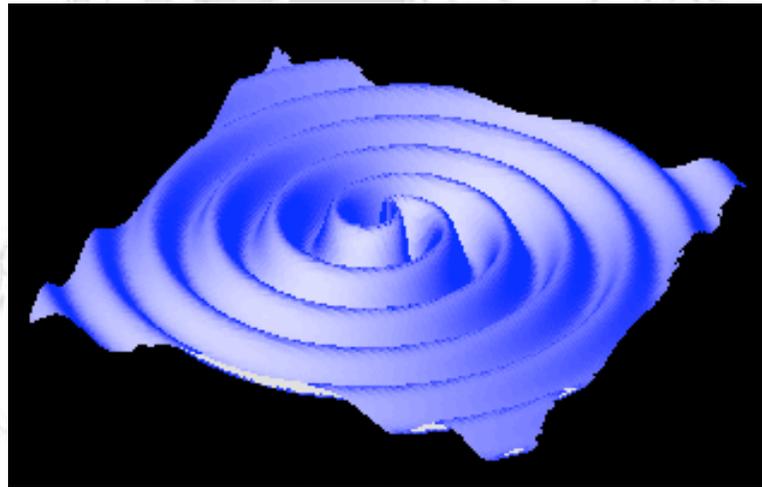


La teoria della Relatività e le Onde Gravitazionali

Un nuovo modo di guardare l'Universo

Viviana Fafone

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



UNIVERSITA' degli STUDI di ROMA
TOR VERGATA



Meccanica newtoniana .1.

- Sistemi di riferimento inerziali
 - scelto un sistema di coordinate K in cui le leggi della fisica abbiano una forma ben definita, le stesse leggi devono valere in qualunque altro sistema di coordinate K' che si muova con una traslazione uniforme rispetto a K (**principio di relatività classico**)
 - un sistema di riferimento si dirà inerziale quando si trovi in riposo nello spazio assoluto o in stato di moto uniforme rispetto allo spazio assoluto.

- Lo spazio e il tempo sono assoluti
 - *Philosophiae naturalis principia mathematica* (1685): “Lo spazio assoluto, per quel che concerne le sue proprietà, non ha nulla a che vedere con le condizioni esterne: esso mantiene per sempre la sua regolarità e similitudine.... Il tempo assoluto, puro e matematico....fluisce senza essere condizionato da qualunque fattore esterno”.
- lo spazio, il tempo e le “condizioni esterne” sono mutuamente indipendenti

Meccanica newtoniana .2.

- La descrizione dei corpi materiali si basa sul concetto teorico fondamentale di punto materiale, o particella.
- La materia è considerata discontinua a priori
- L'azione reciproca dei punti materiali è un'azione “a distanza”
- Legge di gravitazione universale:

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

- Scoperta di Nettuno (Le Verrier e Adams 1846 - perturbazioni nell'orbita di Urano)

Verso una nuova teoria

- Critica: concetto di spazio assoluto

-Leibniz (1646-1716) e Berkeley (1685-1753): non vi è alcuna necessità filosofica di introdurre un concetto di spazio prescindendo dalla materia che in esso è contenuta

- Critica: forze fittizie

La comparsa di forze “fittizie” o inerziali deve essere collegata ad un sistema accelerato. Newton riteneva che l’esistenza di uno spazio assoluto rendesse possibile definire un’accelerazione assoluta

- Mach (1838-1916)

- L’inerzia di un corpo e le forze inerziali sono dovute all’interazione con la materia dell’universo (principio di Mach 1883)
- Non solo i moti uniformi sono relativi, ma anche quelli accelerati, poichè non esiste un’accelerazione assoluta rispetto allo spazio assoluto

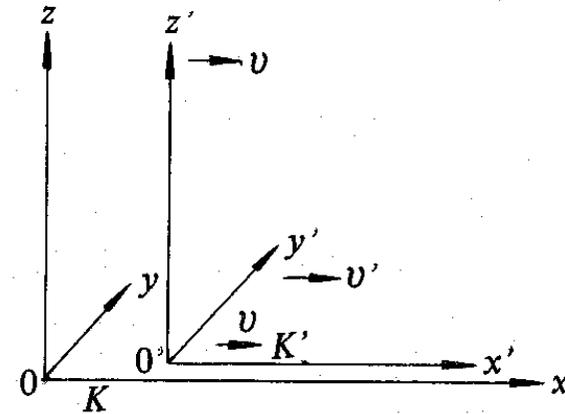
Verso una nuova teoria

- Maxwell (*Treatise on electricity and magnetism* 1873) introduce il concetto di **campo**: le leggi dell'elettrodinamica trovano la loro espressione naturale nelle equazioni differenziali dei campi elettrico e magnetico.
 - Queste equazioni implicano l'esistenza di onde che si propagano a velocità finita, le cui proprietà corrispondono a quelle della luce, così come erano note a quel tempo.
 - Le forze elettromagnetiche si propagano a velocità finita
- Trasformazioni di Lorentz:
 - Le equazioni di Maxwell per lo spazio vuoto rimangono invariate se le coordinate spaziali e il tempo sono soggetti a un tipo particolare di trasformazioni lineari, le trasformazioni di Lorentz (“covarianza” rispetto alle trasformazioni di Lorentz).
 - Mettono in relazione sistemi di riferimento in moto rettilineo uniforme
 - Furono formulate come puro strumento matematico

Trasformazioni di Lorentz

Variabili spaziale e temporale mescolate tra loro: spazio e tempo confluiscono in nuova entità: **spazio-tempo**

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$
$$y' = y$$
$$z' = z$$
$$t' = \frac{t - \frac{v}{c^2}x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



- Nel limite di c tendente ad infinito si riducono alle trasformazioni della meccanica classica
- Nuova legge di composizione delle velocità

$$V = \frac{V' + v}{1 + \frac{V'v}{c^2}}$$

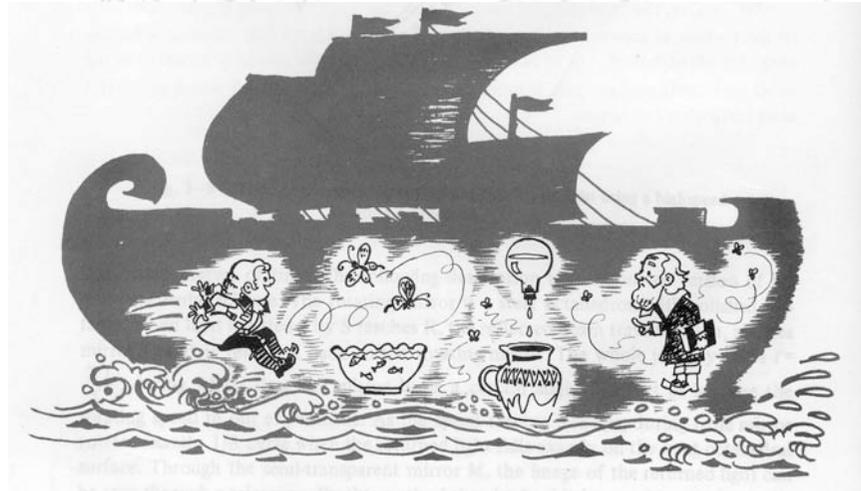
- La luce non obbedisce alla legge classica di composizione delle velocità (e' indipendente dalla velocità dell'oggetto che la emette)
 - Ipotesi dell'etere ed esperimento di Michelson-Morley (fine '800)
- Lorentz credeva ancora nell'ipotesi dell'etere: il risultato nullo dell'esperimento di Michelson-Morley non fu considerato una prova della non esistenza dell'etere.

La teoria della relatività speciale

- Einstein “Sull’elettrodinamica degli oggetti in movimento” (1905):
 - le leggi della natura sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento che si muovono con velocità costante uno rispetto all’altro (**principio di relatività**)
 - La velocità della luce nel vuoto e’ costante, indipendentemente dal moto della sorgente luminosa (**costanza della velocità della luce**)
 - **speciale** significa aver scelto una classe speciale di sistemi di riferimento, quelli inerziali e una classe speciale di trasformazioni lineari, quelle di Lorentz.
 - “la relatività speciale non si discosta dalla meccanica classica tramite il postulato di relatività, ma tramite quello della costanza della velocità della luce nel vuoto”.

Principio di relatività - Galilei

(Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo 1632)



...Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animalletti volanti; siavi anco un gran vaso d'acqua, e dentrovi de' pescetti; sospendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vada versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso; e stando ferma la nave, osservate diligentemente come quelli animalletti volanti con pari velocità vanno verso tutte le parti della stanza; i pesci si vedranno andar notando indifferentemente per tutti i versi; le stille cadenti entreranno tutte nel vaso sottoposto; e voi, gettando all'amico alcuna cosa, non più gagliardamente la dovrete gettare verso quella parte che verso questa, quando le lontananze sieno uguali; e saltando voi, come si dice, a piè giunti, eguali spazii passerete verso tutte le parti. ...fate muover la nave con quanta si voglia velocità; chè (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là) voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, nè da alcuno di quelli potrete comprender se la nave cammina oppure sta ferma.

- Effetti della relatività speciale:

- Contrazione delle lunghezze

Corpi in movimento si **contraggono** lungo la direzione del moto (e soltanto lungo questa) !!

$$L = L_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

- Dilatazione dei tempi

Il tempo misurato in due diversi sistemi di riferimento inerziali e' diverso

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

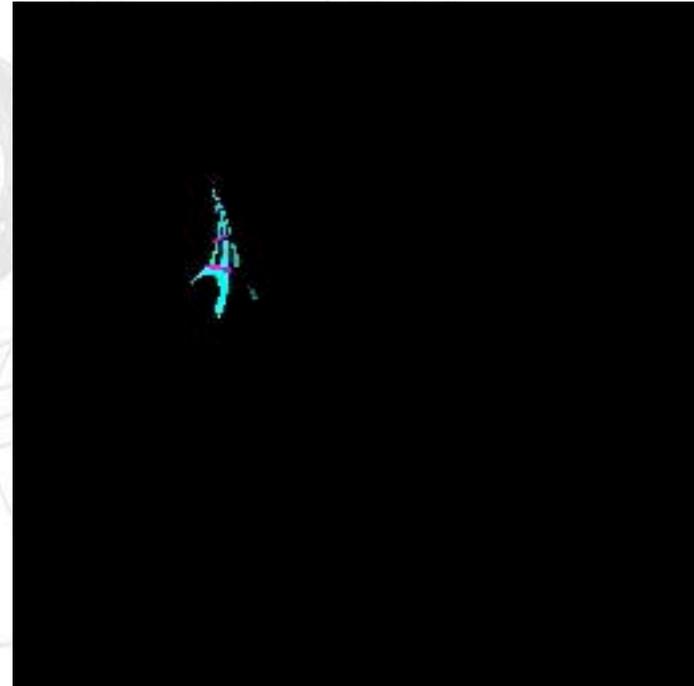
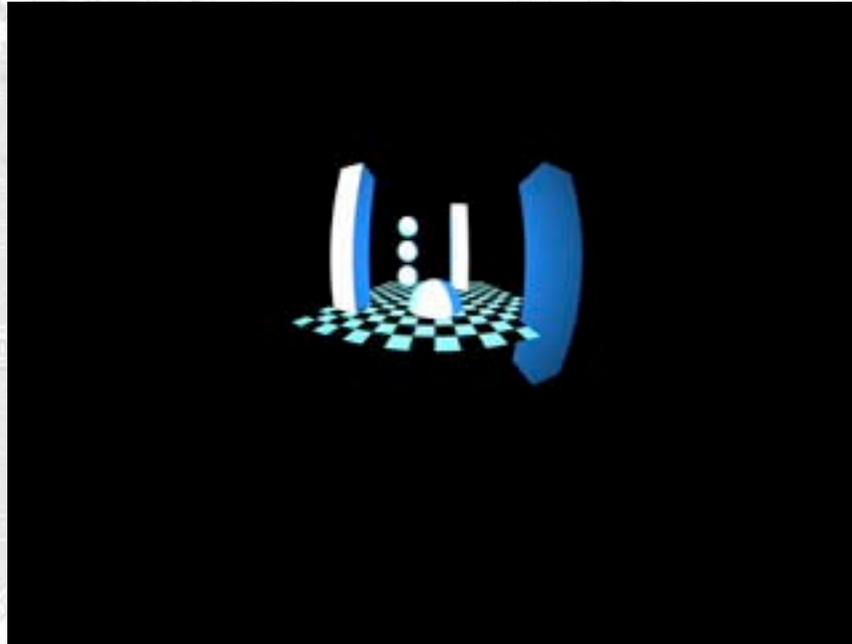
Contrazione delle Lunghezze e Dilatazione dei Tempi



Spazio e Tempo sono elastici !!

L'errore di Mr. Thompkins





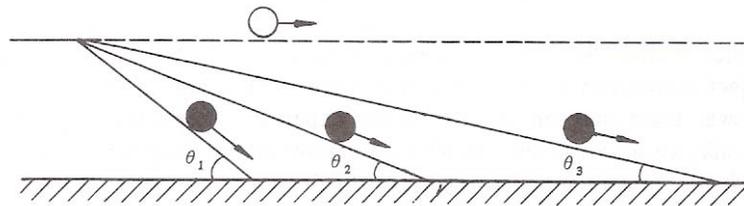
Verso la relatività generale: considerazioni dinamiche

- Perché e come un oggetto si muove?
 - La forza è la causa del moto
- In quale modo la forza determina il moto di un oggetto?

Aristotele (384 a.C.-322 a.C.): la forza determina la velocità di un oggetto in movimento

Galileo: ogni oggetto è dotato di inerzia.

L'inerzia è la tendenza innata di un corpo a rimanere nel suo stato di moto originario. Esperimento del piano inclinato.



Quando la forza tende a zero, la palla prosegue il suo moto con velocità costante

Legge di inerzia: un oggetto in assenza di forze esterne applicate, mantiene per sempre il suo stato di moto; la sua velocità non può né aumentare, né diminuire.

Verso la relatività generale: considerazioni dinamiche

- Newton introdusse il concetto di accelerazione
 m_i e' la massa inerziale

$$F = m_i a$$

	relation between force and motion	equation
Aristotle	force determines velocity	v is the function of f
Galileo	inertia maintains uniform motion	When $f=0$, v is constant
Newton	force determines acceleration	$a=f/m$

Verso la relatività generale: massa inerziale e massa gravitazionale

- Seconda legge della meccanica di Newton $F = m_i a$
- Legge della gravitazione universale di Newton

$$F = G \frac{m_g M}{r^2}$$

- Accelerazione di un corpo in caduta libera

$$a = \frac{m_g}{m_i} \left(\frac{GM}{r^2} \right)$$

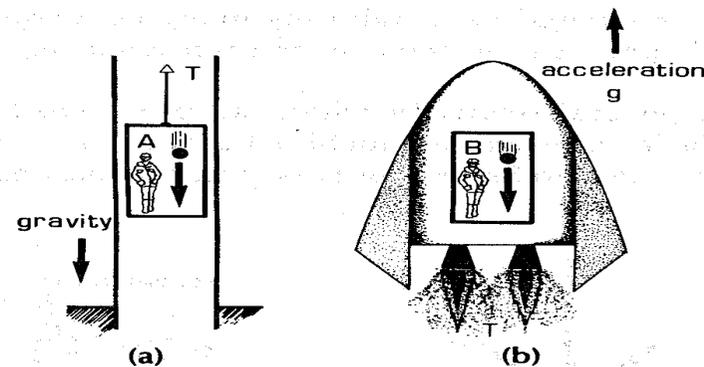
- Esperimento di Galilei: tutti gli oggetti cadono con la stessa accelerazione gravitazionale
- m_g/m_i e' una costante universale indipendente dalle proprietà dell'oggetto

Verso la relatività generale: massa inerziale e massa gravitazionale

- Spesso in fisica la scoperta di una costante universale ha portato allo sviluppo di un'intera nuova teoria
 - c --> relatività ristretta
 - h --> meccanica quantistica
 - m_g/m_i --> teoria della gravitazione

Einstein scrisse: “...nel campo gravitazionale tutti gli oggetti hanno la stessa accelerazione. Questa legge può anche essere capita come la legge di equivalenza tra massa inerziale e massa gravitazionale. ... mi impressiono' a causa delle sue importanti implicazioni. Mi sono stupito della sua esistenza, e intuì che dovesse contenere la chiave per approfondire la nostra conoscenza dell'inerzia e della gravitazione.”

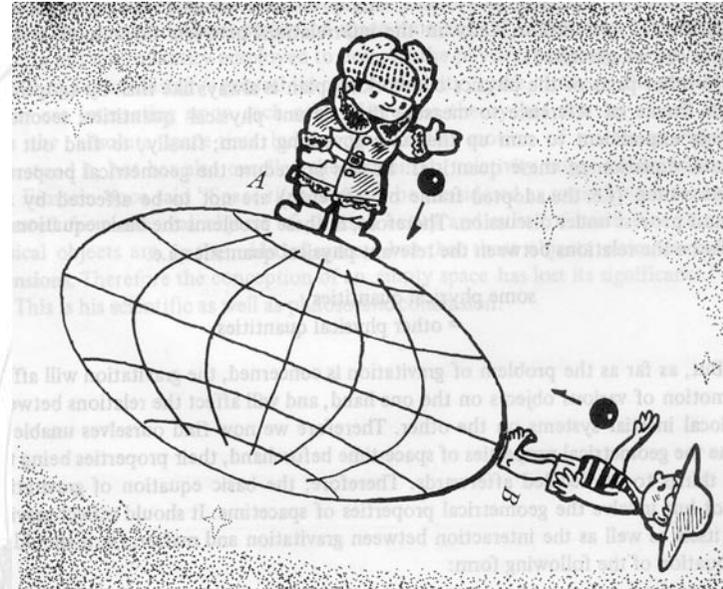
Esperimento dell'ascensore di Einstein



- **principio di equivalenza di Einstein**: non esiste modo di distinguere tra gli effetti di un campo gravitazionale uniforme e di un'accelerazione costante. O anche: e' sempre possibile trovare un sistema di riferimento in cui si riesce ad eliminare l'effetto della gravita'.

- **ATTENZIONE**

Il campo gravitazionale non e' uniforme

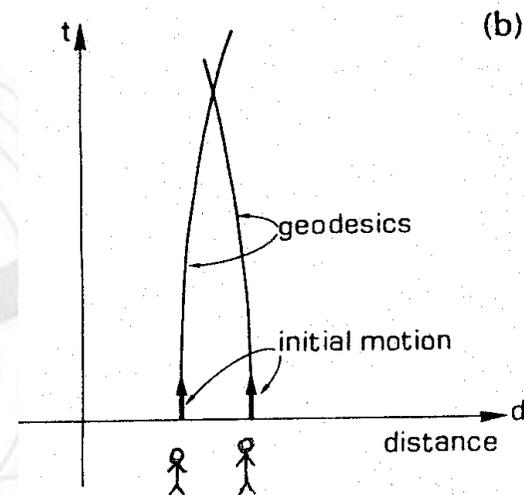


- In generale l'accelerazione gravitazionale cambia da un punto all'altro a seconda di come siano distribuite le masse nell'Universo
- Se la nostra cabina fosse molto grande ci accorgeremmo dell'esistenza di accelerazioni diverse impresse ad oggetti pesanti lontani fra loro

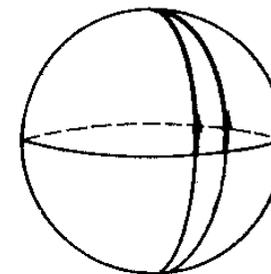
Potremmo allora pensare di limitare la nostra attenzione a fenomeni locali, **usando in pratica una piccola cabina**, dove gli effetti dovuti alle differenze di accelerazione siano trascurabili

Se l'ascensore fosse abbastanza grande, mi accorgerei di essere in presenza di un campo gravitazionale

- I due omini sono in caduta libera in un campo gravitazionale
- Da misure della loro distanza vedono che questa diminuisce -->
- Deve esistere una forza che li attira uno verso l'altro (forza gravitazionale)



- Ma se li facciamo muovere ripetendo l'esperimento in uno spazio curvo, riusciranno a spiegare il loro avvicinamento senza dover introdurre una forza esterna



(b)

L'effetto di un campo gravitazionale e' di incurvare lo spazio (-tempo)

Riassumendo...

- In presenza di un campo gravitazionale, e' impossibile distinguere se un sistema A sia accelerato rispetto ad un altro inerziale.
- Il sistema inerziale puo' essere definito solo localmente e vari sistemi inerziali, definiti in vari punti, possono avere un moto accelerato relativo. Le leggi della fisica devono rimanere invariate spostandoci da uno all'altro di questi sistemi di coordinate.
- L'insieme dei sistemi di coordinate "permessi" deve essere ampliato → espresso in termini piu' formali questo vuol dire che, per spiegare l'identita' tra massa inerziale e massa gravitazionale, il gruppo delle trasformazioni di Lorentz deve essere ampliato.

- Il nuovo gruppo di trasformazioni e' il gruppo di tutte le trasformazioni continue delle coordinate.
- Le equazioni che esprimono le leggi di natura devono essere invarianti rispetto a tutte le trasformazioni continue delle coordinate (**principio della relativita' generale** 1915).
- Secondo la relatività generale, il concetto di spazio separato da ogni contenuto fisico non esiste.
- La realtà fisica dello spazio e' rappresentata da un "campo", la metrica, descritto da funzioni continue di quattro variabili indipendenti: le coordinate dello spazio e del tempo.
- Qual'e' l'equazione che lega il campo gravitazionale alla materia che lo genera?

Equazione di Einstein

10 equazioni non lineari
nelle incognite $g_{\mu\nu}$
componenti del tensore
metrico $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$

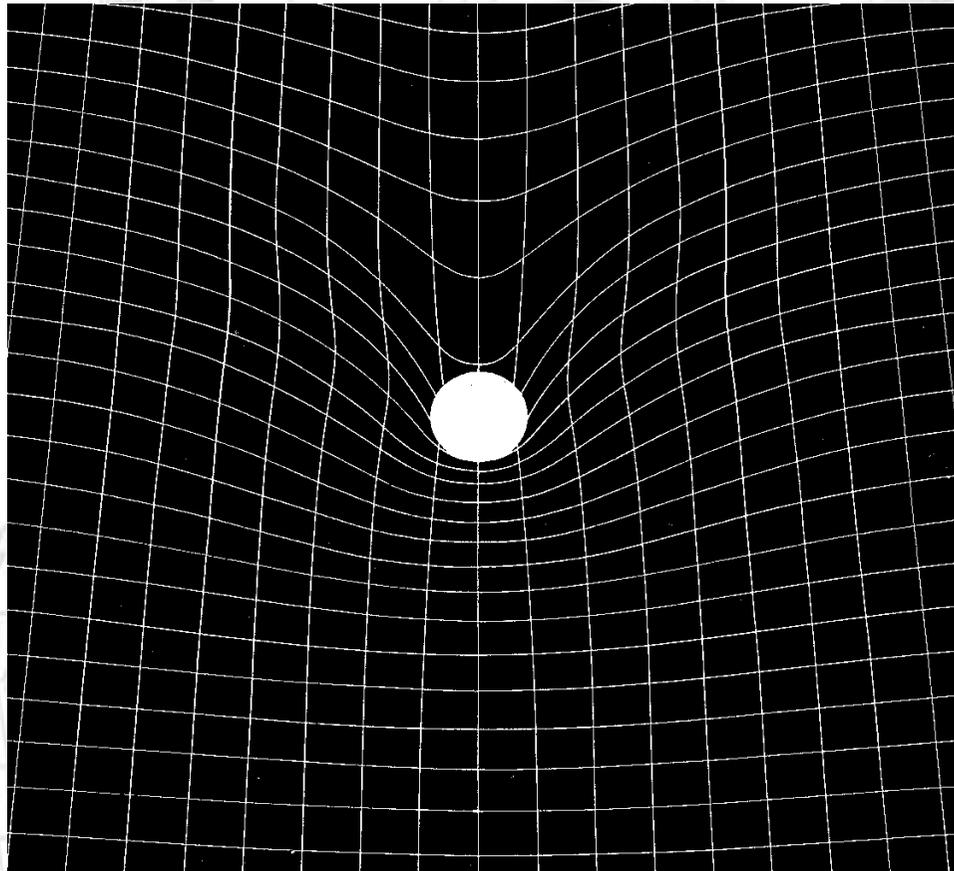
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R \cdot g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^2} T_{\mu\nu}$$

Spazio-tempo **Materia**

- La materia produce la curvatura
- La curvatura determina il moto della materia
- La distribuzione di materia ed il suo moto non possono essere descritti indipendentemente dal campo gravitazionale da essi prodotto
- Cambiamento di curvatura-->cambia la distanza tra due punti nello spazio

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

(J. Wheeler)

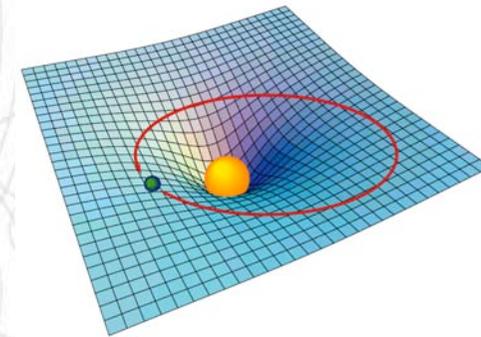


Newton: gravità è una forza



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

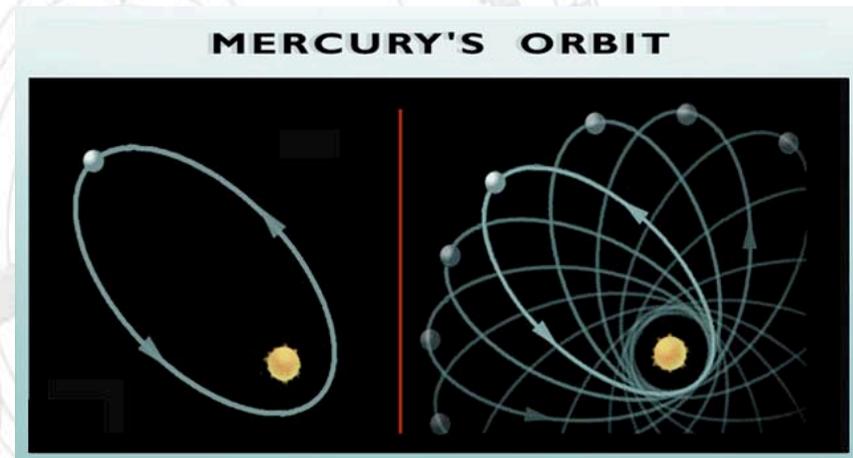
Gravità NON è una forza ma la manifestazione della geometria dello spaziotempo

Alcune verifiche classiche della relatività generale

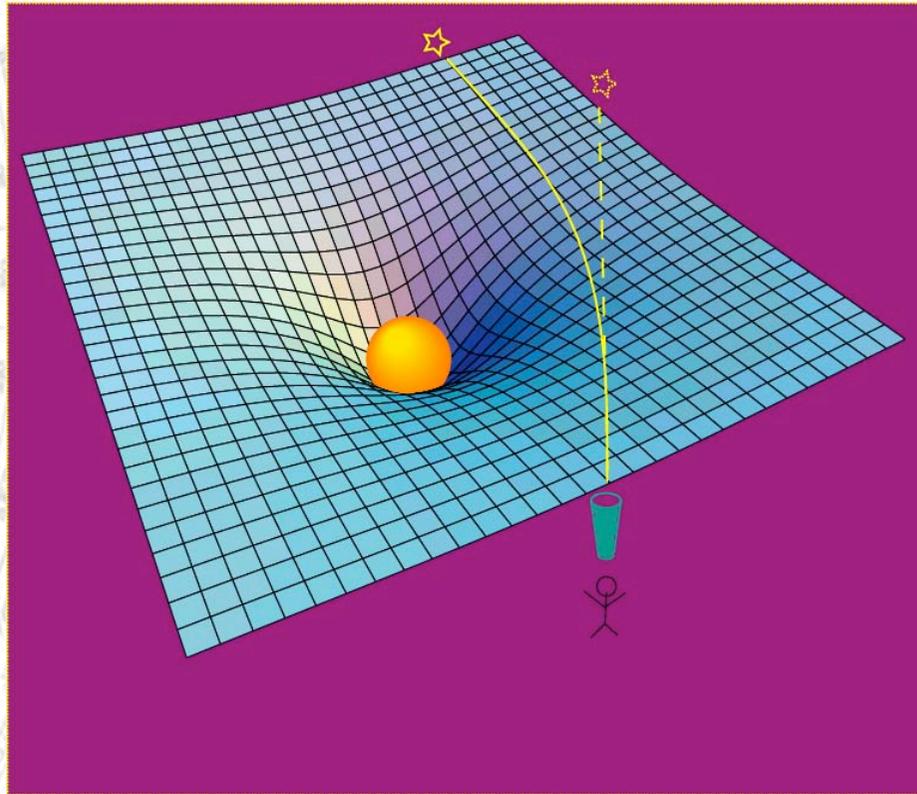
- Precessione del perielio di Mercurio
- Deflessione raggi luminosi

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”.

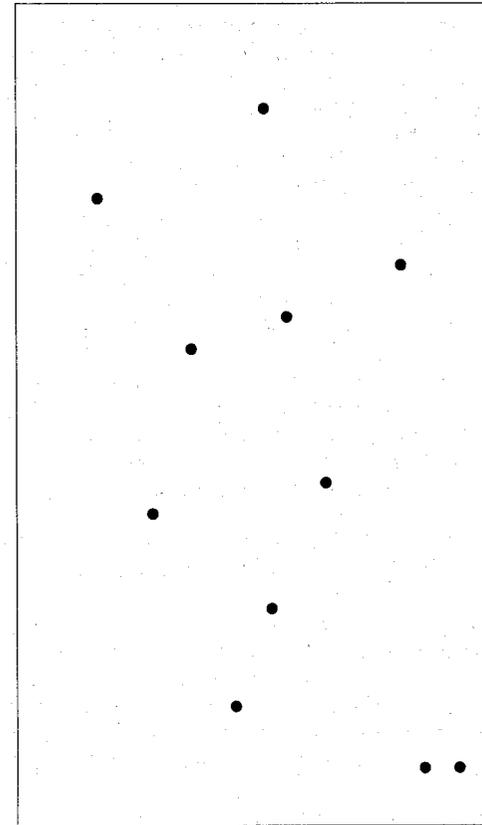
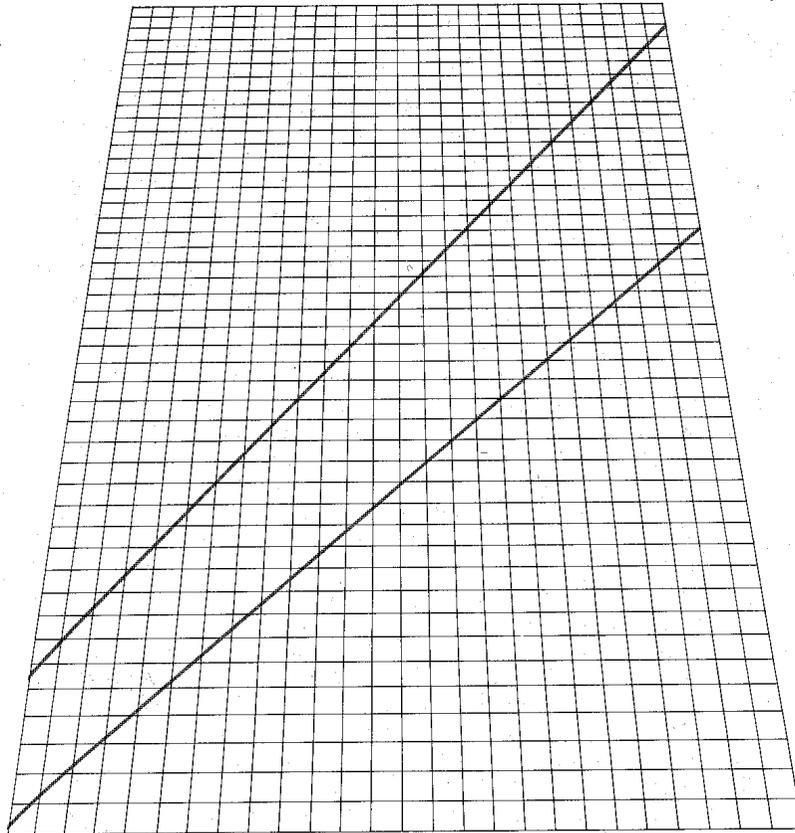


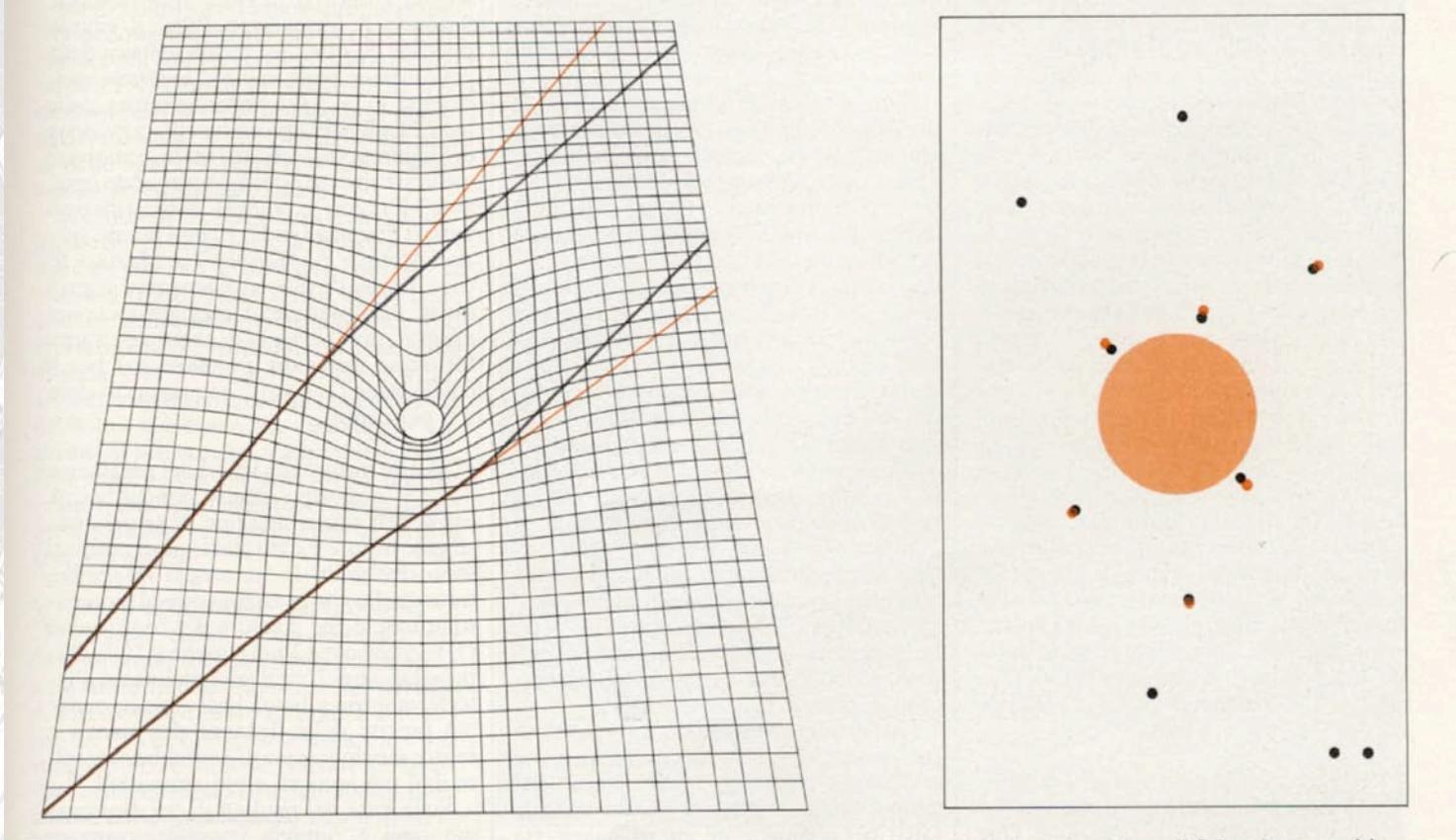
Deflessione dei raggi luminosi



Gravitational Lensing

- Conferma della previsione: Eddington (1919)

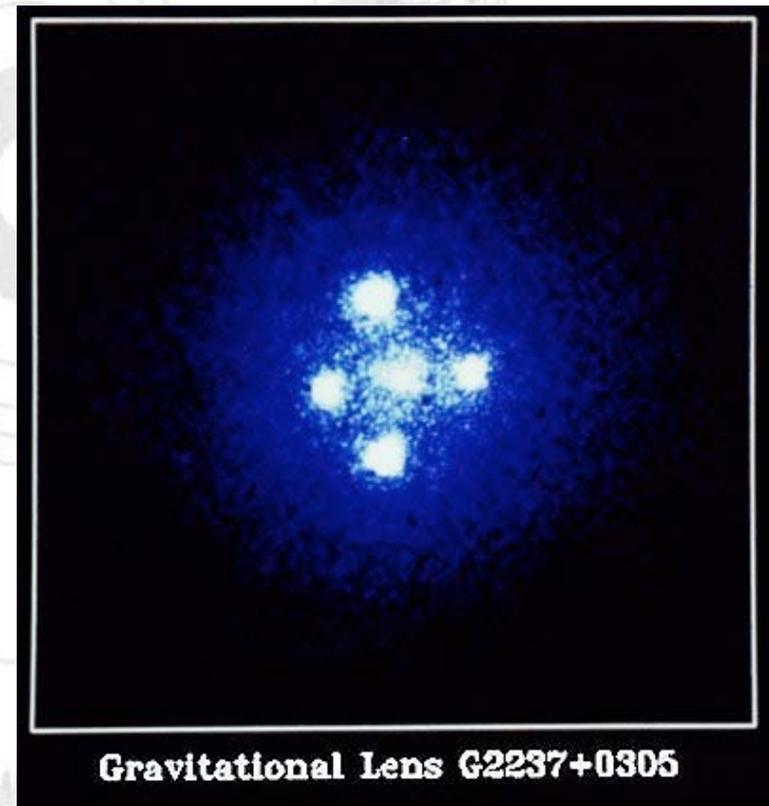




Croce di Einstein

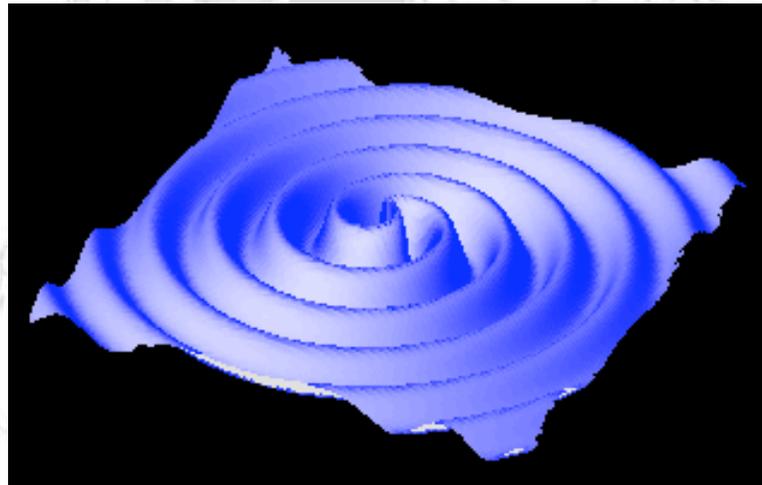
Immagine di un quasar appare “moltiplicata” per la presenza di una galassia che si trova interposta tra la Terra e la posizione del quasar

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



Le onde gravitazionali

- Sono una soluzione delle equazioni di Einstein (nel caso di campo debole)
- 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

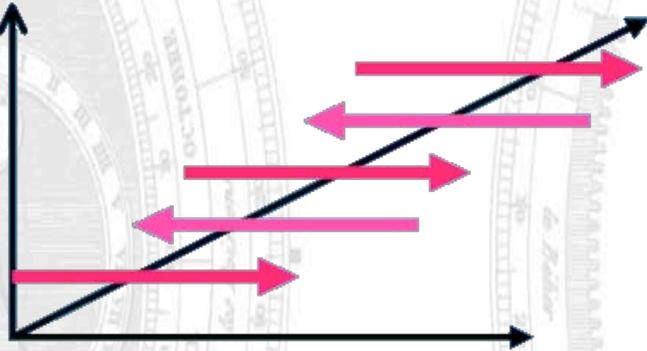


In un'evento di Supernova, a seconda del grado di asimmetria del collasso gravitazionale associato all'esplosione, potrebbe essere emessa energia pari a $\sim 10^{40}$ Joule

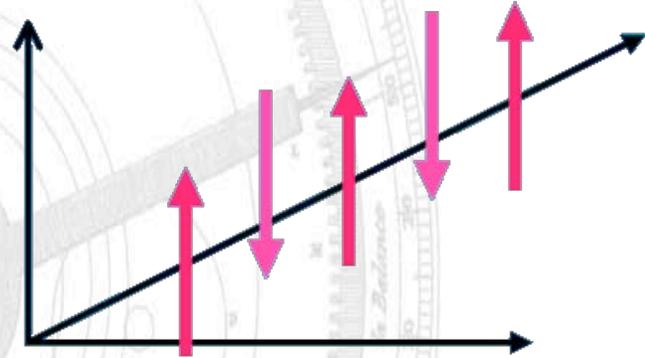
Caratteristiche principali delle O.G.

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

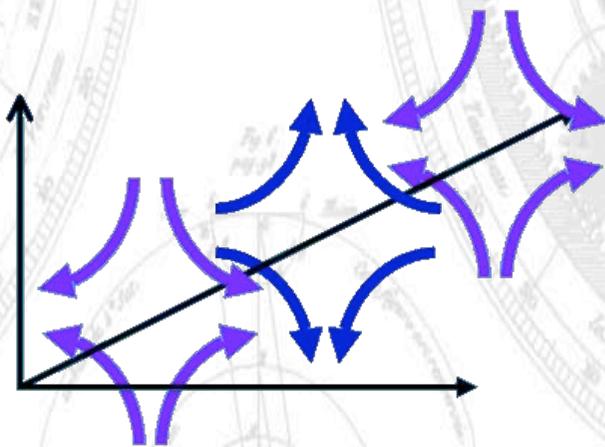
Confronto con le onde elettromagnetiche



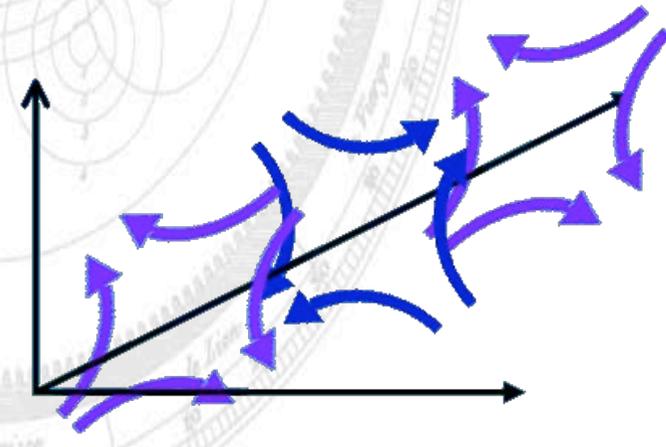
Polarizzazione orizzontale



Polarizzazione verticale

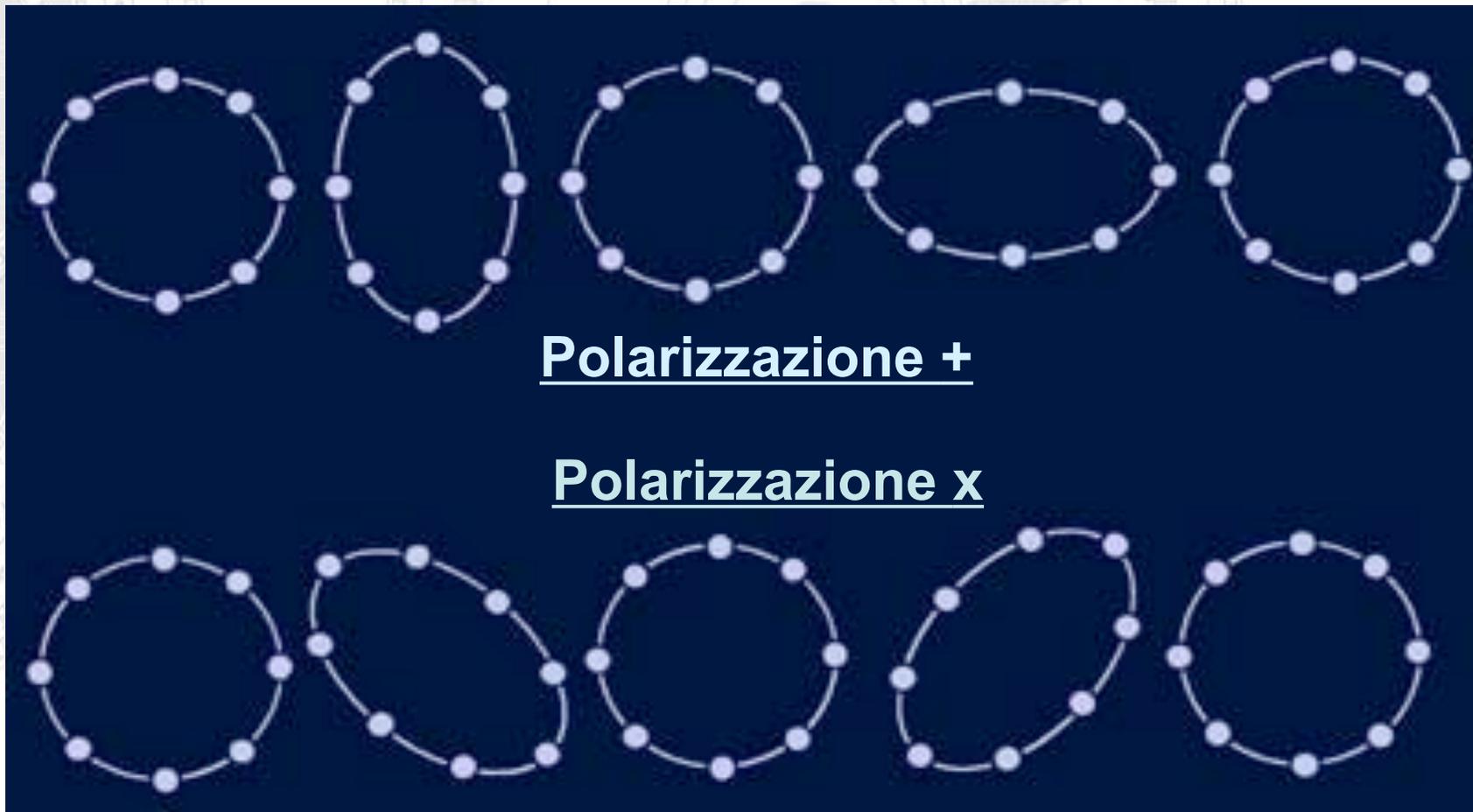


Polarizzazione +



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.

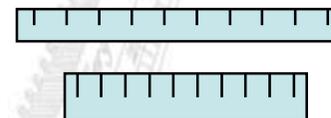


- La variazione δL della distanza L tra due particelle e' proporzionale all'intensità dell'onda gravitazionale

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

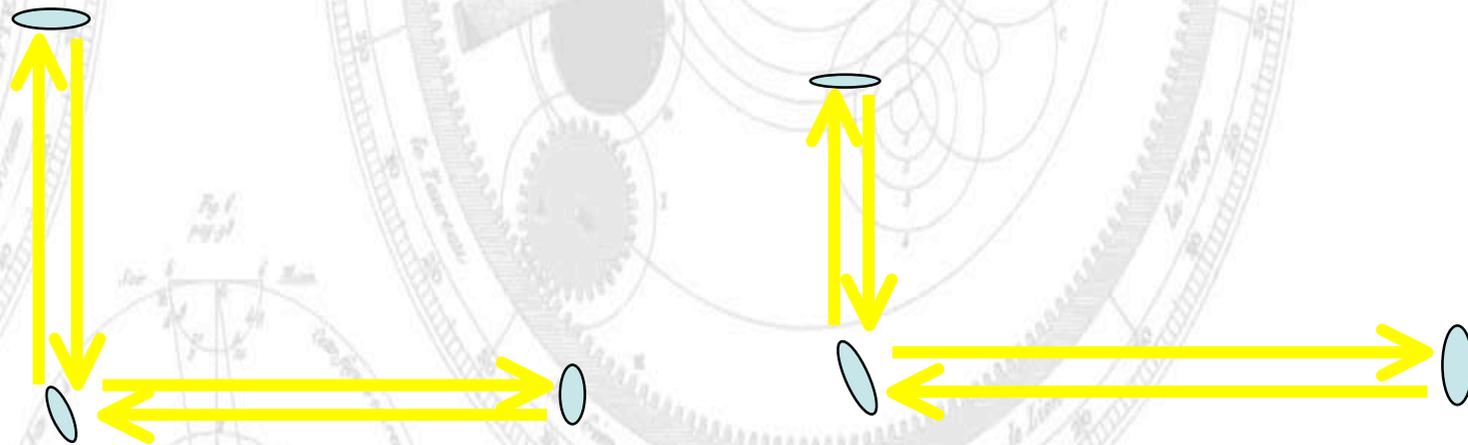
- Come possiamo renderci conto che stanno cambiando le proprietà geometriche dello spazio?

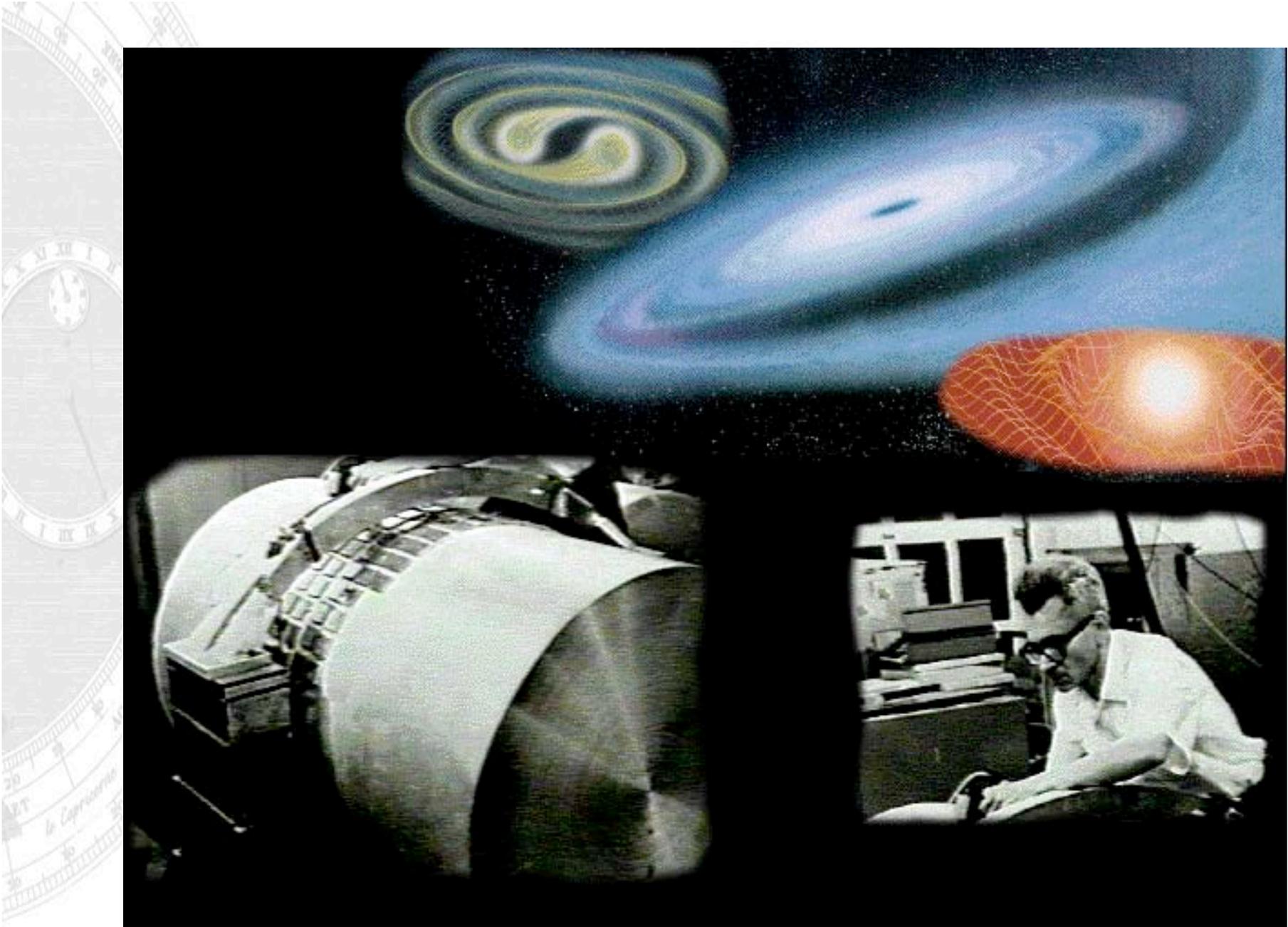
Anche il nostro metro campione si deforma!!



- 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.

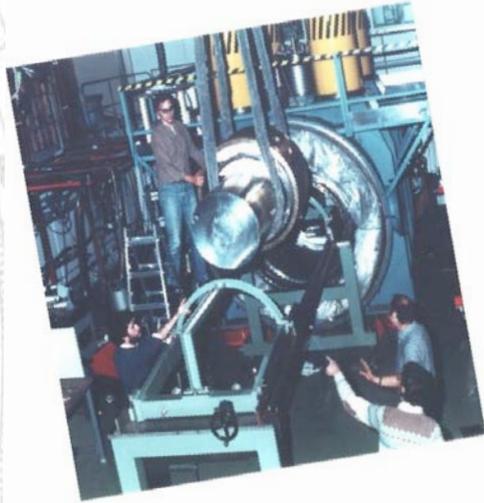
L'Onda Gravitazionale attraversa la Materia senza essere significativamente attenuata.

•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

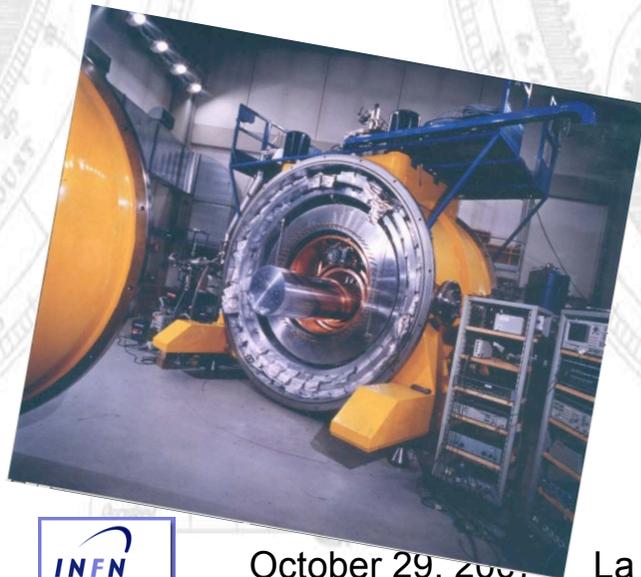


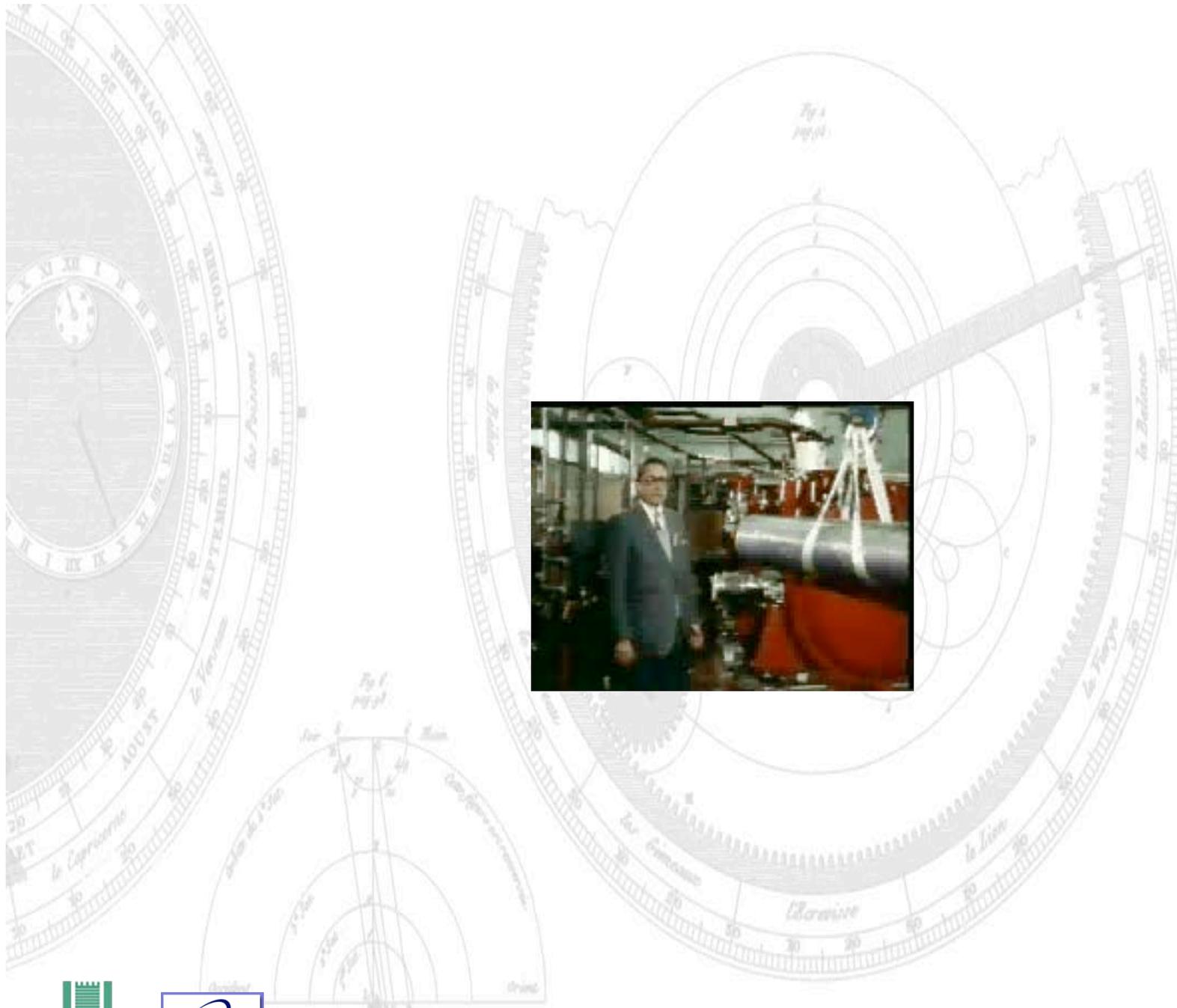
ALLEGRO

AURIGA

EXPLORER

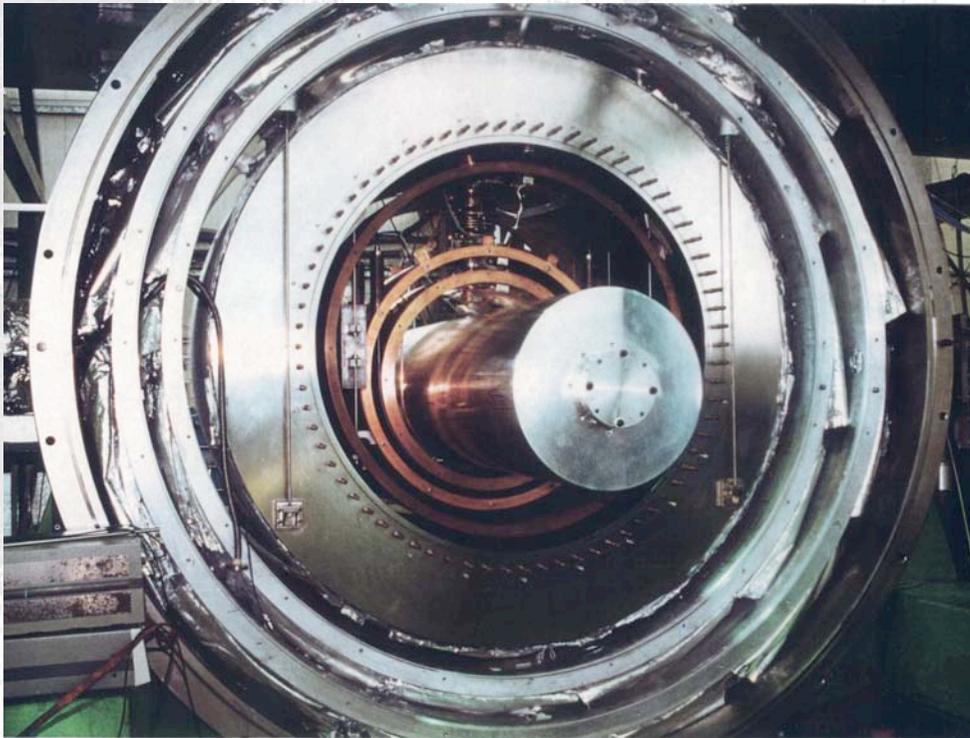
NAUTILUS



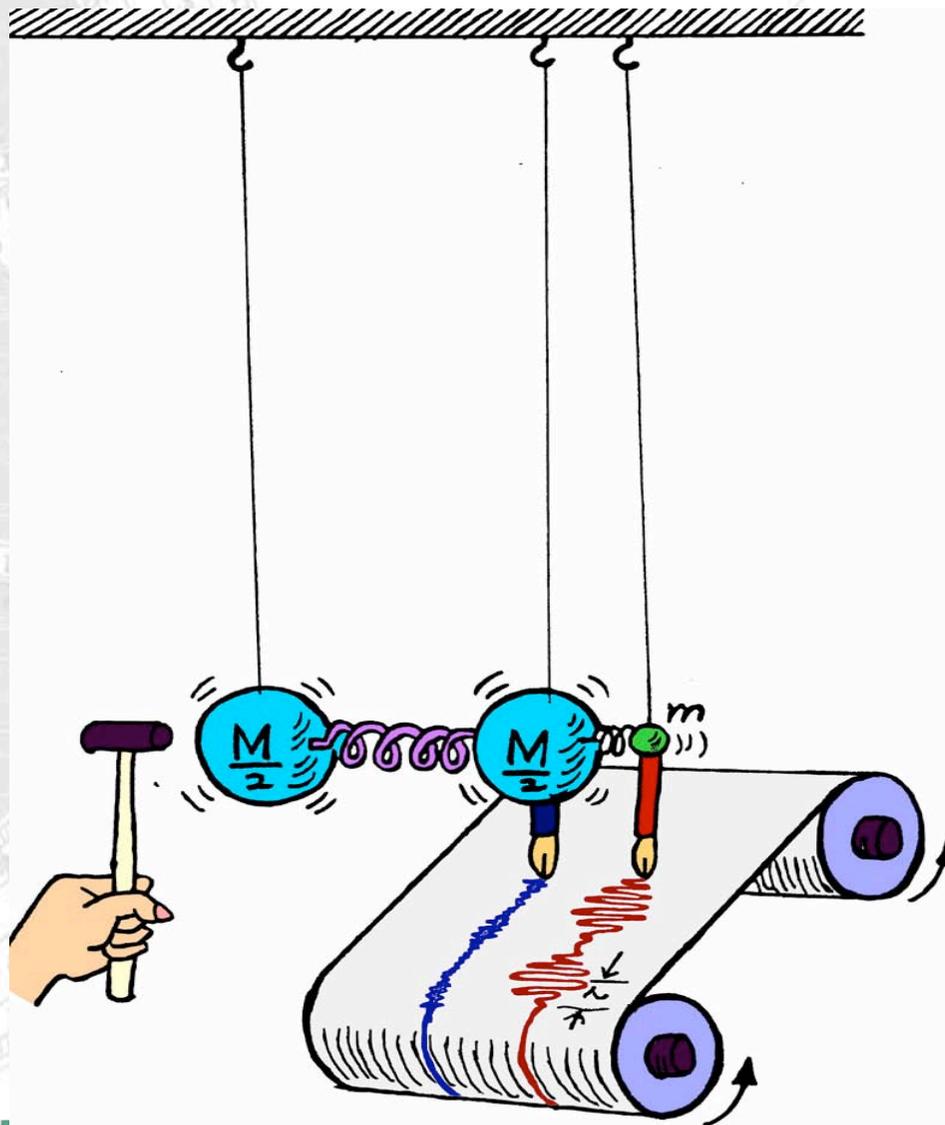


Rivelatori risonanti

- NAUTILUS



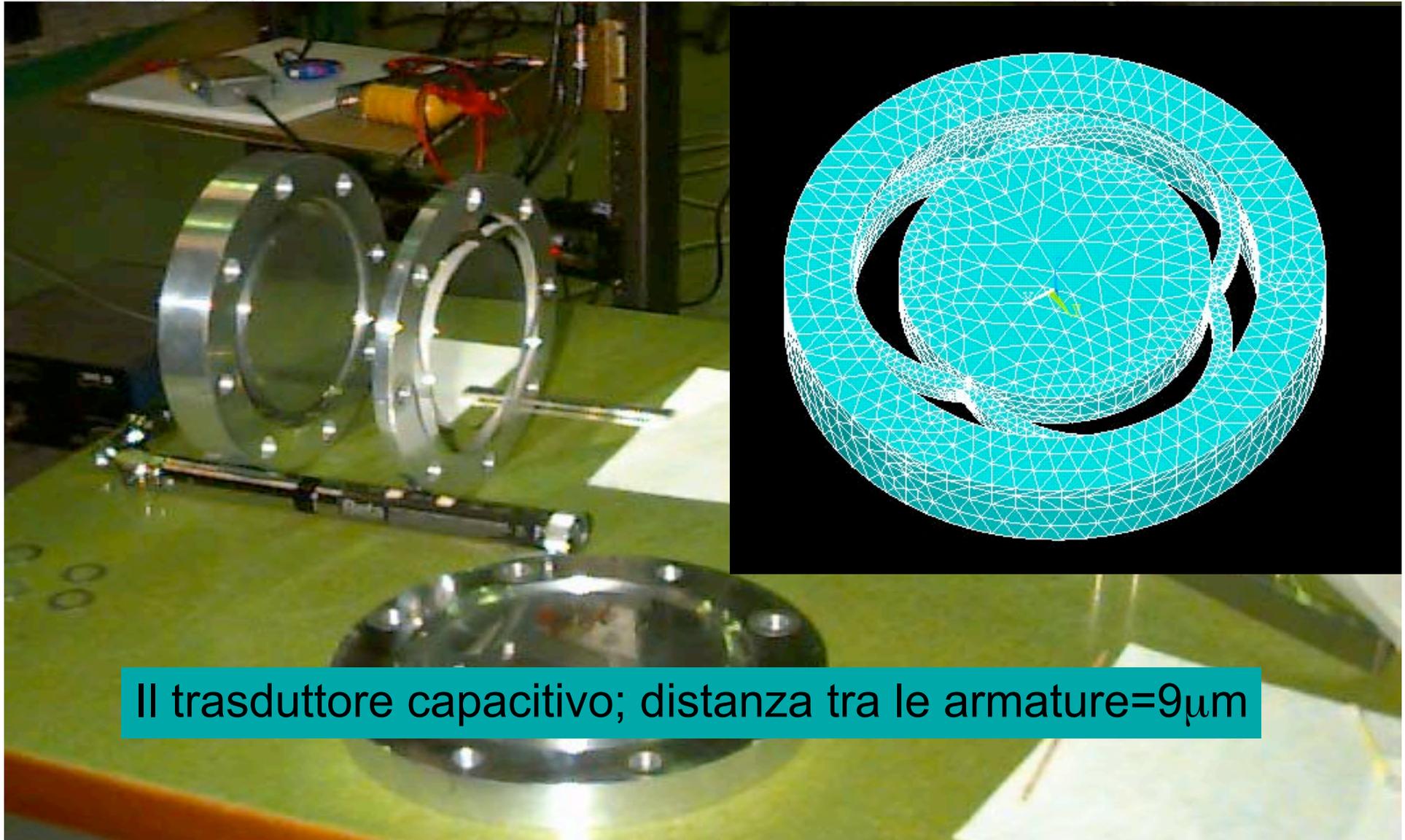
Principio di funzionamento del trasduttore risonante



Lo spostamento dell'oscillatore secondario modula un campo elettrico o magnetico in continua o la frequenza di una cavita' superconduttrice

$$x_m = \sqrt{\frac{M}{m}} x_M$$

MICROMECCANICA

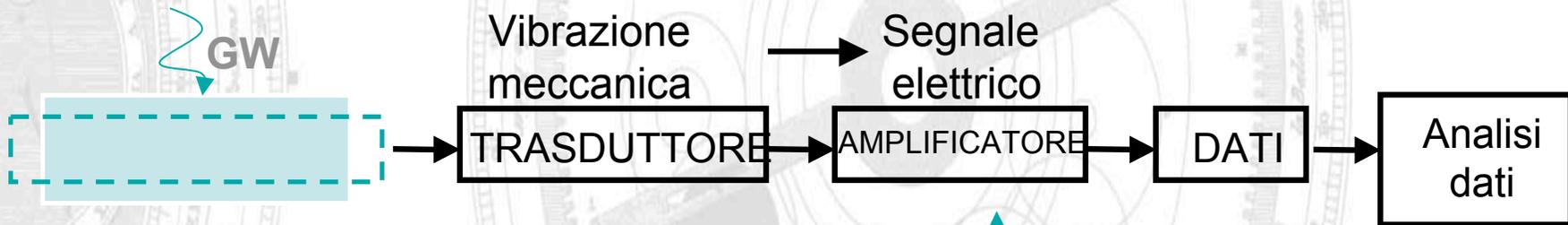


Il trasduttore capacitivo; distanza tra le armature= $9\mu\text{m}$

Rivelatori gravitazionali risonanti

L'onda gravitazionale eccita il modo di vibrazione longitudinale di un cilindro di grande massa

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



Rumore sismico

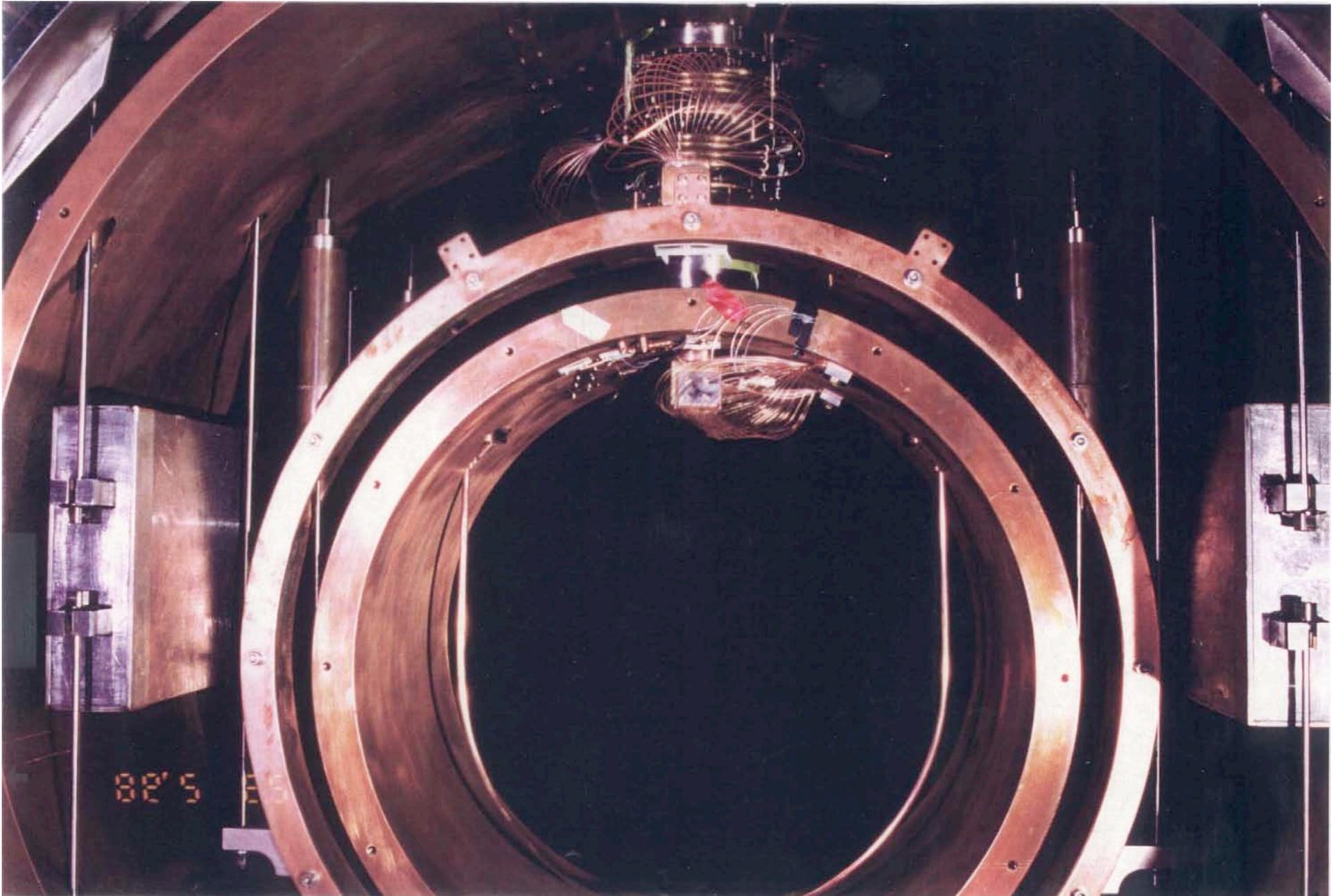
Rumore termico Rumore elettronico

Rumore dai raggi cosmici

Filtri meccanici

Basse temperature Amplificatori a basso rumore (SQUID)

Veto



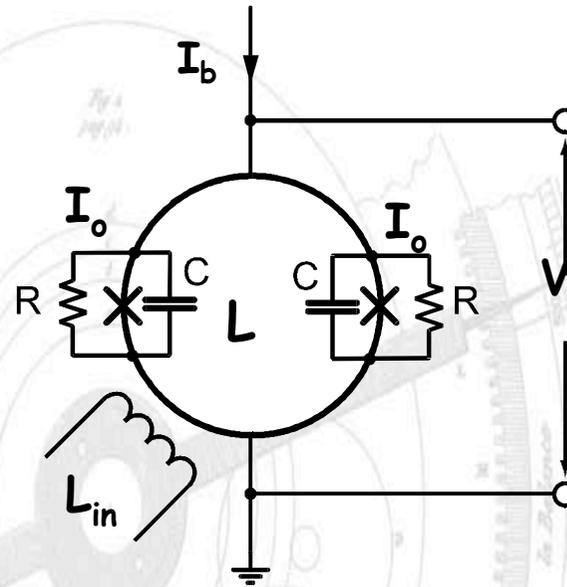
Contatti termici ed isolamento dalle vibrazioni



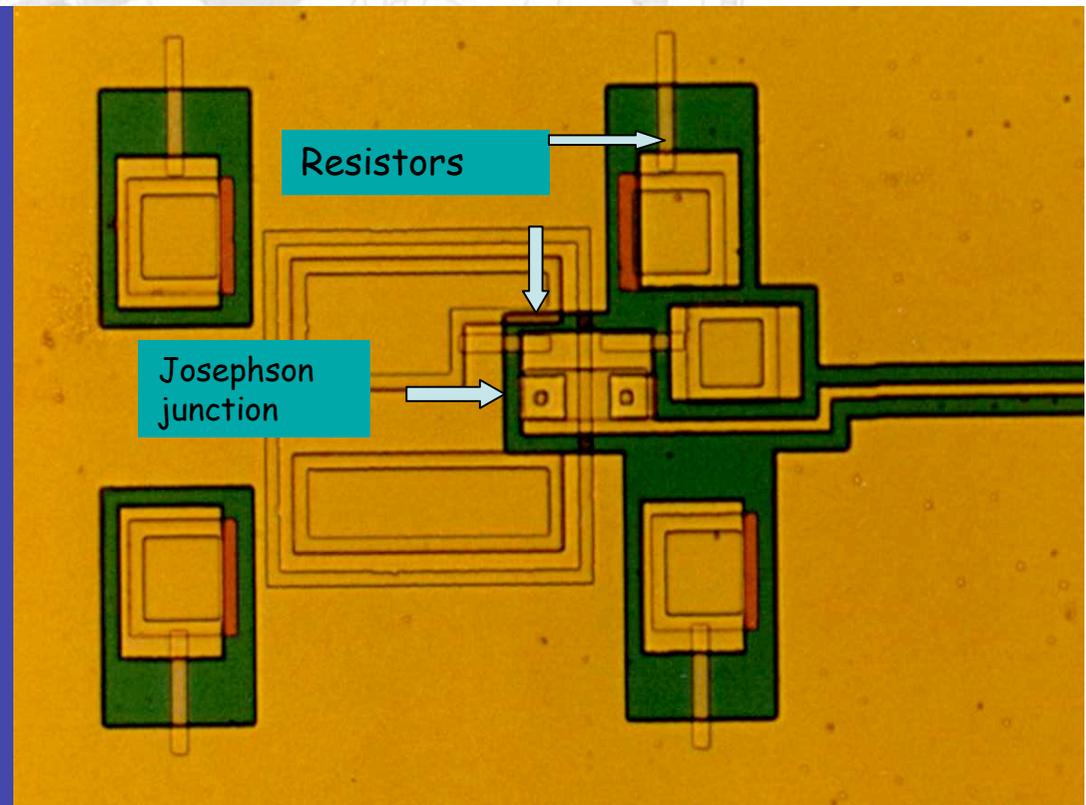
2'S E1

Tecnologie quantistiche

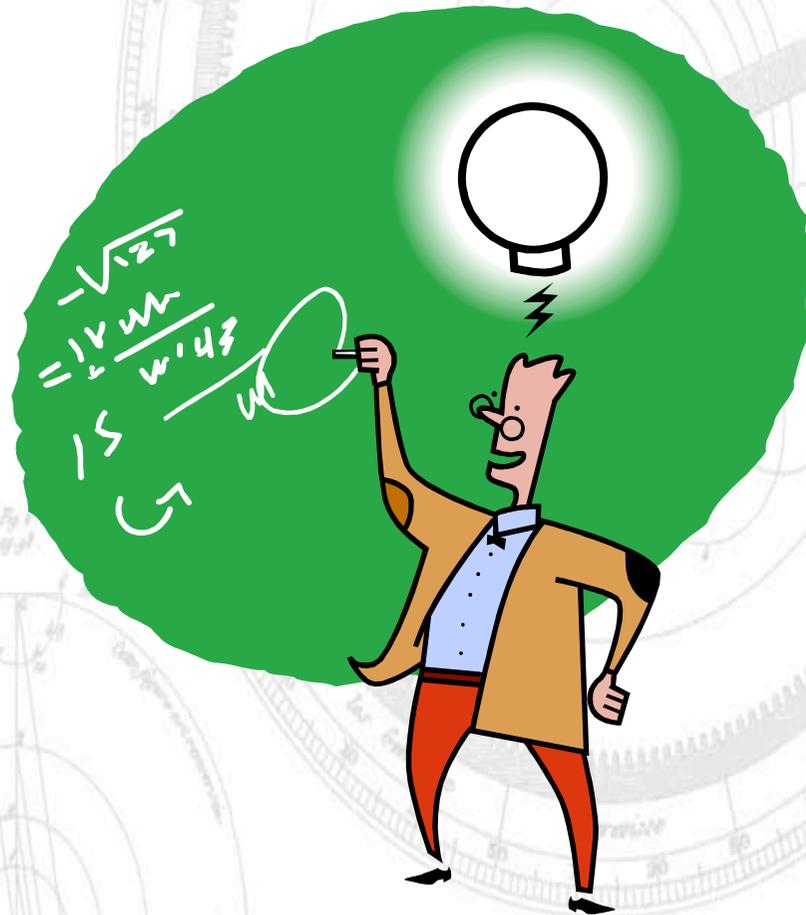
dc-SQUID

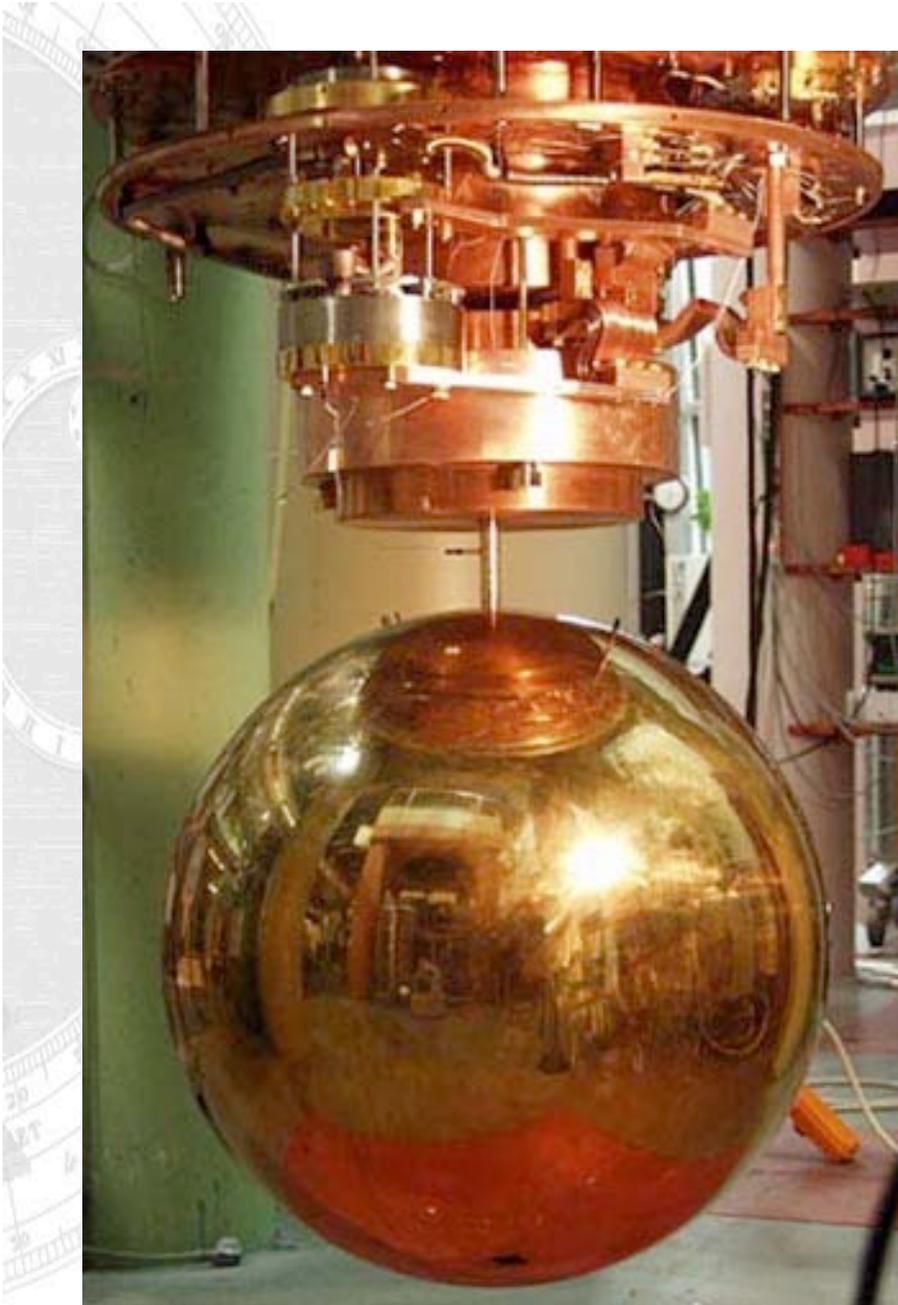


- Anello superconduttore interrotto da due giunzioni Josephson
- Dimensioni tipiche di una giunzione: μm^2
- In grado di apprezzare campi magnetici dell'ordine di 10^{-10} gauss



Il futuro nello sviluppo dei rivelatori risonanti: i rivelatori sferici





Vantaggi di un'antenna sferica:

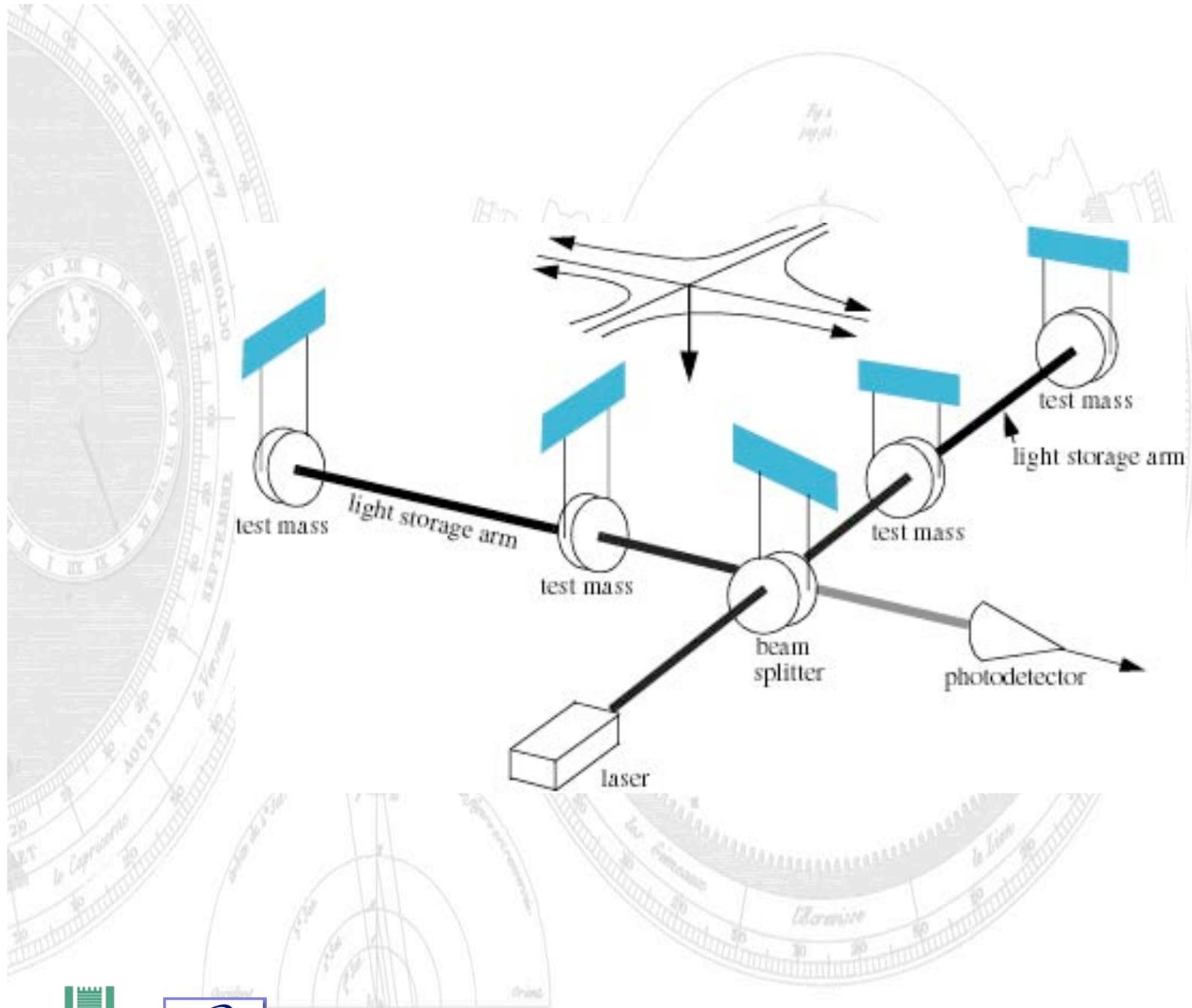
- A parità di materiale e frequenza di risonanza, sezione d'urto 18 volte maggiore di una sbarra cilindrica;
- Corrispondenza biunivoca tra le ampiezze dell'onda gravitazionale e i modi di quadrupolo;
- Omnidirezionalità;
- Possibilità di conoscere la direzione di provenienza dell'onda incidente e in alcuni casi anche la distanza della sorgente;
- Possibilità di conoscere lo stato di polarizzazione dell'onda gravitazionale.

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

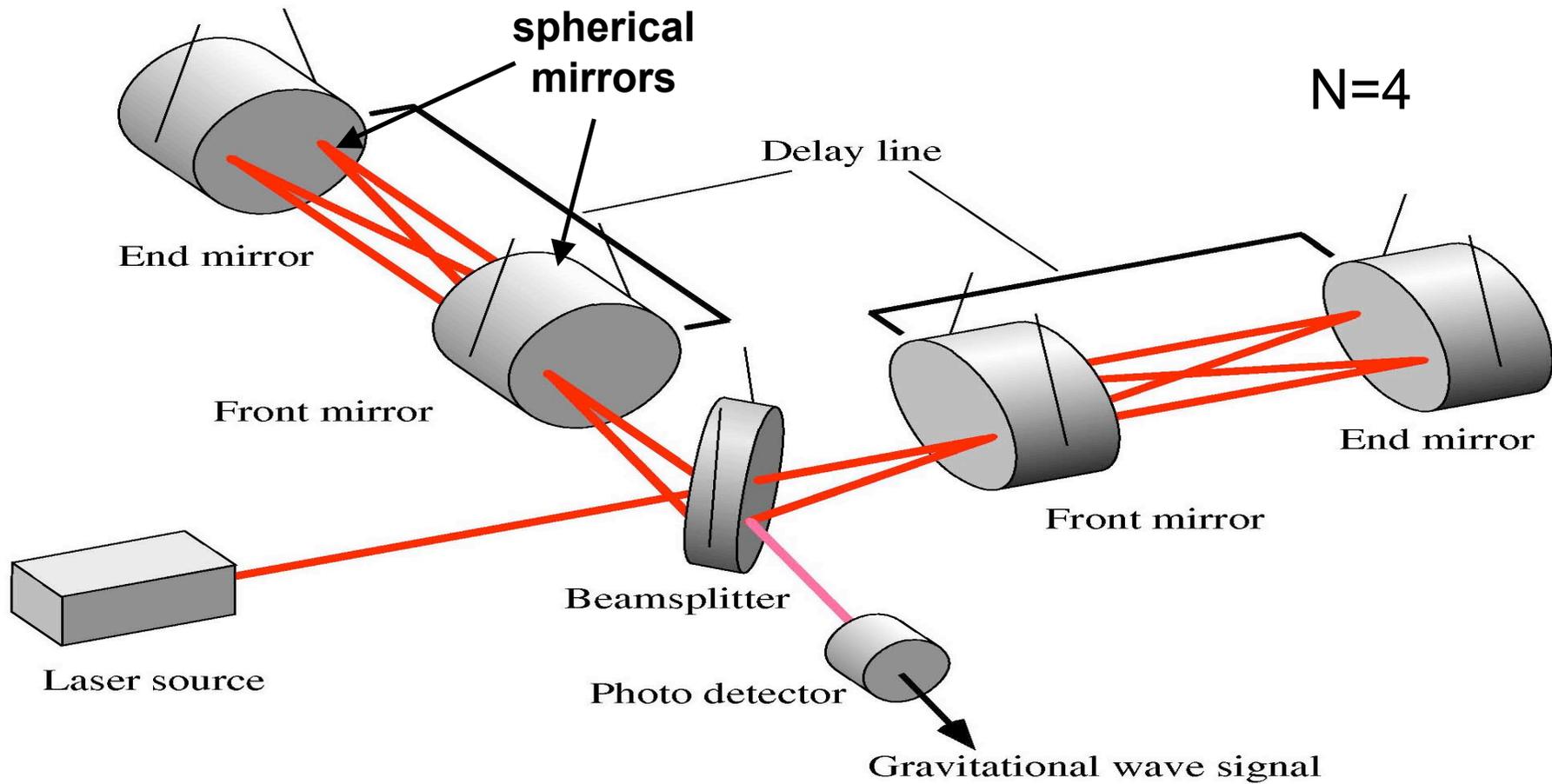
Nella realta' i rivelatori sono costruiti in modo da immagazzinare la luce in ciascun braccio per un tempo maggiore di quello di una singola riflessione: il tempo di immagazzinamento ottimale e' la meta' del periodo dell'onda gravitazionale

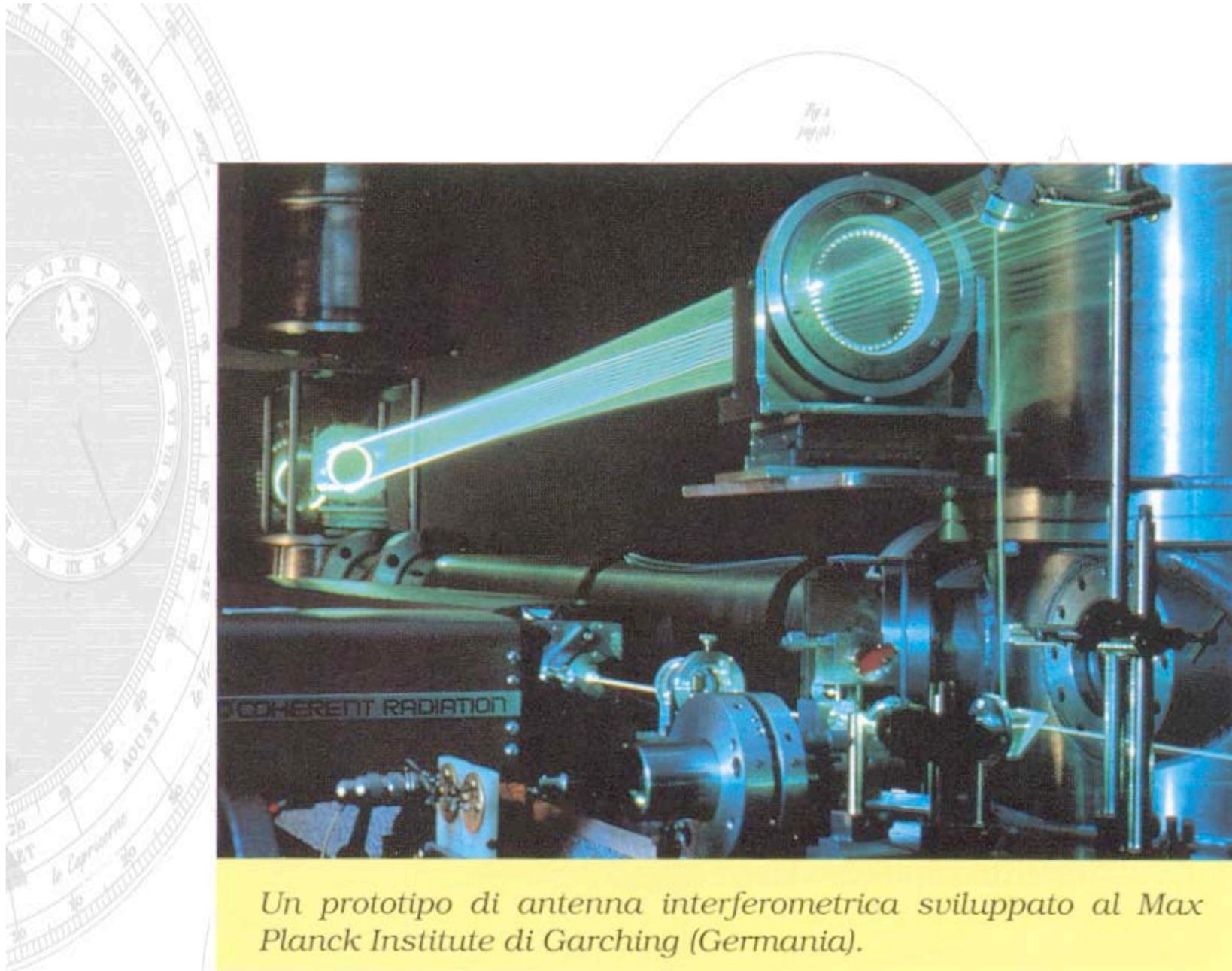
Ex.

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 cavita' Fabry-Perot

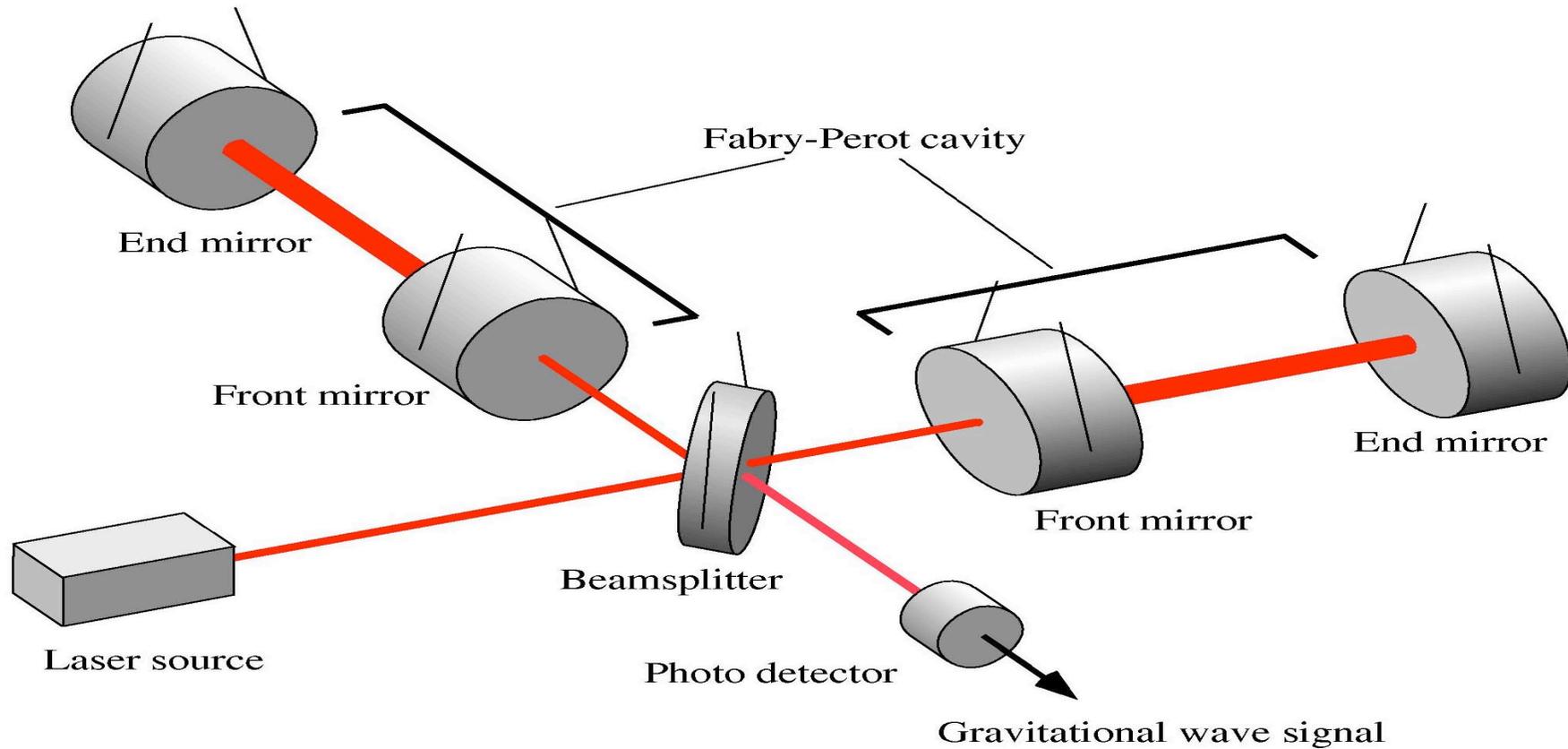
Linea di ritardo

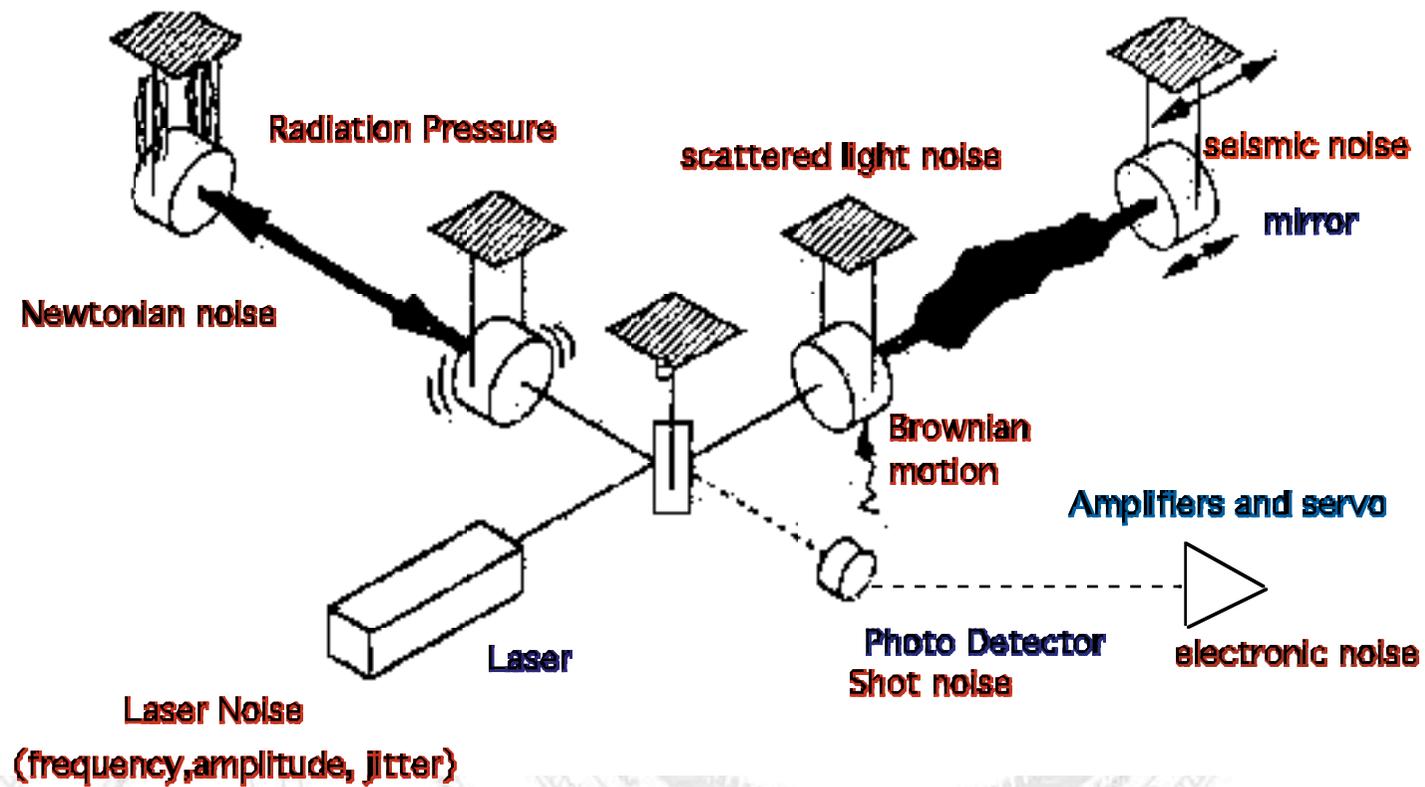




Un prototipo di antenna interferometrica sviluppato al Max Planck Institute di Garching (Germania).

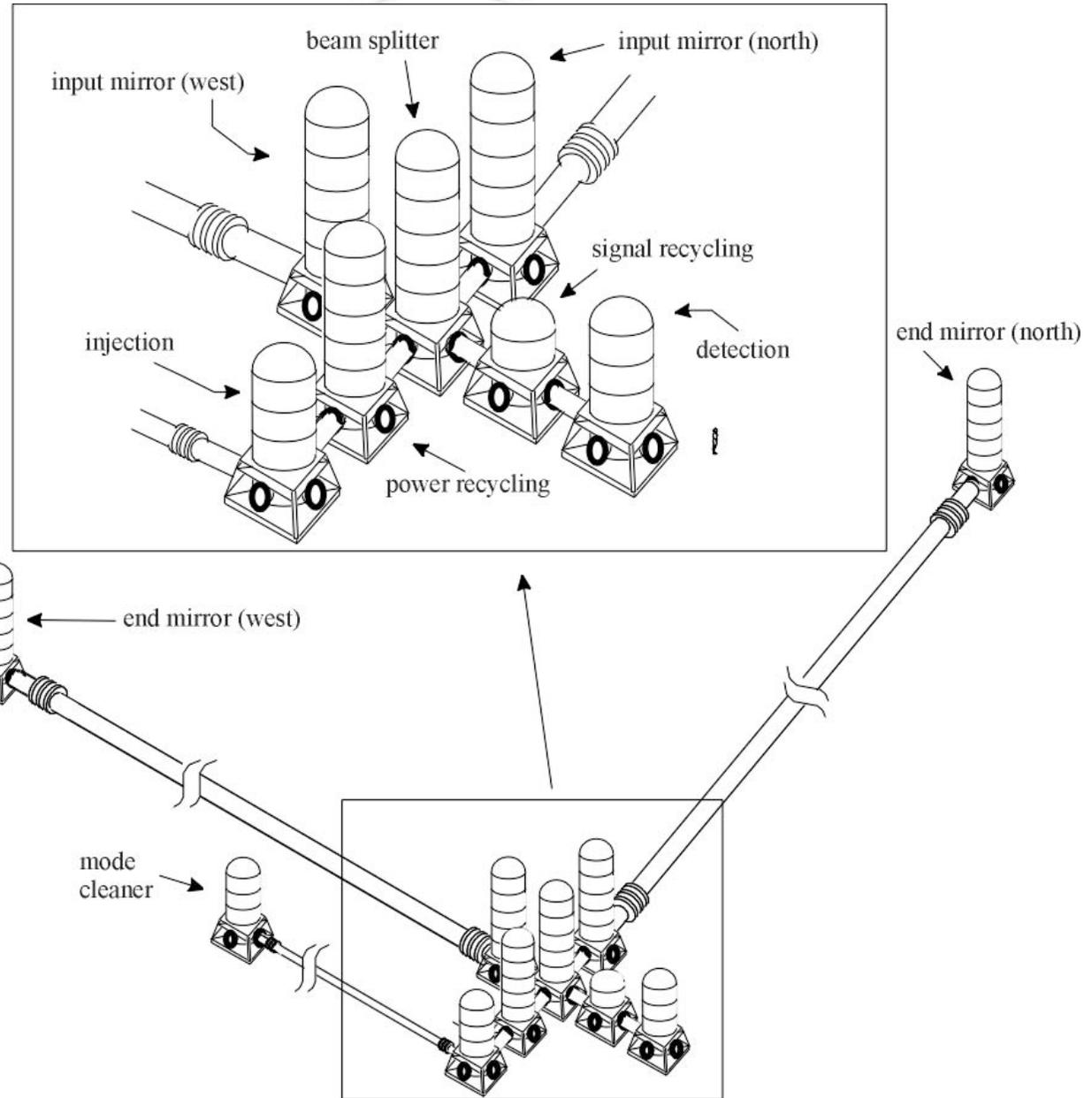
Cavita' Fabry-Perot





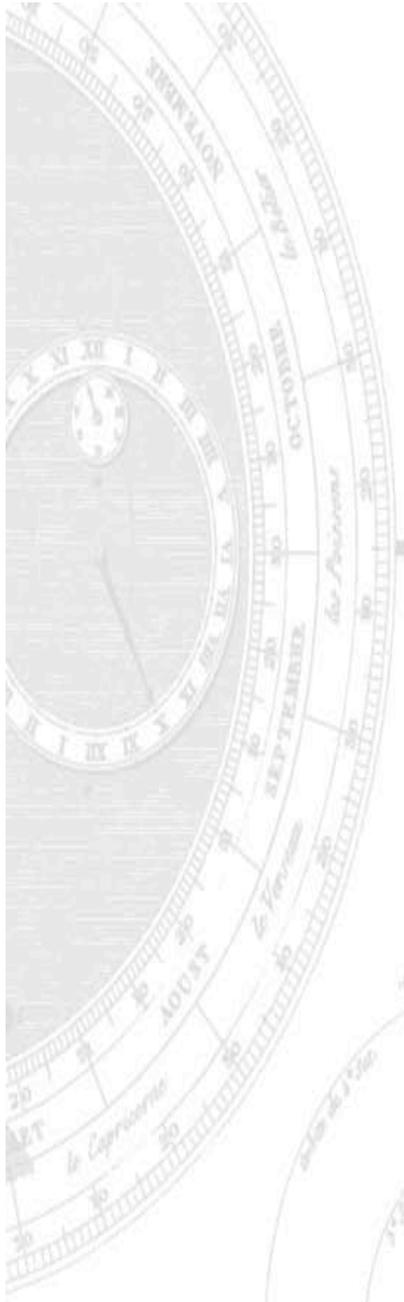
Virgo

Sistema da vuoto e superattenuatori



Virgo - all'interno dell'edificio centrale





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

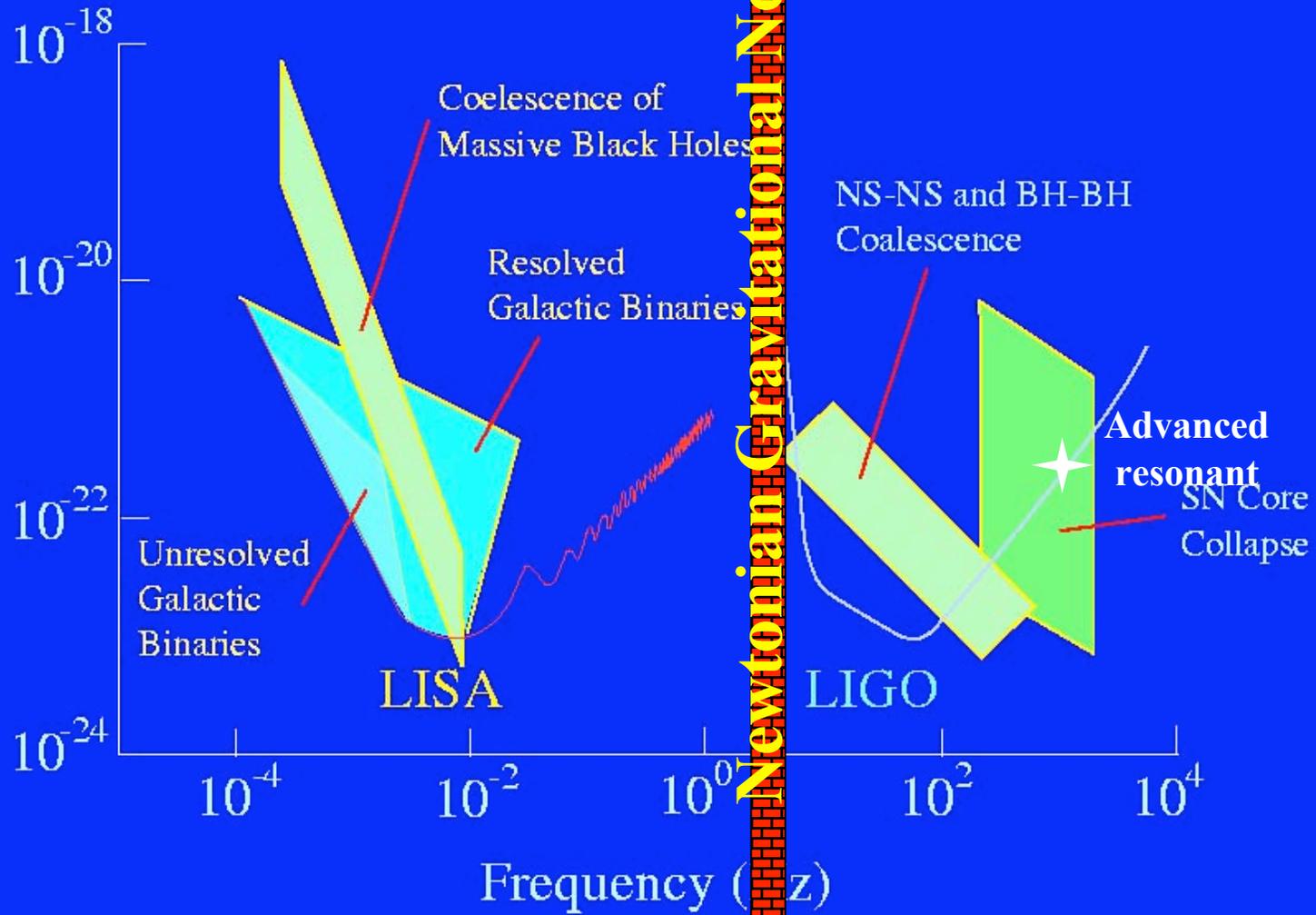




Uno degli specchi dell'interferometro centrale

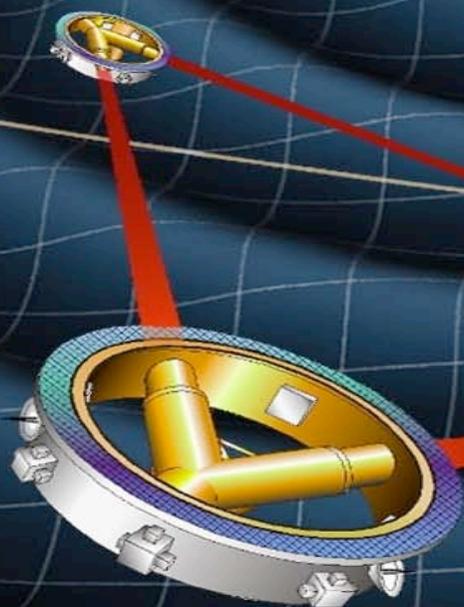
October 29, 2007 La teoria della Relatività e le Onde Gravitazionali

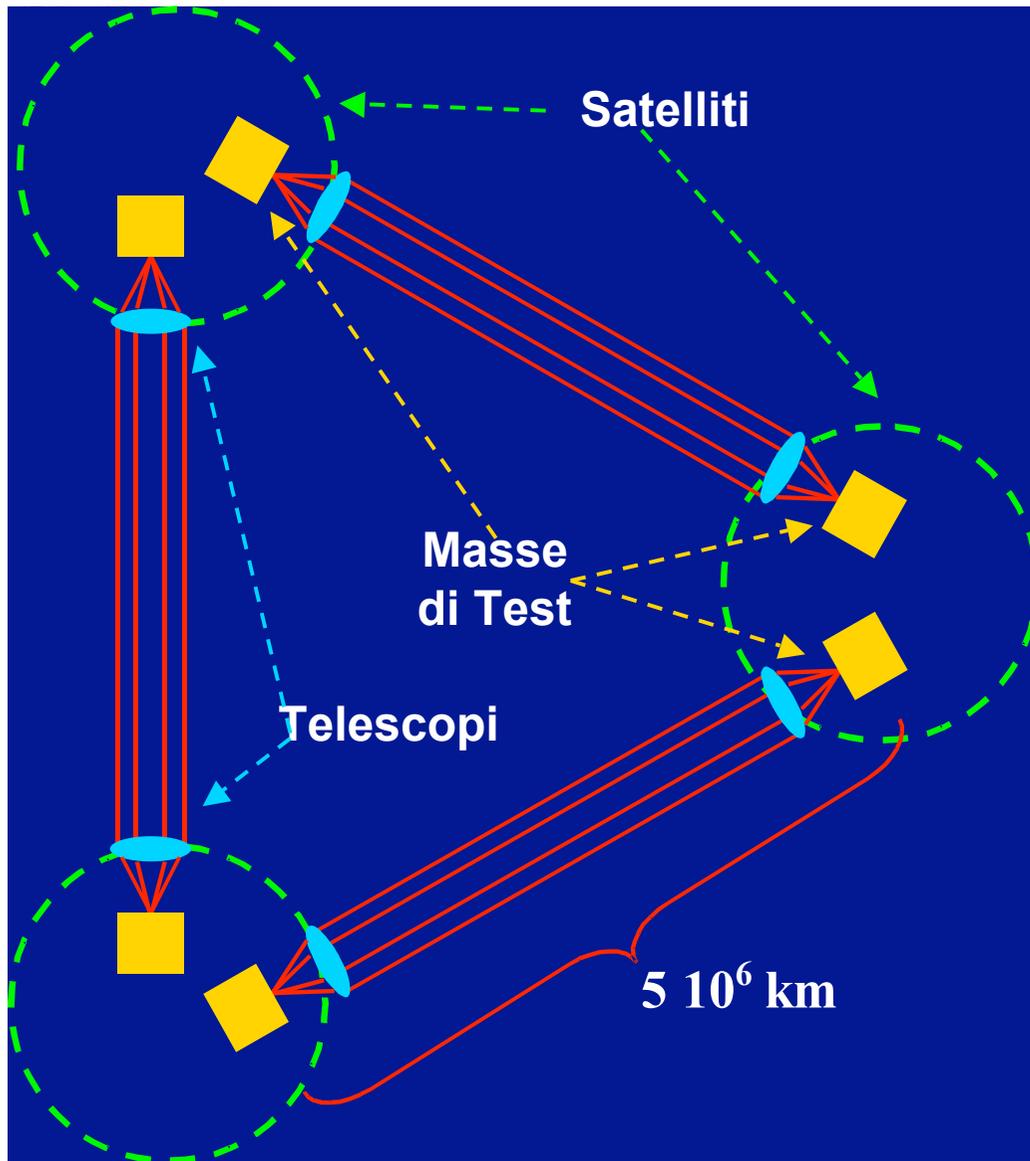
Gravitational Wave Amplitude



Newtonian Gravitational Noise

LISA



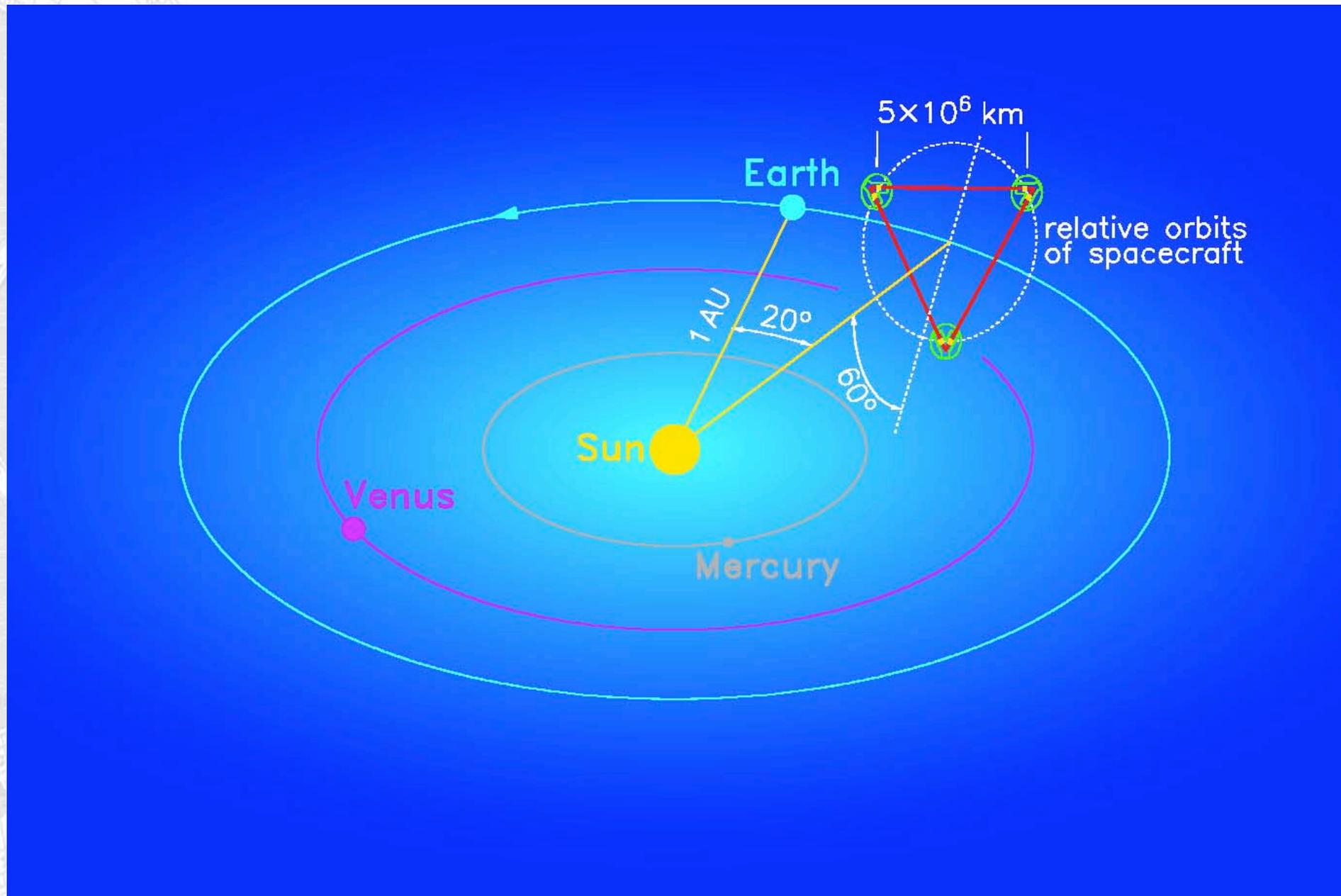


**3 coppie di masse di test in
“caduta libera”**

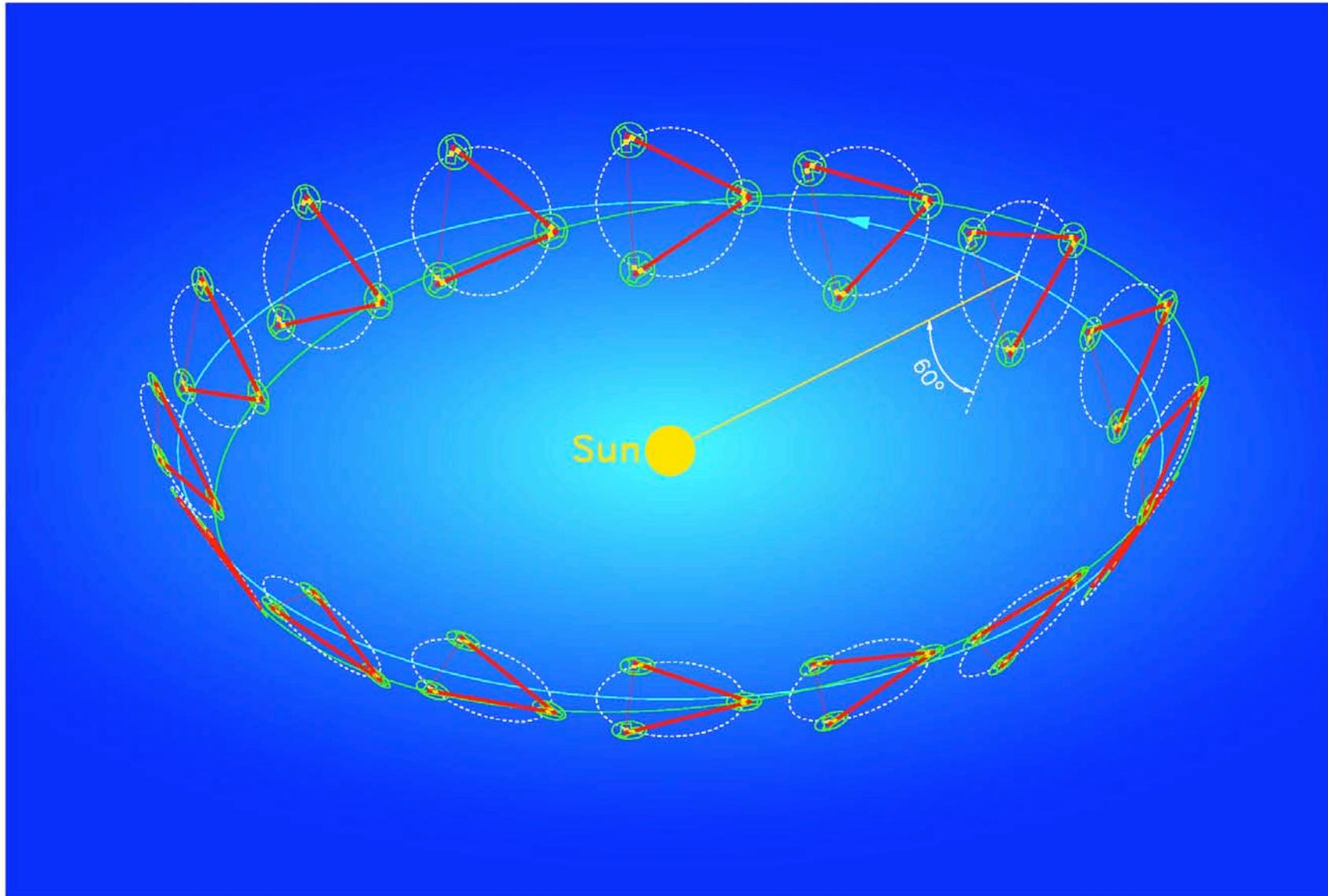
**3 satelliti di schermo
“solidali con le masse di
test”**

**2 interferometri semi-
independenti 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:

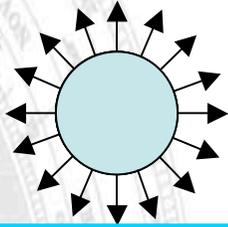
SMART2: dimostratore tecnologico

Lancio previsto nel 2008

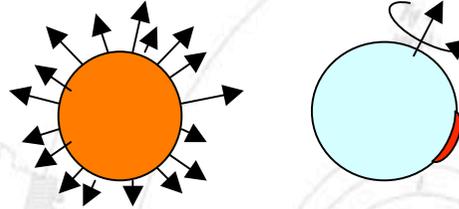
LISA: missione NASA/ESA

Lancio previsto nel 201?

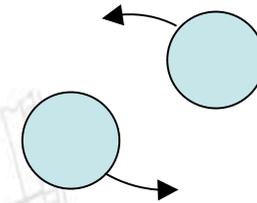
Symmetrical $h=0$



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.

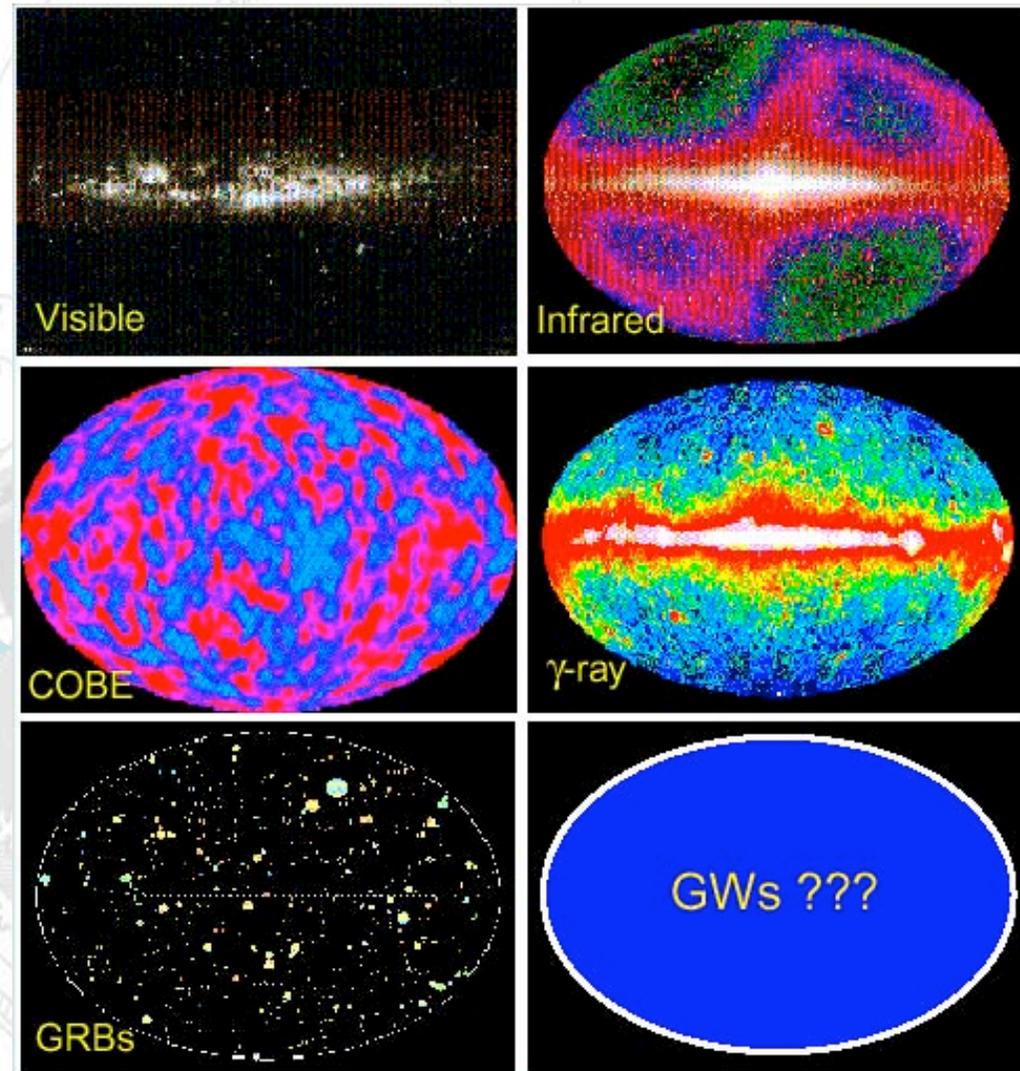
La radiazione elettromagnetica interagisce fortemente con la materia, e' indebolita dall'assorbimento quando viaggia verso il rivelatore.

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.

Campi magnetici molto forti
(10^9 Tesla)

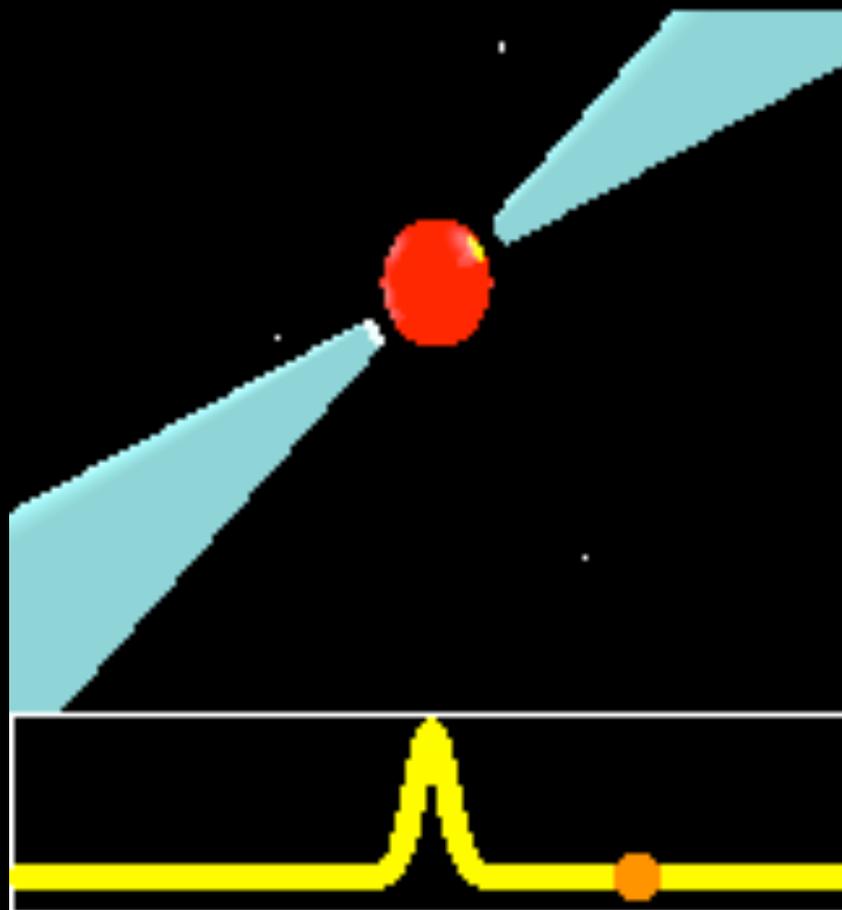
+

Rapida rotazione

=

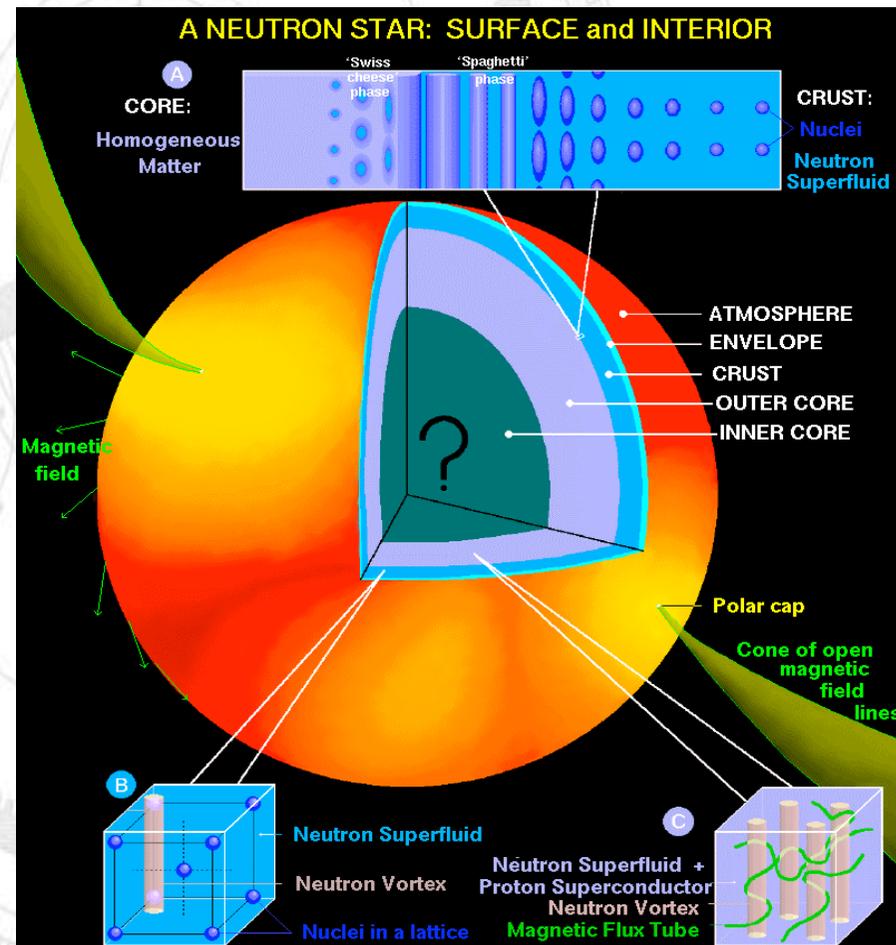
⇒ **emissione di onde**
elettromagnetiche (luce,
onde radio)
e onde gravitazionali

MPIfR-Bonn Pulsar Group f=10-100 Hz



Stelle di neutroni

- La fisica di queste stelle non è ancora ben compresa
 - Dopo 40 anni non sappiamo cosa fa pulsare le pulsar.
 - Le proprietà dell'interno non sono ben comprese: equazione di stato, superfluidità, superconduttività, 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)



This animation illustrates the activity surrounding a black hole. While the matter that has passed the black hole's "event horizon" can't be seen, material swirling outside this threshold is accelerated to millions of degrees and radiates in X-rays. At the end of the animation, the black hole is shown shrouded in a cloud of gas and dust, obscuring it from most angles at wavelengths other than the X-rays picked up by the Chandra X-ray Observatory.

Sorgenti di onde gravitazionali

- **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).



This artist concept depicts two white dwarfs called RX J0806.3+1527 or J0806, swirling closer together, traveling in excess of a million miles per hour. As their orbit gets smaller and smaller, leading up to a merger, the system should release more and more energy in gravitational waves. This particular pair might have the smallest orbit of any known binary system. They complete an orbit in 321.5 seconds - barely more than five minutes.

Sorgenti di onde gravitazionali

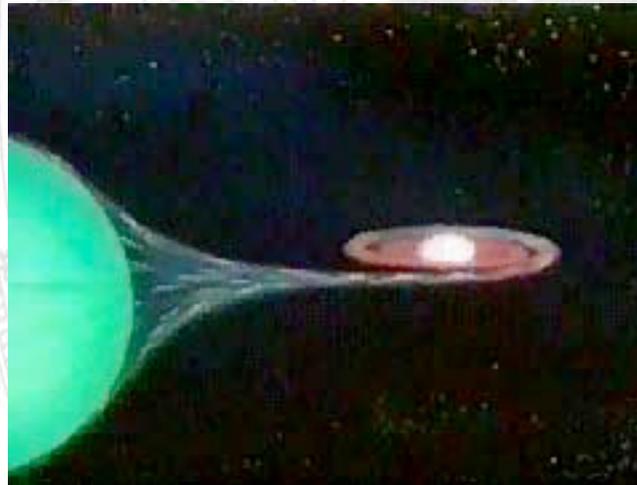
- Sistemi binari (BH-NS)



Scientists say they have seen tantalizing, first-time evidence of a black hole eating a neutron star—first stretching the neutron star into a crescent, swallowing it, and then gulping up crumbs of the broken star in the minutes and hours that followed.

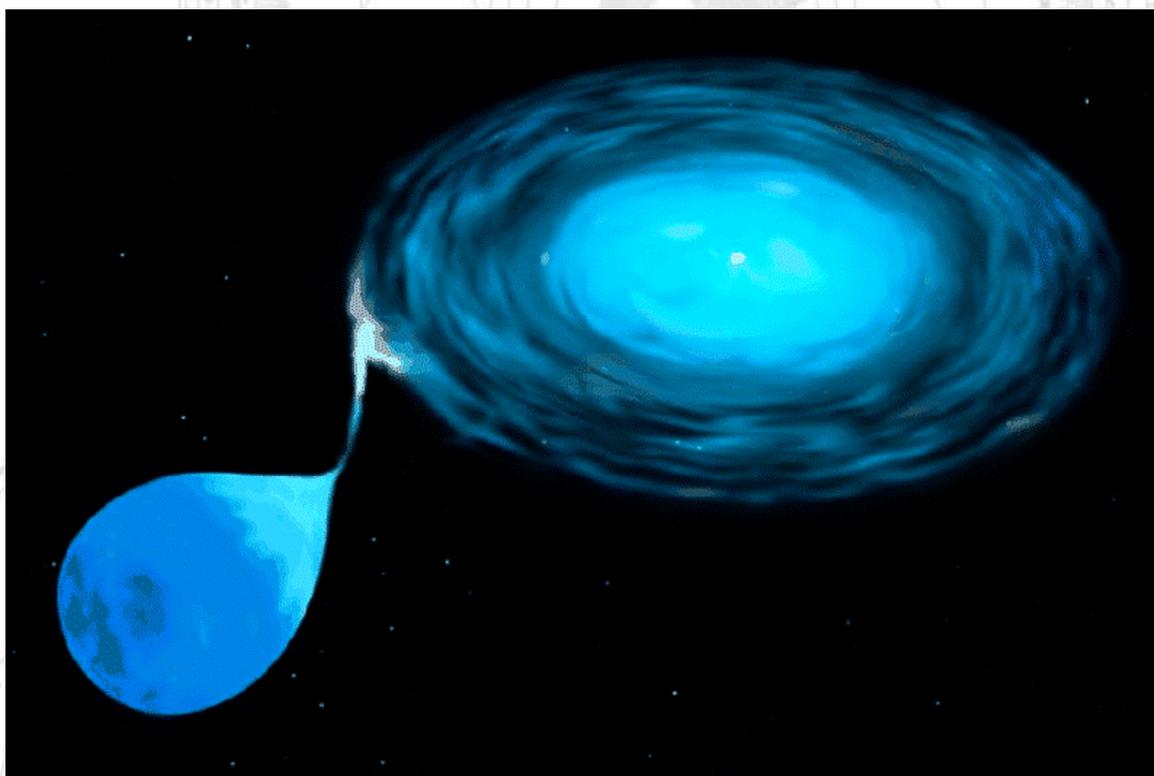
Sorgenti di onde gravitazionali

- Sistemi binari (BH-star / NS-star)



Binarie galattiche

Sistemi ben modellati: il segnale previsto e' conosciuto con grande precisione

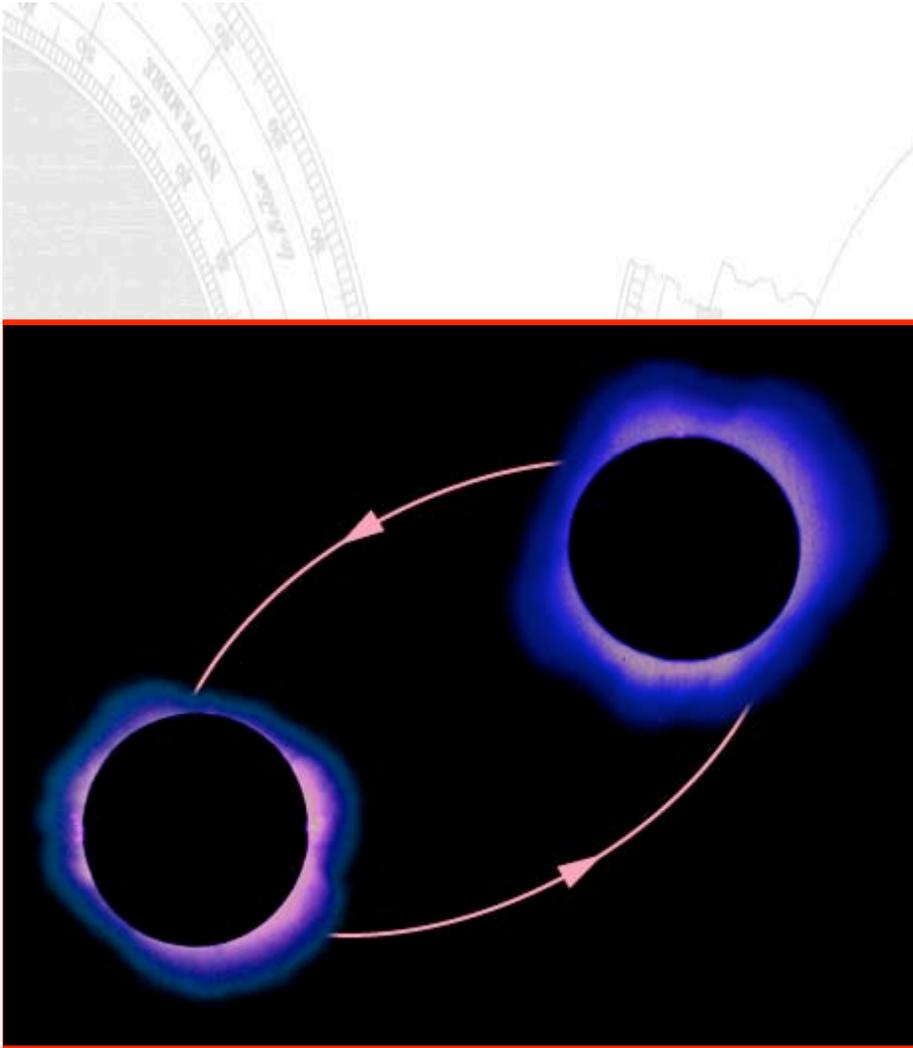


Sorgenti di onde gravitazionali

- Sistemi binari (BH-BH)



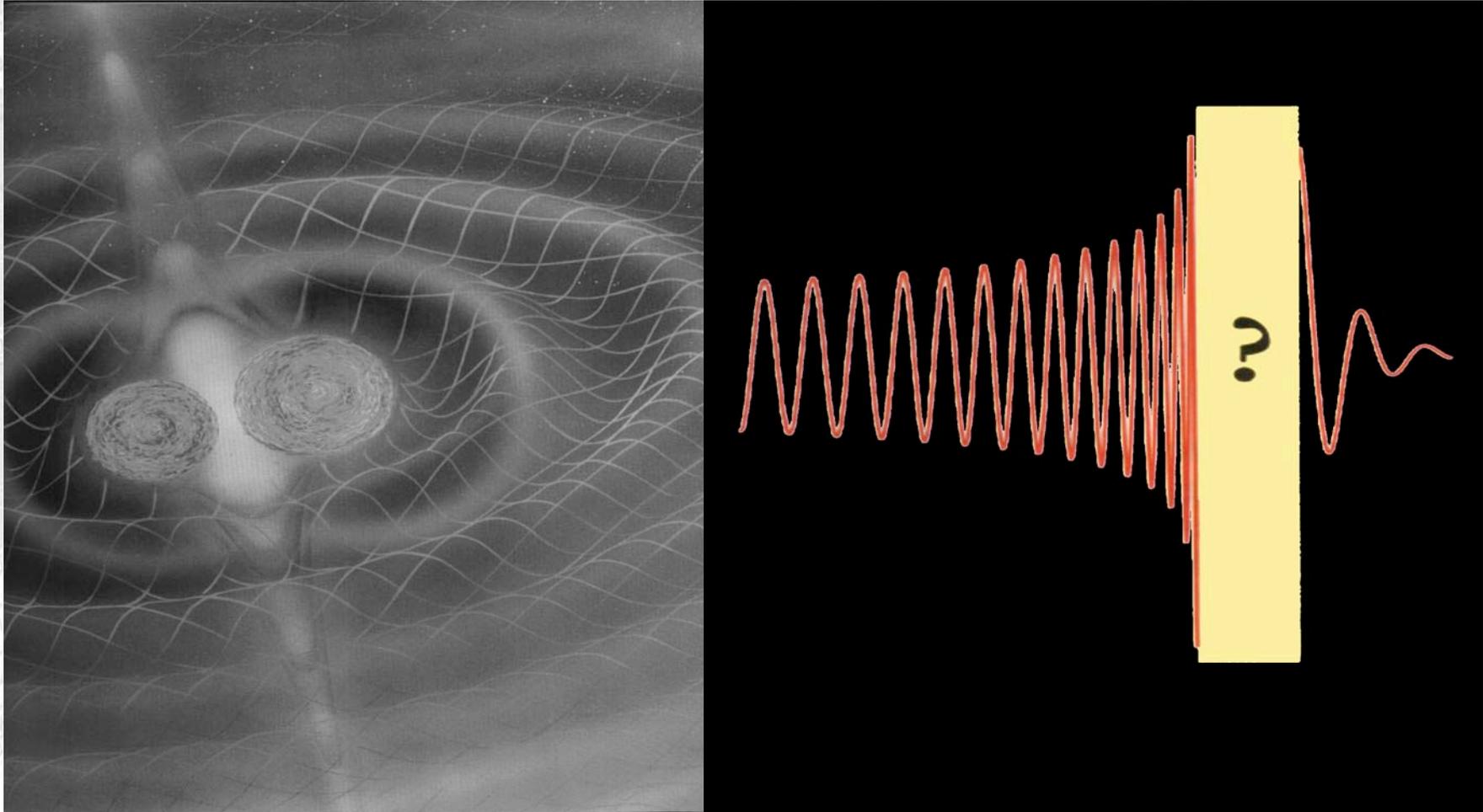
This sequence begins with the Chandra Deep Field-North, the deepest X-ray image ever taken. Black holes that are also found in submillimeter observations, indicating active star formation in their host galaxies, are then marked. The view then zooms onto one pair of particularly close black holes (known as SMG 123616.1+621513). Astronomers believe these black holes and their galaxies are orbiting each other and will eventually merge. The sequence ends by showing an animation of this scenario.



Sistemi binari di buchi neri massivi formati da nuclei galattici

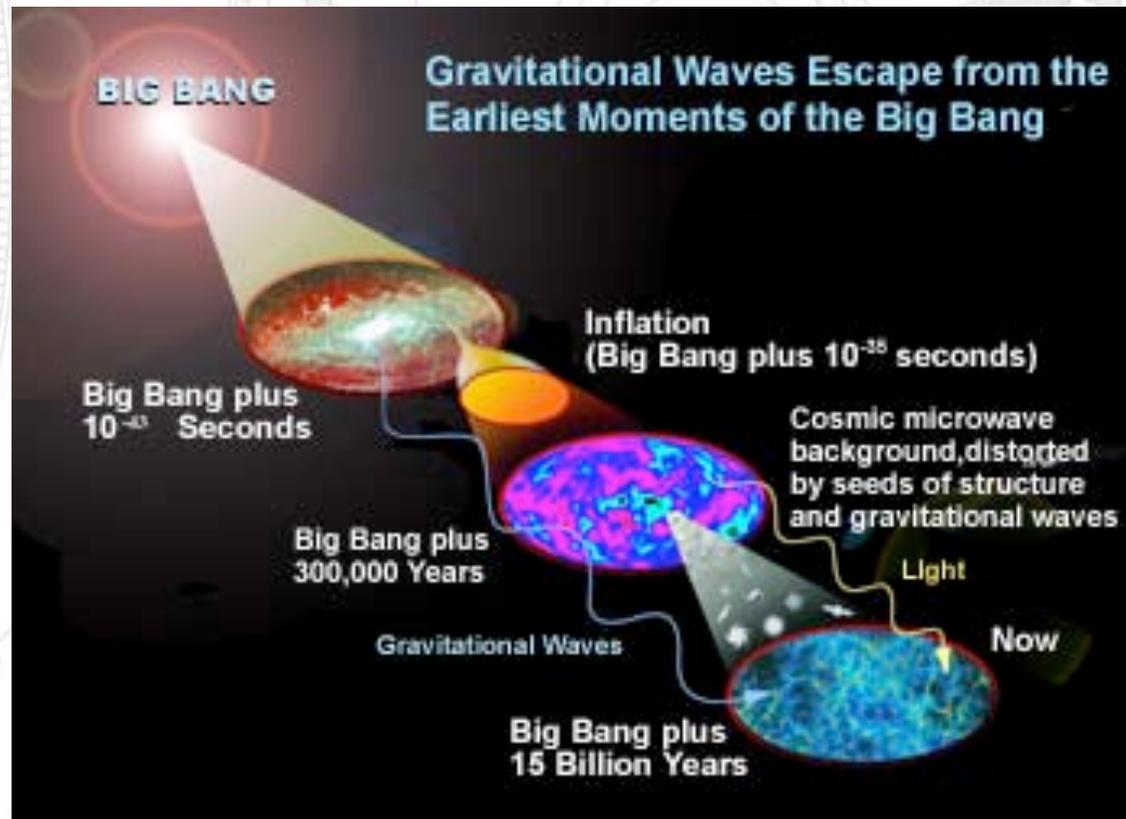
Sorgenti di onde gravitazionali

- Sistemi binari



Sorgenti di onde gravitazionali

- Radiazione gravitazionale di fondo



- **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)
- **2005** Prima operazione di un grande interferometro
- **2007** Primo rivelatore sferico in funzione
- **201?** Lancio missione LISA

Gravitational Wave Detectors





The End