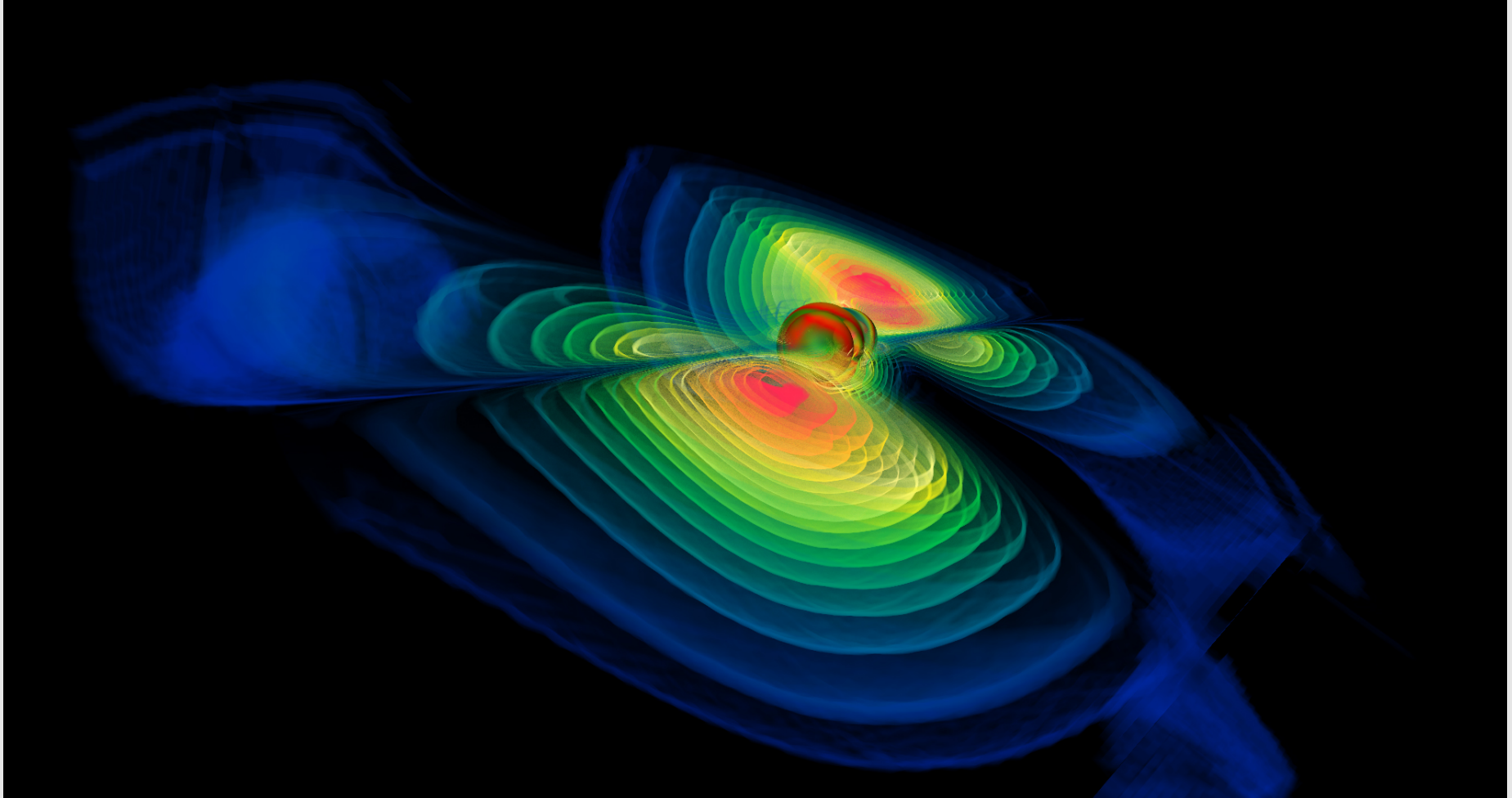


Cavalcando le Onde...



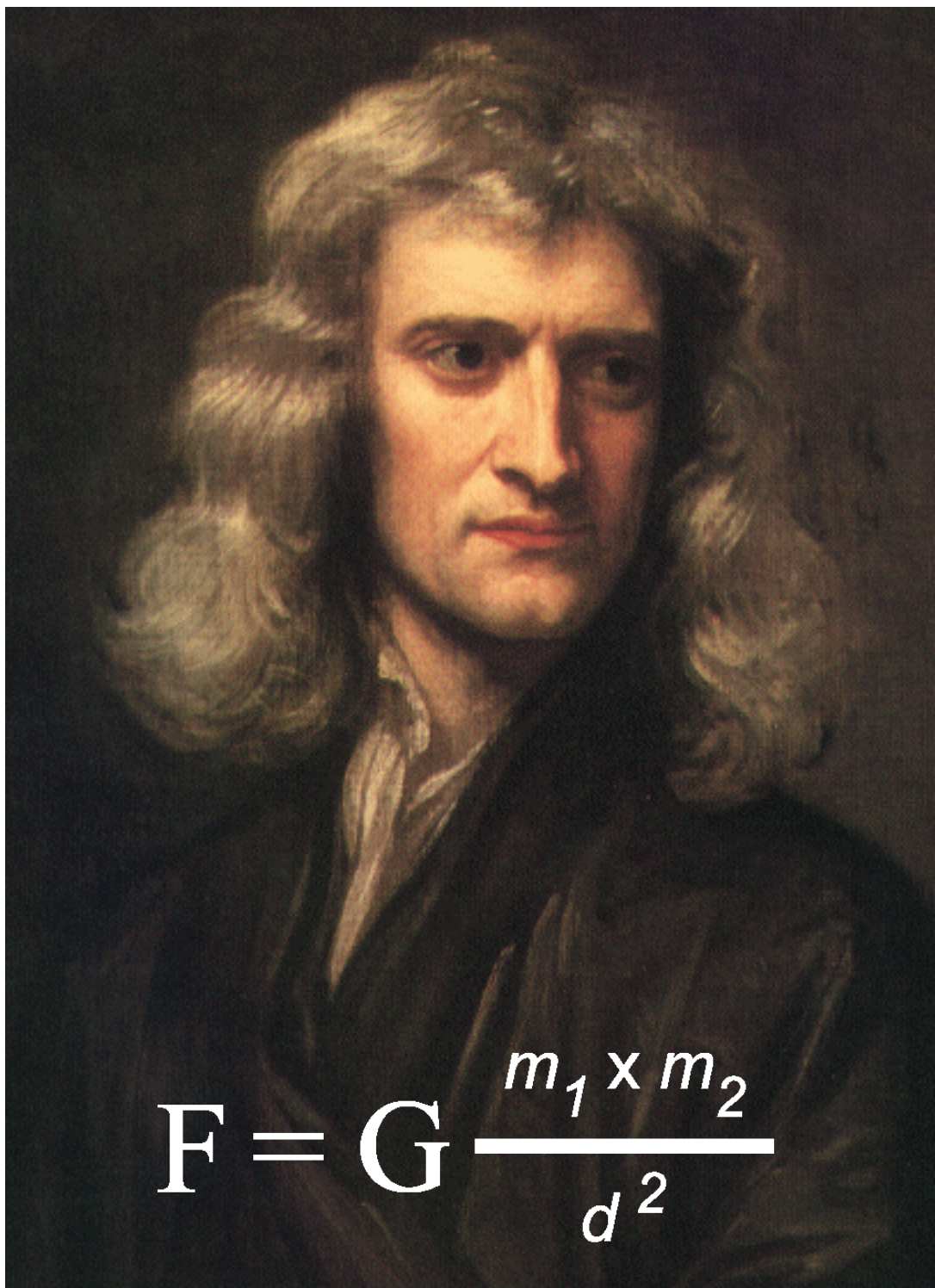
Ettore Majorana
INFN
Dipartimento di Fisica
Università di Roma La Sapienza

..... Gravitazionali

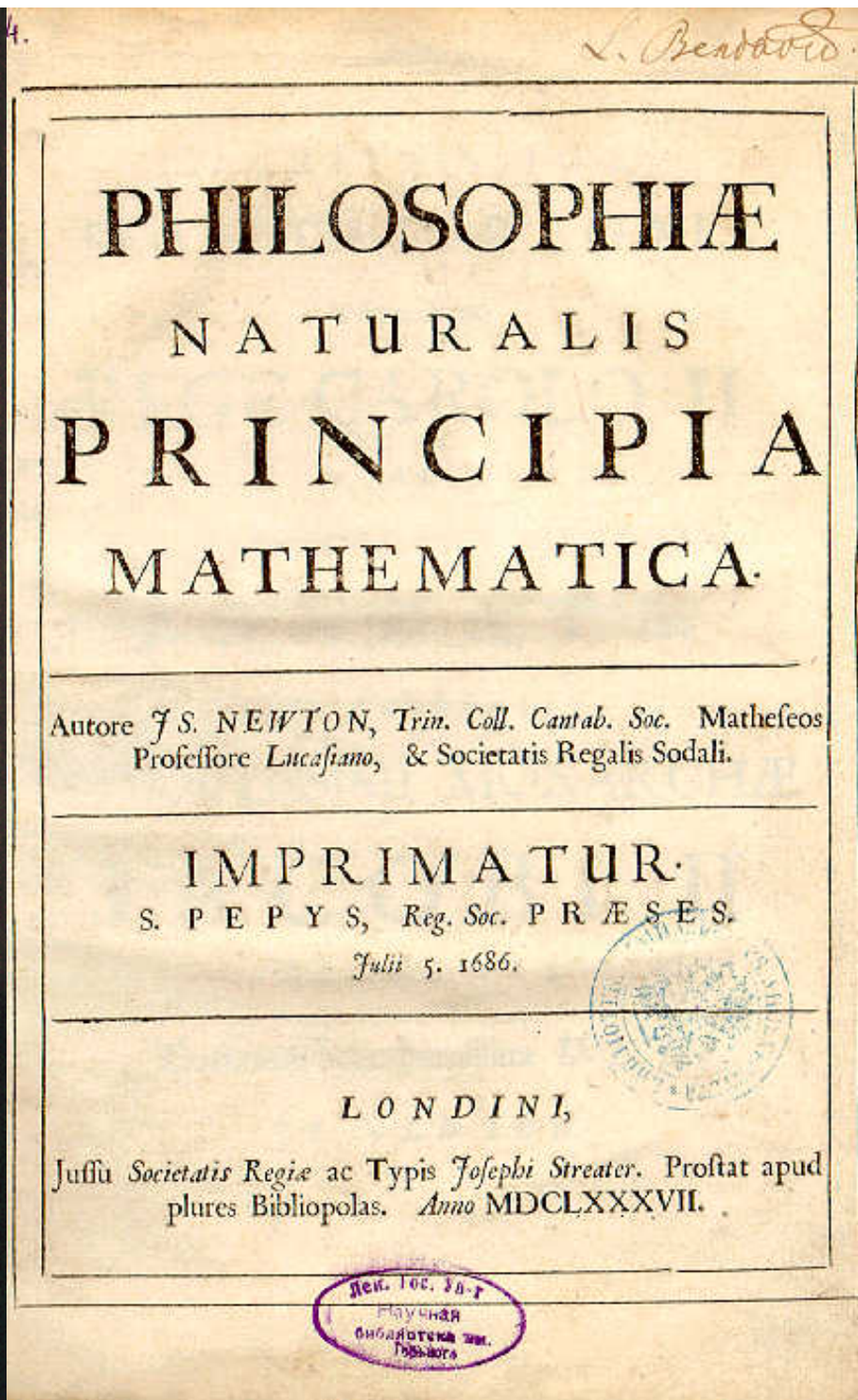


Simulazione numerica della collisione tra due Buchi Neri "

USA-National Center for Supercomputing Applications (NCSA)



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



L. Beadon

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore J. S. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos
Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

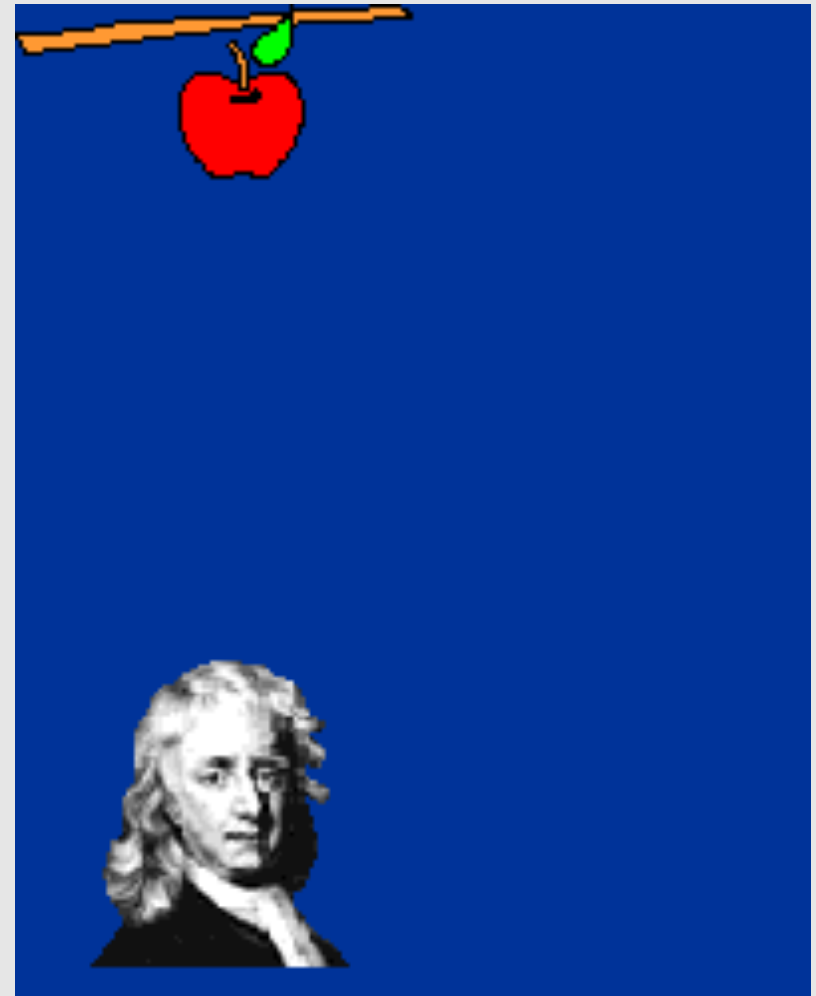
LONDINI,

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

Рек. №. 28-7
Муниципальная
Библиотека им.
Горького

La Gravitazione Universale

- **Risolve gran parte dei fenomeni osservati a Terra e nel Cielo**
 - » **L'orbita dei pianeti e delle comete**
 - » **La cause delle maree**
 - » **Il moto della Luna e la perturbazione dovuta alla Gravita' del Sole**
- **Giunge ad una visione unitaria del lavoro di Galileo Copernico e Keplero.**

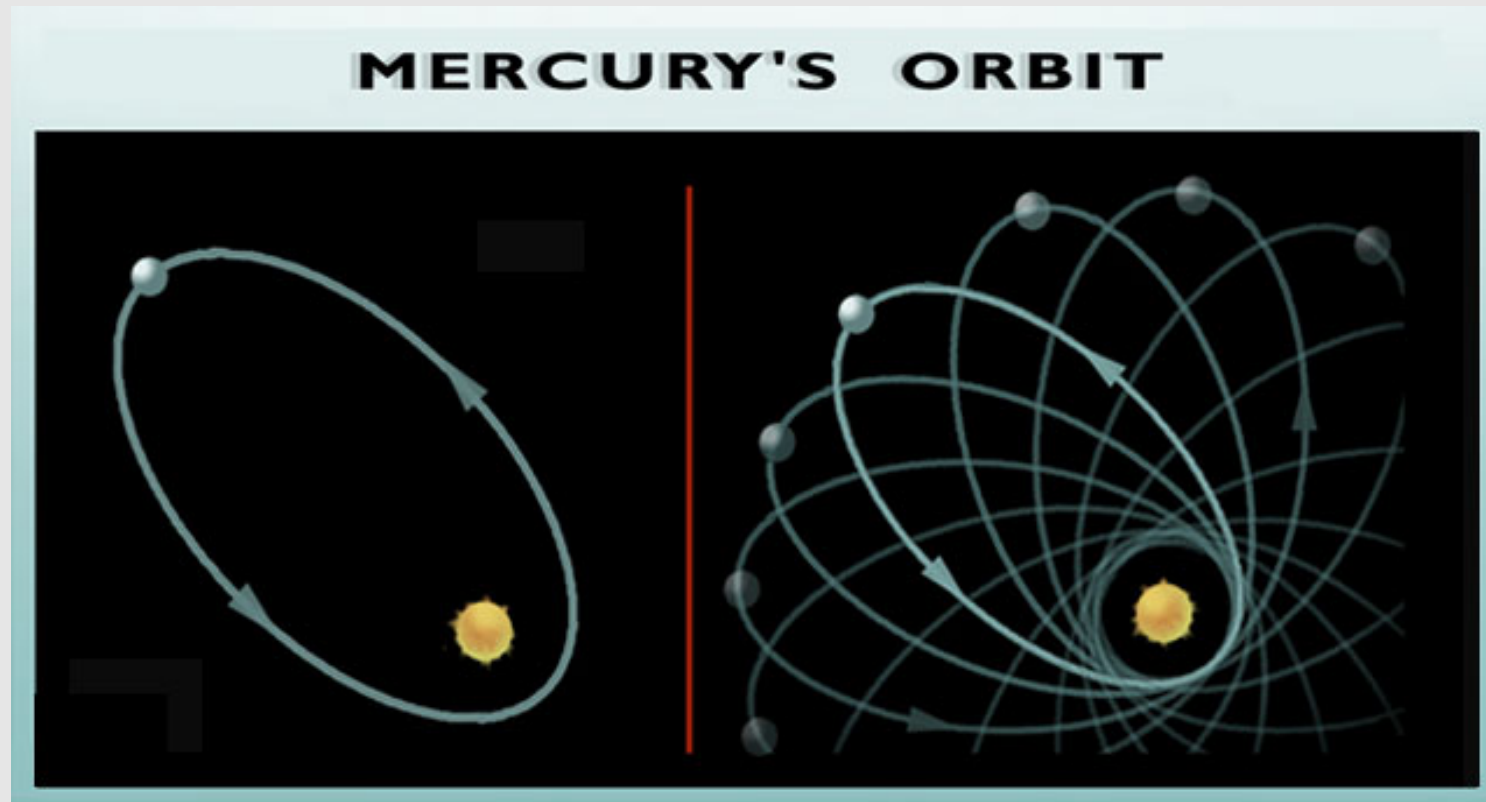


$$\vec{F} = G \frac{M_1 M_2}{r^2} \hat{r}$$

Ma quale è la causa ultima di questa forza ?

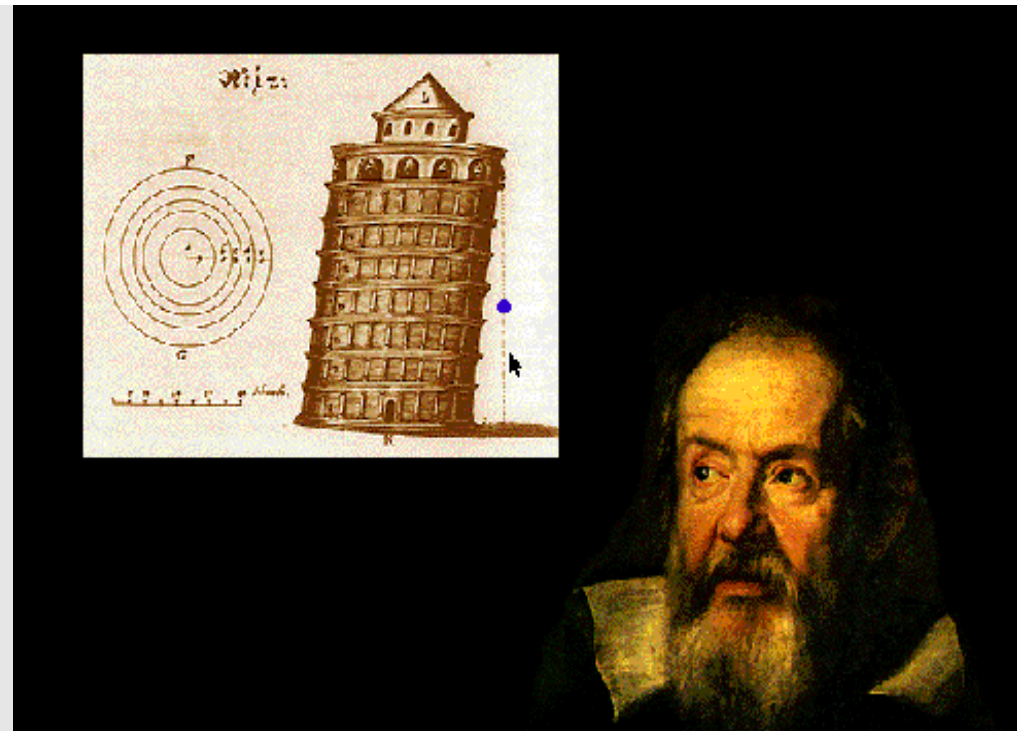
L'equazione ne riassume bene le proprietà, ma non ci spiega sino in fondo quale sia il meccanismo che la crea!

Dopo qualche centinaio di anni si apre una piccola crepa nella teoria Newtoniana



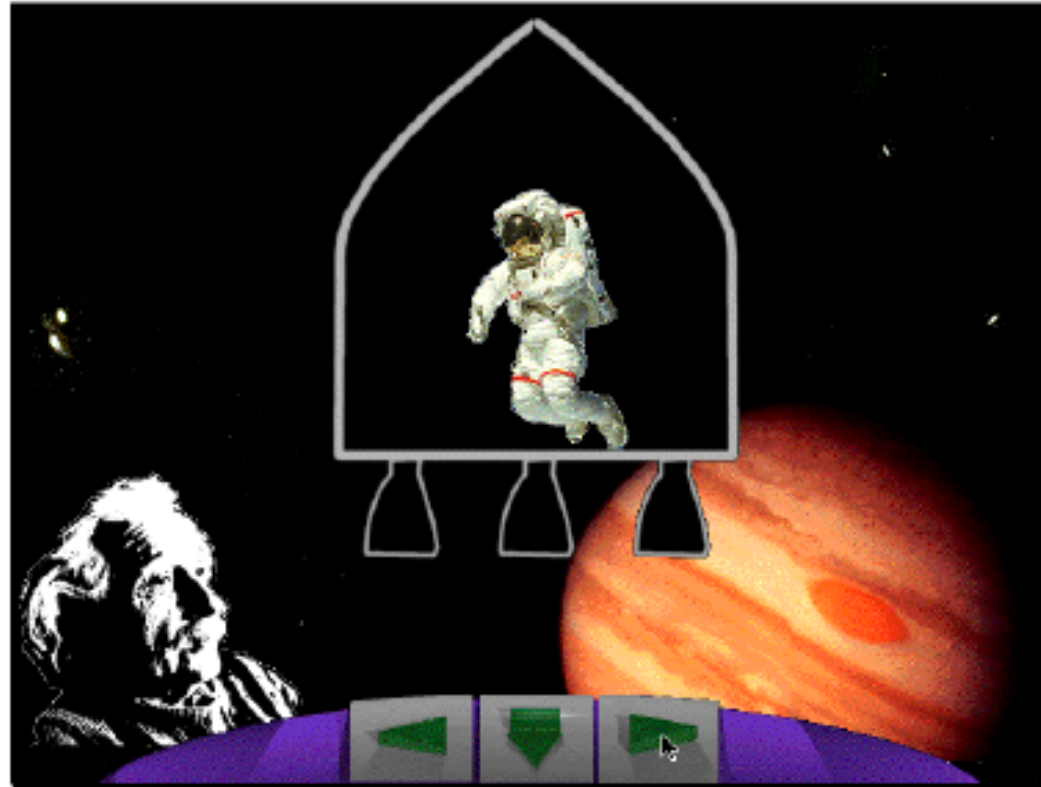
Lo spostamento del perielio di Mercurio è +43"/Secolo più grande di quello previsto dalla teoria di Newton

Inerzia e Gravitazione: il principio di Equivalenza



$$\begin{aligned} & \blacksquare \text{ **Massa Inerziale** } * \text{ **Accelerazione** } \\ & \quad \quad \quad = \\ & \text{ **Massa Gravitazionale** } * \text{ **Campo Gravitazionale** } \end{aligned}$$

- ***L'eguaglianza tra Massa Inerziale e Massa Gravitazionale fa sì che tutti i corpi cadano con la stessa accelerazione, indipendentemente dalla loro natura***



È possibile cancellare localmente il campo gravitazionale studiando i fenomeni fisici rispetto ad un sistema di riferimento uniformemente accelerato

Tuttavia va osservato che il campo gravitazionale non è uniforme. Infatti nel caso di masse puntiformi la legge di Newton ci dice che

$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{M_2} = G \frac{M_1}{r^2} \hat{r}$$



In generale l'accelerazione gravitazionale cambia da punto all'altro.

Potremmo allora pensare di **limitare** la nostra attenzione a **fenomeni locali**, usando in pratica una **piccola cabina**, dove gli effetti dovuti alle differenze di accelerazione siano trascurabili.

Grande vantaggio:

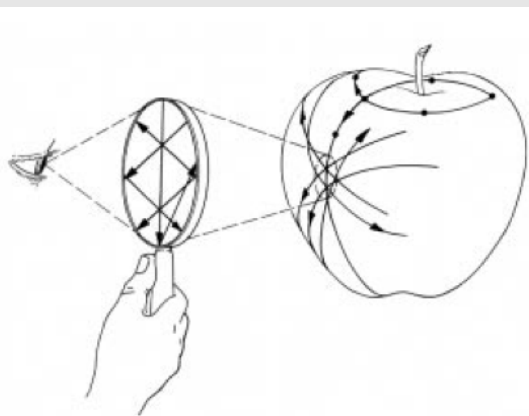
in queste cabine le leggi della relatività ristretta sono applicabili.

Grande svantaggio:

per studiare i fenomeni su larga scala occorre utilizzare più sistemi di riferimento (più cabine).

Ogni cabina è come la singola mappa di un atlante

Ma per pianificare percorsi su larga scala è necessario un Mappamondo





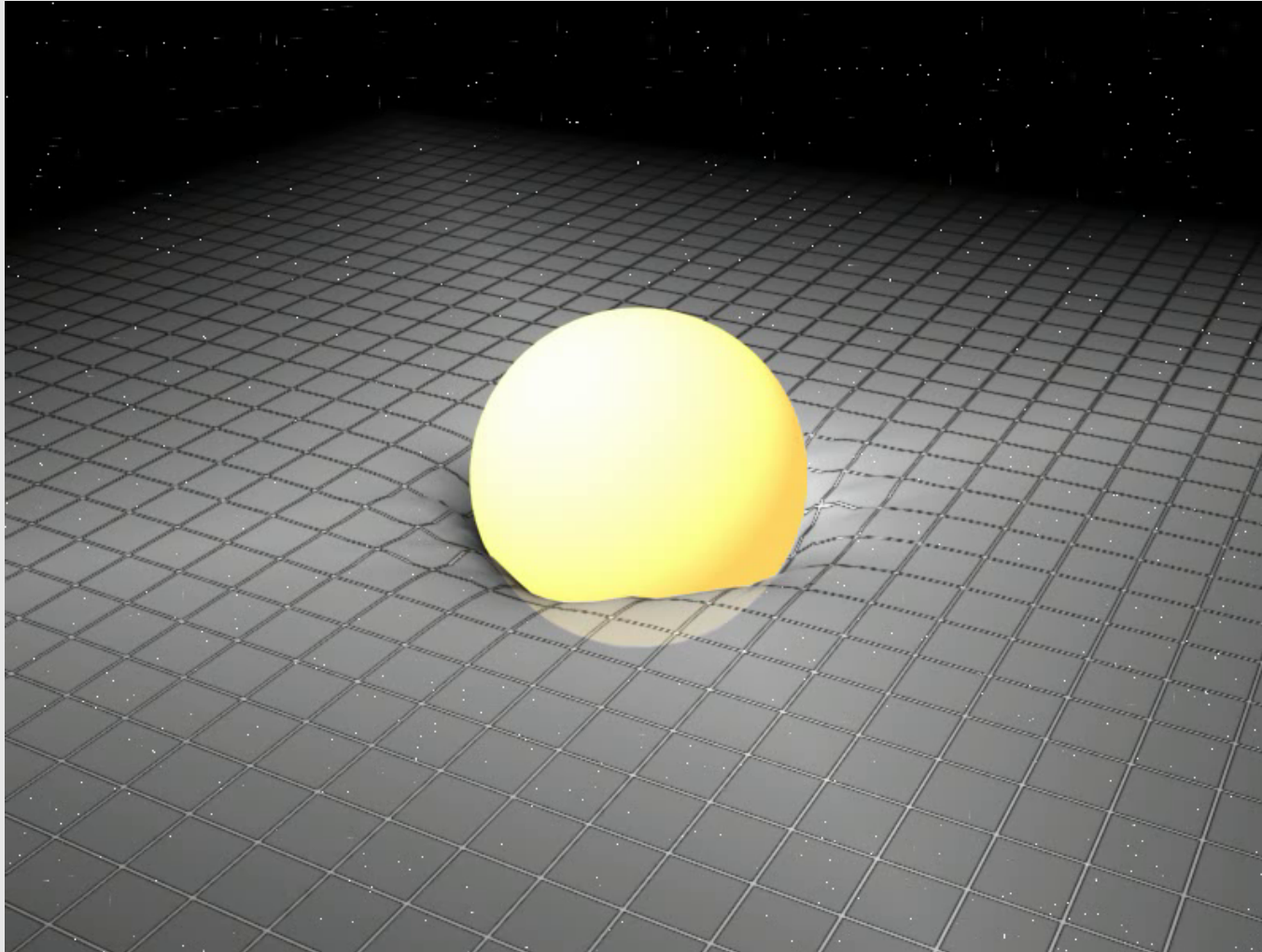
Relatività Generale

l'idea essenziale

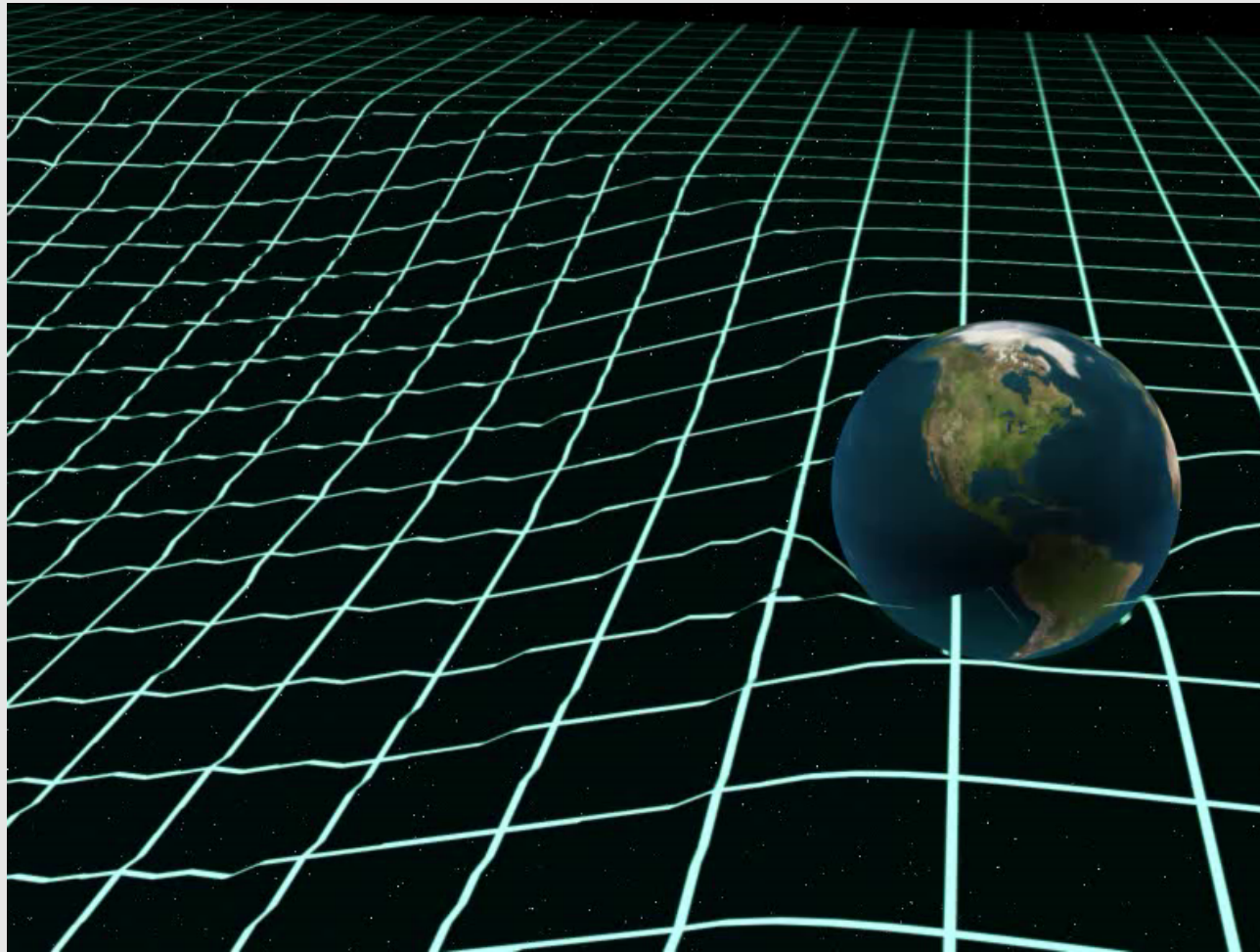
$$G_{\mu\nu} = 8\pi T_{\mu\nu}$$

- **La Gravità non è vista come un campo di forze; essa è descritta come una proprietà**
- **Gli oggetti seguono il cammino più breve tra i punti dello spazio tempo deformato; questo cammino è lo stesso per qualunque tipo di corpo (indipendente dalla sua natura)**

Relatività Generale



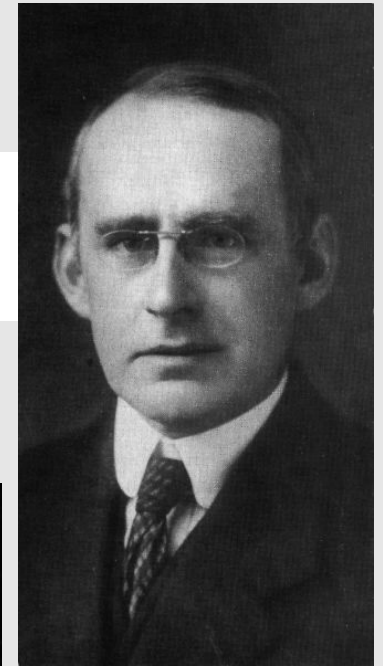
***Einstein teorizza che la massa dei corpi
possa deformare lo spazio-tempo***



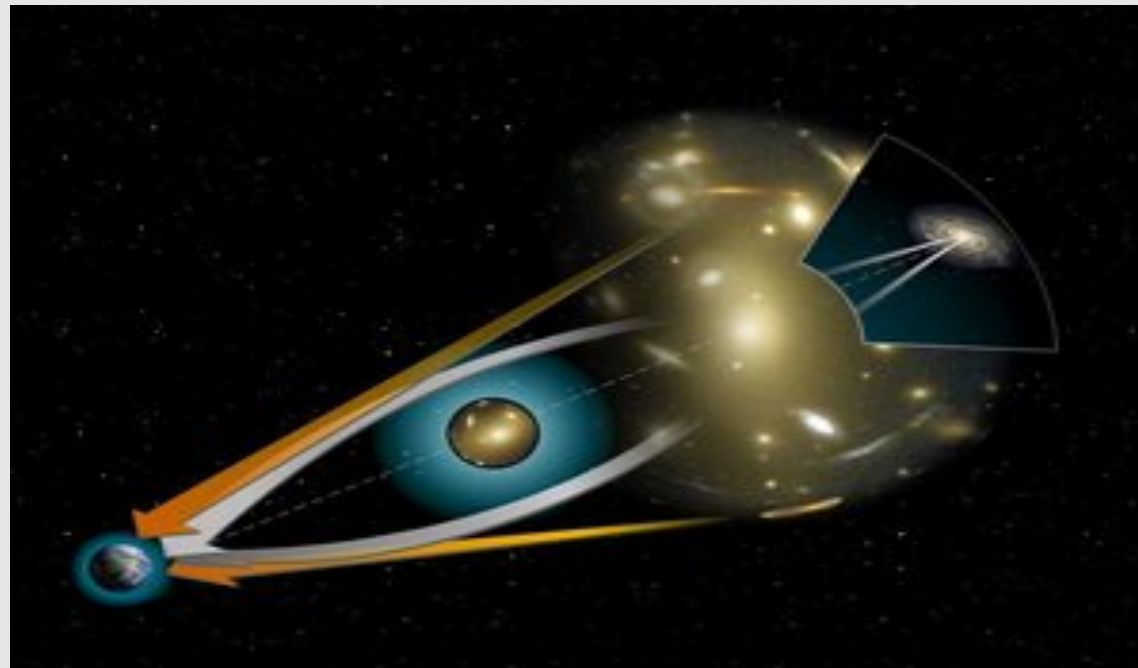
Tutti i corpi si muovono attraverso lo spazio deformato

Una predizione della Teoria di Einstein...

**Sir Arthur Eddington
(1919)**



La deflessione della luce



Le frecce arancioni indicano la posizione apparente della galassia distante.
Le frecce grige indicano il reale percorso della luce

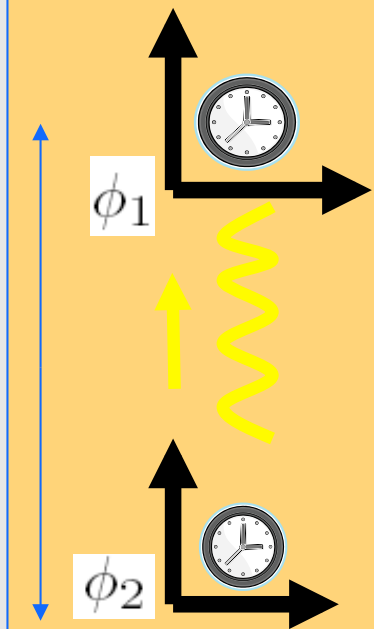
Le meraviglie di Hubble



Einstein Ring Gravitational Lenses
Hubble Space Telescope • Advanced Camera for Surveys

Il tempo scorre più lentamente dove la gravità è meno intensa

Orologi con moto relativo nullo in 2 punti del campo gravitazionale



$$T_1 = T_2 \left\{ 1 + g \frac{(h_1 - h_2)}{c^2} \right\}$$



Effetto correttivo importante per il Global Position System (GPS)

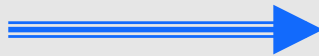
WOOPS !!!!

Non solo astrofisica

Il sistema GPS 24 satelliti ad su orbite a 20000 km dalla superficie terrestre. 4 di loro sempre visibili da ogni punto.

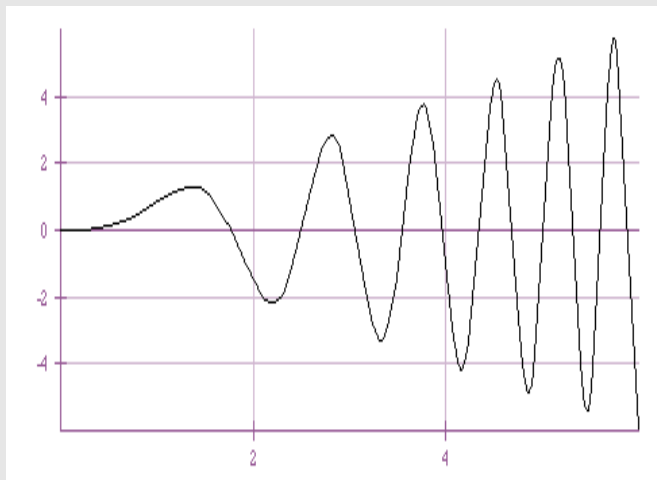
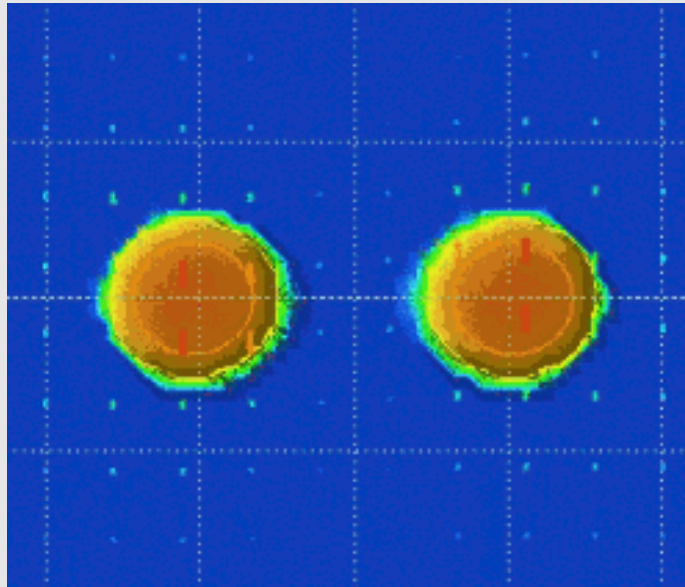
La teoria della Relatività c'è dentro:

- RS (Speciale) ritardo di 7microsecondi/giorno degli orologi che si muovono velocemente (14000 km/ora)
- RG (Generale) il tempo scorre più lentamente dove il campo gravitazionale è maggiore (sulla superficie terrestre): anticipo 45 microsecondi.



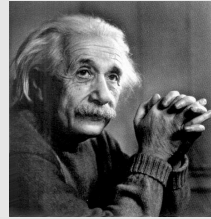
GPS funzionerebbe solo per 2 minuti e continuerebbe ad accumulare un errore di 10 km / giorno !!!!

ONDE GRAVITAZIONALI -1



Due stelle collassate che ruotano l'una attorno all'altra avvicinandosi progressivamente
Binarie coalescenti

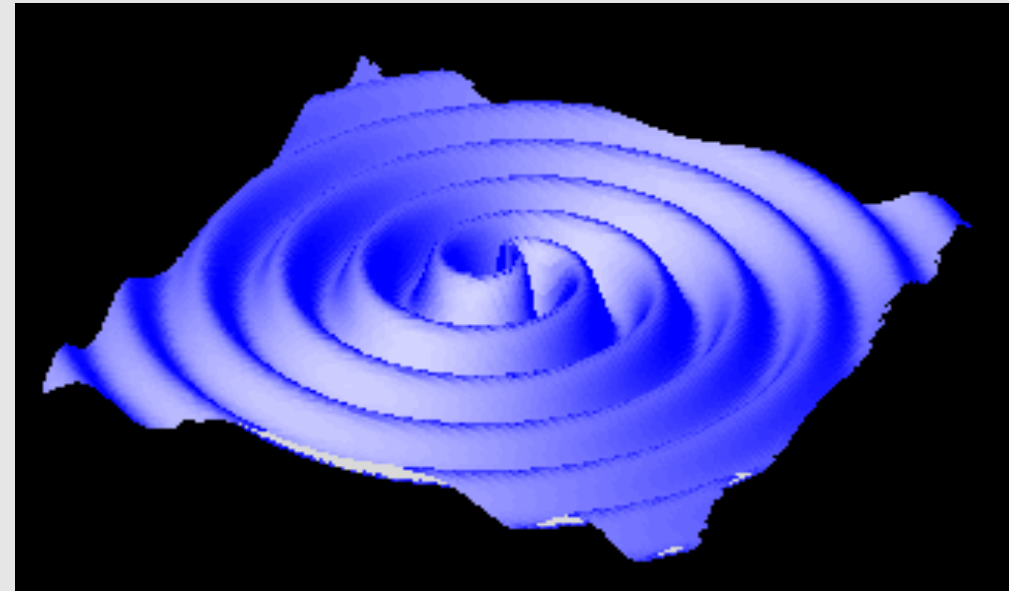
Teoria della Gravitazione di Einstein



- Una conseguenza cruciale della Relatività Speciale è che tutte le informazioni si propagano con velocità finita
- Quindi l'informazione del cambiamento della struttura dello spazio tempo, dovuta ad un'accelerazione delle masse che deformano lo spazio, si propaga alla velocità della luce

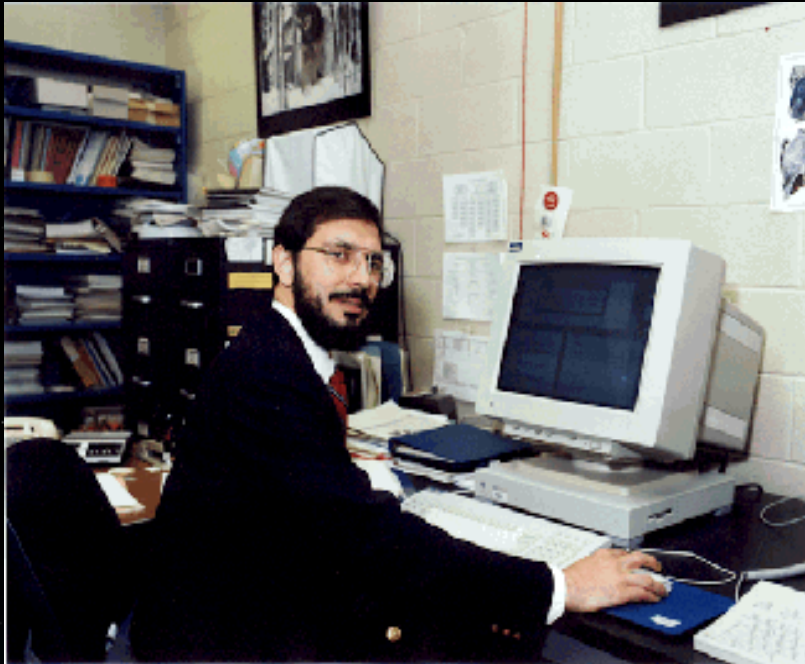


Onde Gravitazionali



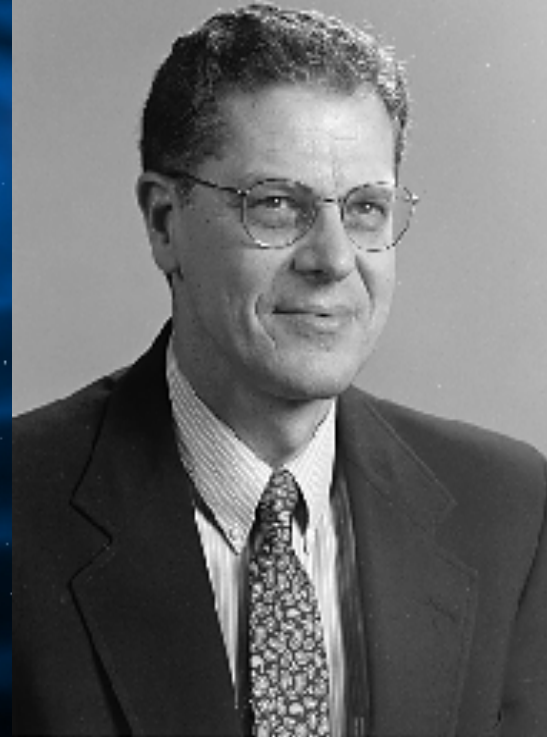
La radiazione gravitazionale emessa durante la fase di spiraleggiamento di due oggetti compatti

Prova indiretta dell'esistenza delle Onde Gravitazionali



Russel A. Hulse

**Sistema binario della
Pulsar PSR 1913 + 16
Studiata con un
Radio Telescopio**

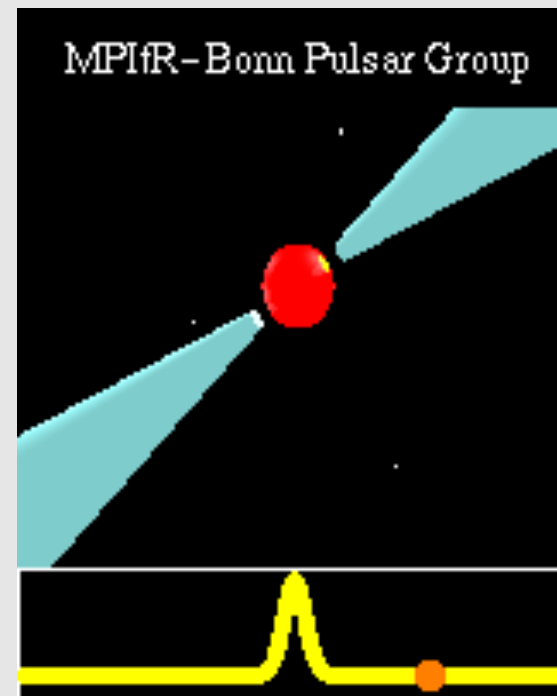
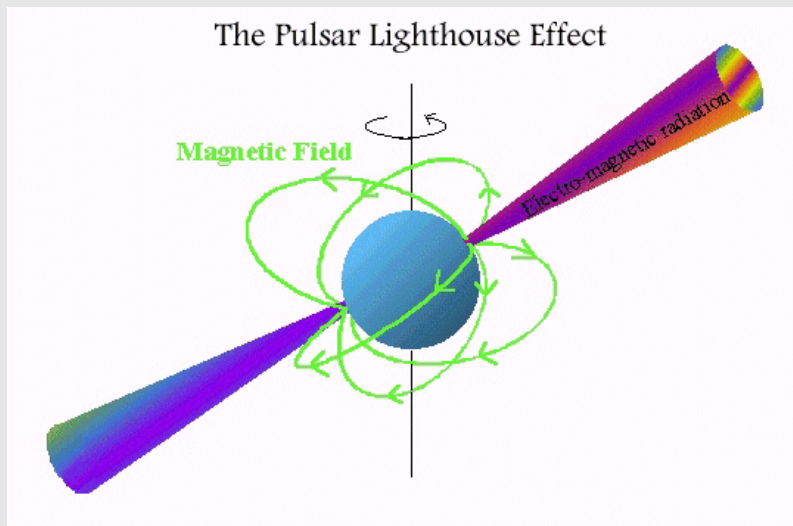
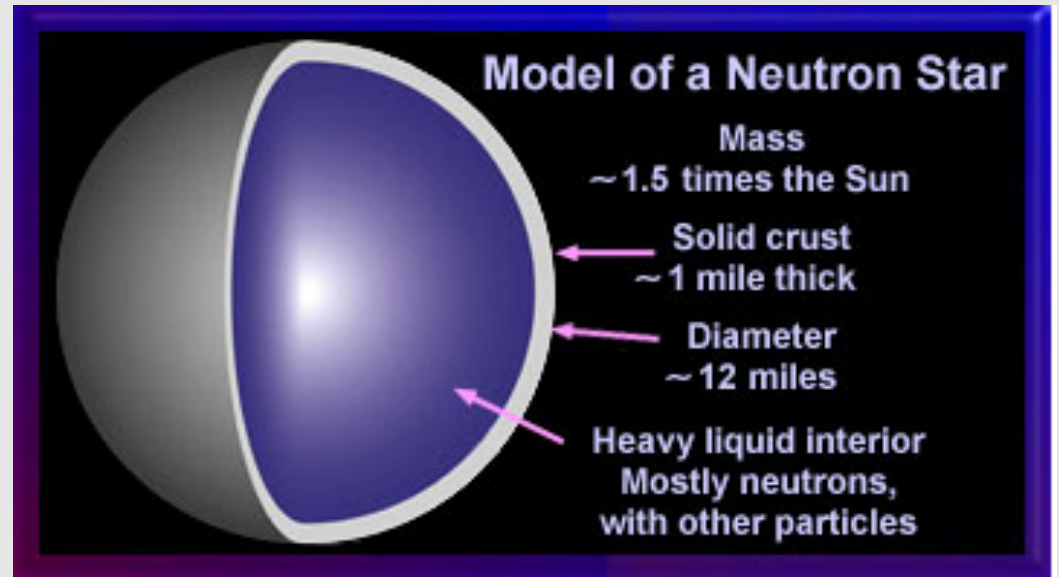


Joseph H. Taylor Jr

Stella di Neutroni

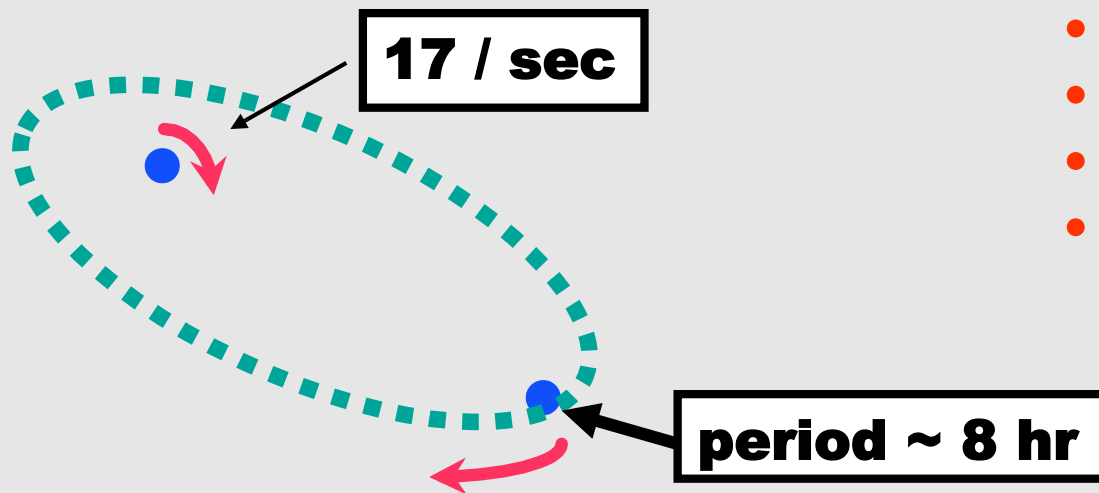


Radio Pulsar



Evidenza dell'esistenza delle Onde Gravitazionali

Hulse & Taylor



Sistema binario di stelle compatte

- separazione $\sim 10^6$ km
- $m_1 = 1.4$ masse solari
- $m_2 = 1.36$ masse solari
- eccentricità = 0.617

Predizione della Relatività Generale

PSR 1913 + 16
Timing of pulsars

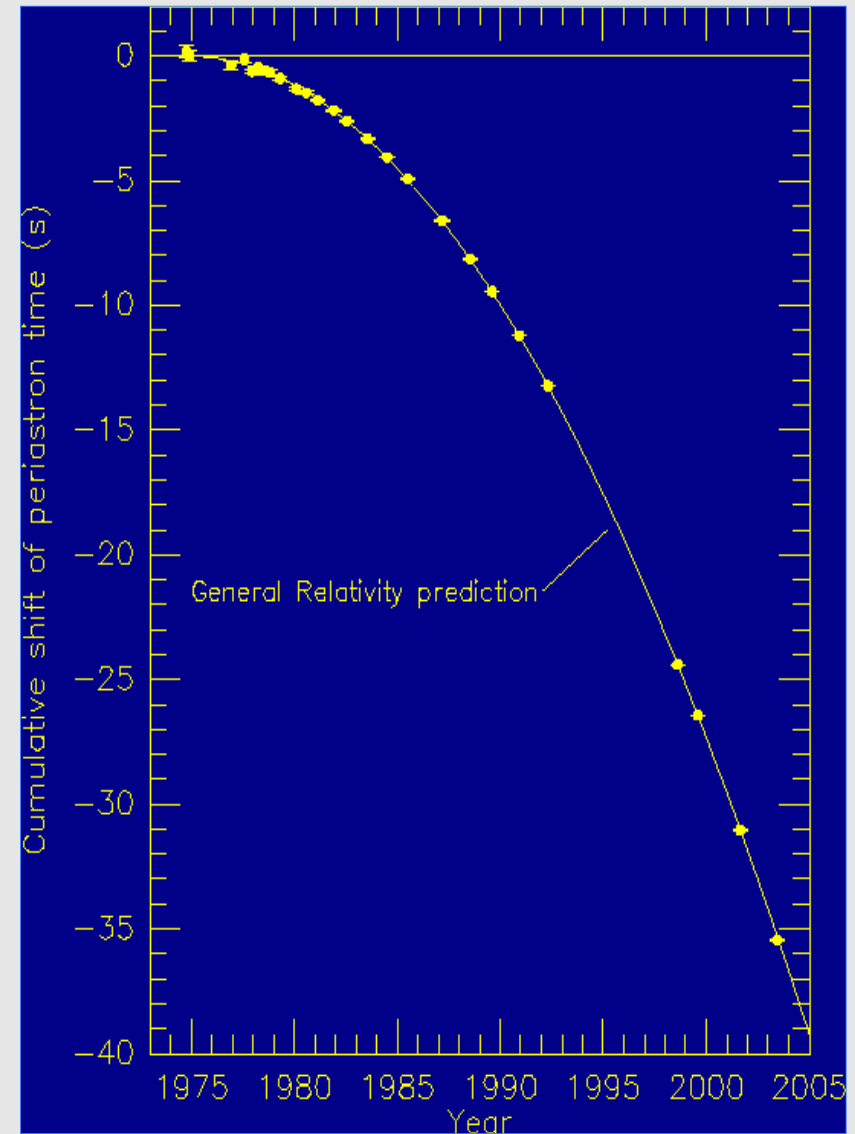
- riduzione progressiva dell'orbita 3 mm/orbita

Evidenza “indiretta” d’esistenza delle Onde Gravitazionali



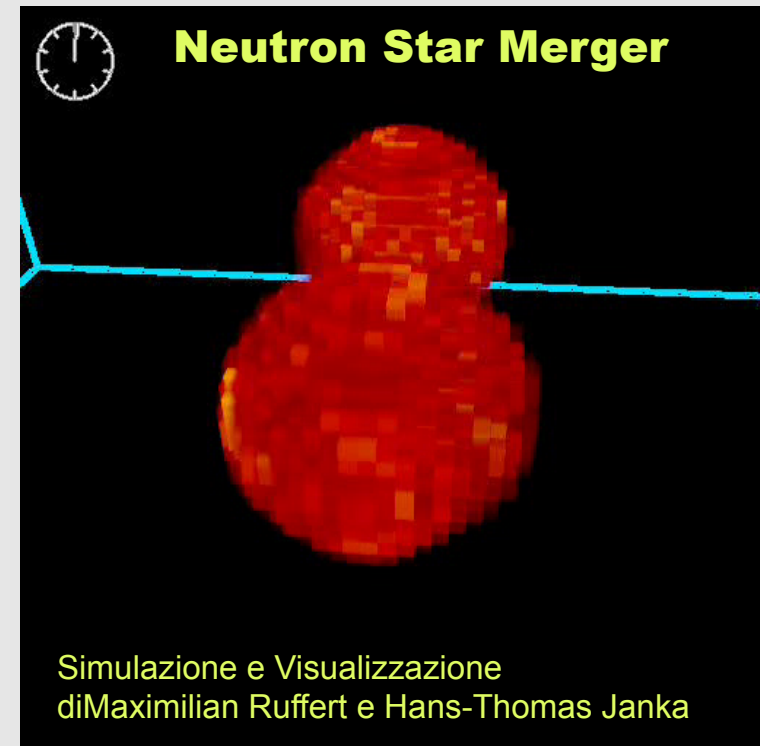
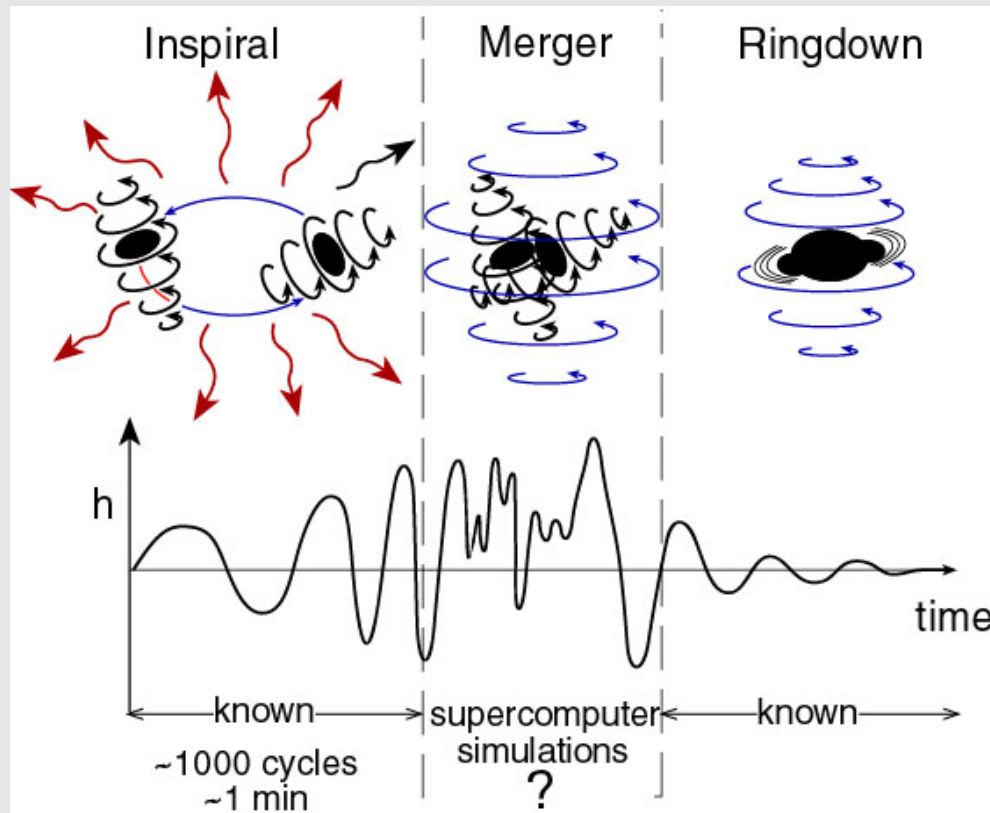
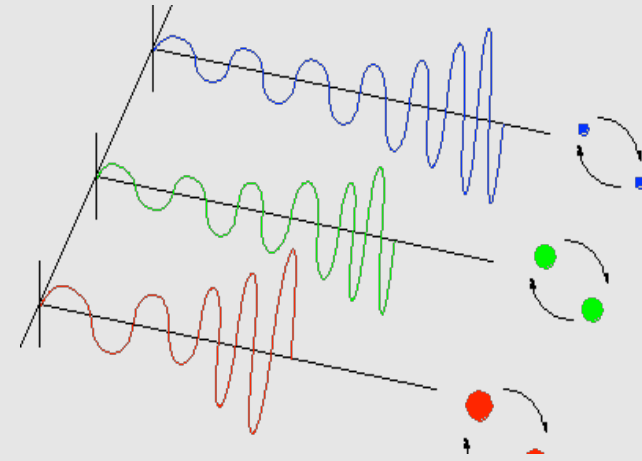
(Nobel 1993).

$$\dot{P}_{MEAS} / \dot{P}_{GTR} = 1.0023 \pm .0047$$



Collisioni di sistemi compatti: “chirps”

» Coppia di Stelle compatte di Neutroni



Formazione

La Stella brucia

- Può accadere che gli atomi si fondano in un mare di elettroni e protoni. Questo mare resiste all'ulteriore processo di compressione e il collasso si può

cipolla,
ti
eri

Il Collasso

- Quando la fusione nucleare non può opporsi all'attrazione gravitazionale, la materia non riesce a compattarsi sufficientemente.

- In una stella più massiccia gli elettroni e protoni possono fondere creando una struttura di pura materia neutronica → "stella di neutroni". L'estrema rigidità di questa materia

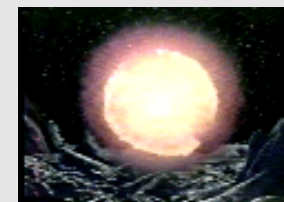
- Nessuna forma di materia resiste al collasso → lo spazio ed il tempo si deformano a tal punto che nulla può sfuggire → "Buco Nero".

Neutron Star

Black Hole

©ZoomSchool.com

Supernovae: *“segnale impulsivo*

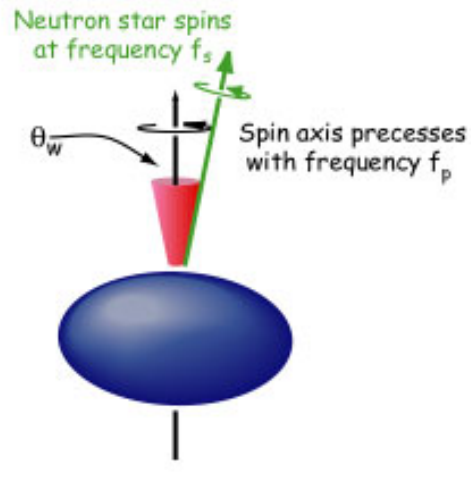


La morte di
una Stella

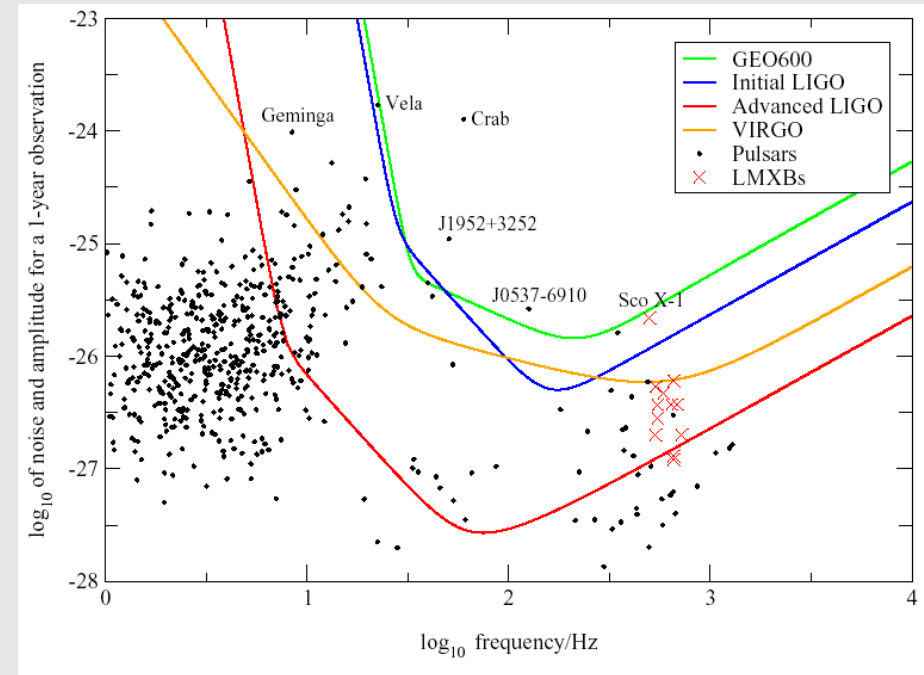
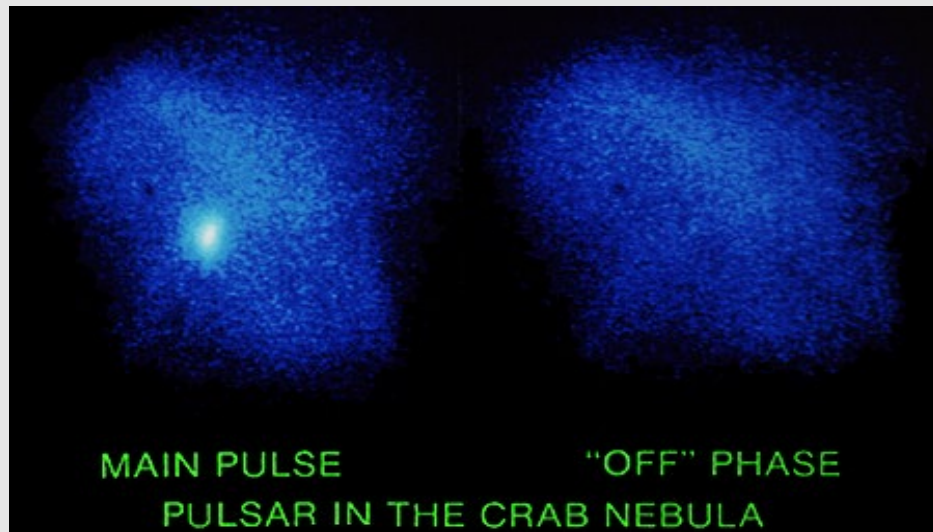
Evoluzione temporale

Immagini dall'archivio NASA
High Energy
Astrophysics Research

Stelle di Neutroni Rotanti: “segnali periodici”



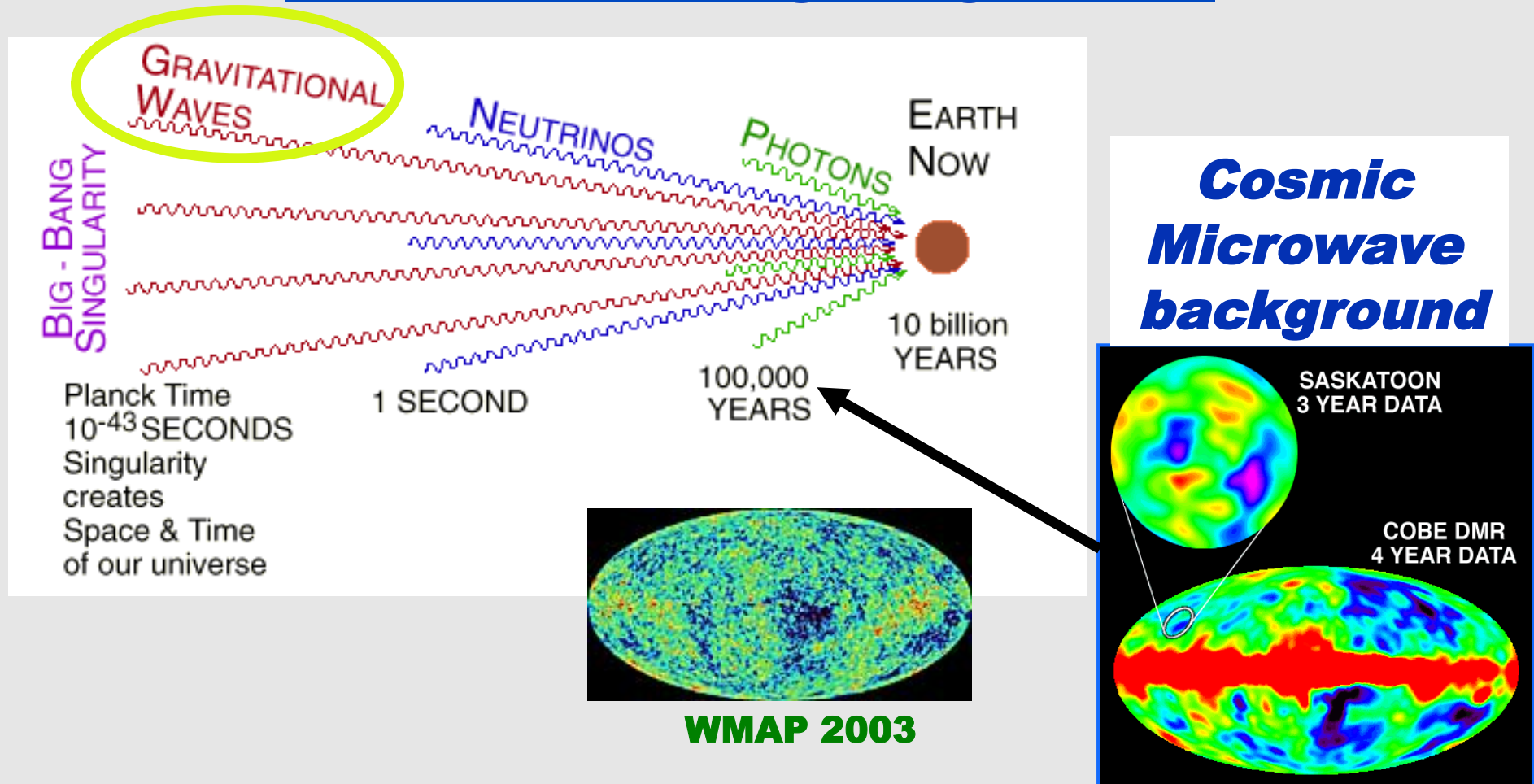
In questo caso il segnale si ripete continuamente nel tempo (segnale periodico) con un periodo pari al doppio del periodo di rotazione della stella pulsante



**Luminosità
gravitazionale massima
delle pulsar note**

Universo Primordiale: *“rumore correlato tra i vari rivelatori”*

‘mormorio’ dal Big Bang iniziale



La Rivelazione delle ONDE GRAVITAZIONALI -4

Le quantità d'energia emesse nei processi stellari sono enormi. Se la sorgente è lontana e l'energia tipicamente si disperde in tutto l'universo e noi possiamo raccoglierne solo una frazione piccola, ma possiamo rivelare più sorgenti.

Distanza : 10 kparsec = $3 \cdot 10^{20}$ m

Energia emessa: 10^{40} Joule

Effetto geometrico a Terra:

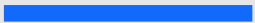
$$h = 10^{-21}$$

h rappresenta il cambiamento sulla Terra della distanza relativa tra due punti

In altre parole se pongo due corpi ad una distanza di 1 km l'uno rispetto all'altro, lo spostamento da misurare è

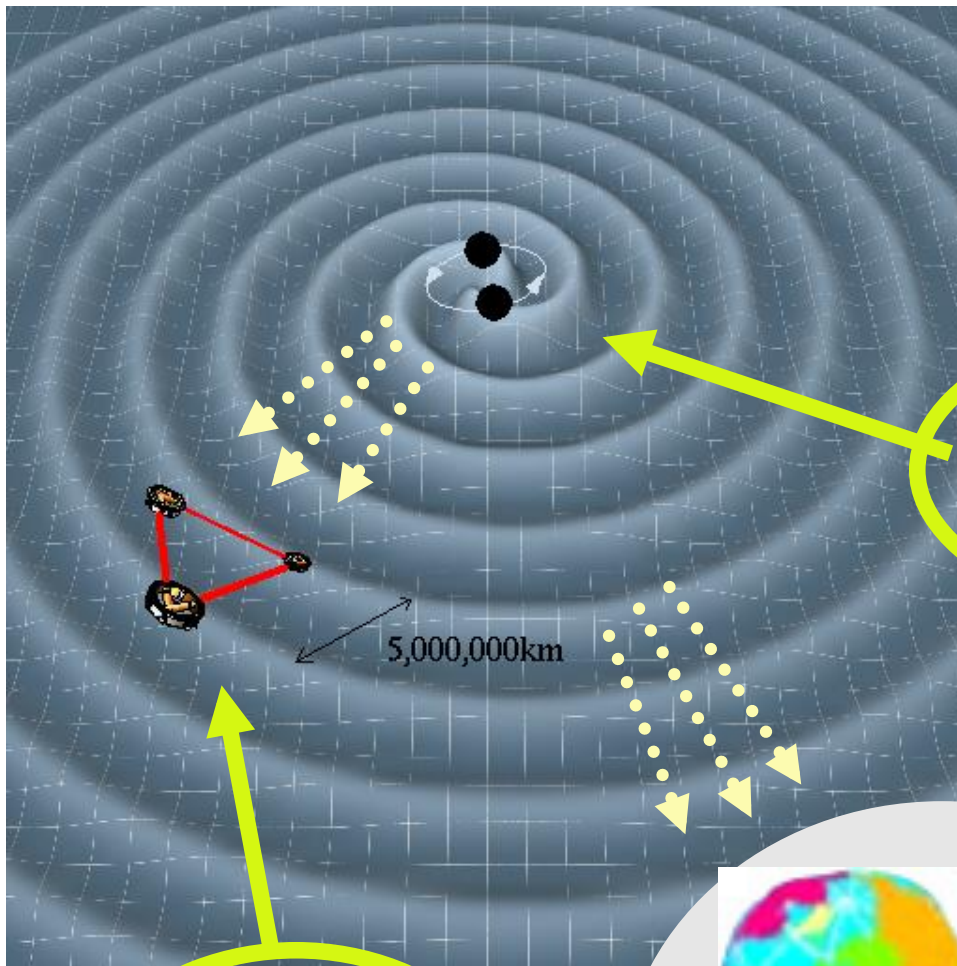
$$\Delta L = h \times 1000 = 10^{-18} \text{ m}$$

Quanto piccola è lo spostamento che dovremo misurare?

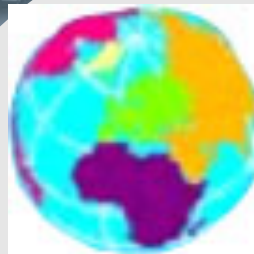
		1 metro
÷10,000		Capello umano ~ 100 microns
÷100		Lunghezza d'onda della luce ~ 1 micron
÷10,000		Diametro atomico 10^{-10} m
÷100,000		Diametro Nucleare 10^{-15} m
÷1,000		Sensibilità di VIRGO 10^{-18} m

Rivelazione diretta

**Onde da sorgenti
Astrofisiche**



**Rivelatori
spaziali
LISA**

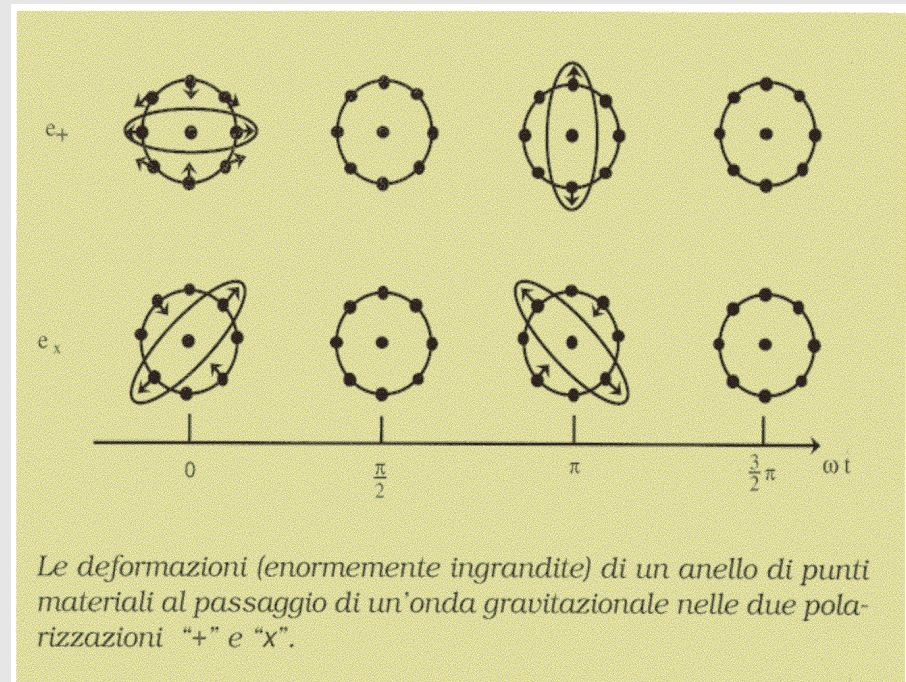
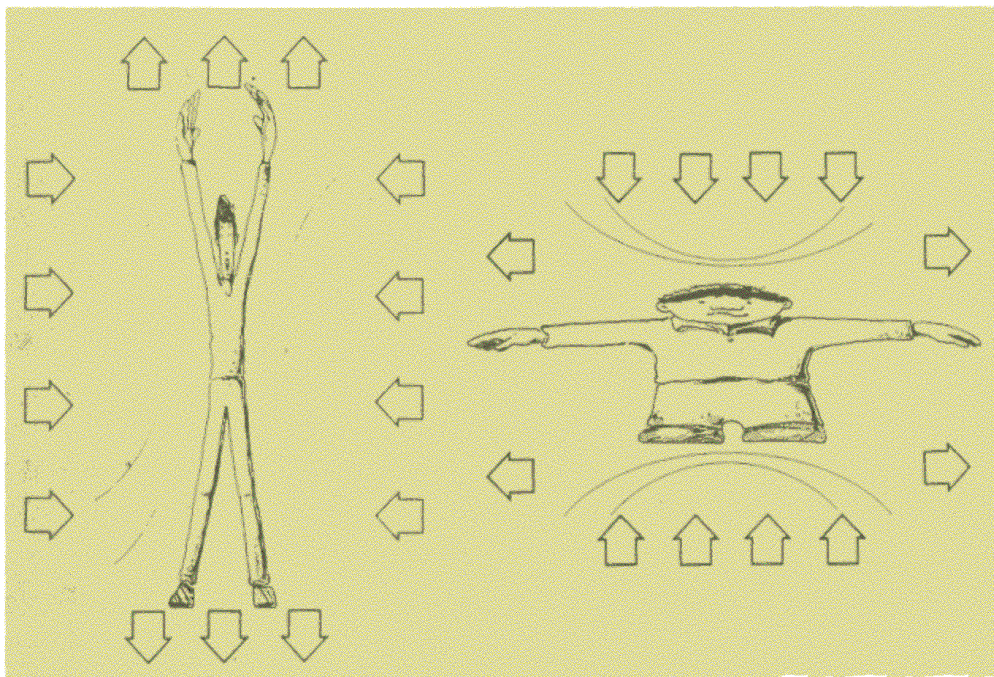


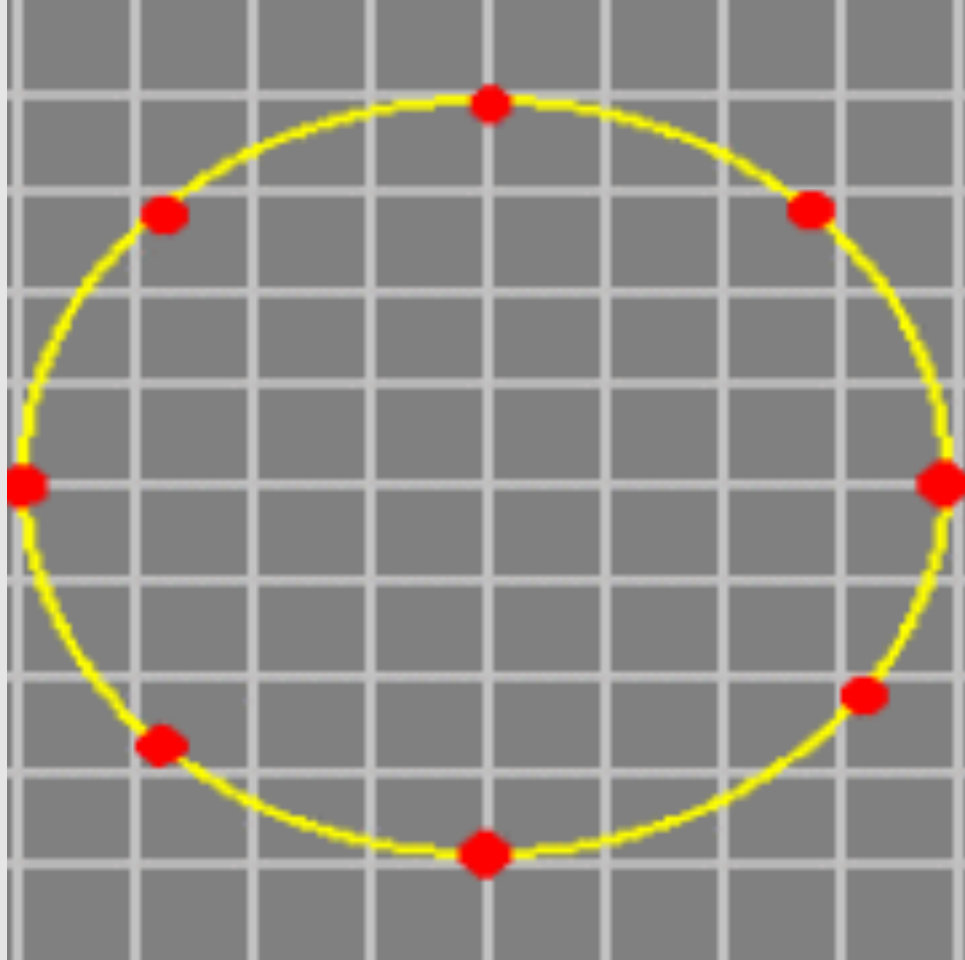
**Rivelatori Terrestri
LIGO e Virgo**



La Rivelazione delle ONDE GRAVITAZIONALI - 1

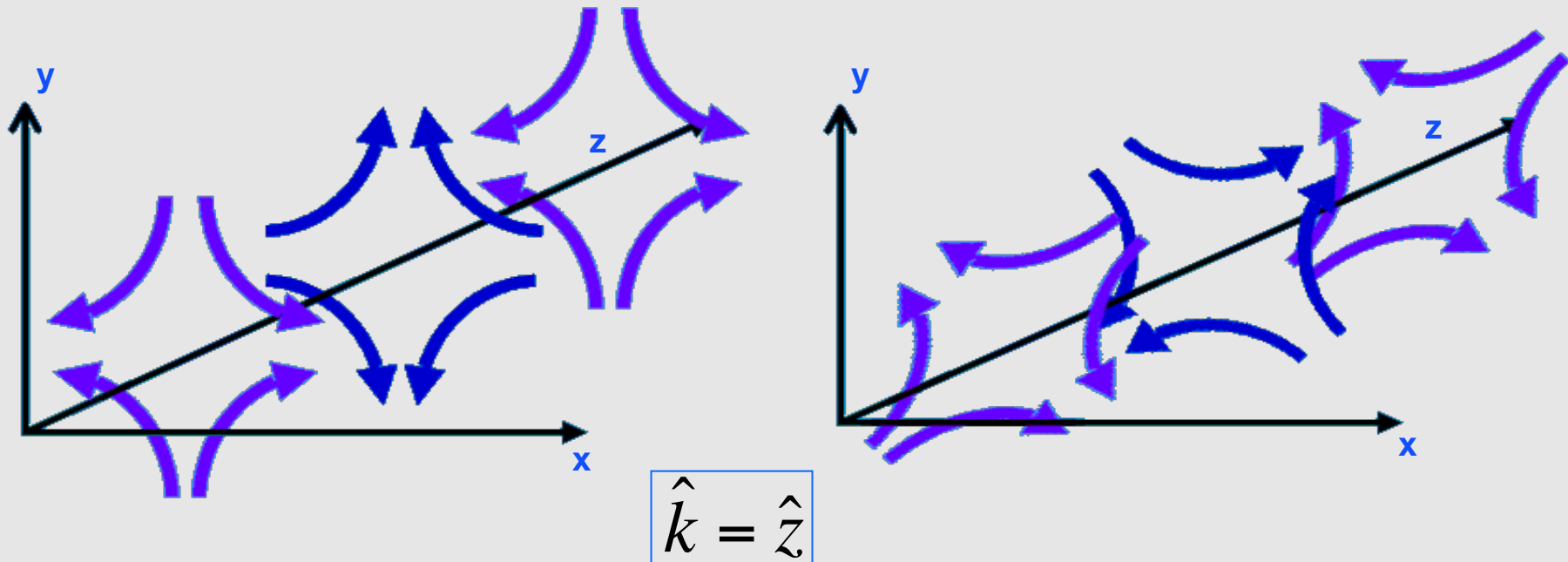
Quando la nostra regione di spazio è investita dall' Onda
Gravitazionale, cambiano le proprietà geometriche dello spazio





Polarizzazione delle onde gravitazionali

Le onde gravitazionali si propagano alla velocità della luce c ($2.99 \cdot 10^8$ m/s) e sono dotate di due stati di polarizzazione a 45°



La Rivelazione delle ONDE GRAVITAZIONALI -2

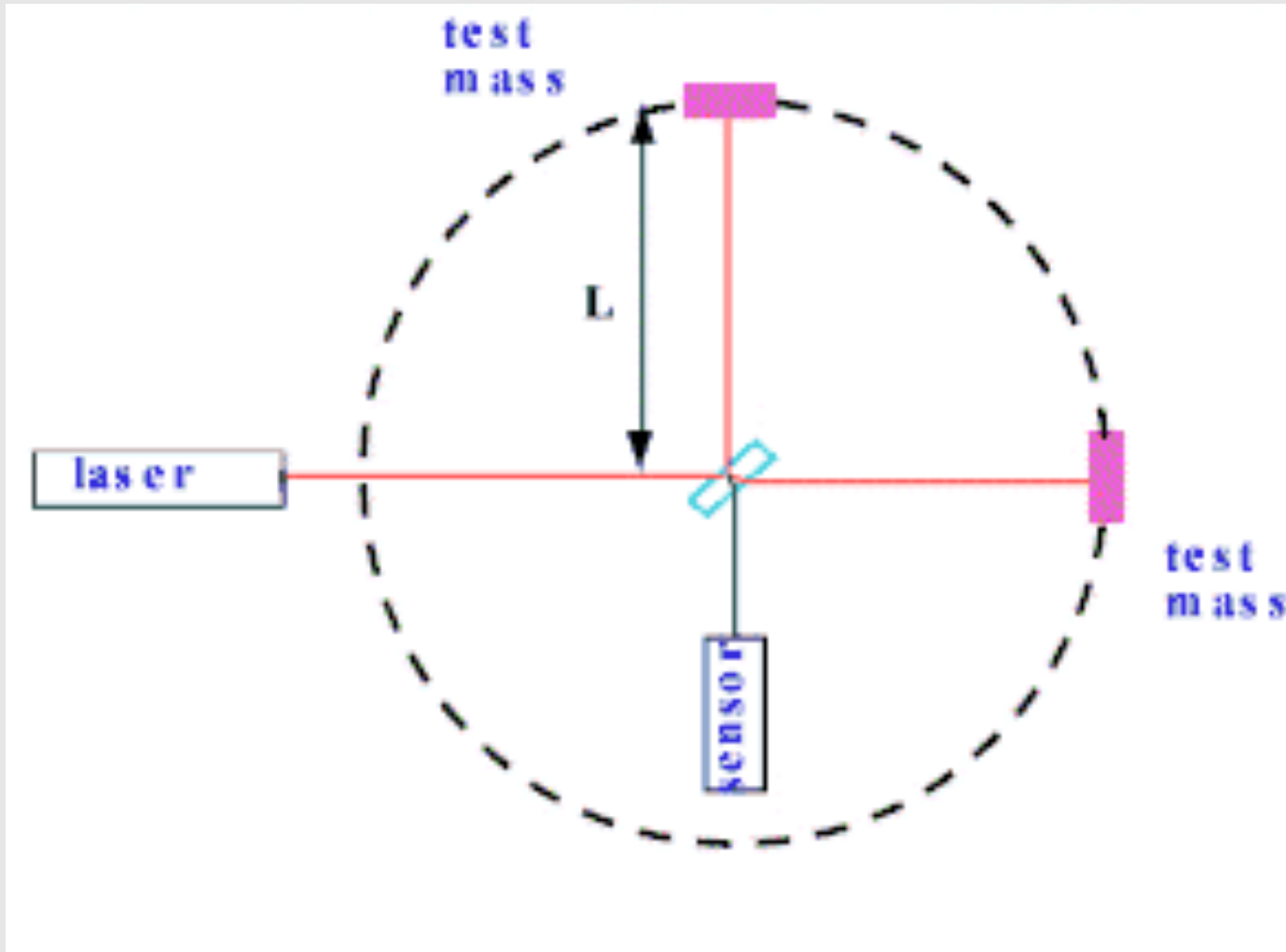
Come possiamo renderci conto che stanno cambiando le proprietà geometriche dello spazio?

Anche il nostro metro campione si deforma!!



Noi possiamo però misurare il tempo che luce impiega a fare un viaggio di andata e ritorno tra due punti localmente liberi da effetti gravitazionali, perchè la velocità della luce è sempre pari a c .





L'effetto dell'Onda Gravitazionale è analogo a quello di una forza di marea.
Se ho tre corpi distribuiti a L , quando un tratto si allunga l'altro si accorcia e viceversa

L'INTERFEROMETRIA e le ONDE GRAVITAZIONALI -2

Il segnale d'uscita di un interferometro Michelson dipende dalla differenza dei tempi di transito della luce nei due bracci, ovvero dalla differenza di lunghezza dei due bracci.

La variazione di lunghezza di un braccio è

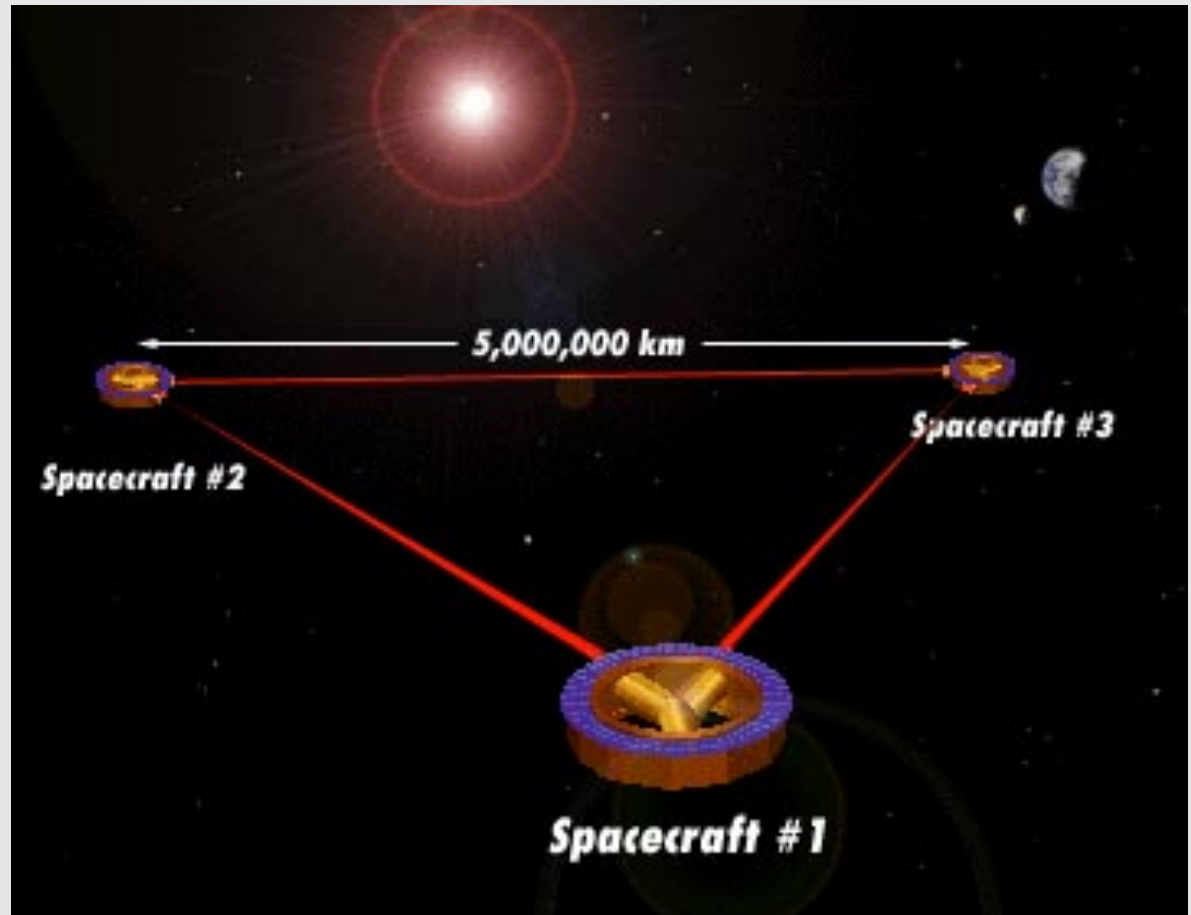
$$\Delta L = h * L$$

A parità di h , tanto più è grande L quanto più è grande è il segnale dell'interferometro ΔL

La rivelazione nello spazio

Un progetto per il futuro

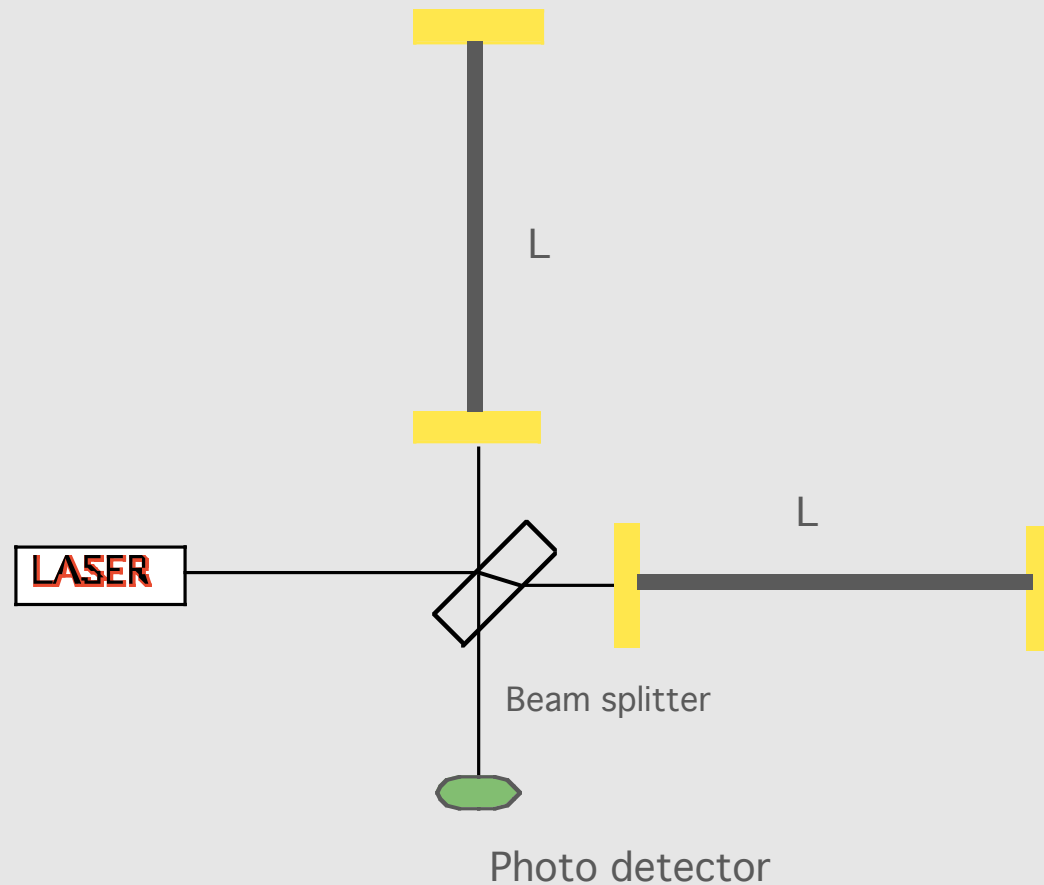
**Laser
Interferometer
Space Antenna
LISA**



L'INTERFEROMETRIA a Terra e le ONDE GRAVITAZIONALI

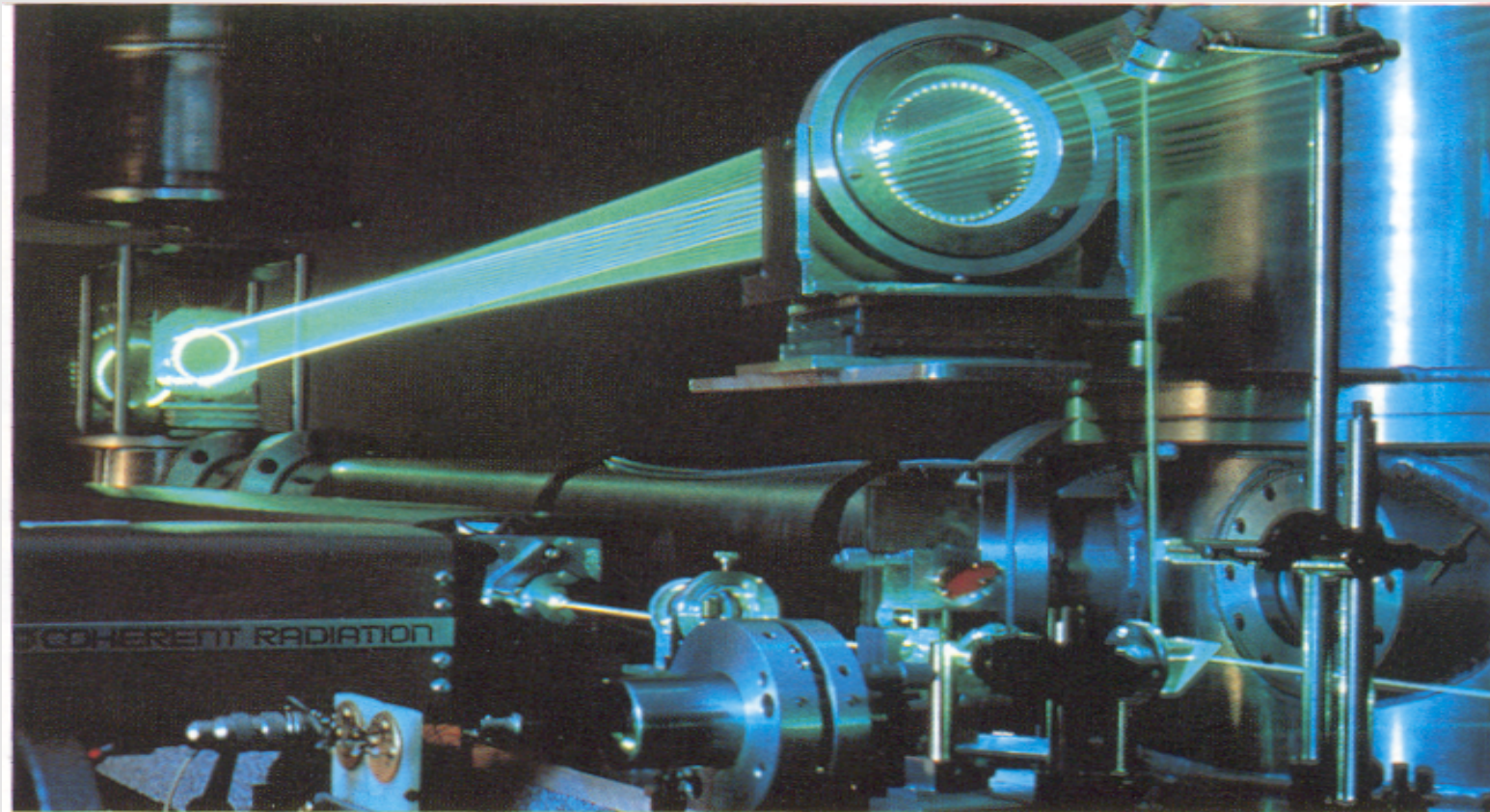
Il tempo di permanenza della luce nei bracci viene allungato costruendo delle cavità ottiche dove la luce rimbalza avanti ed indietro prime di uscire.

Due tecniche possibili: a) Linee di Ritardo Ottiche, b) Cavità Fabry-Perot



L'INTERFEROMETRIA a Terra e le ONDE GRAVITAZIONALI

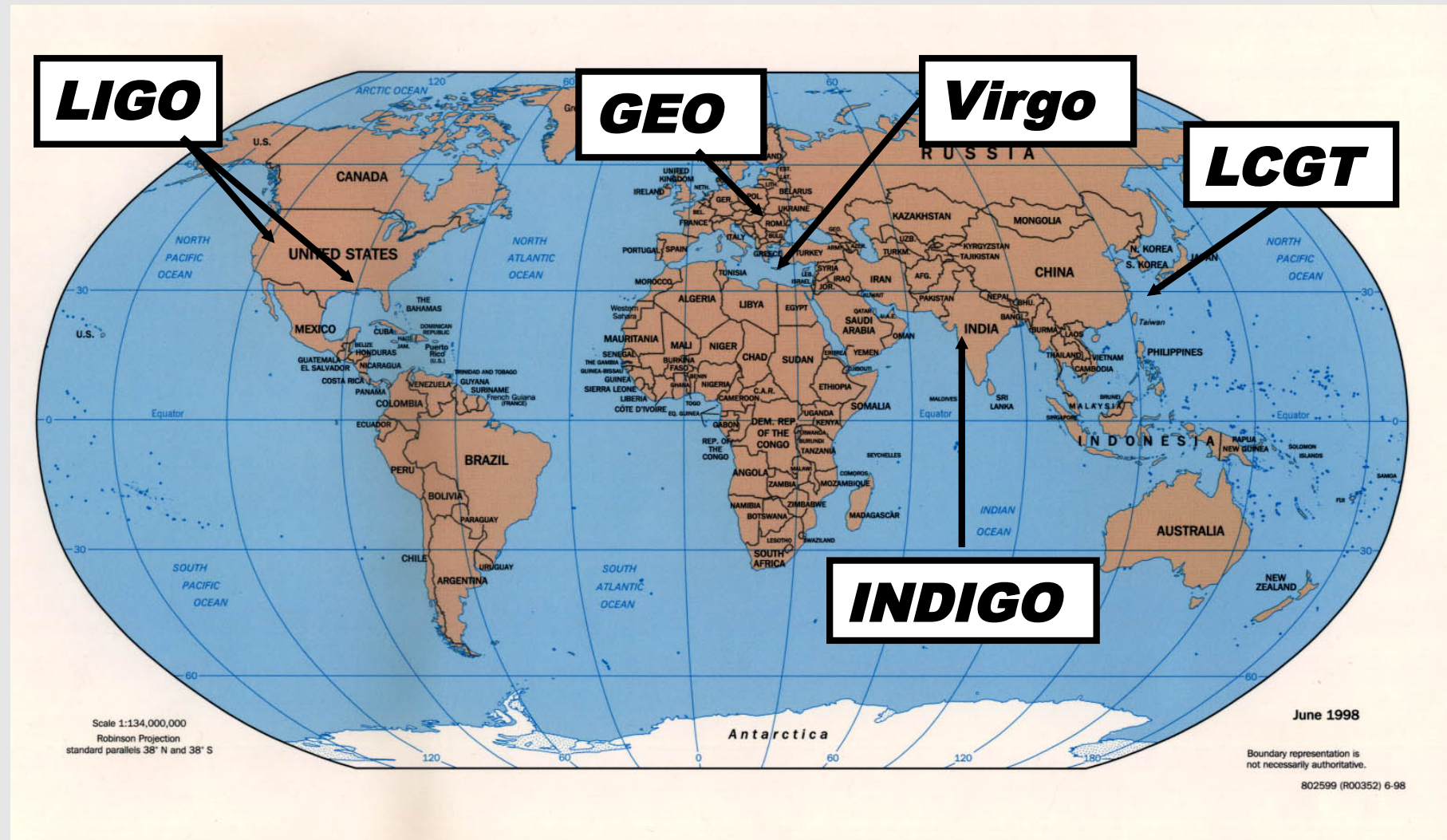
Tecnica delle Linee di Ritardo Ottiche



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

Antenne a Terra

Rivelazione simultanea degli eventi gravitazionali dalla rete mondiale di antenne



Gli esperimenti in corso ed in preparazione

Virgo collaborazione italo-francese; sito: Cascina (Pisa), Italia, L=3 km. Fabry-Perot con Power Recycling, super attenuatori per estendere la banda a bassa frequenza

LIGO I collaborazione Caltech e MIT (+ L.S.C.), 2 siti → Hannford (stato di Washington), Livingstone (stato della Louisiana), L=4 km. In corso di preparazione LIGO II.

LCGT collaborazione giapponese; sito:ICRR lab. Nella miniera di in Kamioka, Giappone, L= 3 km, Fabry-Perot con Power Recycling, Sotterraneo, criogenico

In corso di preparazione

GEO collaborazione anglo-tedesca; sito: in prossimità di Hannover, Germania, L=600 m, linee di ritardo ottiche con Power e Signal Recycling

INDIGO collaborazione Indiana,, progetto in corso di definizione, in costruzione una "facility" di R&D

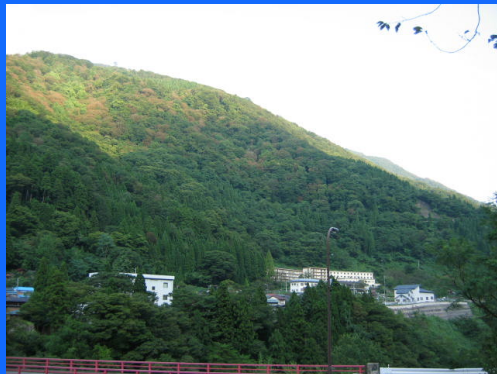
Una ricerca condotta a livello internazionale



GEO600 (British-German)
Hannover, Germany



LIGO (USA)
Hanford, WA and Livingston, LA



LCGT (Japan)
Kamioka



INDIGO (India),
R&D activity for a 4km Interferometer



VIRGO (French-Italian)
Cascina, Italy

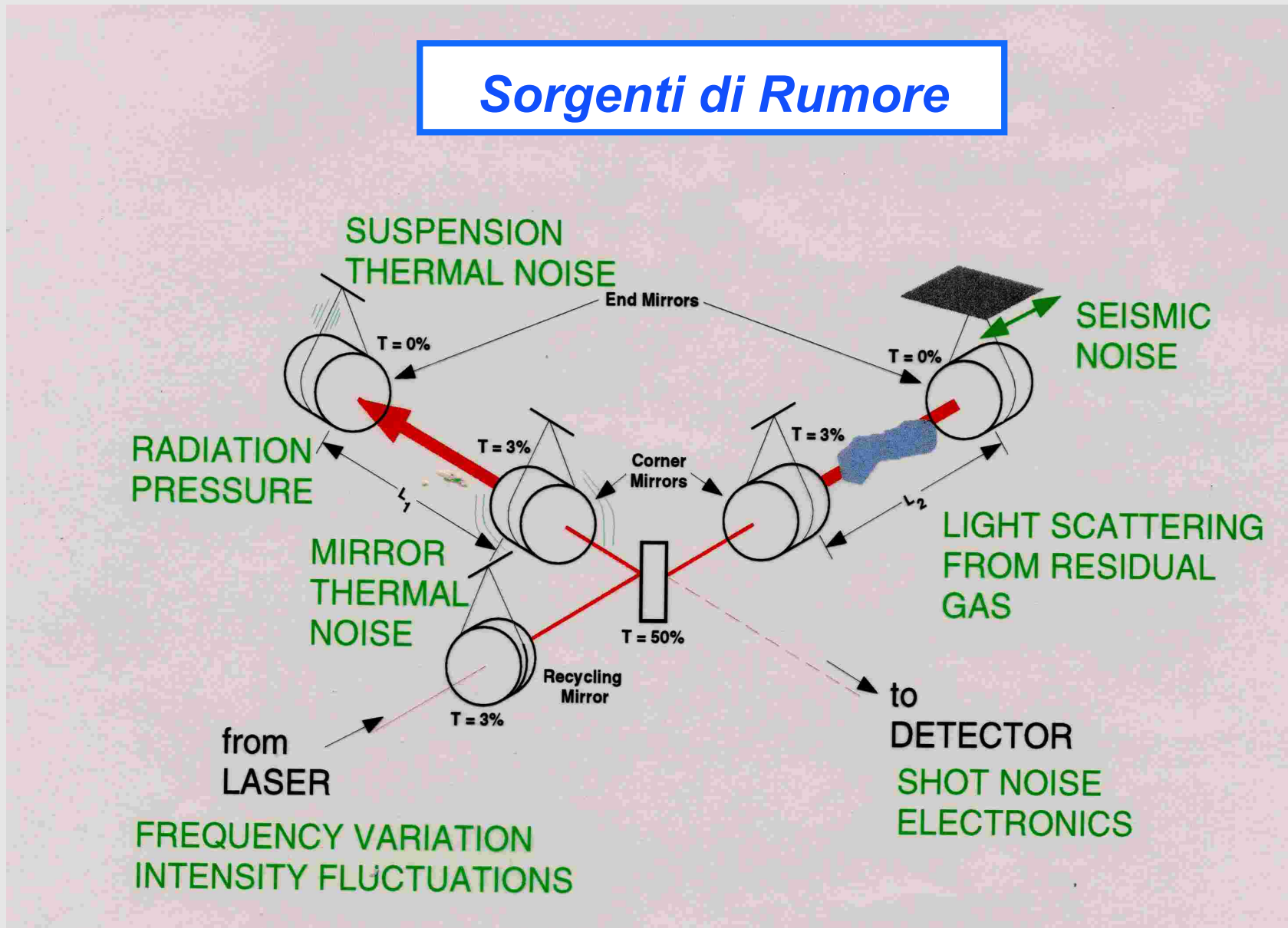
Interferometri con bracci di 3- 4 km e cammini ottici di 50-100 km



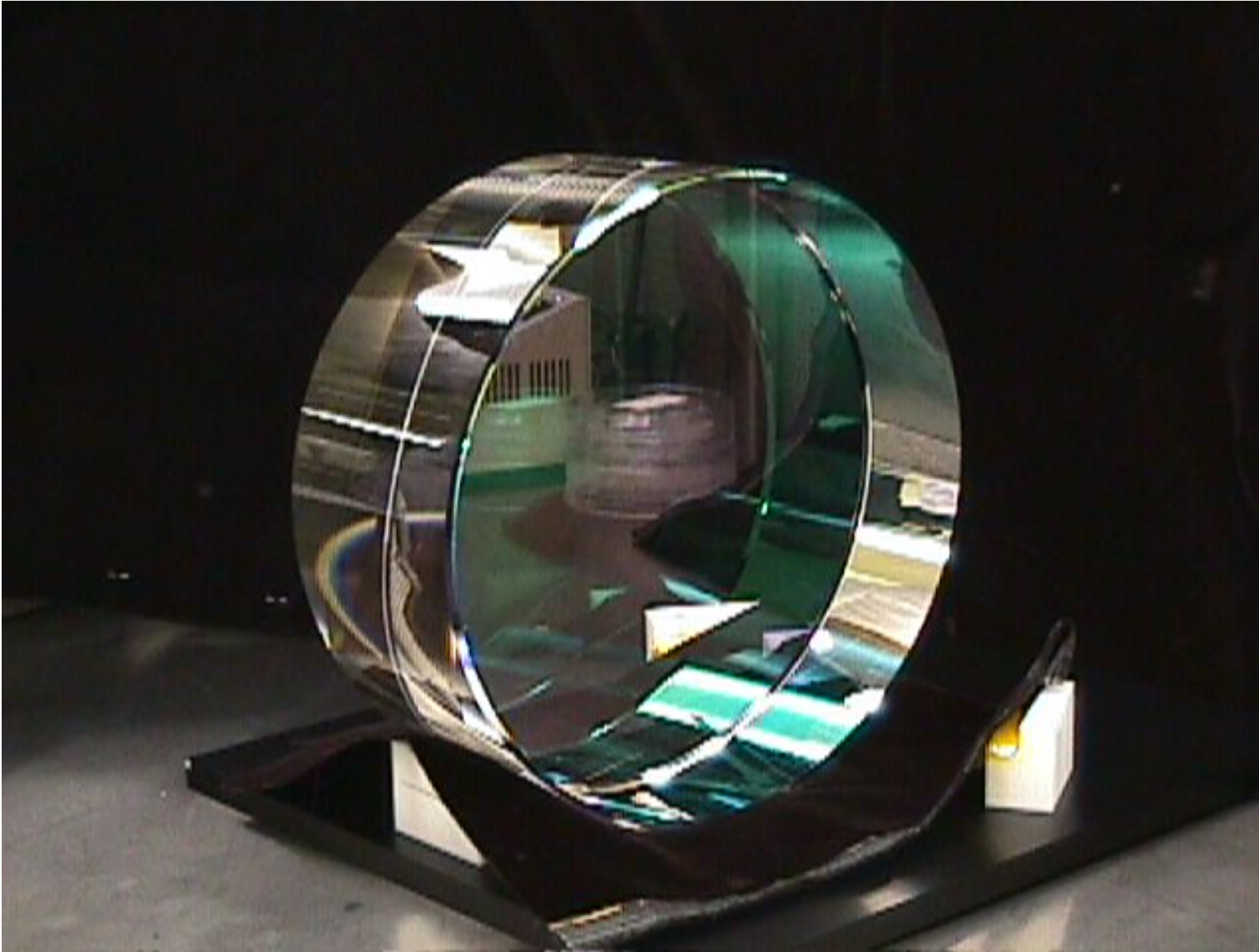
collaborazione italo -francese INFN -CNRS

Il segnale è $\Delta L \sim 100 \text{ km} * 10^{-21} = 10^{-16} \text{ m}$, quindi è fondamentale limitare tutte le sorgenti di rumore dell'interferometro.

Sorgenti di Rumore



OTTICA: gli specchi

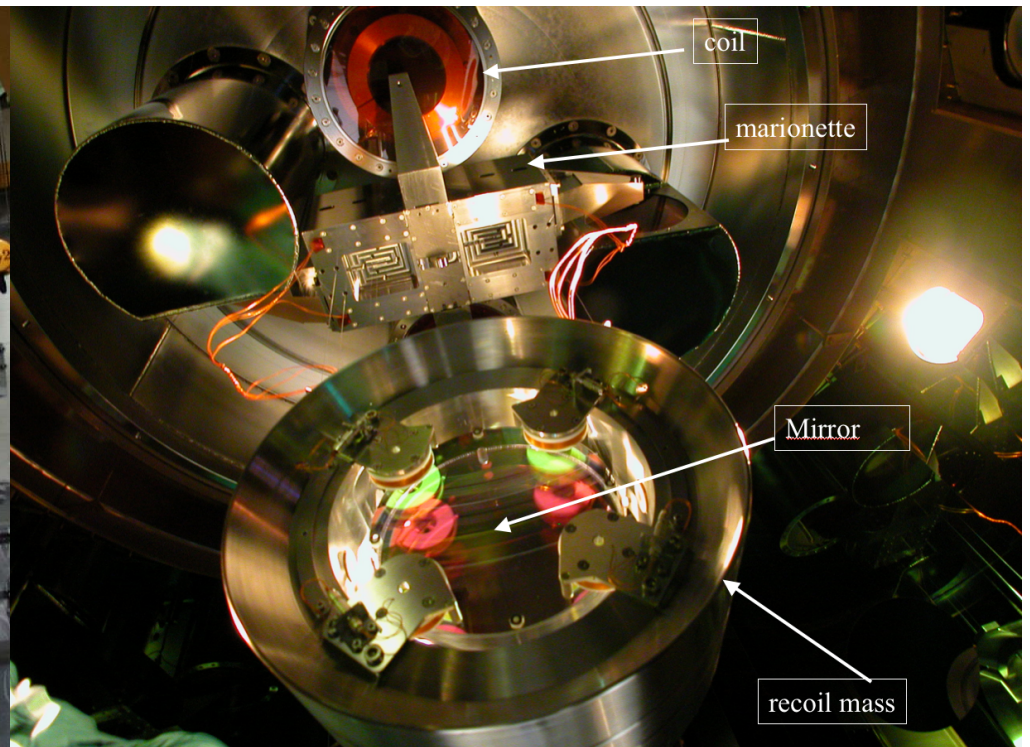
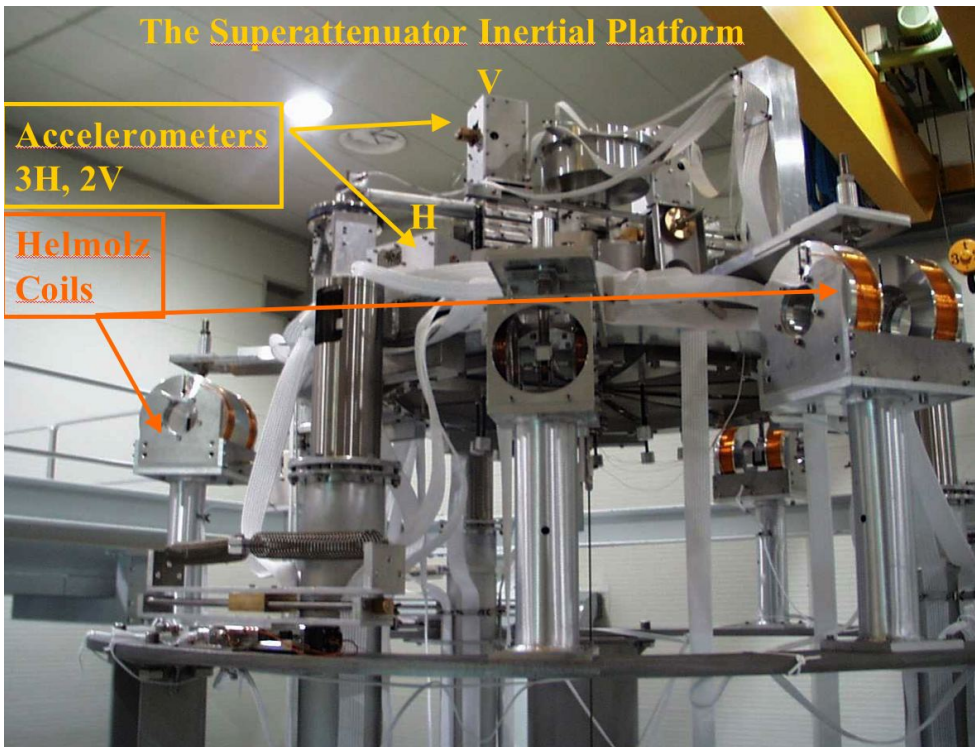


Substrato: SiO₂

**35 cm di
diametro,
10 cm
spessore**

**Omogeneità <
5 x 10⁻⁷**

**Uniformità
della
superficie
< 1 10⁻⁹ m**

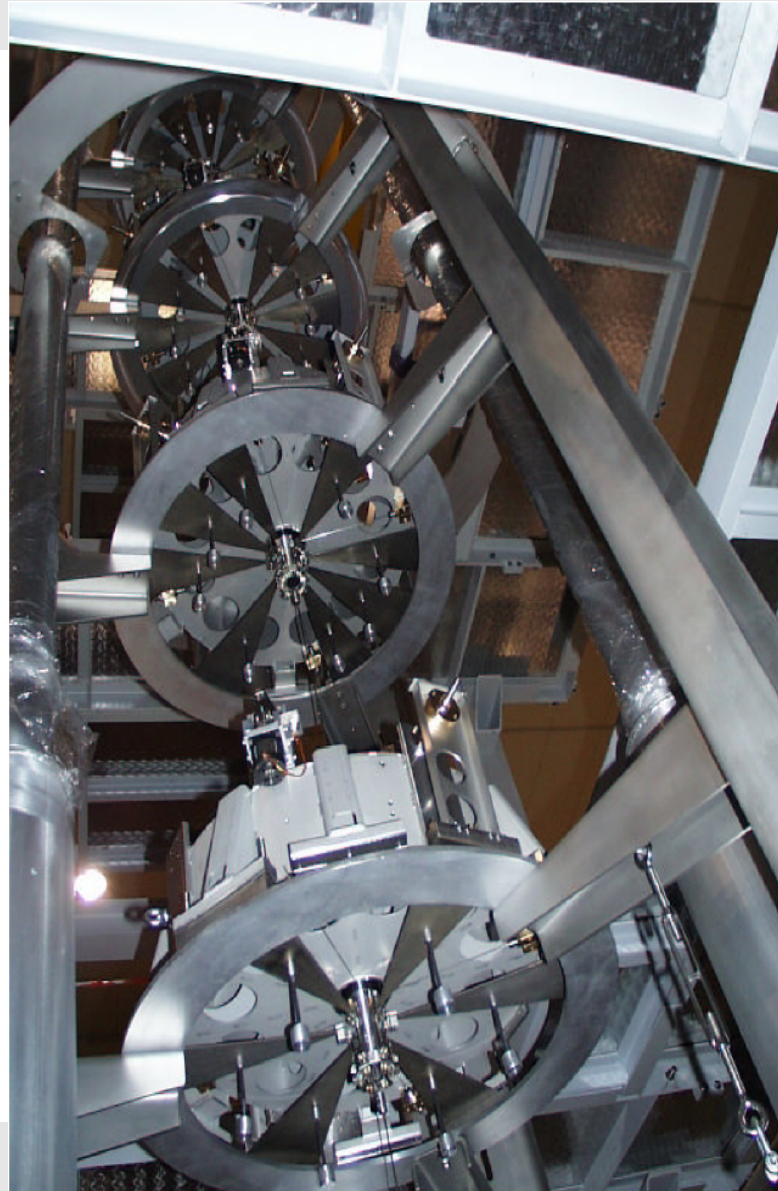
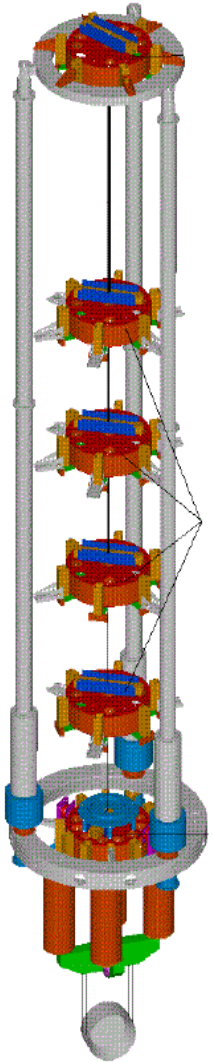


suspended to a Superattenuator



Riduzione del rumore sismico

Riduzione della Luce Diffusa: il Vuoto



L'INTERFEROMETRIA e le ONDE GRAVITAZIONALI

L'Onda Gravitazionale investe tutta la Terra

e

le antenne la rivelano in coincidenza

I vari rivelatori, una volta in funzione, saranno in grado di confrontare i loro dati. Una rivelazione simultanea da parte di più osservatori lontani è necessaria per una sicura identificazione di un'onda gravitazionale, per discriminare effetti locali che possono simulare l'arrivo dell'onda.



Da questo studio congiunto sarà possibile determinare con precisione la direzione delle sorgenti di onde gravitazionali e farne le prime carte. Nascerà così l'astronomia a Onde Gravitazionali, un nuovo occhio aperto verso l'universo.

UNO SGUARDO ALLA SENSIBILITÀ

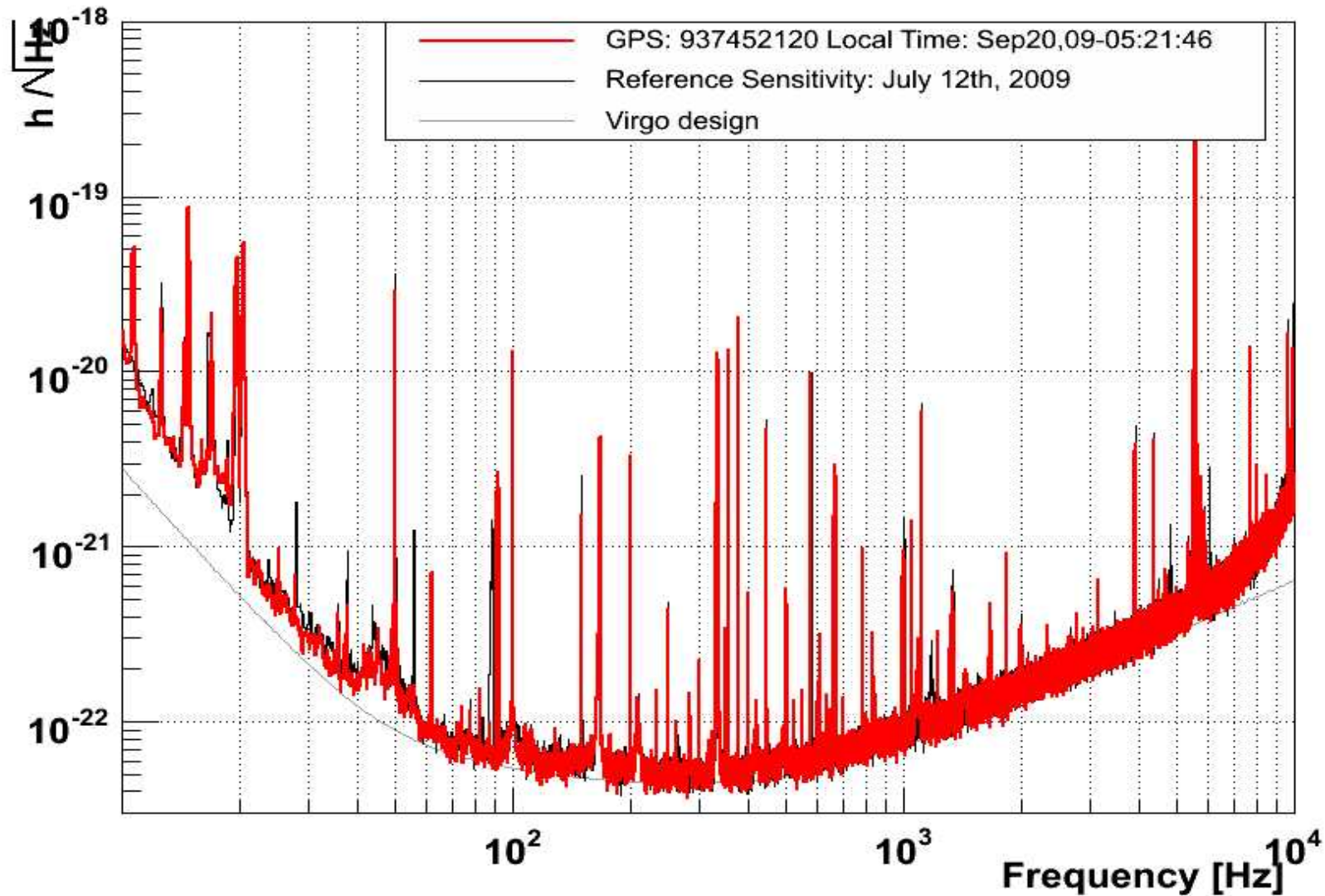
Binaria coalescente nel Virgo Cluster:

$M \sim 1.4 M_{\odot}$,

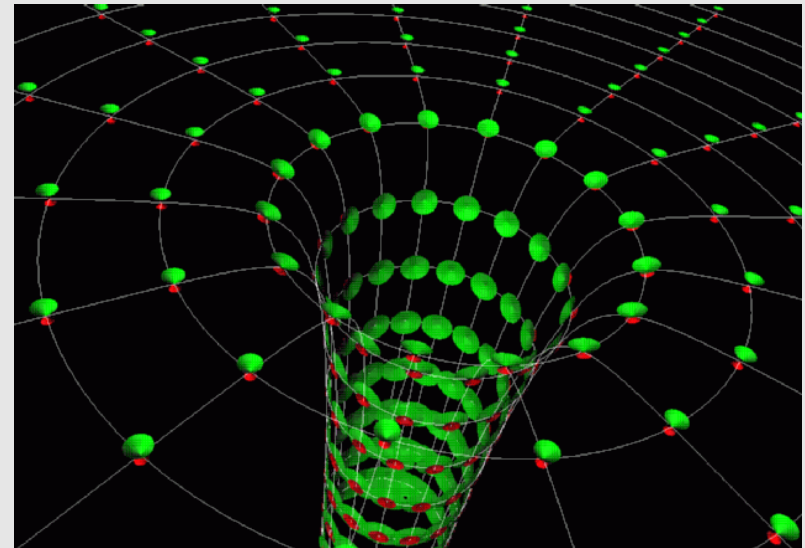
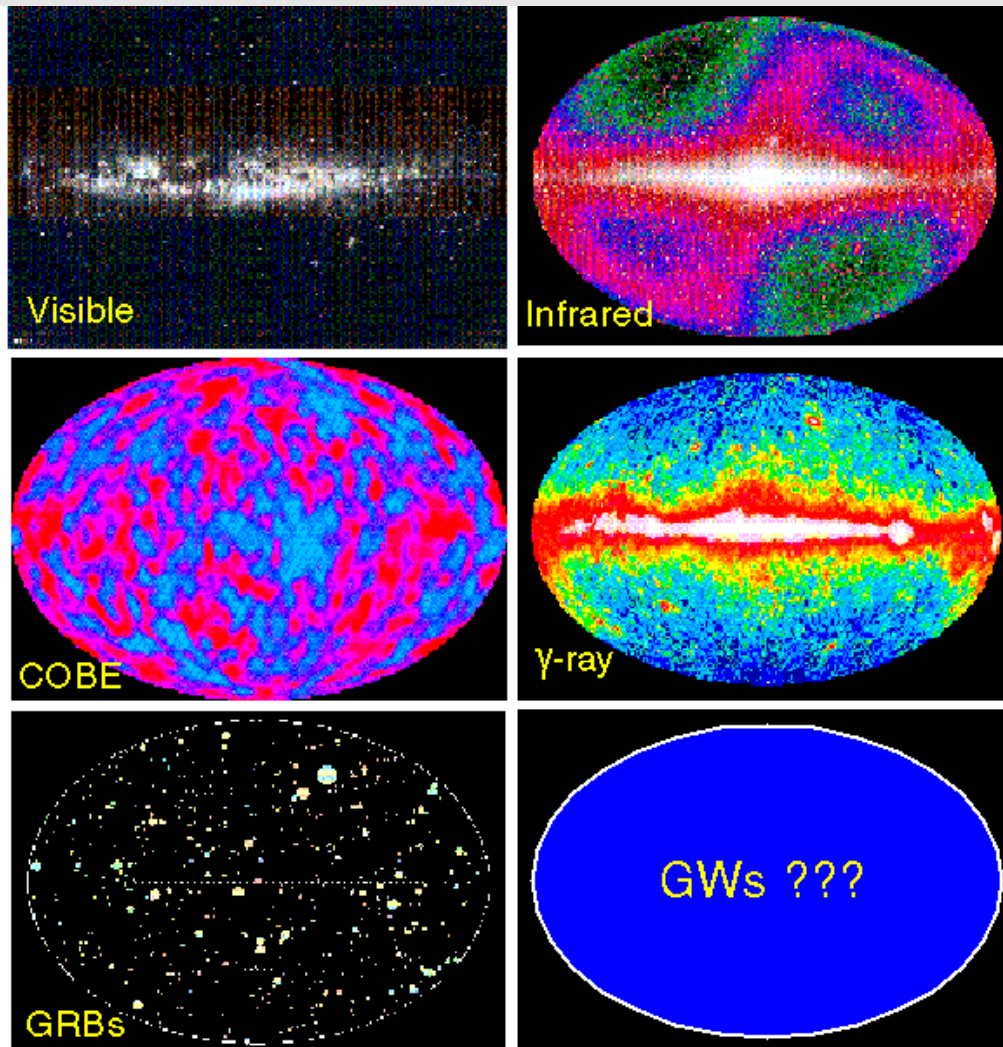
$R \sim 20 \text{ km}$,

$f \sim 400 \text{ Hz}$,

$r \sim 15 \text{ Mpc}$



Una Nuova Finestra sull'Universo



Le Onde Gravitazionali