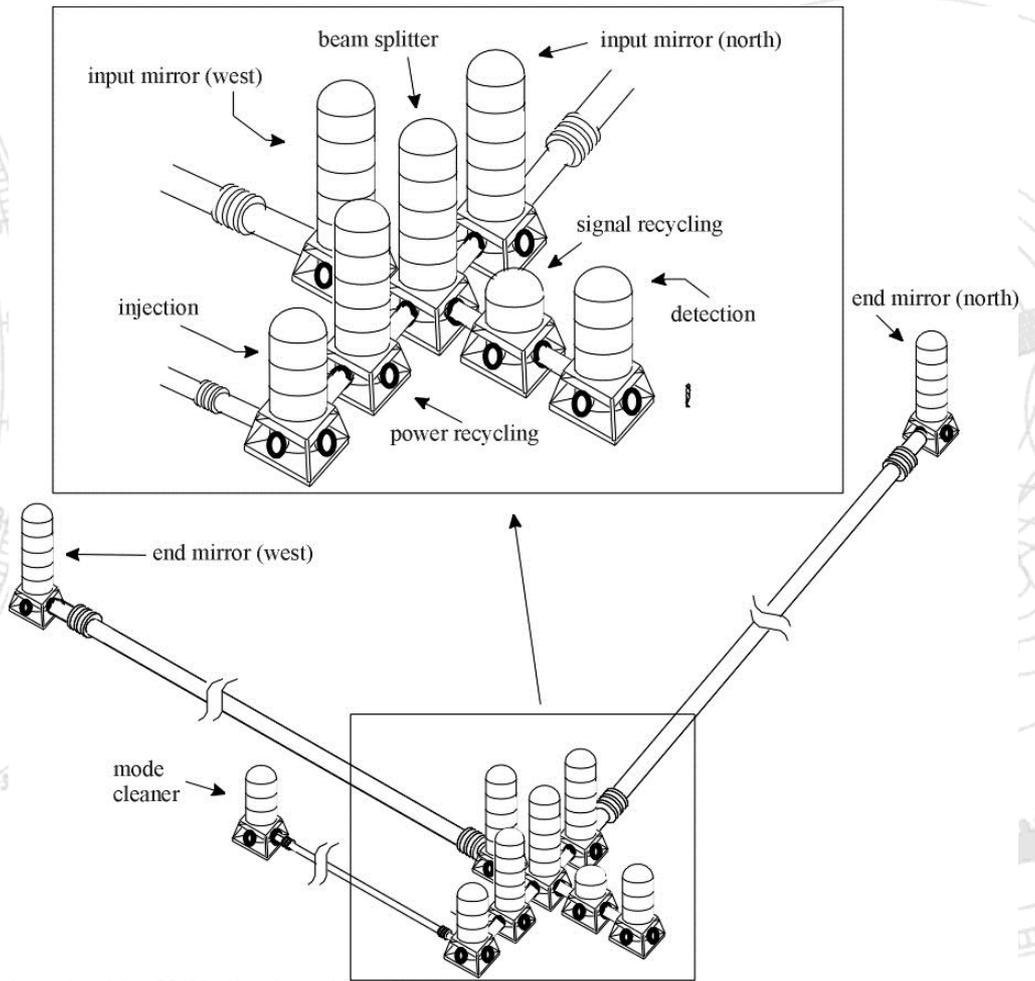
Riduzione del rumore sismico: Superattenuatori

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



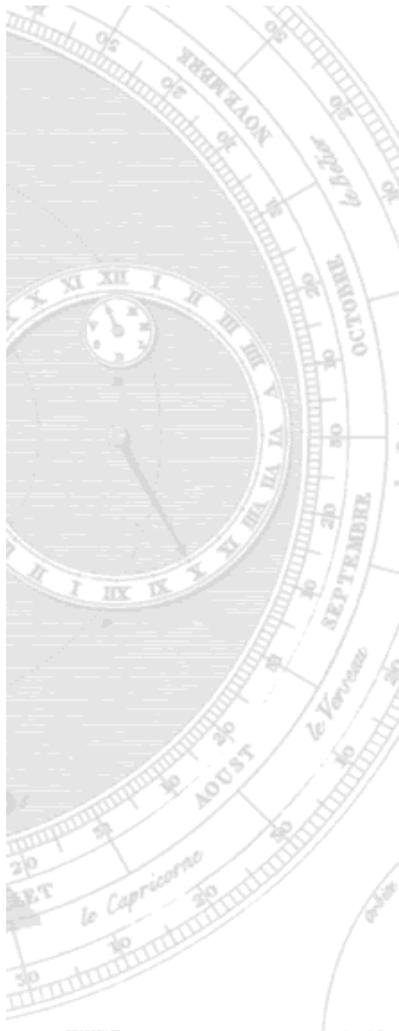
Virgo

Sistema da vuoto e superattenuatori



Virgo - all'interno dell'edificio centrale





6 ottobre 2011

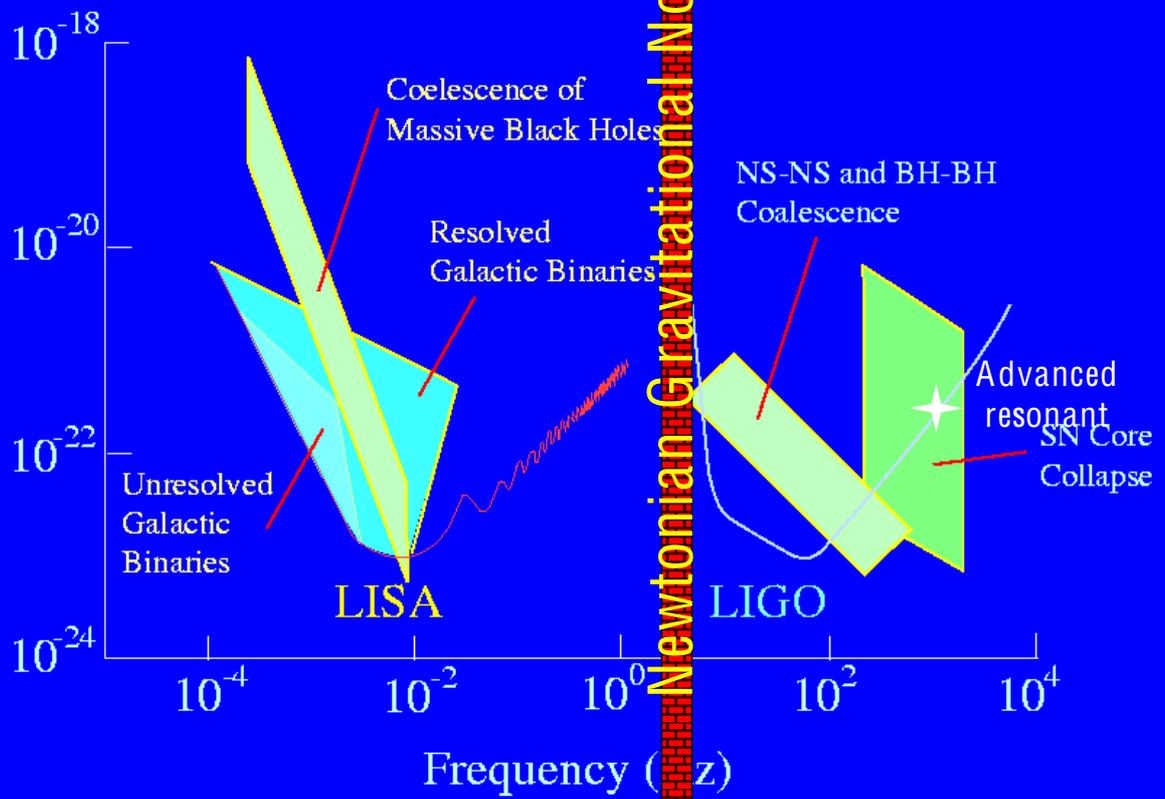
La teoria della Relatività e le Onde Gravitazionali

35

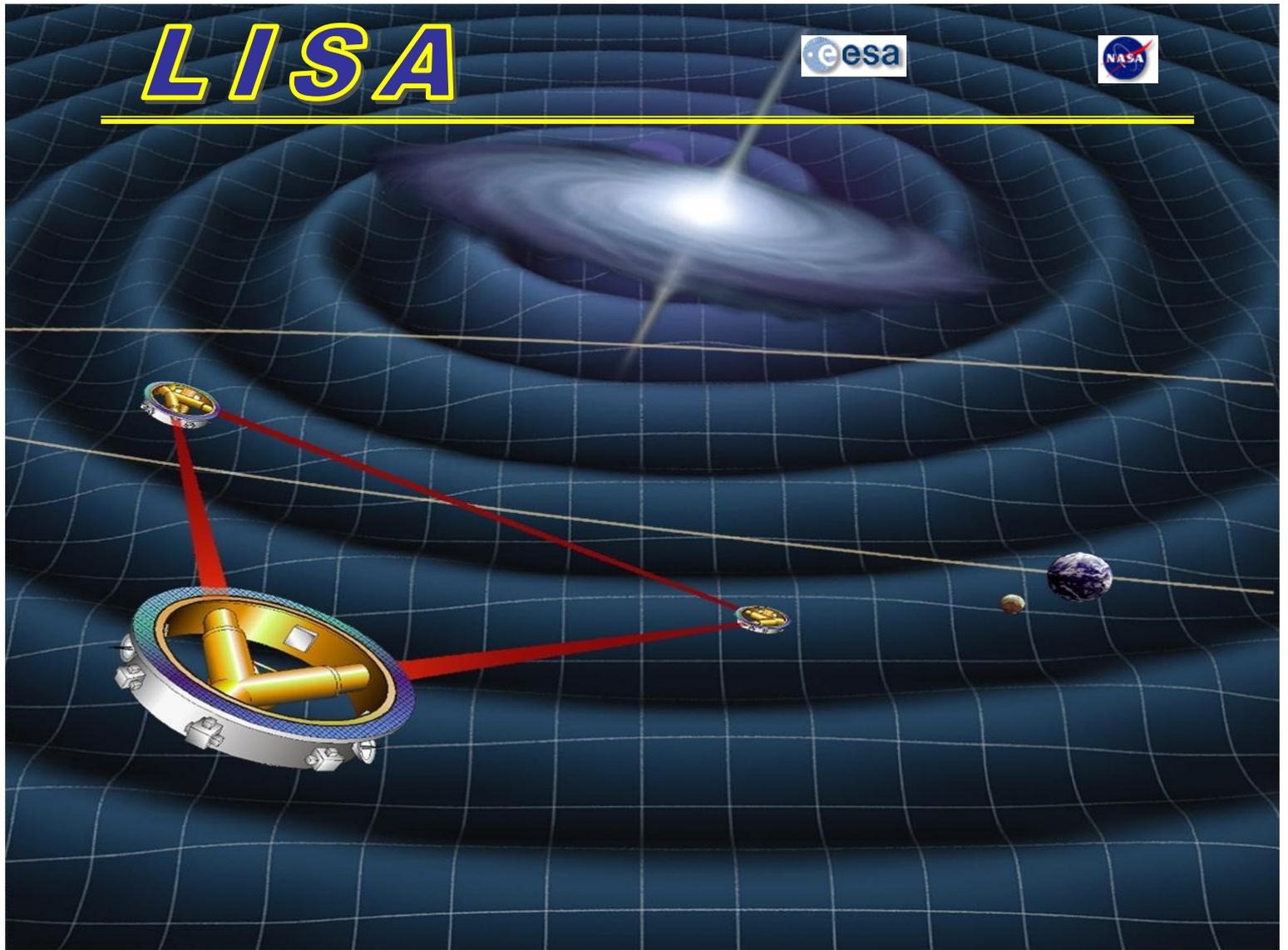
Virgo - Il tubo da vuoto di 3 km del braccio NORD

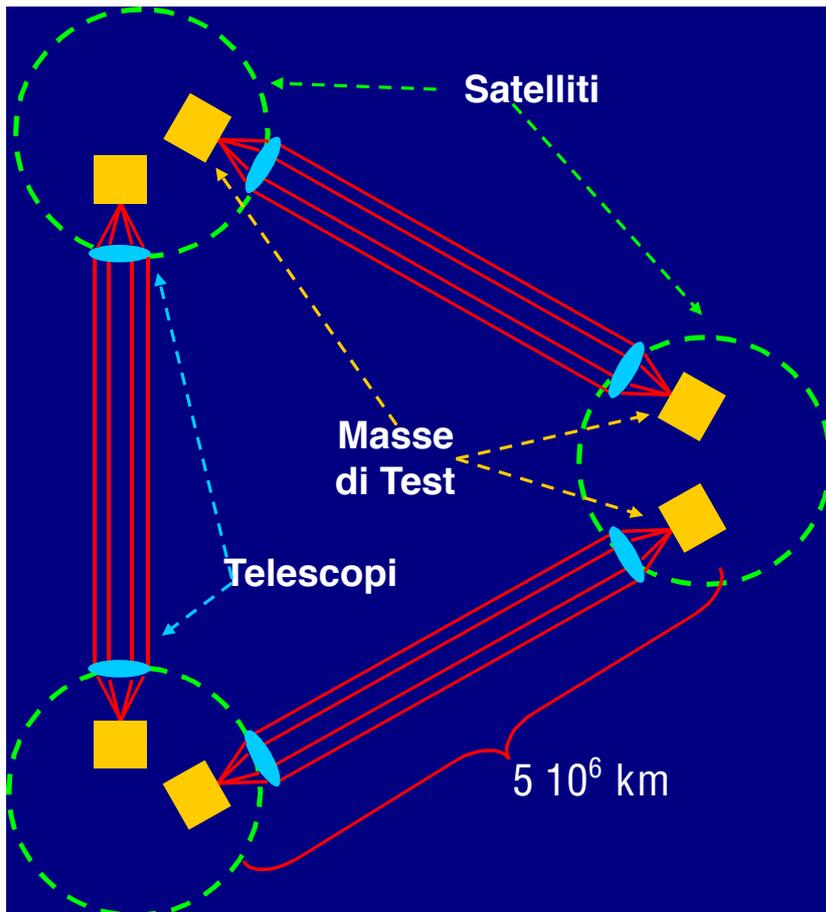


Gravitational Wave Amplitude



LISA



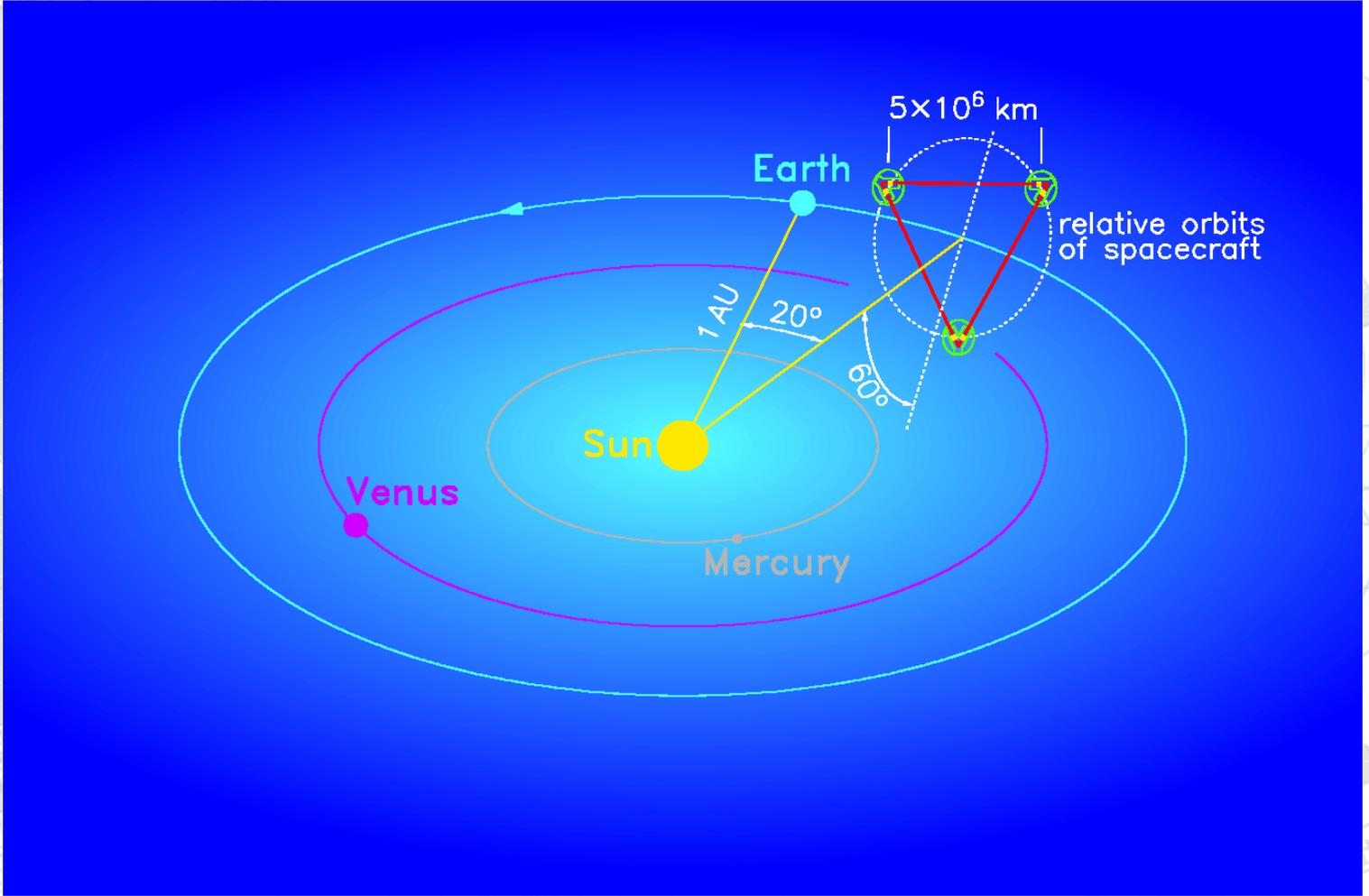


**3 coppie di masse di test in
“caduta libera”**

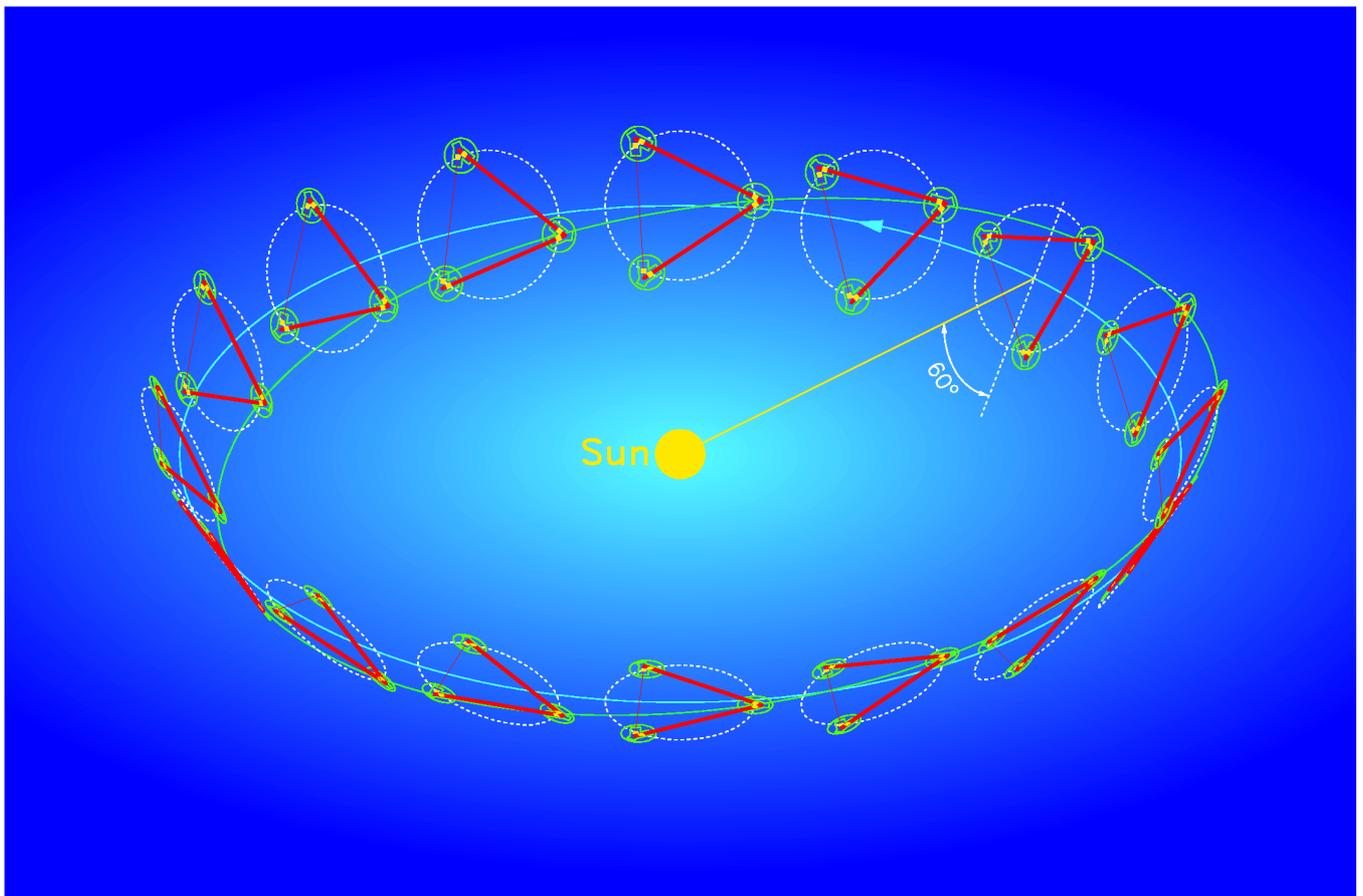
**3 satelliti di schermo
“solidali con le masse di
test”**

**2 interferometri semi-
indipendenti di Michelson da
 $5 \cdot 10^6$ km con Trasmettitori
Laser**

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



L'orbita di LISA





Il programma di LISA:

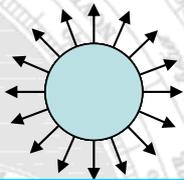
LISA Pathfinder: dimostratore tecnologico

Lancio previsto nel 201?

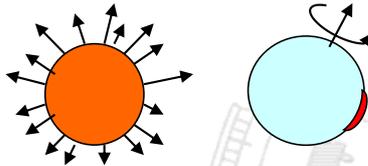
LISA: missione NASA/ESA

Lancio previsto nel 20??

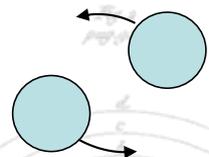
Symmetrical $h=0$



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 radiazione da elettroni, atomi e molecole.

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

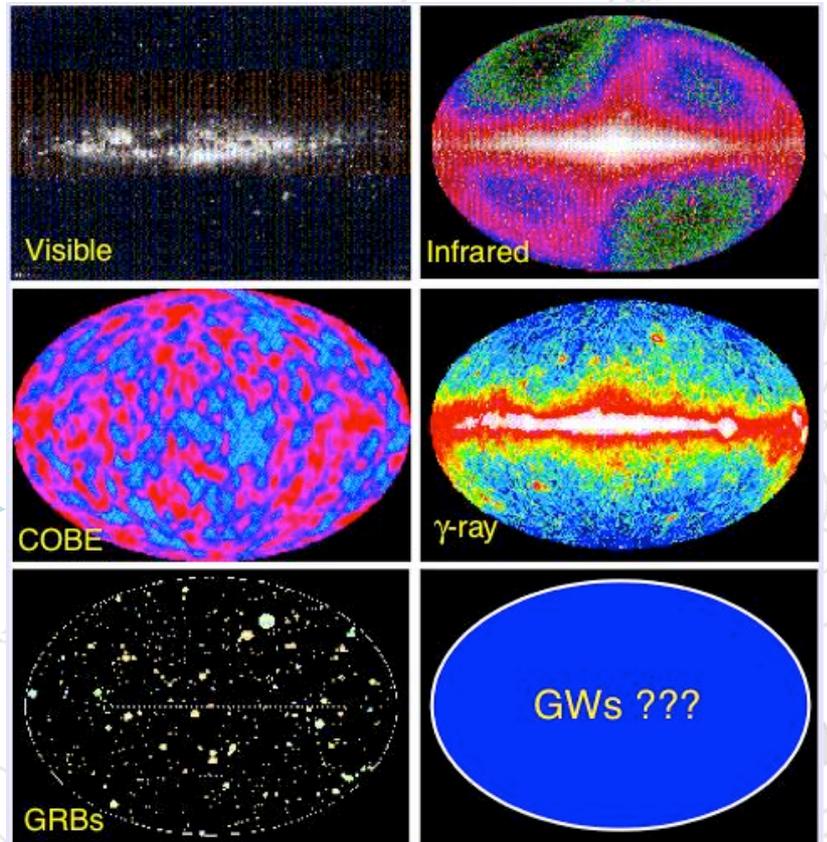
La radiazione elettromagnetica interagisce fortemente con la materia, e' indebolita dall'assorbimento quando viaggia verso il rivelatore.

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)

1. verifica diretta della **Relatività Generale**
2. nascita dell'**Astrofisica Gravitazionale**
3. esistenza di fondo cosmico di O.G. → “fotografia” dello stato dell’Universo $\sim 10^{-43}$ s dopo Big Bang

N.B. fondo cosmico di microonde: la “foto” si riferisce a $\sim 3 \times 10^5$ anni dopo B.B.



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/cm³) 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

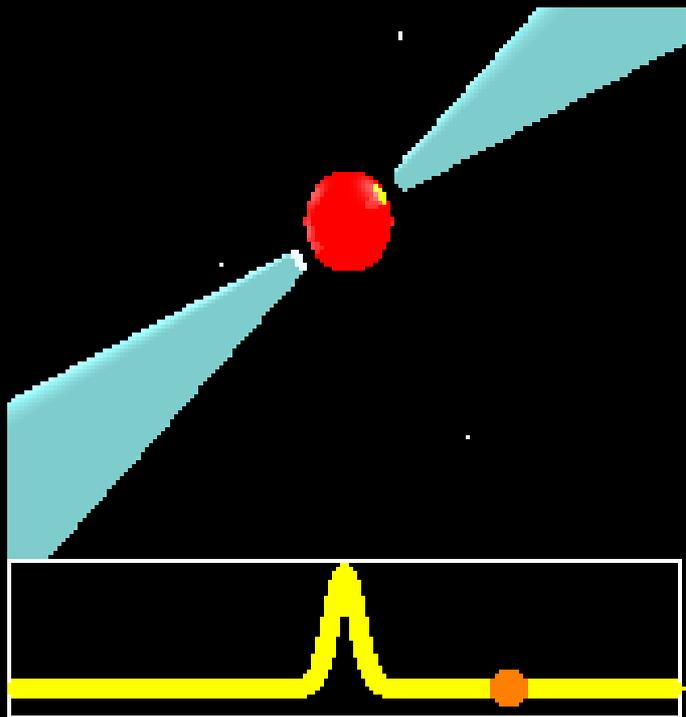
Campi magnetici molto forti
(10^9 Tesla)

+

Rapida rotazione

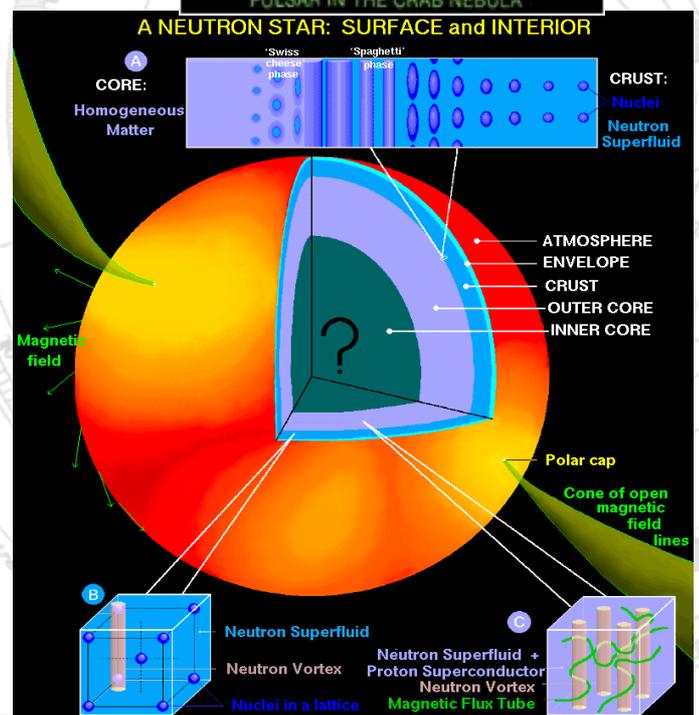
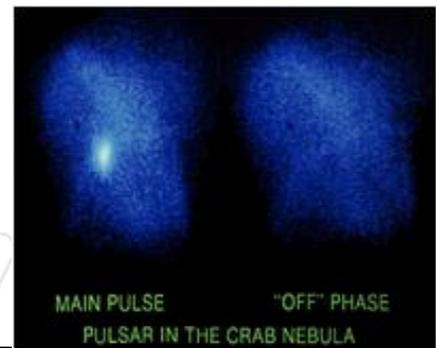
=

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



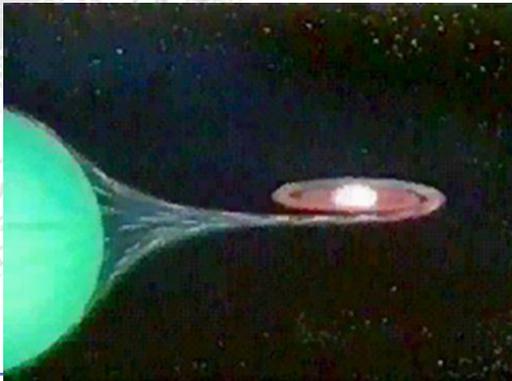
Stelle di neutroni

- 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!

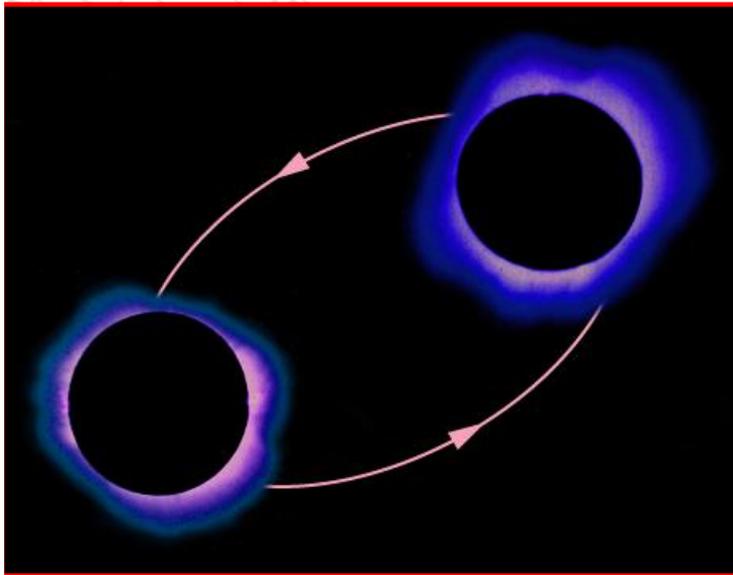


Sorgenti di onde gravitazionali

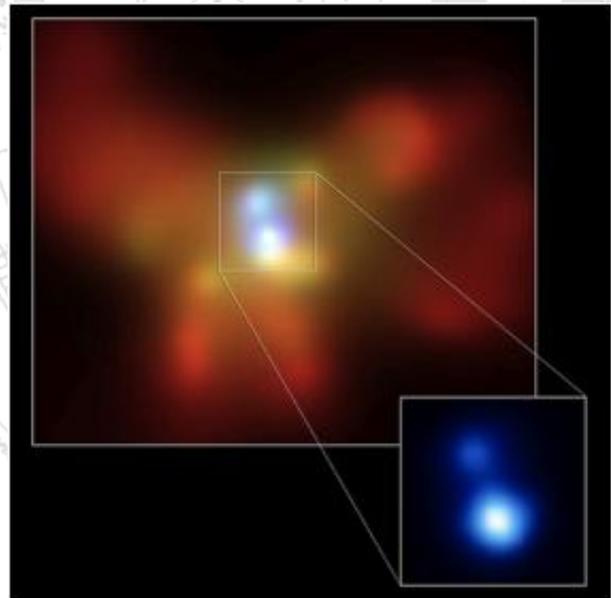
- Buchi neri: stadio terminale della vita di una stella molto massiva (maggiore di 1.4 Masse solari)
- Sistemi binari (NS-NS / WD-WD) - Si stimano circa 10^{8-9} binarie galattiche con frequenze $> 0.1\text{mHz}$ (la maggior parte WD/WD)
- Sistemi binari (BH-NS)
- Sistemi binari (BH-star / NS-star)



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

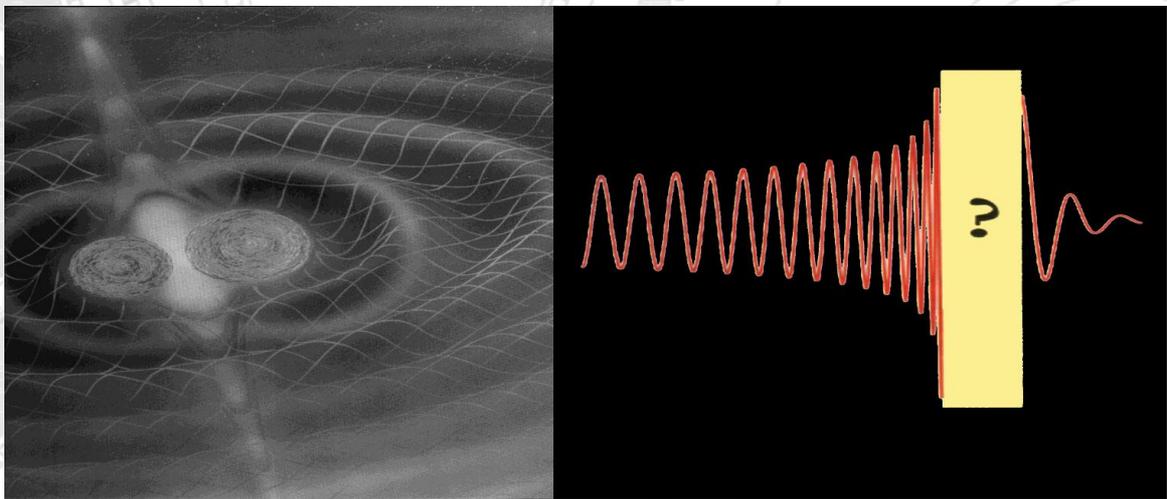


NGC 6240, galassia massiva formata dal merger di due galassie piu' piccole. D~122 Mpc. I due BH distano circa 900 pc. Osservati da Chandra X-Ray



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)

Sorgenti di onde gravitazionali

- Sistemi binari

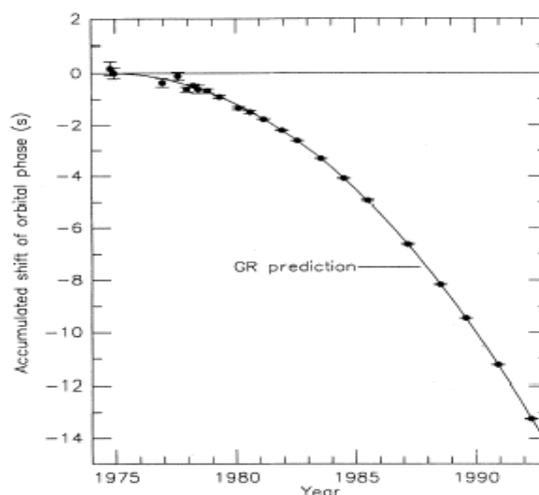
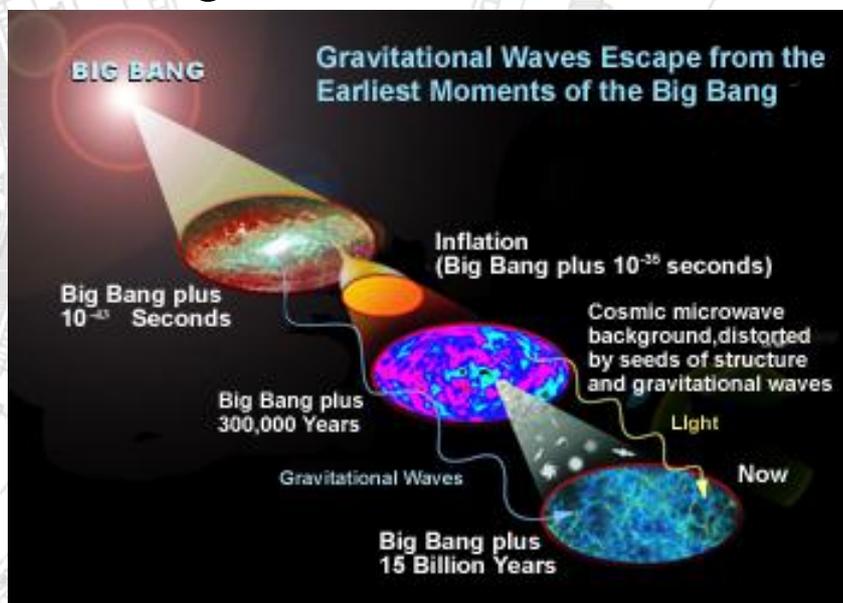


FIG. 10. Accumulated shift of the times of periastron in the PSR 1913+16 system, relative to an assumed orbit with constant period. The parabolic curve represents the general relativistic prediction for energy losses from gravitational radiation.

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)

Sorgenti di onde gravitazionali

- Radiazione gravitazionale di fondo



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

- **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
- **2014** 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?

Gravitational Wave Detectors



The End

