

LA RIVELAZIONE DELLE ONDE GRAVITAZIONALI

una coraggiosa impresa scientifica internazionale

Ettore Majorana
INFN

Dipartimento di Fisica
Università di Roma *Sapienza*

Liceo Mamiani, Roma 3 Marzo 2015

- Il caso scientifico
- Relativizzare lo spazio e il tempo
- La Gravità
- Le onde gravitazionali
- Sorgenti di Onde gravitazionali
- Rivelazione dalla Terra
- Esperimenti

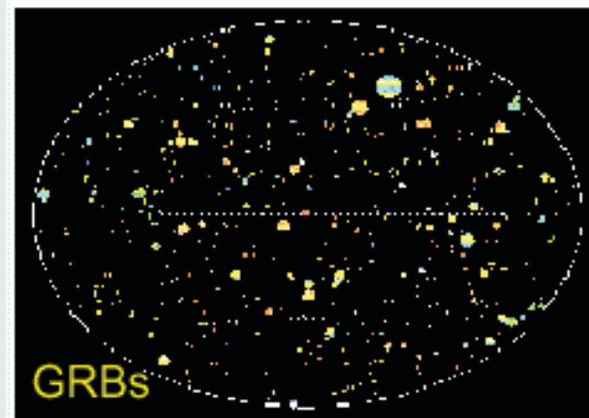
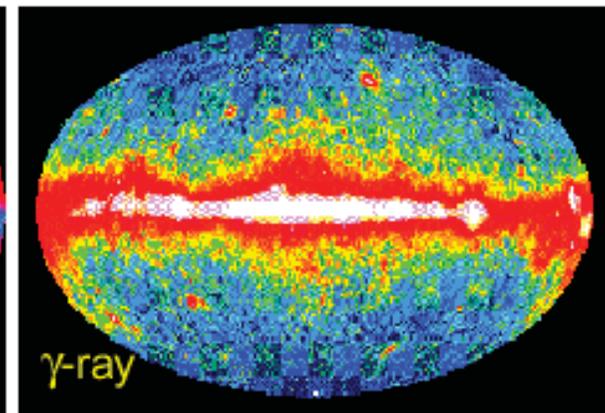
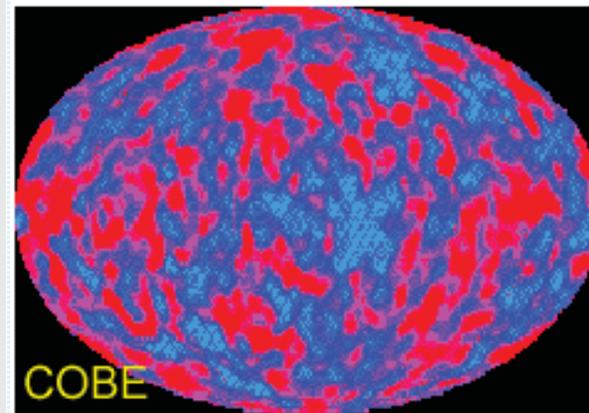
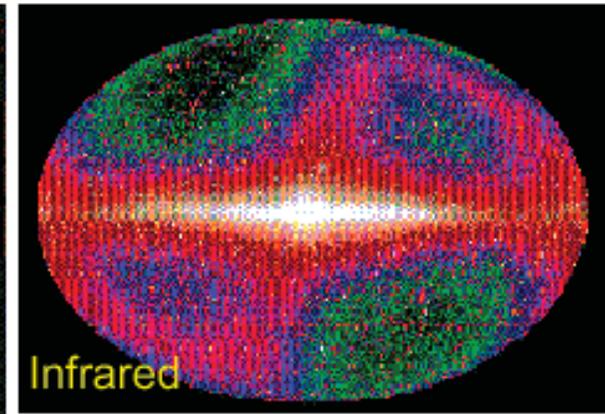
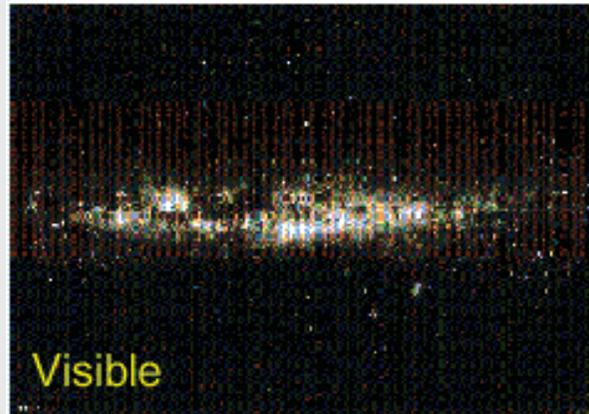
Perché studiare le onde gravitazionali

La sfera celeste è stata studiata per mezzo di radiazioni elettromagnetiche, dovute a temperatura, carica, magnetismo delle stelle:
l'immagine dell'universo

Le onde gravitazionali, di natura completamente diversa, sono generate dalla massa dei corpi celesti. Possono portare informazioni totalmente nuove e sconosciute:

il suono dell'universo

Captare le onde gravitazionali può essere paragonato ad *alzare per la prima volta il volume del televisore*



MATERIA OSCURA

I corpi celesti “visibili”
rendono conto di meno del
10% della massa presente
nell’ Universo



Hubble Deep Field

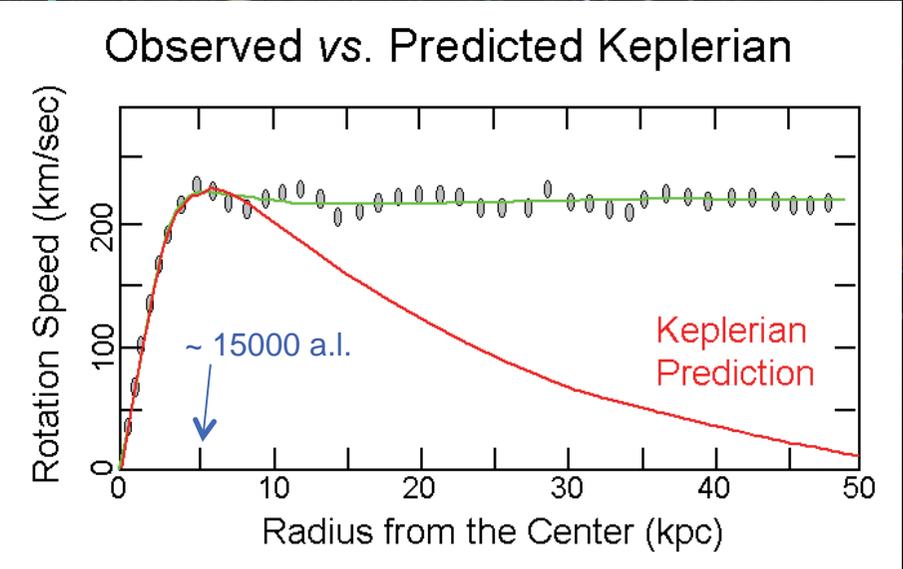
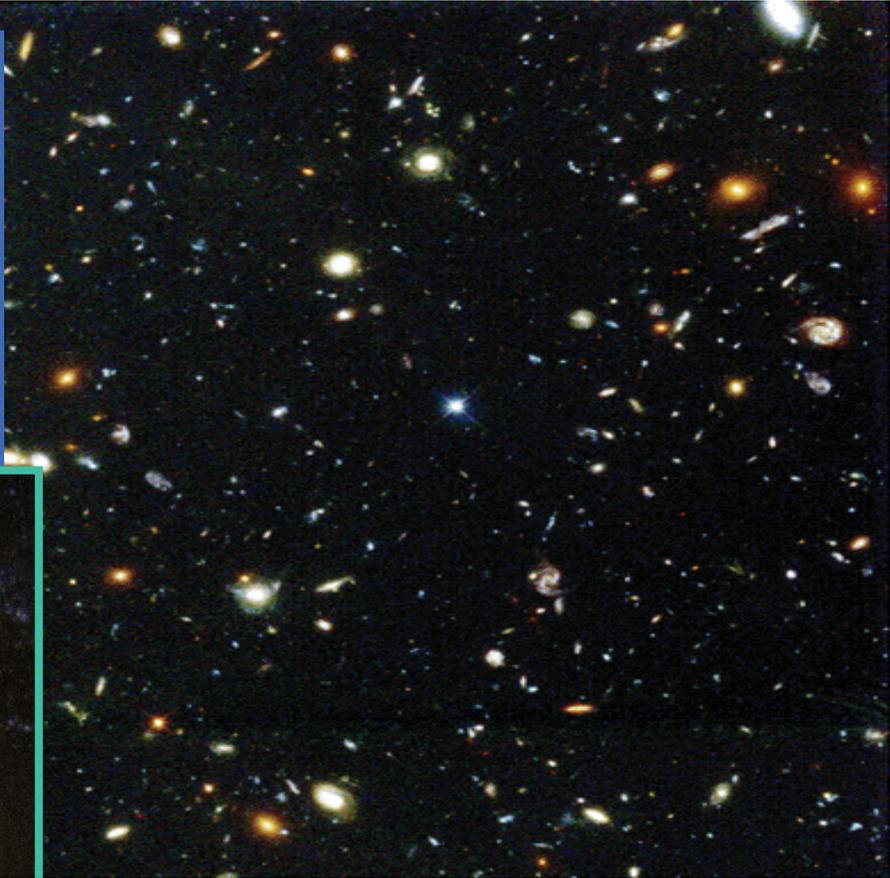
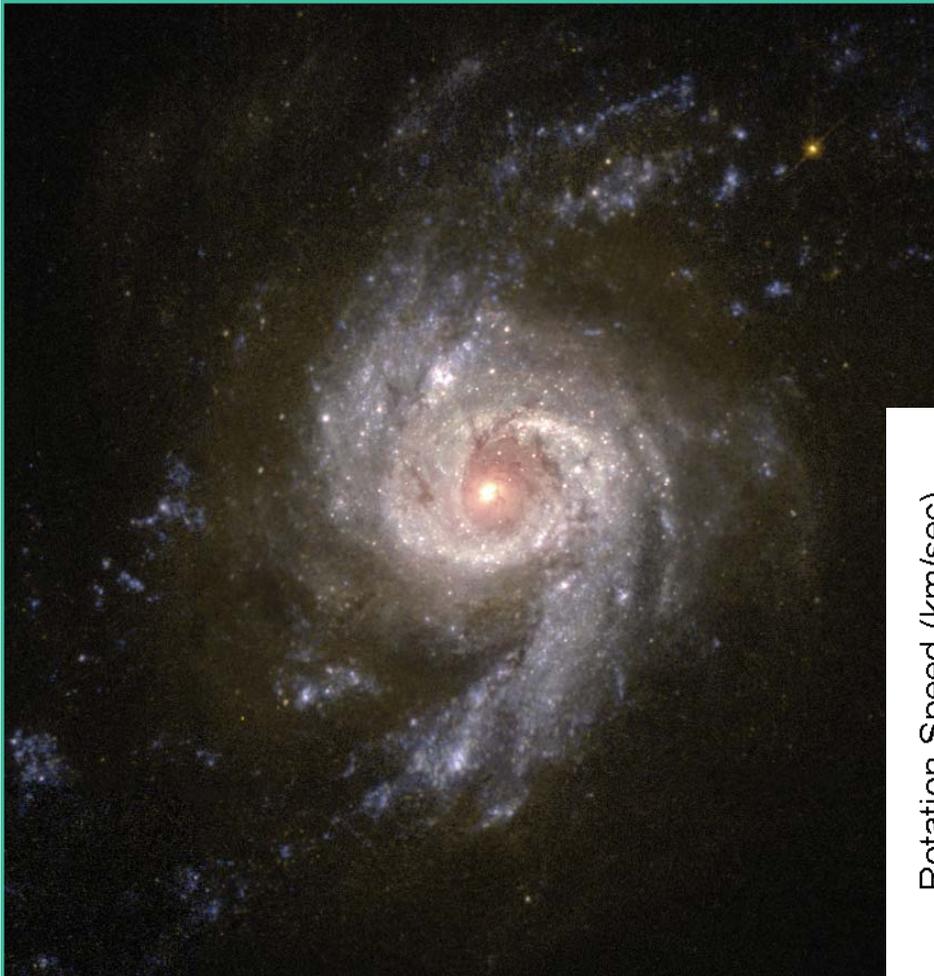
HST

WFPC2

ST ScI OPO January 15, 1996 R. Williams and the HDF Team (ST ScI) and NASA

MATERIA OSCURA

I corpi celesti “visibili” rendono conto di una piccola porzione della materia presente nell’universo



Relativizzare
lo spazio e il tempo



CINEMATICA
Galilei
Lorentz
(fine '800)

ELETTRODINAMICA CLASSICA
Maxwell
Lorentz
(fine '800)

ESPERIMENTI
Michelson-Morley
Fizeau

RELATIVITÀ SPECIALE
Einstein
ultimi due lavori del 1905

PROBLEMA
la gravitazione
non è inclusa !

MECCANICA CLASSICA
(reazione vincolare
e calcolo tensoriale)

MECCANICA QUANTISTICA
e la sua applicazione
per lo studio delle
particelle elementari
~1930

Einstein, contributo
fondamentale con i primi 3
lavori del 1905

ESPERIMENTI
Galilei
Øtvs
Newton
 $m_i = m_g$??

RELATIVITÀ GENERALE (1916) teoria di campo,
invariante per trasformazioni di Lorentz, che include la gravità

Teoria cinematica (ed elettromagnetica): un'idea straordinaria

(Giugno 1905)

"When the Special Theory of Relativity began to germinate in me, I was visited by all sorts of nervous conflicts... I used to go away for weeks in a state of confusion." (A. Einstein)

Il **principio di relatività**, valido nella meccanica classica, assicura che i risultati di due esperimenti analoghi, svolti rispettivamente in quiete e in moto rettilineo a velocità costante (**sistemi inerziali**), sono uguali.

Ma al tempo di A. Einstein vi era **un'incongruenza**: secondo Maxwell e Lorentz doveva esservi differenza di velocità della luce (c) in esperimenti elettromagnetici svolti in **sistemi inerziali** in moto relativo. Ma questo fenomeno non era mai stato osservato.

Einstein rivoluzionò il modo di concepire la cinematica e l'elettrodinamica partendo **dall'assunzione che c fosse invariante** (299 792 458 m/s), e ciò portò ad una geniale reinterpretazione delle trasformazioni cinematiche tra sistemi inerziali (o di Lorentz).

3. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper;*
von A. Einstein.

Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Beispiele ähnlicher Art, sowie die mißlungenen Versuche, eine Bewegung der Erde relativ zum „Lichtmedium“ zu konstatieren, führen zu der Vermutung, daß dem Begriffe der absoluten Ruhe nicht nur in der Mechanik, sondern auch in der Elektrodynamik keine Eigenschaften der Erscheinungen entsprechen, sondern daß vielmehr für alle Koordinatensysteme, für welche die mechanischen Gleichungen gelten, auch die gleichen elektrodynamischen und optischen Gesetze gelten, wie dies für die Größen erster Ordnung bereits erwiesen ist. Wir wollen diese Vermutung (deren Inhalt im folgenden „Prinzip der Relativität“ genannt werden wird) zur Voraussetzung erheben und außerdem die mit ihm nur scheinbar unverträgliche

differenz und der erlangten Geschwindigkeit v des Elektrons die Beziehung gelten muß:

$$P = \int X dx = \frac{\mu}{\epsilon} v^2 \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} - 1 \right\}.$$

3. Wir berechnen den Krümmungsradius R der Bahn, wenn eine senkrecht zur Geschwindigkeit des Elektrons wirkende magnetische Kraft N (als einzige ablenkende Kraft) vorhanden ist. Aus der zweiten der Gleichungen (A) erhalten wir:

$$-\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{v^2}{R} = \frac{\epsilon}{\mu} \frac{v}{V} N \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}$$

oder

$$R = v^2 \frac{\mu}{\epsilon} \cdot \frac{\frac{v}{V}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{V}\right)^2}} \cdot \frac{1}{N}.$$

Diese drei Beziehungen sind ein vollständiger Ausdruck für die Gesetze, nach denen sich gemäß vorliegender Theorie das Elektron bewegen muß.

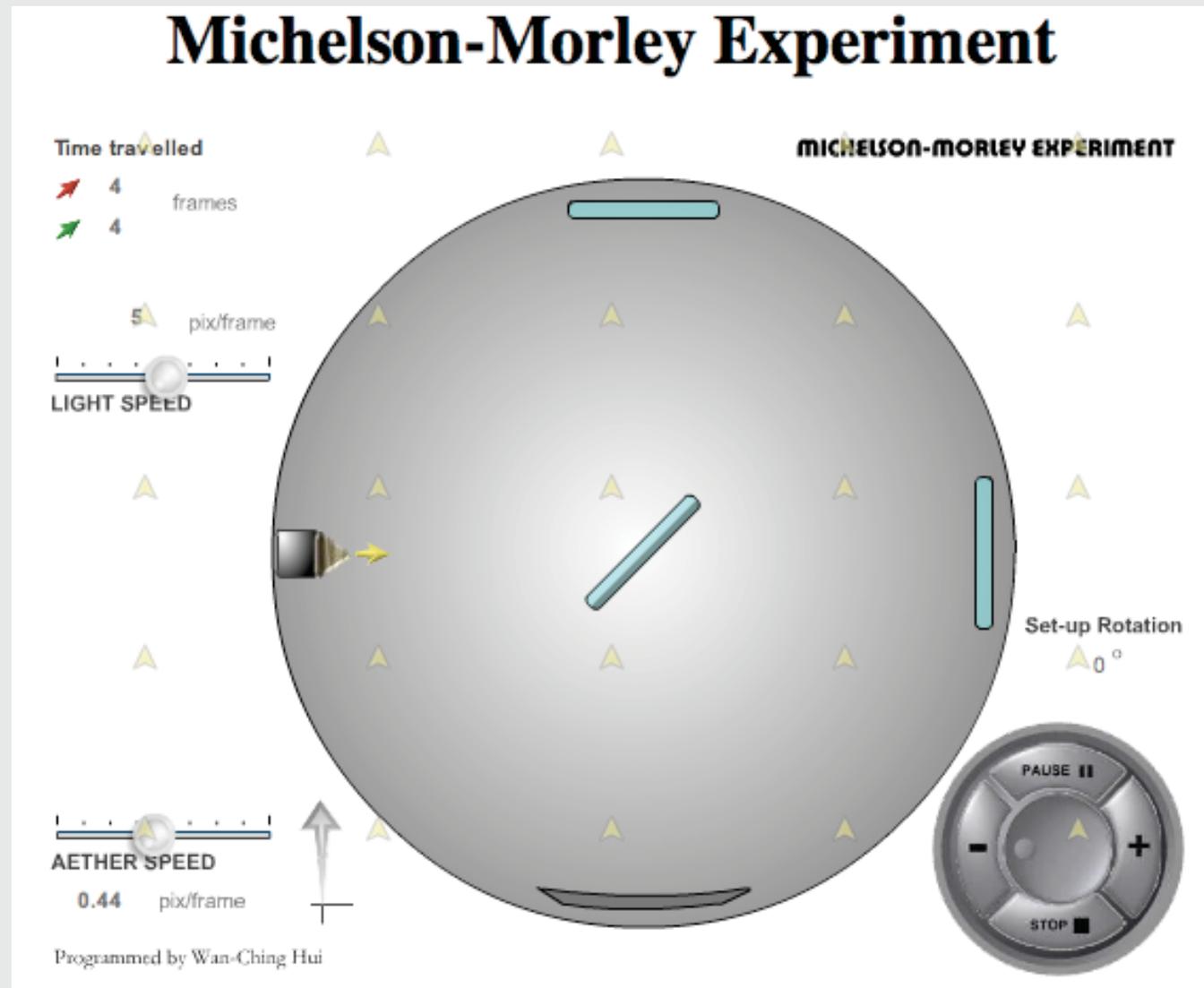
Zum Schlusse bemerke ich, daß mir beim Arbeiten an dem hier behandelten Probleme mein Freund und Kollege M. Besso treu zur Seite stand und daß ich demselben manche wertvolle Anregung verdanke.

Bern, Juni 1905.

(Eingegangen 30. Juni 1905.)

non vi è bibliografia !

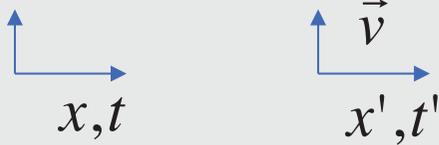
Prima di Einstein si credeva esistesse *l'etere*, una sostanza materiale invisibile, ma onnipresente. Si riteneva che la velocità della luce si dovesse misurare “rispetto all'etere” (analogia acustica): si cercò di rivelare *l'etere* invano, usando raggi luminosi in movimento relativo rispetto ad esso, sfruttando il naturale moto della Terra (30 km.s).



http://galileoandsteinstein.physics.virginia.edu/more_stuff/flashlets/mmexpt6.htm

Nota

Qualche formula



$$x' = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} (x - v \cdot t)$$
$$t' = \frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} (t - v \cdot x/c^2)$$

Trasformazioni di Lorentz

(viene introdotto il *tempo proprio* di un sistema di riferimento)

$$L' = L_o \sqrt{1 - v^2/c^2}$$

Contrazione dei segmenti

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

Dilatazione degli intervalli

Nota: $c = \text{velocità della luce} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

Game

tempo proprio di ET nel riferimento della navicella

Distance: 5 light hours Flying time (earth system): 5.55556 hours

Speed: 0.900000 c Flying time (spaceship system): 2.421611 hours

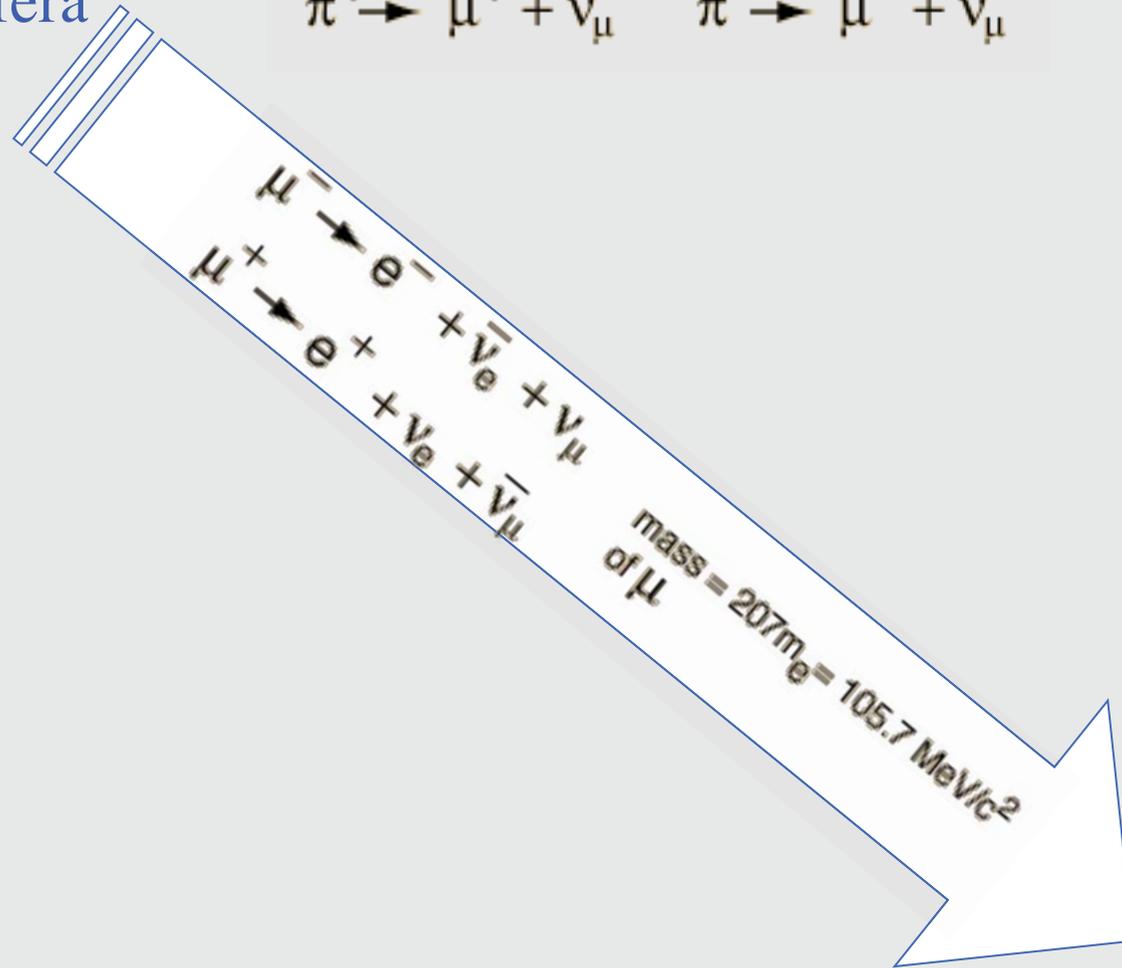
Reset Start © W. Fendt 1997, T. Mzoughi 1998

Punto delicato di questo gioco
(e di altre simili illustrazioni):

- Sincronizzazione di orologi a grande distanza

Le contrazioni delle lunghezze le dilatazioni degli intervalli tempo possono essere facilmente dimostrate in pratica usando particelle “veloci”

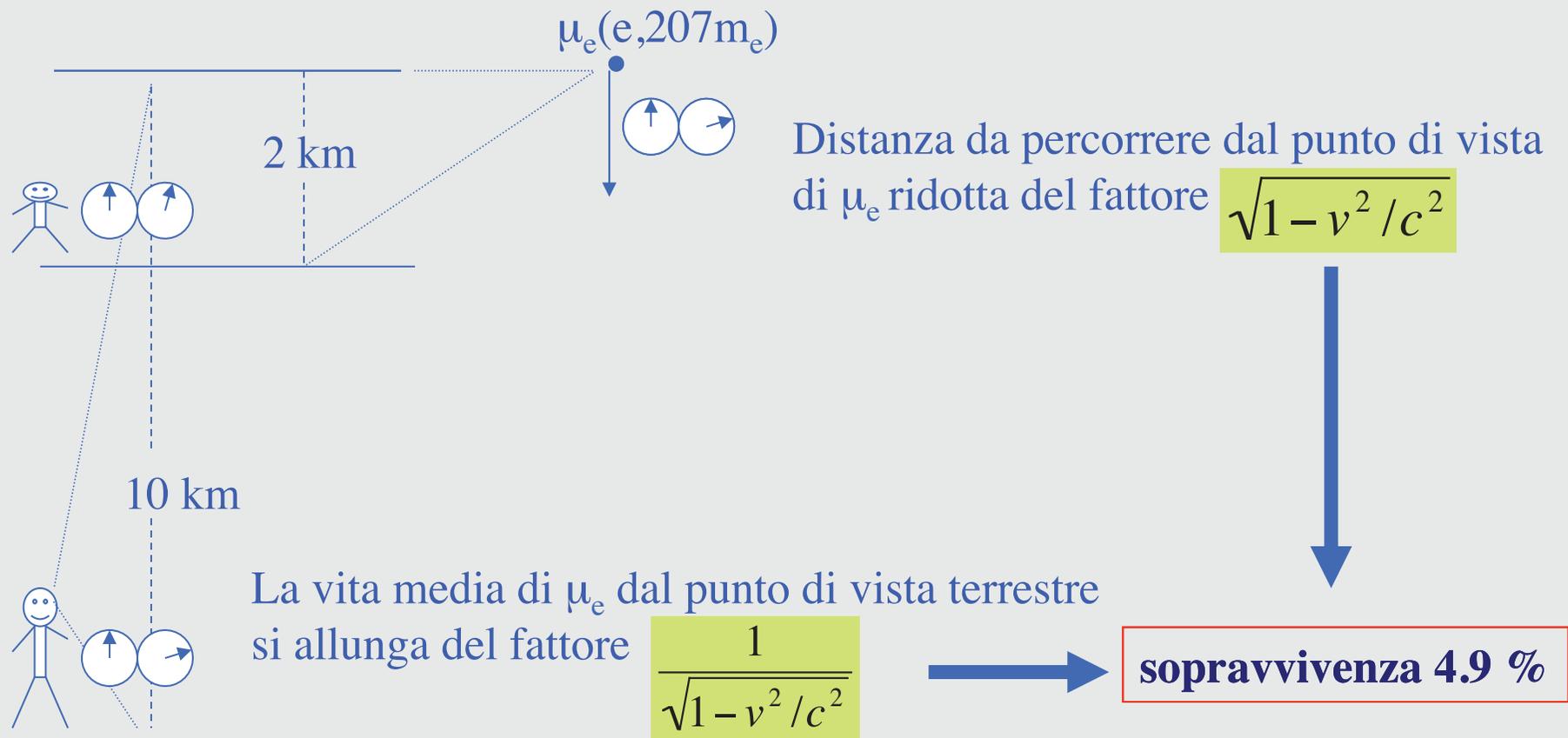
Alta atmosfera



Superficie terrestre

Esperimento

- a 10 km di altitudine si formano sciame di muoni $\mu_e(e, 207m_e)$, con velocità $0.98 c$.
- il 4.9 % di essi sopravvive e viene rivelato al livello del mare.
- a riposo la vita media dei muoni μ_e è 1.56 milionesimi di secondo.
 ➔ dovrebbero arrivarne solo 0.000027 %, **come è possibile ?**



Prima della dell' avvento della Teoria della Relatività Speciale, si pensava che dato un orologio e un evento particolare, come lo scoccare di un' ora, vari osservatori posti a qualunque distanza reciproca potessero osservare simultaneamente l' evento.

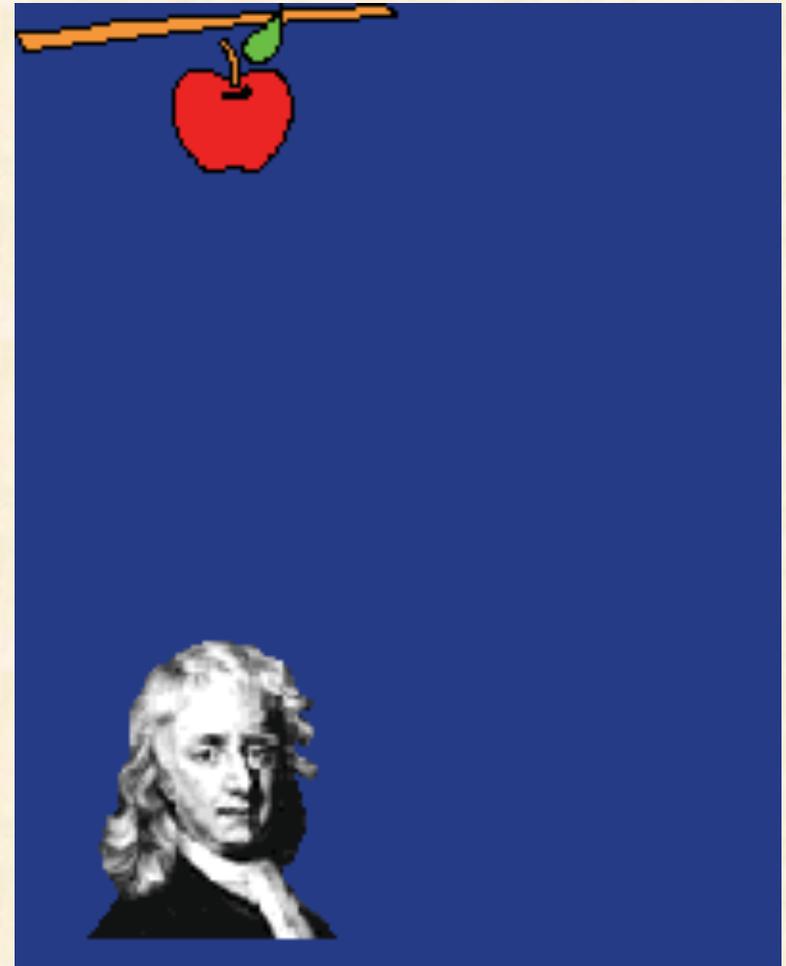
▶ **PRIMA DI EINSTEIN** : la simultaneità di eventi era definibile in modo assoluto

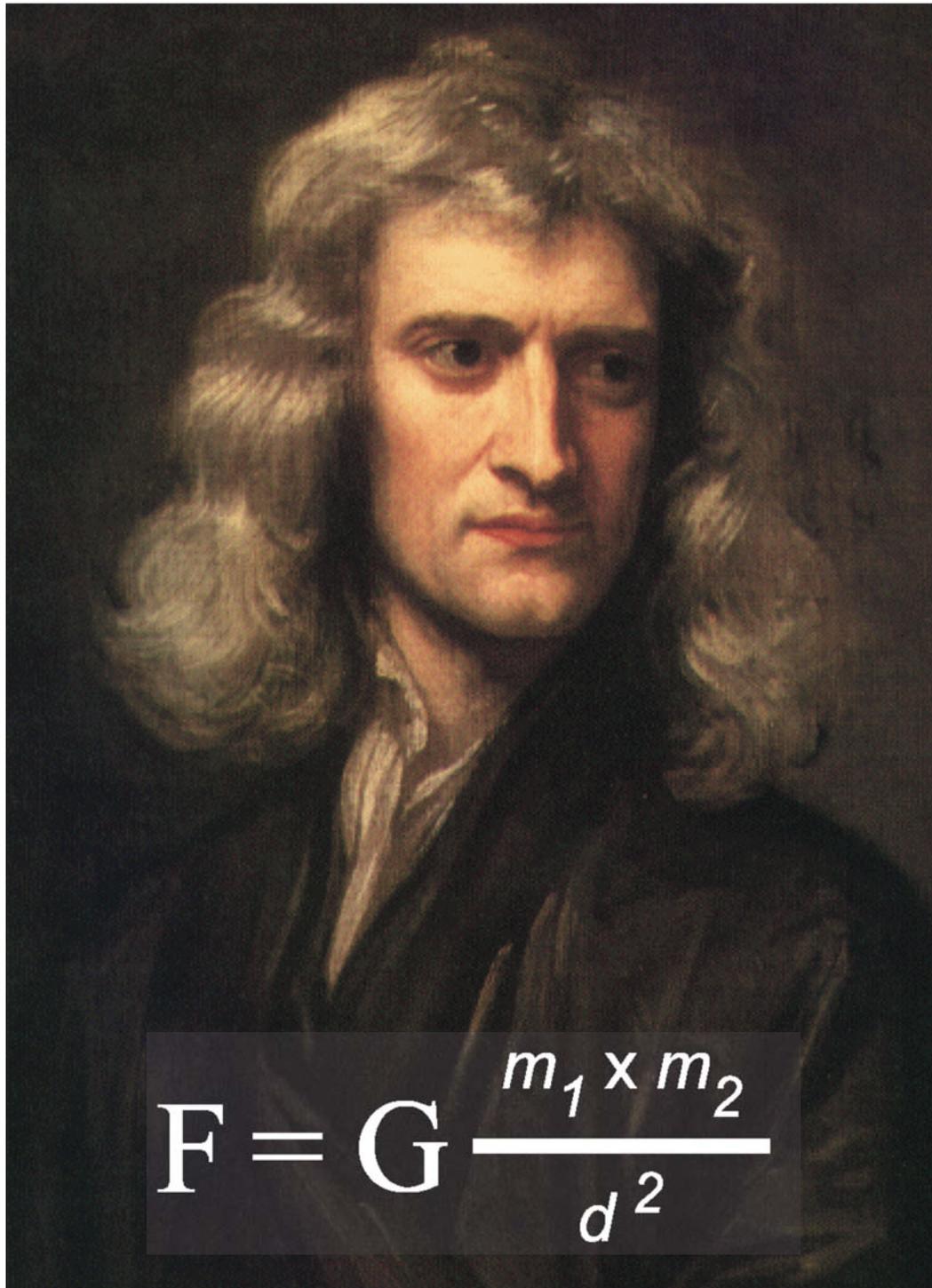
Con la Teoria della Relatività Speciale e con la scoperta sulla velocità della luce - indipendente dallo stato di moto del *sistema inerziale di riferimento* prescelto - si scopre che parlare di **simultaneità di più eventi separati nello spazio non ha senso** perché non è possibile riferire questi eventi ad un comune sistema inerziale di riferimento.

▶ **DOPO EINSTEIN**: simultaneità rimane valida solo in ambito locale (relativa)

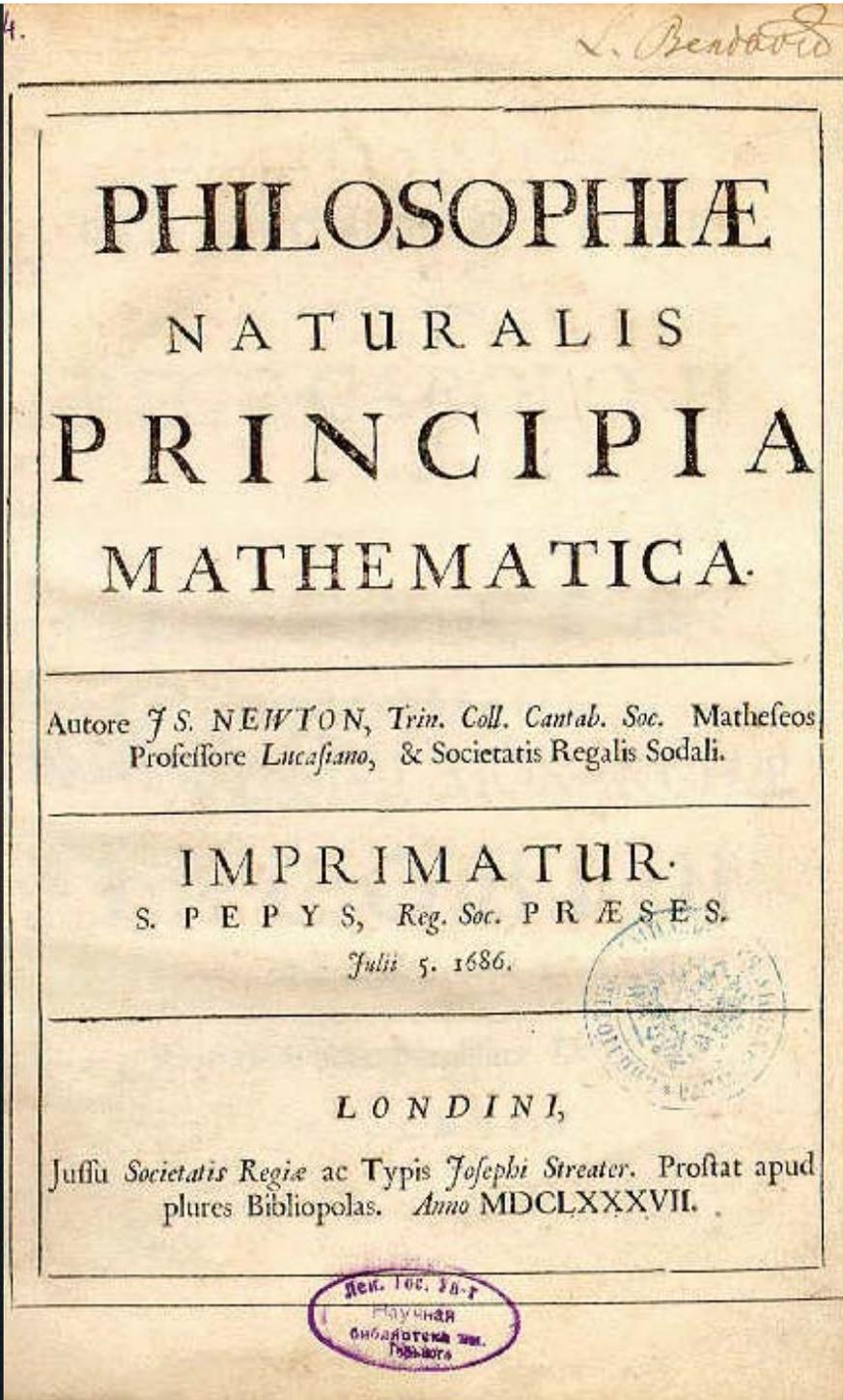
Lo spazio e il tempo appaiono dunque “saldati”

La Gravità





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



L. Beadard

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.

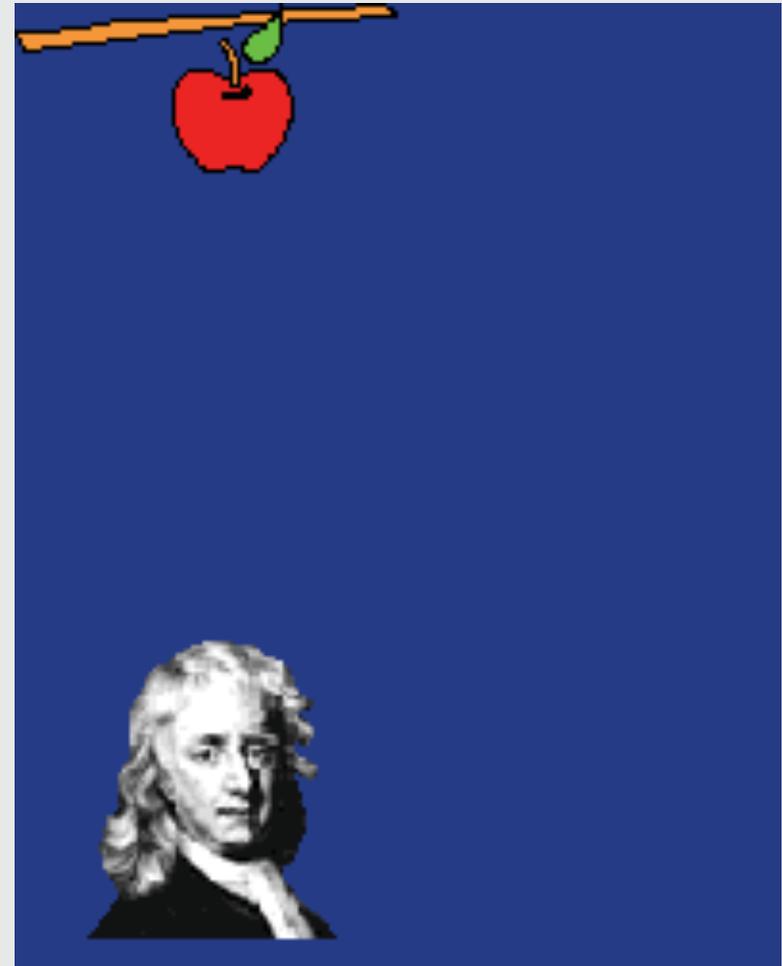
LONDINI,

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

Лек. 100. 18-7
Научная
библиотека им.
Горького

La Gravitazione Universale

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



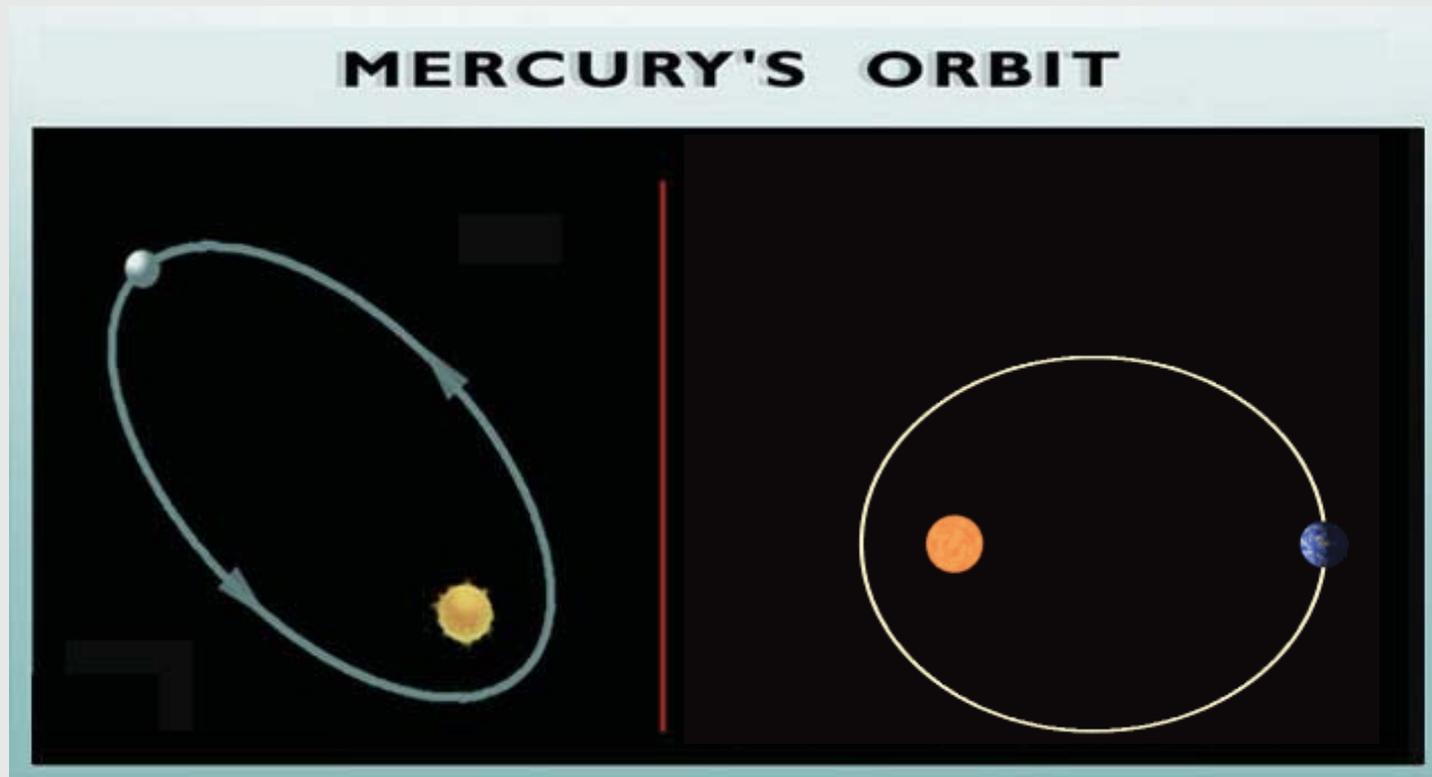
$$\vec{F} = G \frac{M_1 M_2}{r^2} \hat{r}$$

Ma quale è la causa ultima di questa forza ?

L'equazione ne riassume bene le caratteristiche, ma non ci spiega quale sia il meccanismo che la determina !

Dopo quasi duecento anni si apre una piccola crepa nella teoria Newtoniana

(Le Verrier, 1859)



*Lo spostamento del perielio di Mercurio è
5600"/secolo, 43"
più grande di quello previsto dalla teoria di Newton*

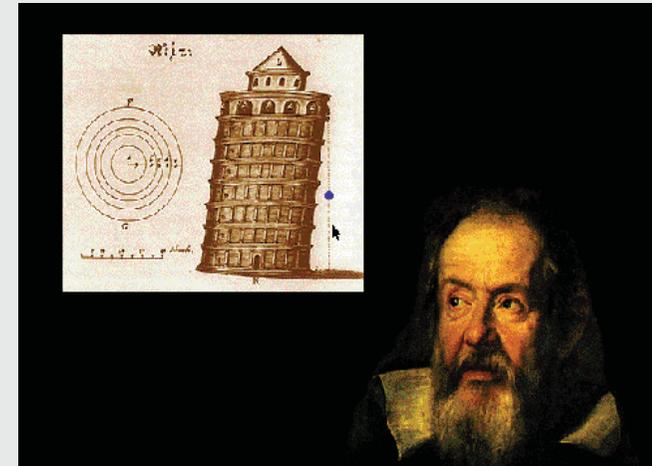
Il principio di Equivalenza

- L'eguaglianza tra *Massa Inerziale* e *Massa Gravitazionale* spiega come mai tutti i corpi cadano con la stessa accelerazione, indipendentemente dalla loro natura

$$\vec{F} = G \cdot \frac{M \cdot m_g}{r^2} \hat{r} \quad (\text{gravità})$$

$$\vec{F} = m_i \cdot \vec{a} \quad (\text{inerzia})$$

$$\Rightarrow \vec{a} = \frac{m_g}{m_i} \cdot \frac{G \cdot M}{r^2} \hat{r}$$



- *Massa inerziale* x accelerazione (Il legge della dinamica)
= *Massa gravitazionale* x accelerazione gravitazionale (gravità)

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

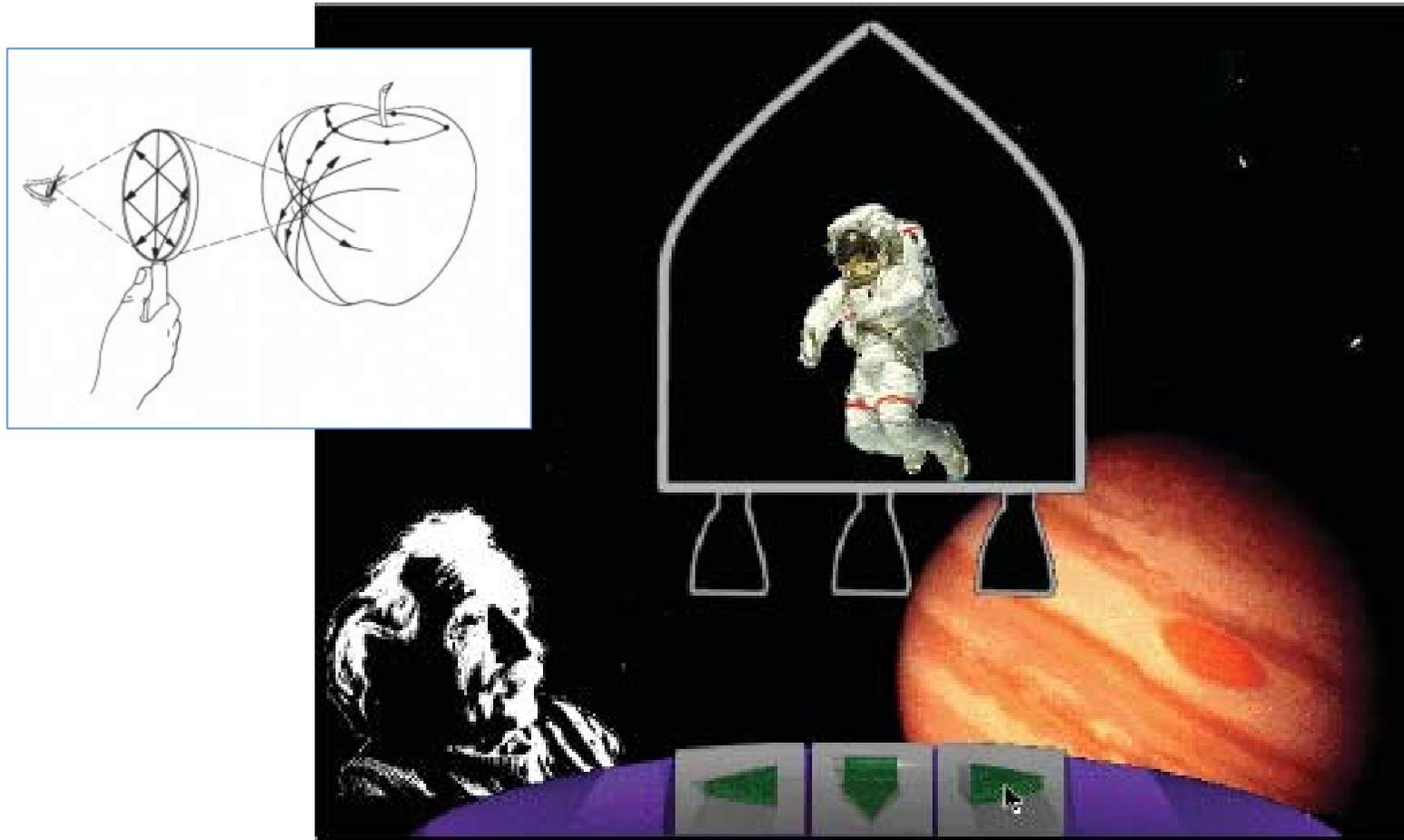
$$\vec{g} = \frac{\vec{F}}{M_2} = G \frac{M_1}{r^2} \hat{r} \quad G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2 / \text{kg}^2$$



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

Localmente, ovvero dove il campo gravitazionale può essere approssimato come uniforme, è possibile cancellarne l'effetto studiando i fenomeni fisici rispetto ad un sistema di riferimento uniformemente accelerato.

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.



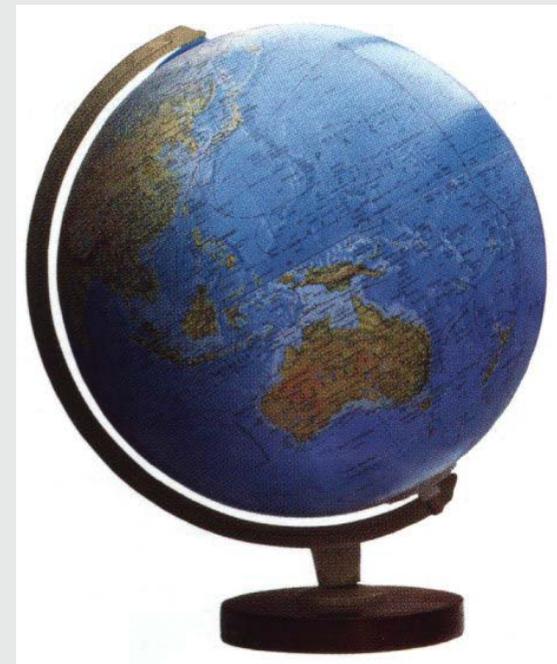
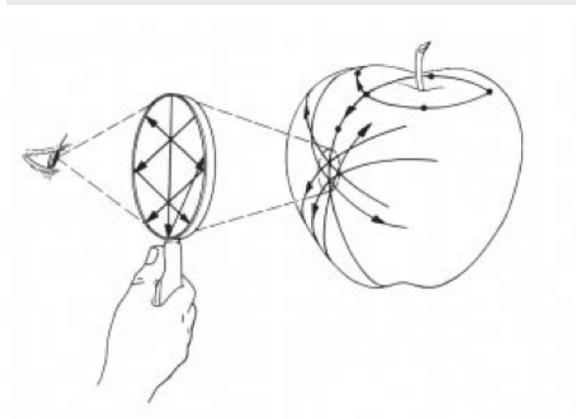
Grande vantaggio:

in queste cabine le leggi della relatività ristretta sono applicabili.

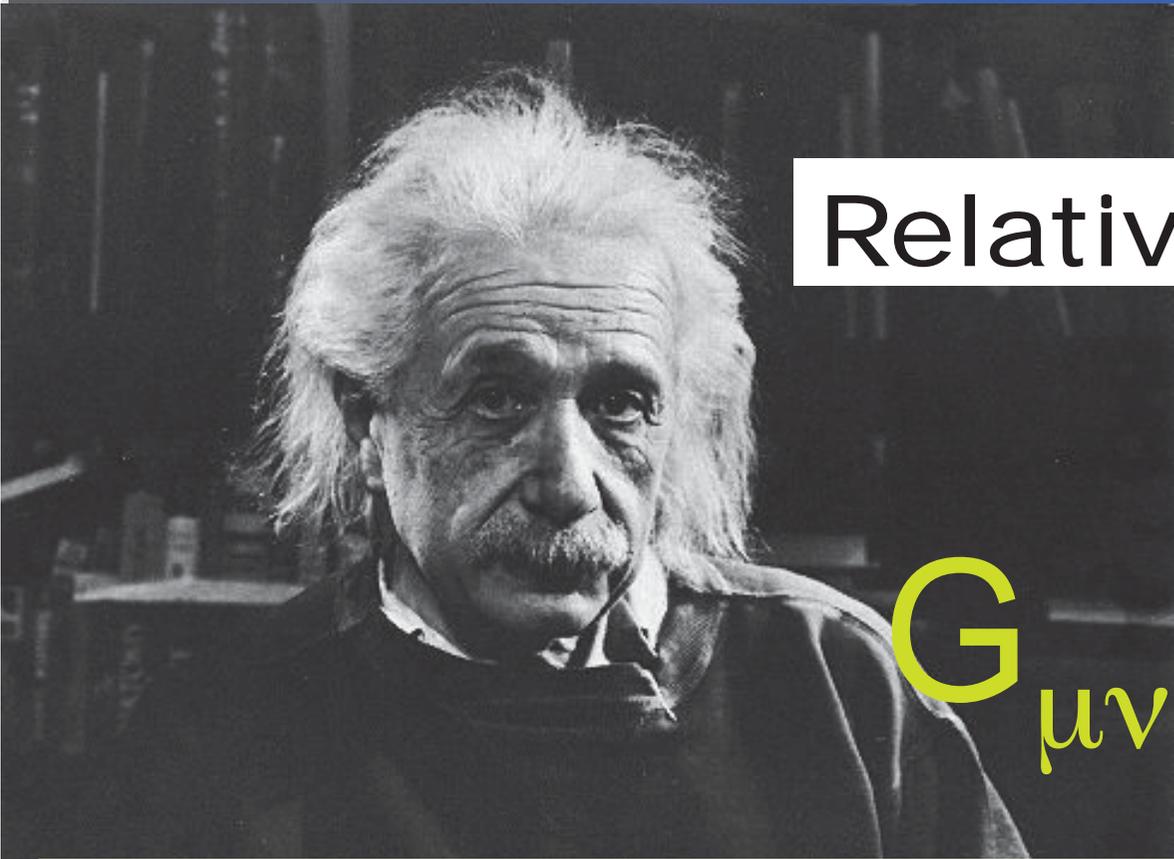
Grande svantaggio:

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

Ogni cabina è come il foglio di una singola mappa in un atlante



Ma per pianificare percorsi su larga scala è necessario un mappamondo



Relatività Generale

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

- La Gravità non è vista come un campo di forze; essa è descritta come una proprietà dello spazio e del tempo

- » Spazio-tempo = 3 dimensioni spaziali + tempo

- Le concentrazioni di massa o di energia deformano lo spazio tempo

- Il movimento dei corpi e della luce stessa, segue 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)**



un altro modo di scrivere le equazioni di A. Einstein

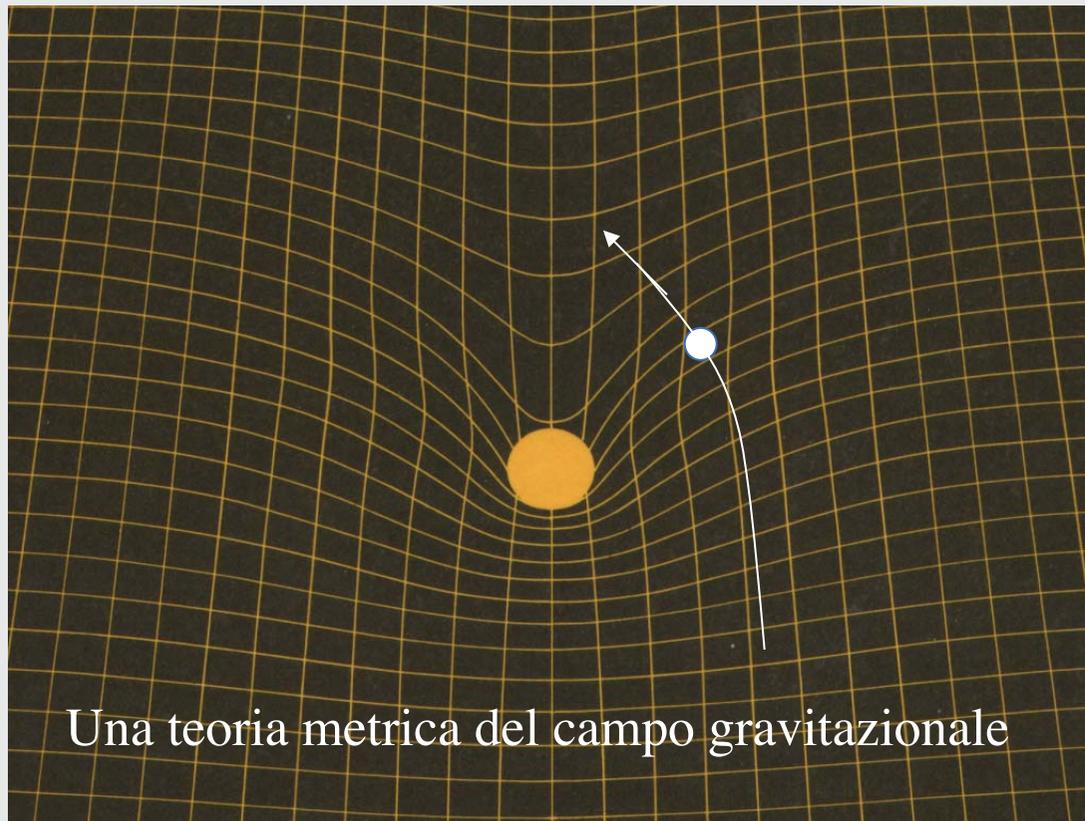
RELATIVITÀ GENERALE (1916)

Equazioni di Einstein
(Relatività Generale)

$$R^{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} R = \frac{8\pi G}{c^4} T^{\alpha\beta}$$

Metrica associata alla "curvatura" dello spazio.
(serve a definire le distanze in uno spazio curvo)

distribuzione di massa
(e di energia) nello spazio



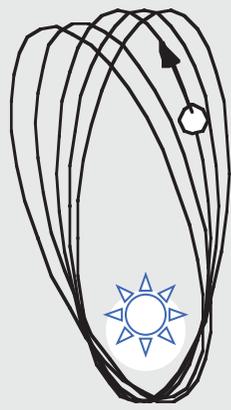
Una teoria metrica del campo gravitazionale

Effetti sempre più fini... per
verificarli si entra nel regno
dell' **astrofisica**

I

Avanzamento del perielio di Mercurio :

La teoria di Newton spiega l' effetto a meno di 43".

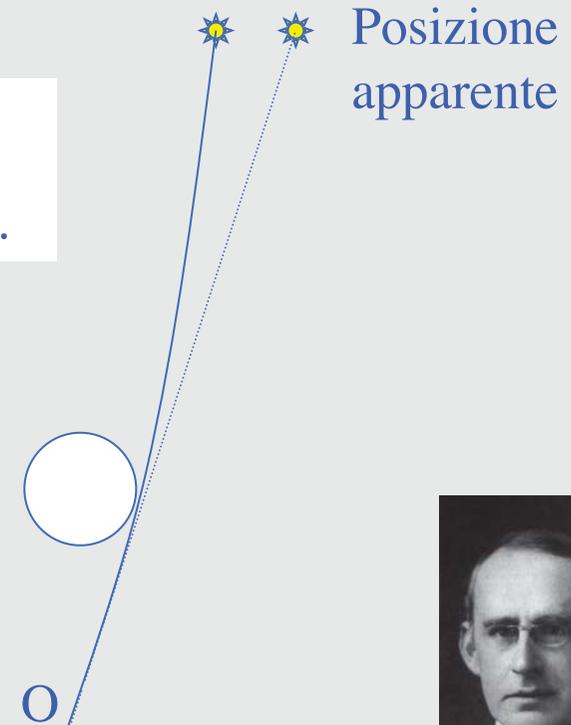


→ 1.6 gradi/secolo

II

La luce proveniente dalle stelle percorre la strada più breve, ma lo spazio è curvo a causa della presenza della massa delle altre stelle:

1.75" (Sir. A. Eddington 1919).



Le meraviglie di Hubble

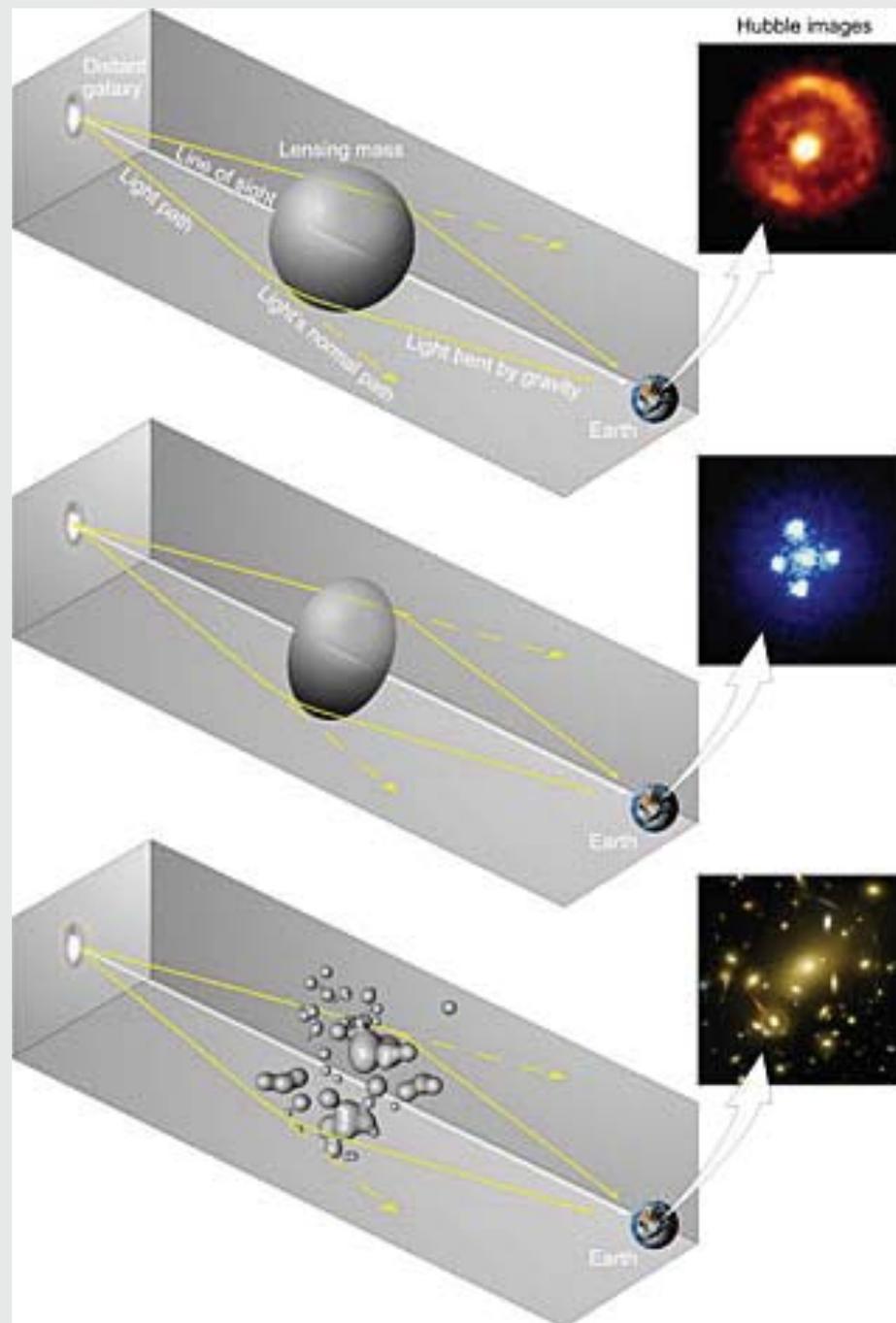


Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

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



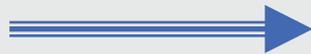


Non solo astrofisica

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 $7 \mu\text{s}$ /giorno degli orologi che si muovono velocemente (14000 km/h)
- RG (Generale) il tempo scorre più lentamente dove il campo gravitazionale è minore (sulla superficie terrestre): anticipo $45 \mu\text{s}$.



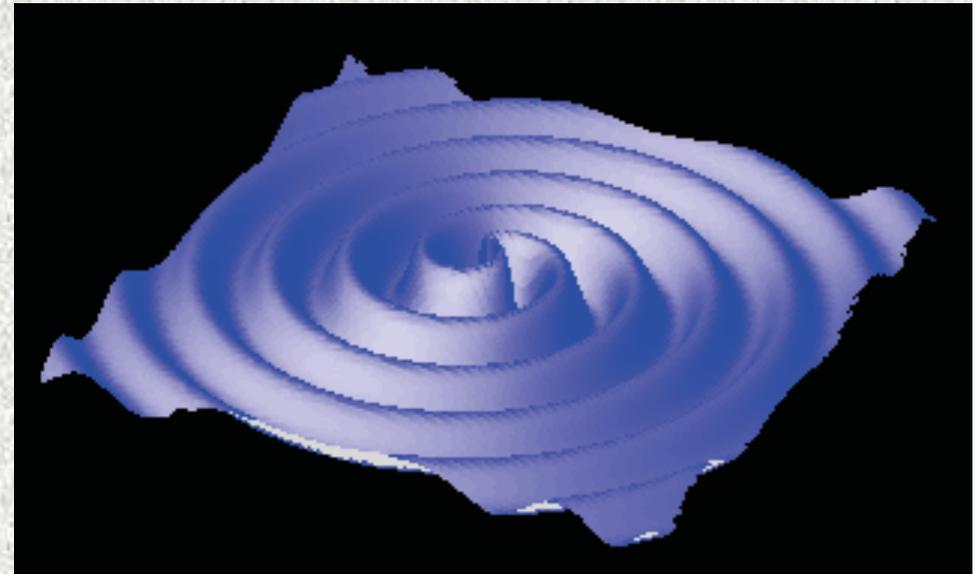
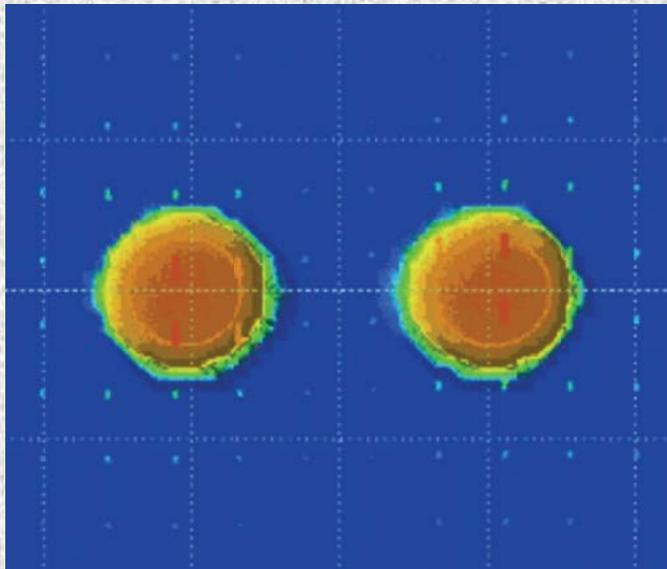
GPS funzionerebbe solo per 2 minuti e continuerebbe ad accumulare un errore di 10 km / giorno !!!!

Le meraviglie di Hubble



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

III ONDE GRAVITAZIONALI, la terza prova della Relatività Generale e una nuova astrofisica

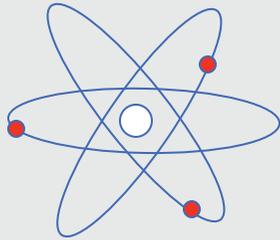


Simulazione di del collasso di due stelle
compatte e della propagazione delle onde
gravitazionali generateDue stelle collassate
che ruotano l'una attorno
all'altra avvicinandosi progressivamente
Binarie coalescenti

ELETTROMAGNETISMO

carica elettrica \pm
forza elettrica

$$F = k \frac{q \cdot Q}{R^2}$$



atomi

Maxwell
cariche in moto accelerato

ONDE ELETTROMAGNETICHE

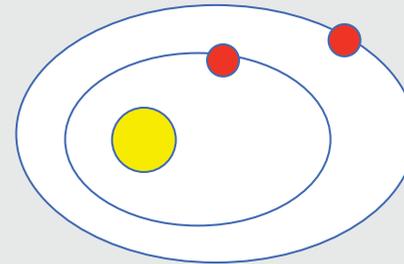
luce
radio TV telefono
microonde
raggi X γ

$$c = 300\,000\,000 \text{ m/s}$$

GRAVITAZIONE

massa
forza gravitazionale

$$F = G \frac{m \cdot M}{R^2}$$



sistema
solare

Einstein
masse in moto accelerato

ONDE GRAVITAZIONALI



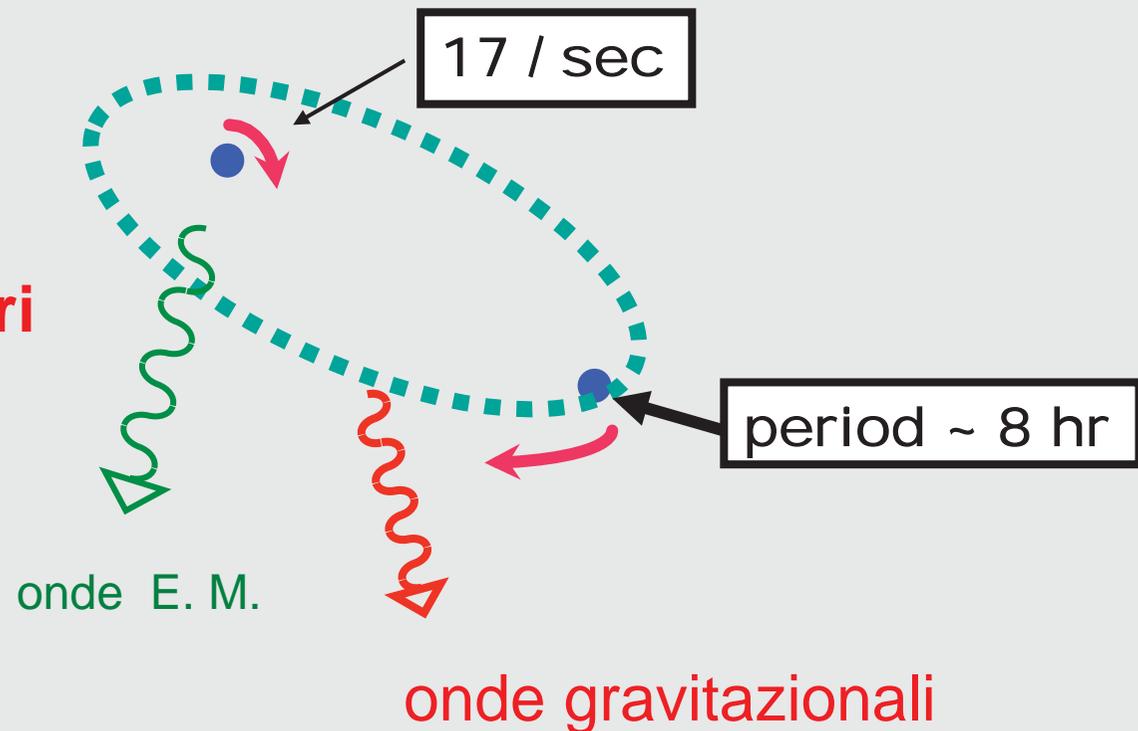
esiste una prova indiretta

Evidenza **indiretta** dell'esistenza delle Onde Gravitazionali

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

PSR 1913 + 16

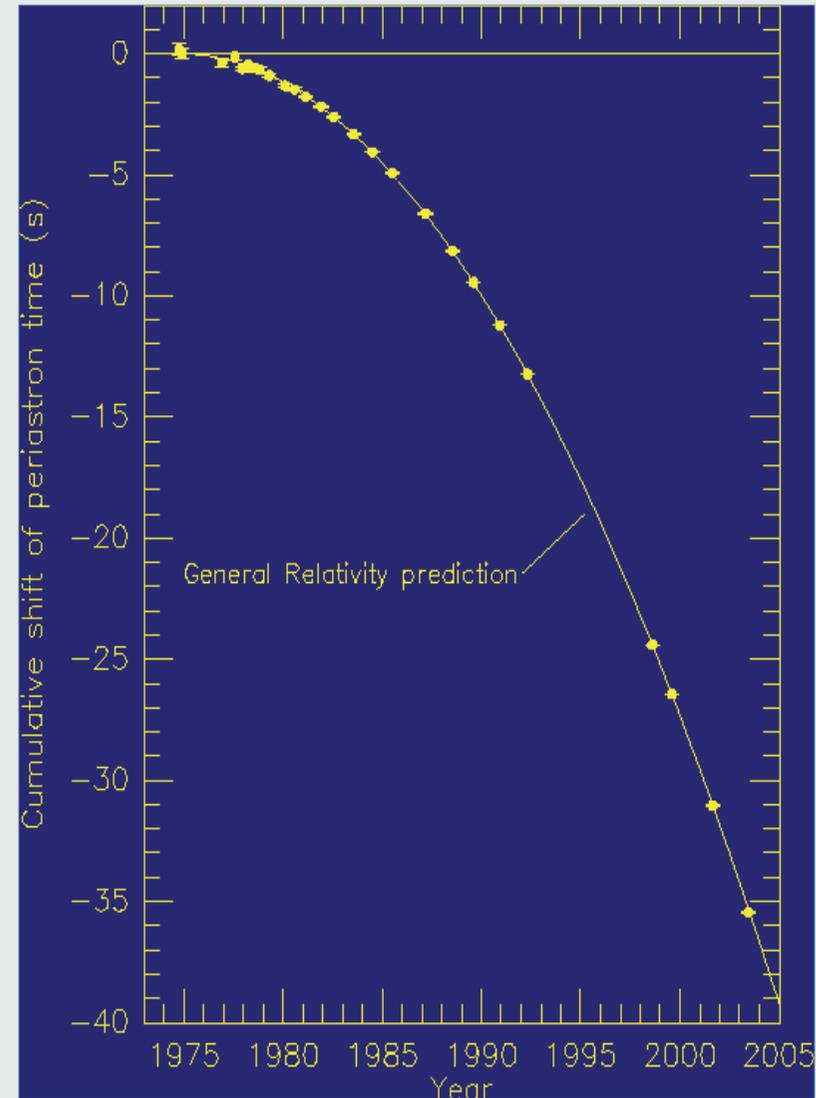


Secondo la teoria della Relatività Generale

- riduzione progressiva dell'orbita 3 mm/orbita
- Coalescenza in 400 milioni di anni



(Nobel 1993)



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

Metrics deformation propagating at light speed in two polarization components

$$R^{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} R = \frac{8\pi G}{c^4} T^{\alpha\beta}$$

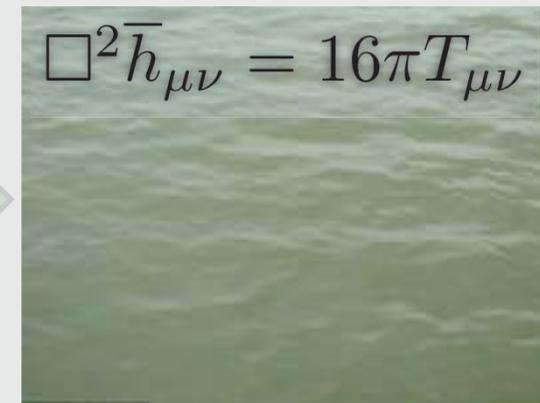
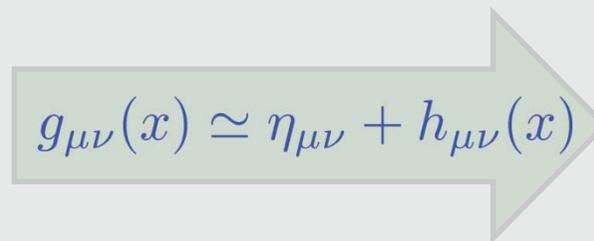
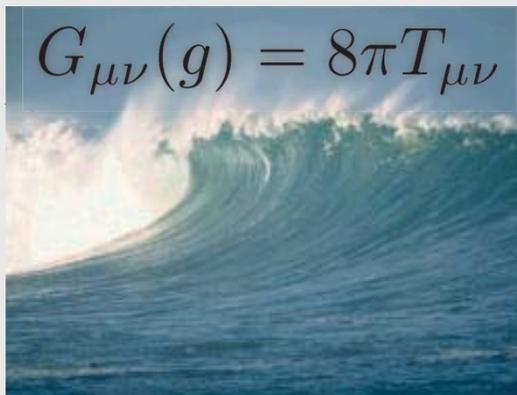
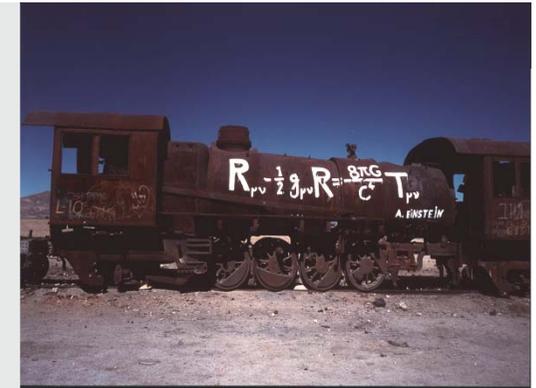
A. Einstein 1916

$$g_{\alpha\beta} = \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta} \quad |h_{\alpha\beta}| \ll 1$$

Linearization and gauge choice

$$R^{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} R = -\frac{\square h^{\alpha\beta}}{2}$$

Wave equation set (in absence of the source, with $T=0$)



Il regime in cui vogliamo osservare le OG è quello di piccolissime fluttuazioni della geometria dello spazio, lontano dalle sorgenti

Metrics deformation propagating at light speed in two polarization components

$$R^{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} R = \frac{8\pi G}{c^4} T^{\alpha\beta}$$

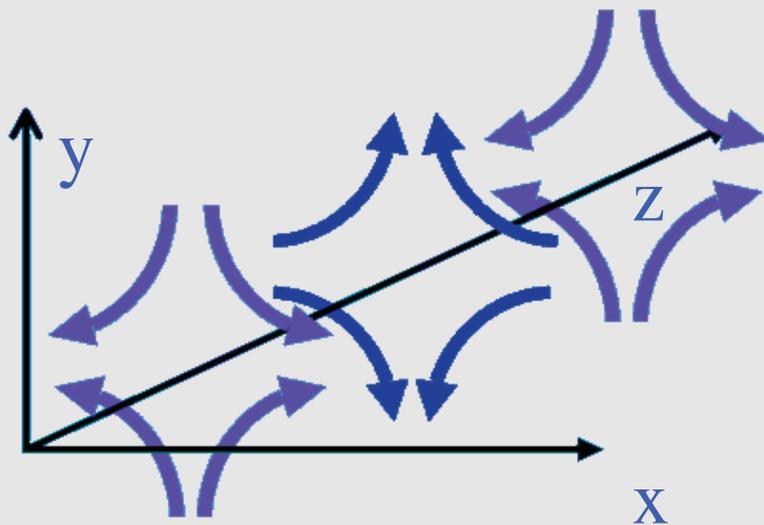
A. Einstein 1916

$$g_{\alpha\beta} = \eta_{\alpha\beta} + h_{\alpha\beta} \quad |h_{\alpha\beta}| \ll 1$$

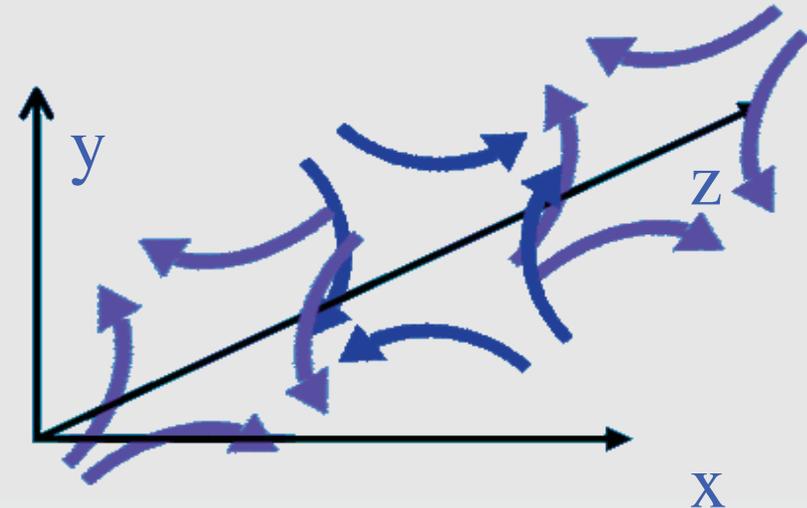
Linearization and gauge choice

$$R^{\alpha\beta} - \frac{1}{2} g^{\alpha\beta} R = -\frac{\square h^{\alpha\beta}}{2}$$

Wave equation set (in absence of the source, with $T=0$)



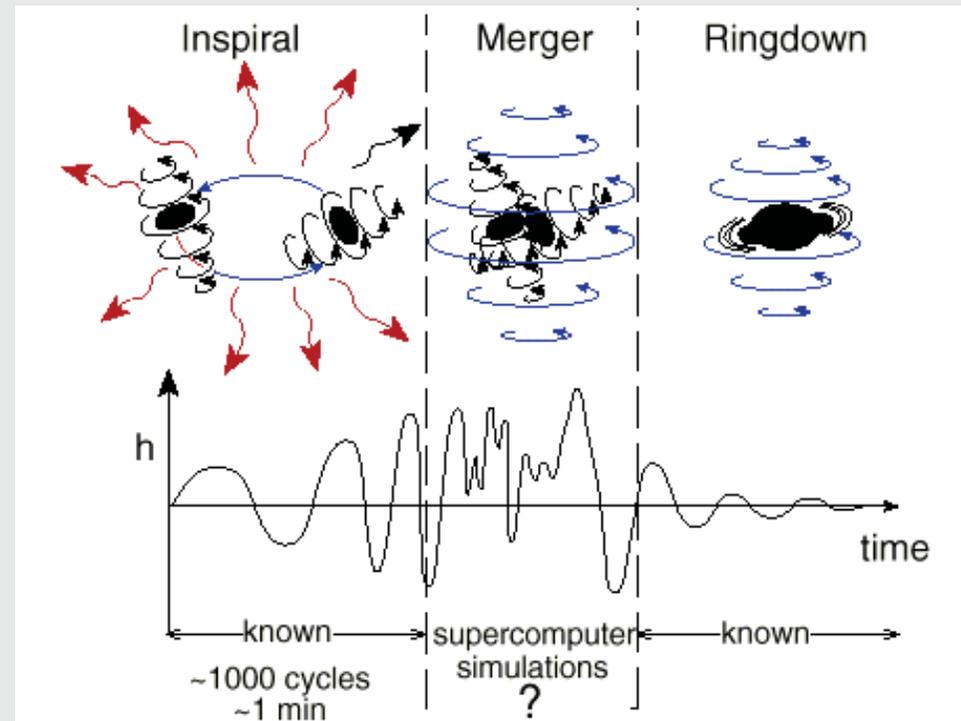
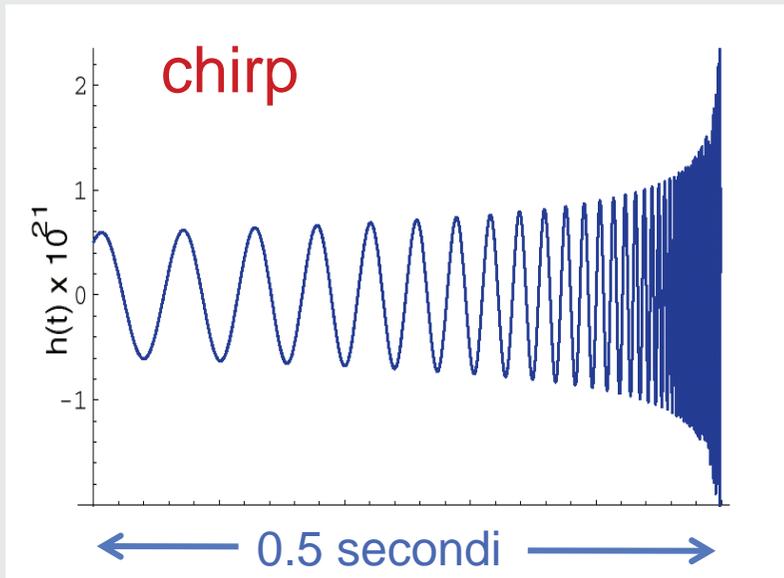
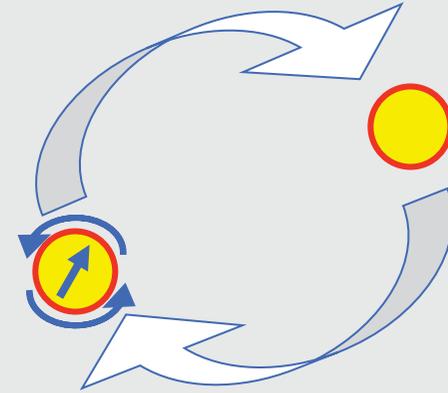
$$\hat{k} = \hat{z}$$



Sorgenti di onde gravitazionali

1) Stelle Binarie Coalescenti

Coppie di stelle densissime (stelle di neutroni o buchi neri), che, ruotando una intorno all'altra, irradiano energia (OG) e finiscono per fondersi in un'unico corpo.



2) Supernovae

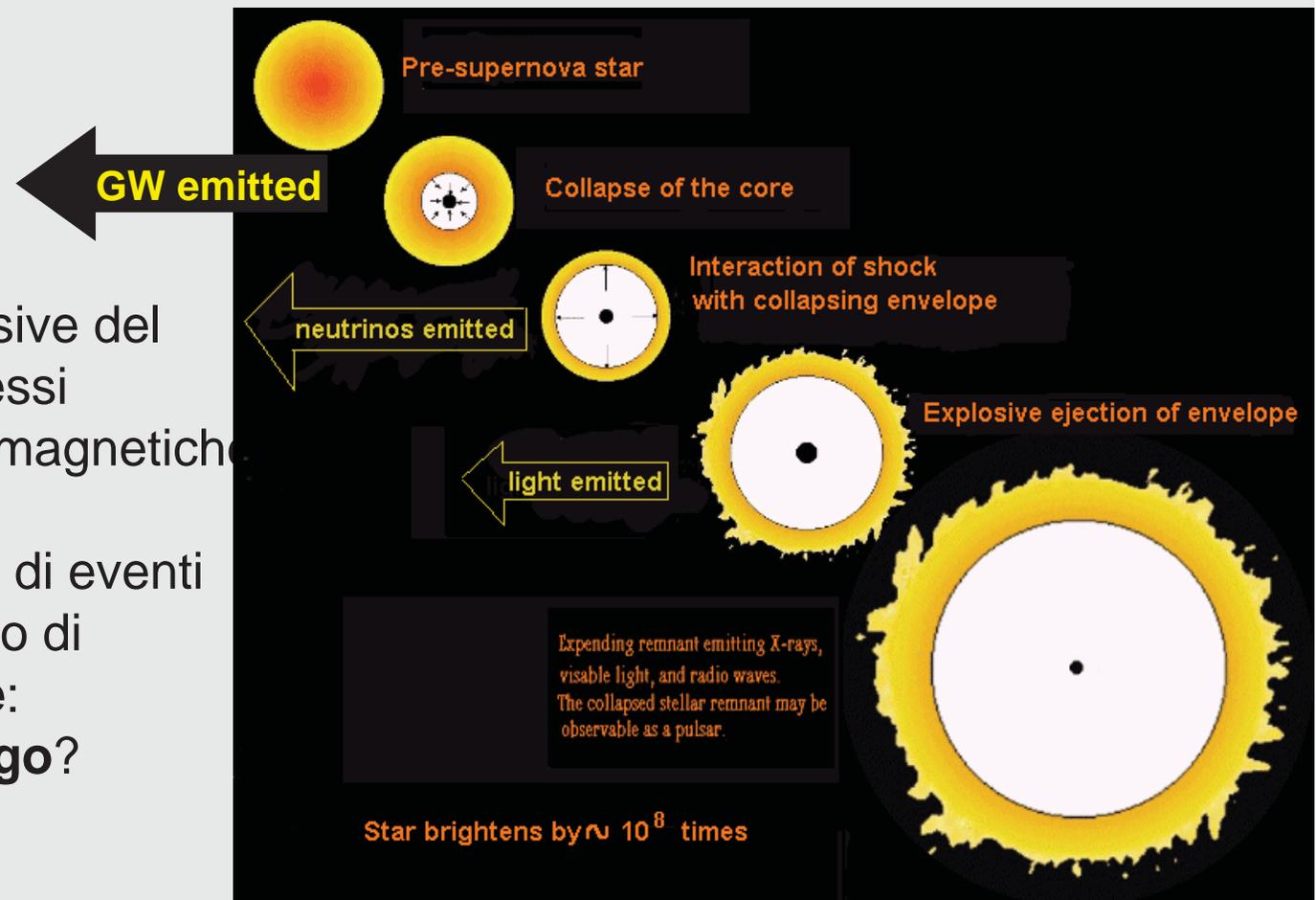
Eventi impulsivi (1 ms) dovuti all'atto finale della vita di stelle che collassano in un corpo densissimo (stella di neutroni o buco nero).

Le **Onde Gravitazionali** sono emesse solo se il collasso avviene con simmetria non sferica.

Le previsioni sull'ampiezza e sullo sviluppo temporale sono molto incerte.

Solo nelle fasi successive del collasso vengono emessi neutrini e onde elettromagnetiche.

Ci si aspettano decine di eventi all'anno nell'ammasso di galassie della **Vergine**: quanti "visibili" da **Virgo**?



SUPERNOVAE



The Crab Nebula in Taurus (VLT KUEYEN + FORSZ)
ESO PR Photo 4059 (17 November 1999) © European Southern Observatory

Nebulosa del Granchio

distanza 6000 anni-luce, diametro 10 anni-luce, velocità di espansione 1800 km/s

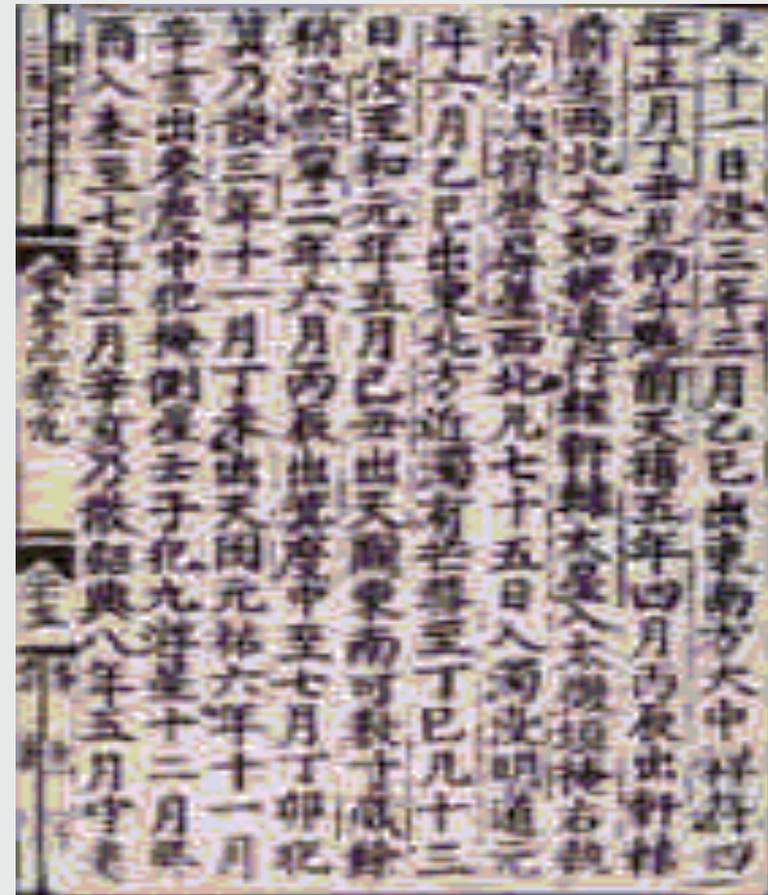
Resti della supernova osservata il 4 luglio 1054 in Cina e in America, rimase visibile anche di giorno per 23 giorni

Al centro, non visibile, una Pulsar con frequenza di 30Hz

La trascrizione dell'incisione originale degli astronomi cinesi e la sua traduzione

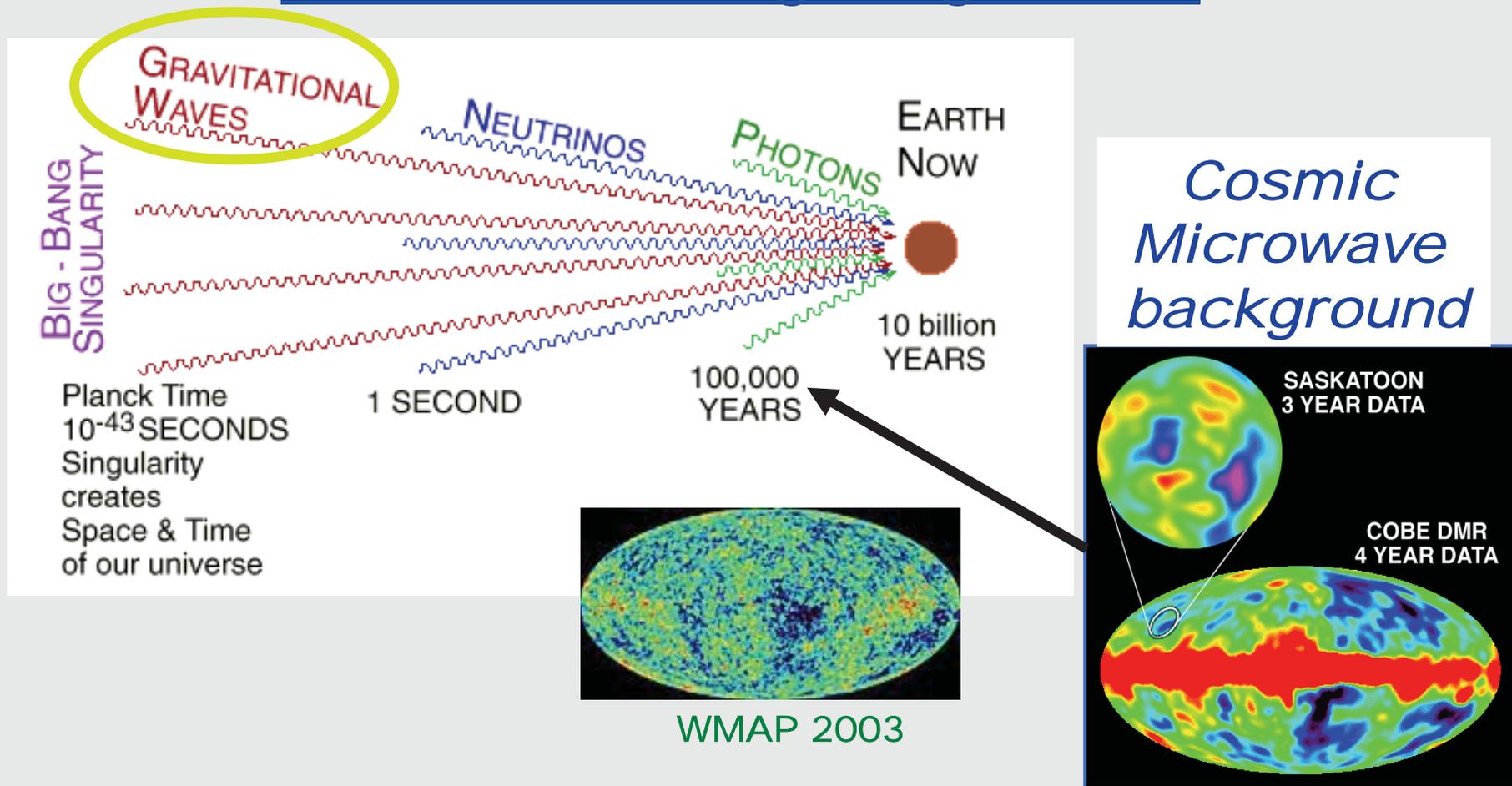
1054年7月4日 [宋會要]中記有：「元年三月，司天監言客星沒，客去之兆也。初，至和元年五月，晨出東方，守天關。晝如太白，芒角四出，色赤白，凡見二十三日。」

Nel libro “ShongHuiYao”, che significa “Raccolta della dinastia Shong”, si trova scritto: “Nel Marzo dell’ anno ZhiHe Primo (Maggio 1054), l’osservatore astronomico vedendo che la stella KeXing (Stella temporanea) diminuisce di intensità luminosa, prevede la scomparsa dell’astro. La mattina del 13 Maggio dello stesso anno (4 Luglio 1054), la nuova stella nasce ad est come un guardiano celeste. E’ tanto luminosa di giorno, quanto la stella polare di notte, con una corona particolarmente luminosa e bianca, della durata di 23 gioni.”



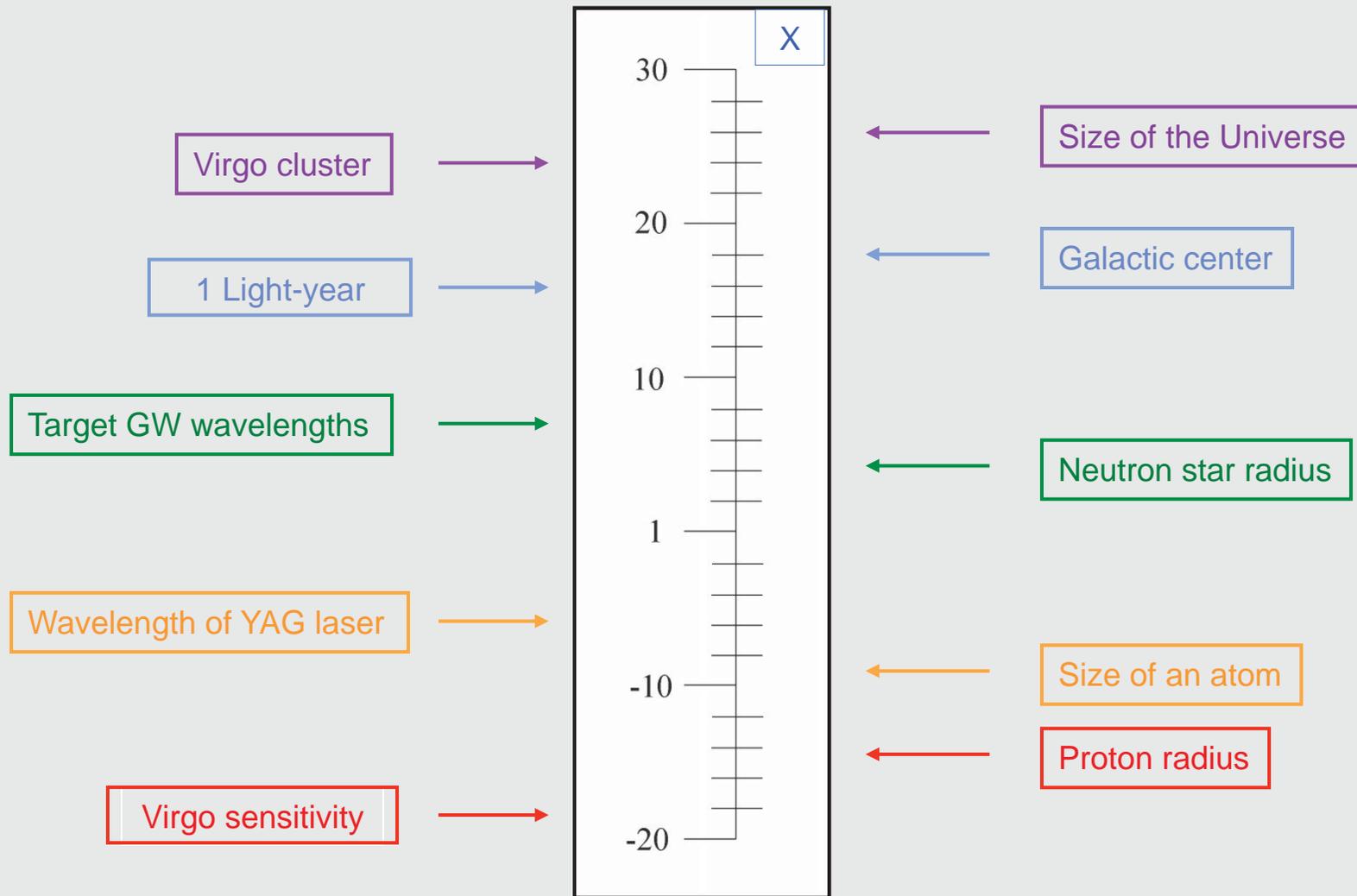
3) Universo Primordiale: “rumore correlato tra i vari rivelatori”

‘mormorio’ dal Big Bang iniziale



Rivelazione dalla terra

Scala logaritmica di lunghezze ($L = 10^x$ metri)



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:

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

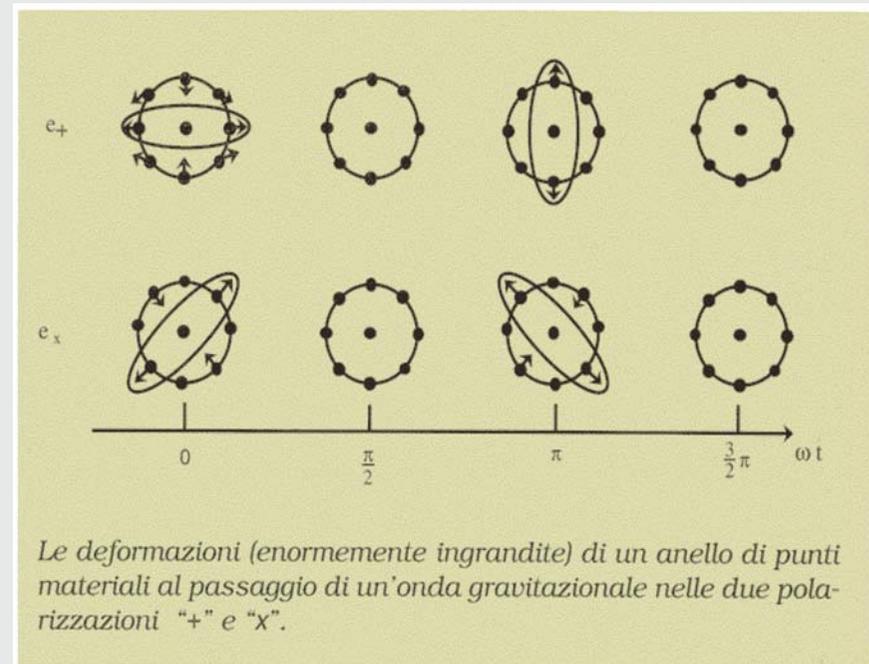
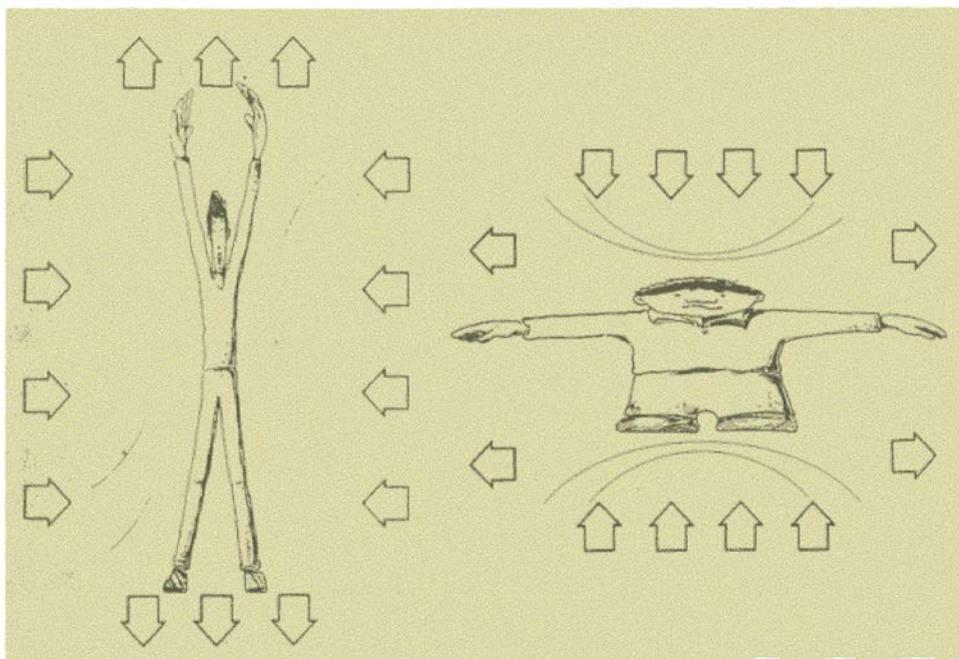
h rappresenta il cambiamento sulla Terra della distanza relativa tra due punti

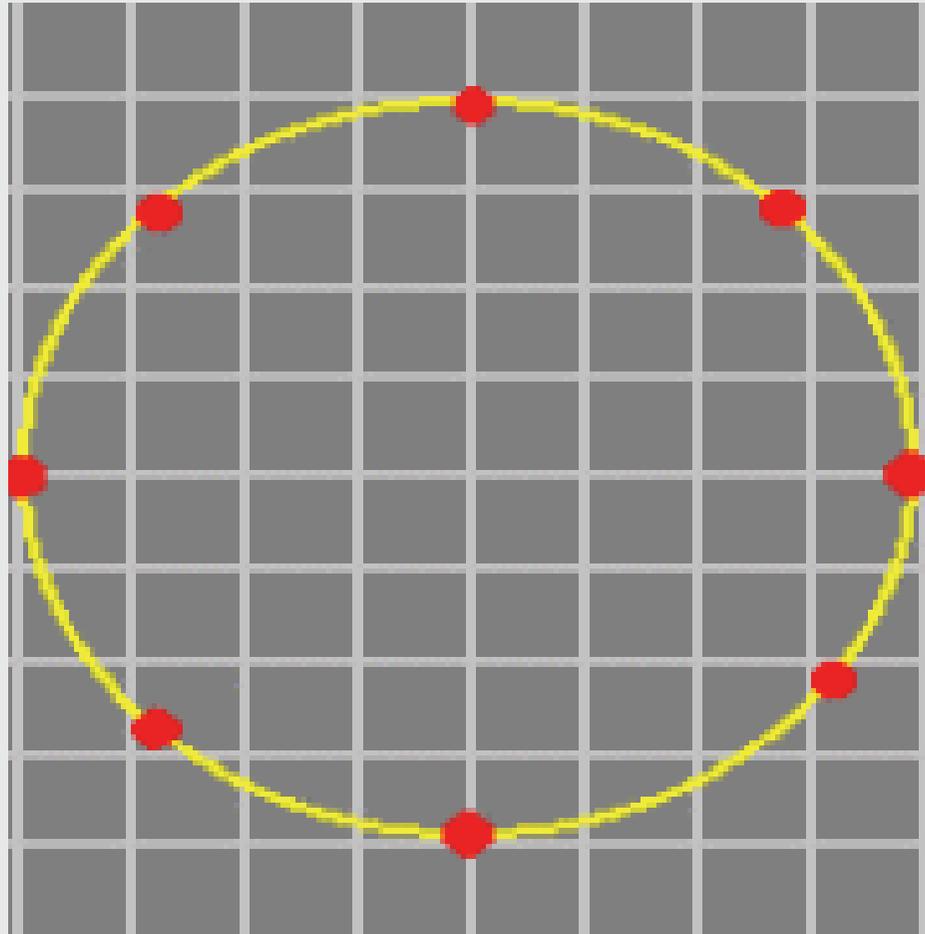
In altre parole se pongo due corpi ad una distanza di 1 km l'uno rispetto all'altro, lo spostamento da misurare è

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

La Rivelazione delle ONDE GRAVITAZIONALI - 1

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





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 .



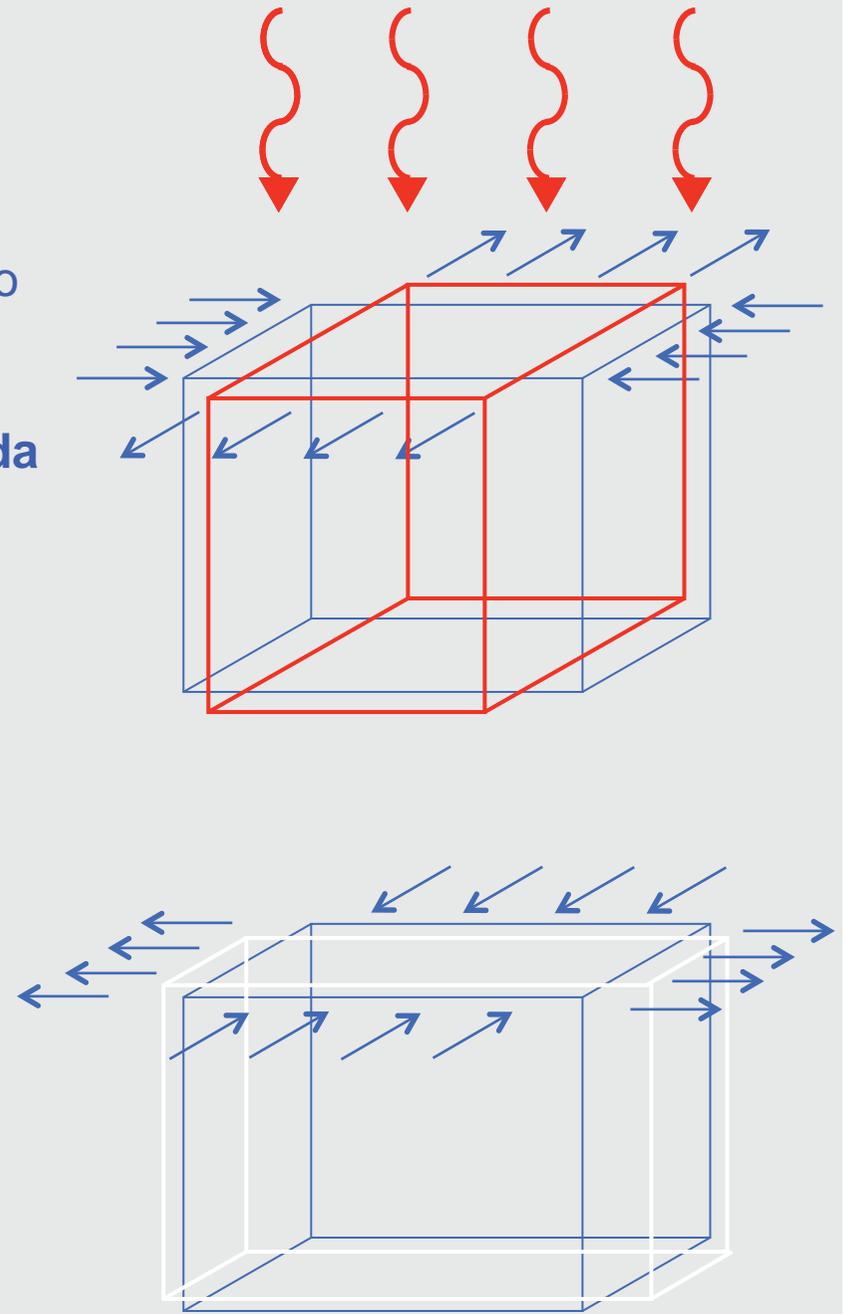
In sintesi :

Gravitazione = deformazione dello spazio-tempo

→ Le Onde Gravitazionali sono **oscillazioni dello spazio che ci circonda determinate da corpi molto massivi soggetti ad accelerazione** (quadrupolare, come in figura)

Le **onde gravitazionali** deformano alternativamente lo spazio(-tempo) nelle due direzioni perpendicolari alla direzione in cui si propagano

Per rilevare il passaggio di un'onda gravitazionale è sufficiente tenere sotto controllo le distanze fra corpi liberi per determinarne eventuali alterazioni (come in figura)



L'INTERFEROMETRIA e le ONDE GRAVITAZIONALI -2

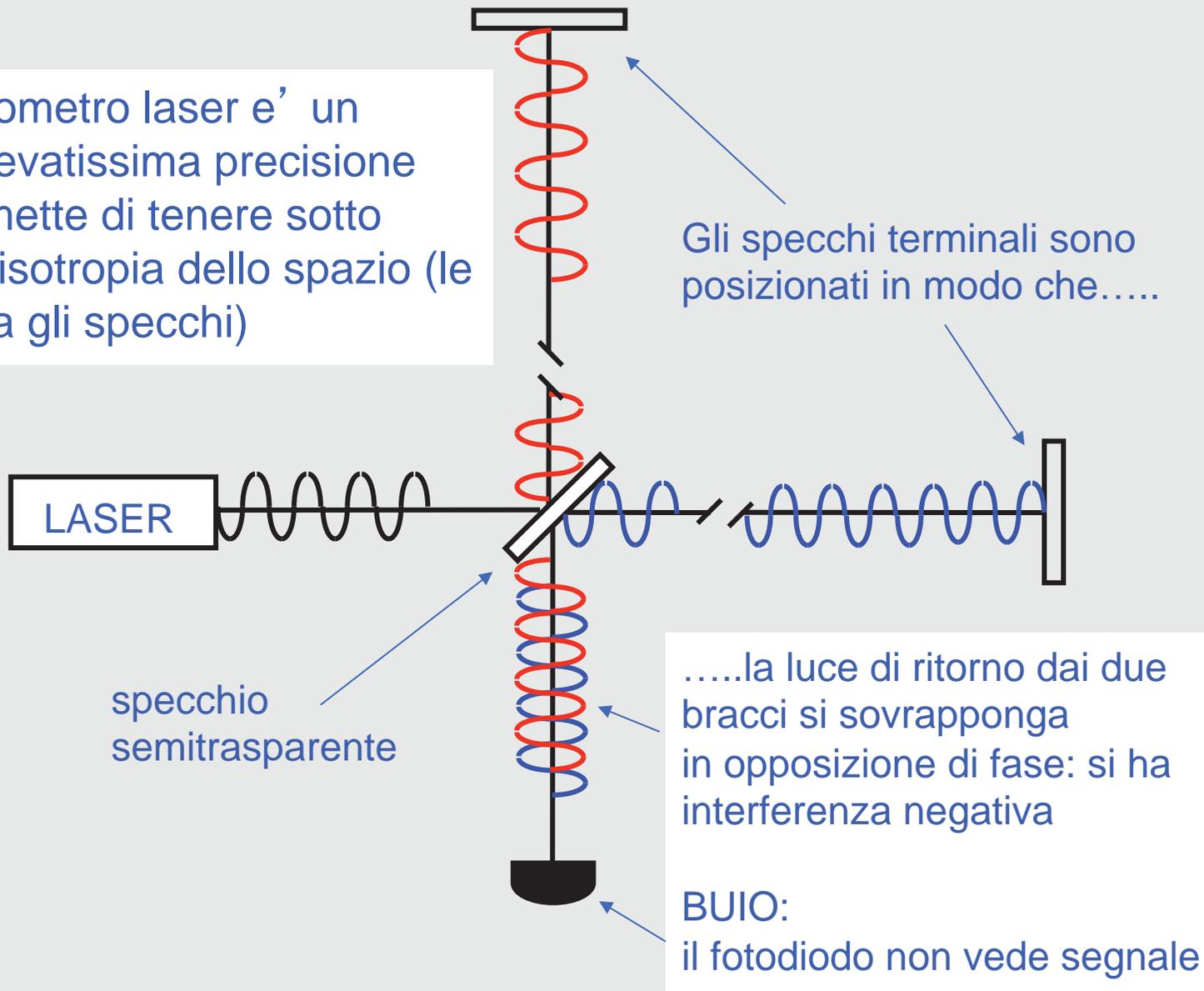
Il segnale d'uscita di un interferometro Michelson dipende dalla differenza dei tempi di transito della luce nei due bracci, ovvero dalla differenza di lunghezza dei due bracci.

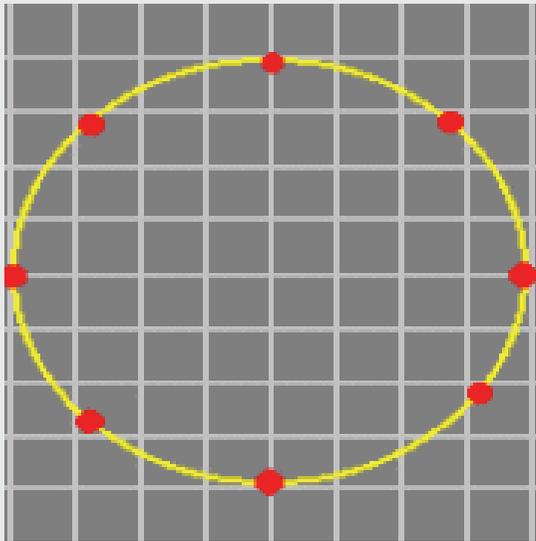
La variazione di lunghezza di un braccio è

$$\Delta L = h * L$$

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

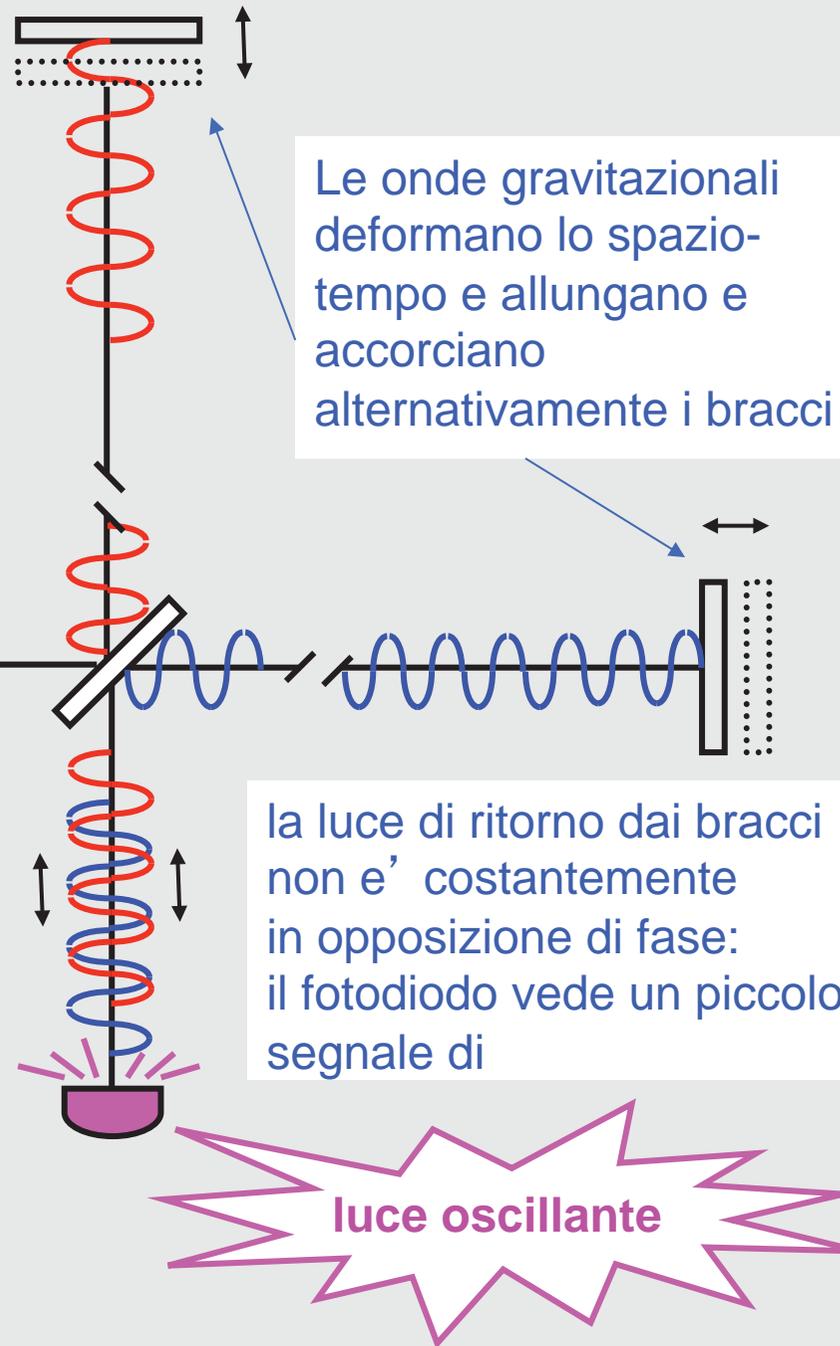
Un interferometro laser e' un metro di elevatissima precisione che ci permette di tenere sotto controllo l' isotropia dello spazio (le distanze fra gli specchi)





LASER

Le onde gravitazionali piu' intense che si possono prevedere deformano lo spazio-tempo di una frazione infinitesima: 10^{-21}
I bracci di 3 km si allungano e si accorciano di $3 \times 10^{-18} \text{ m}$:
un millesimo del raggio del protone !!!

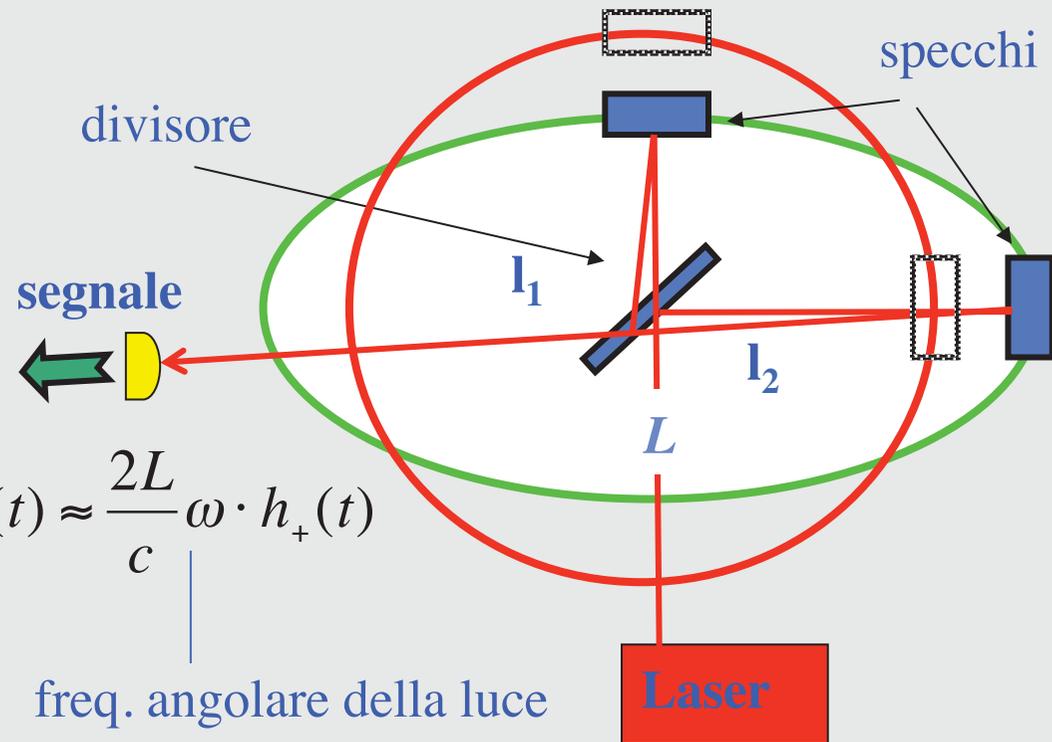
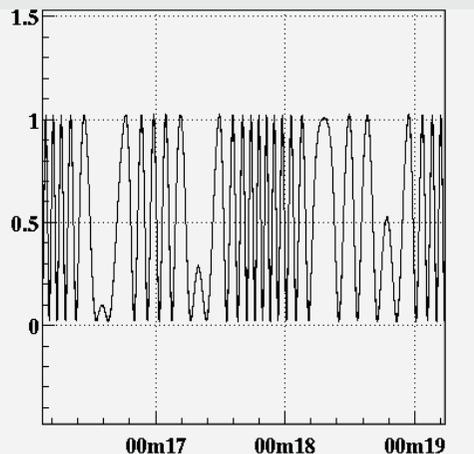


Uno strumento ideale per misurare deformazioni

Il segnale d'interferenza 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 DL

Interference fringes



$$\delta\varphi(t) \approx \frac{2L}{c} \omega \cdot h_+(t)$$

freq. angolare della luce

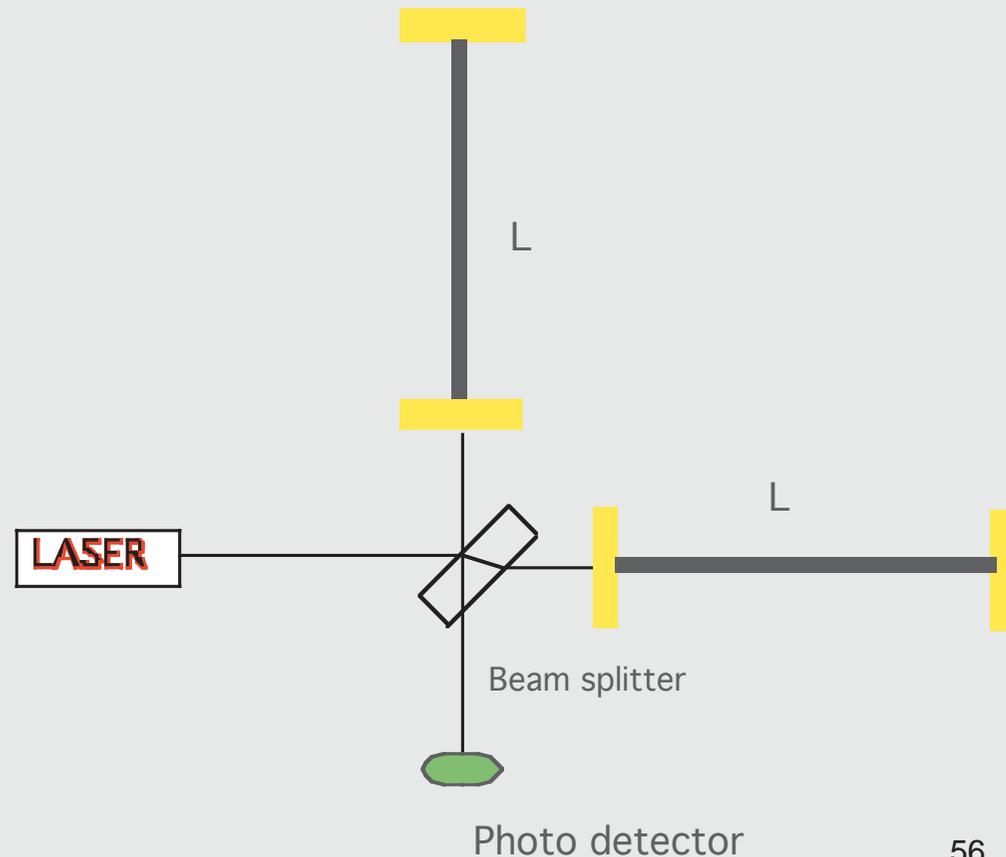
Sfasamento dei due treni d'onda

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**

Relativamente facile ottenere lunghezze efficaci di 200 km !

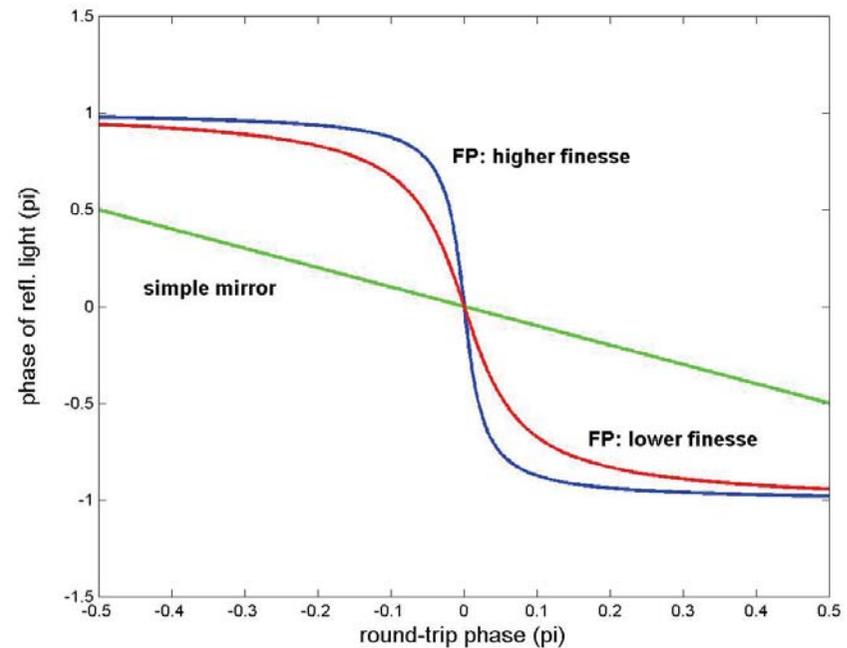
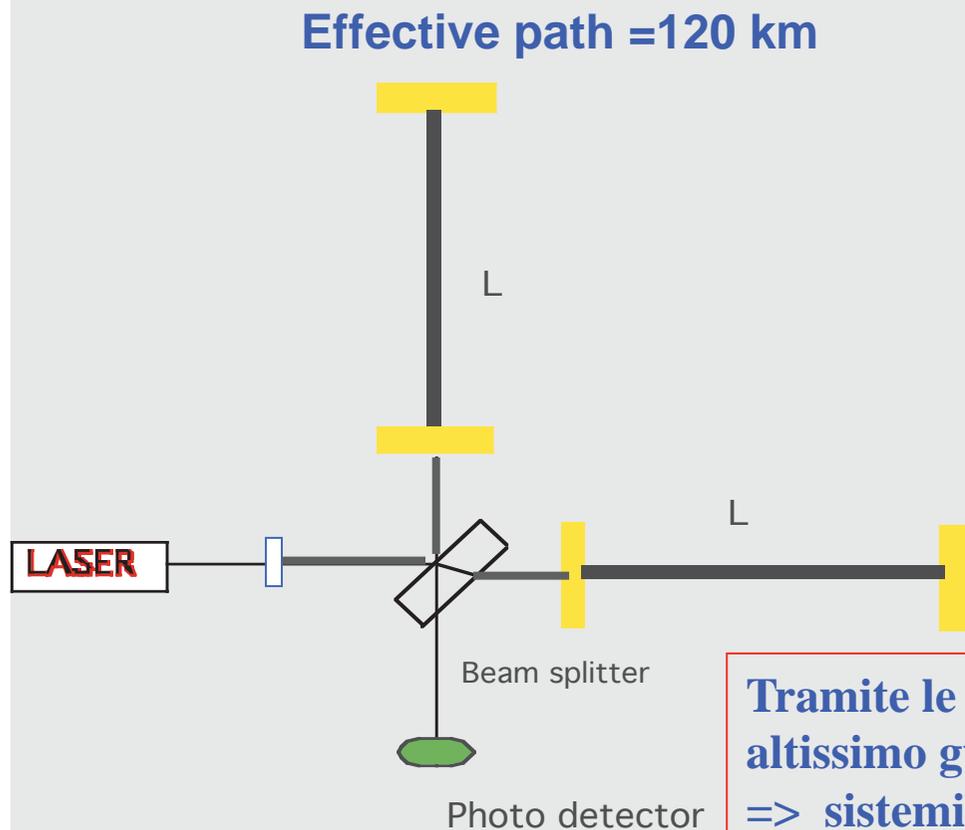


Standard layout used in ground-based detectors (i.e. framework upon Advanced detectors are being based)

I) The optical path where the GW-induced phase shift is accumulated can be enhanced by means of Fabry-Perot resonant cavities.

II) Dark fringe detection to reduce read-out noise.

III) Recycling of ITF reflection.

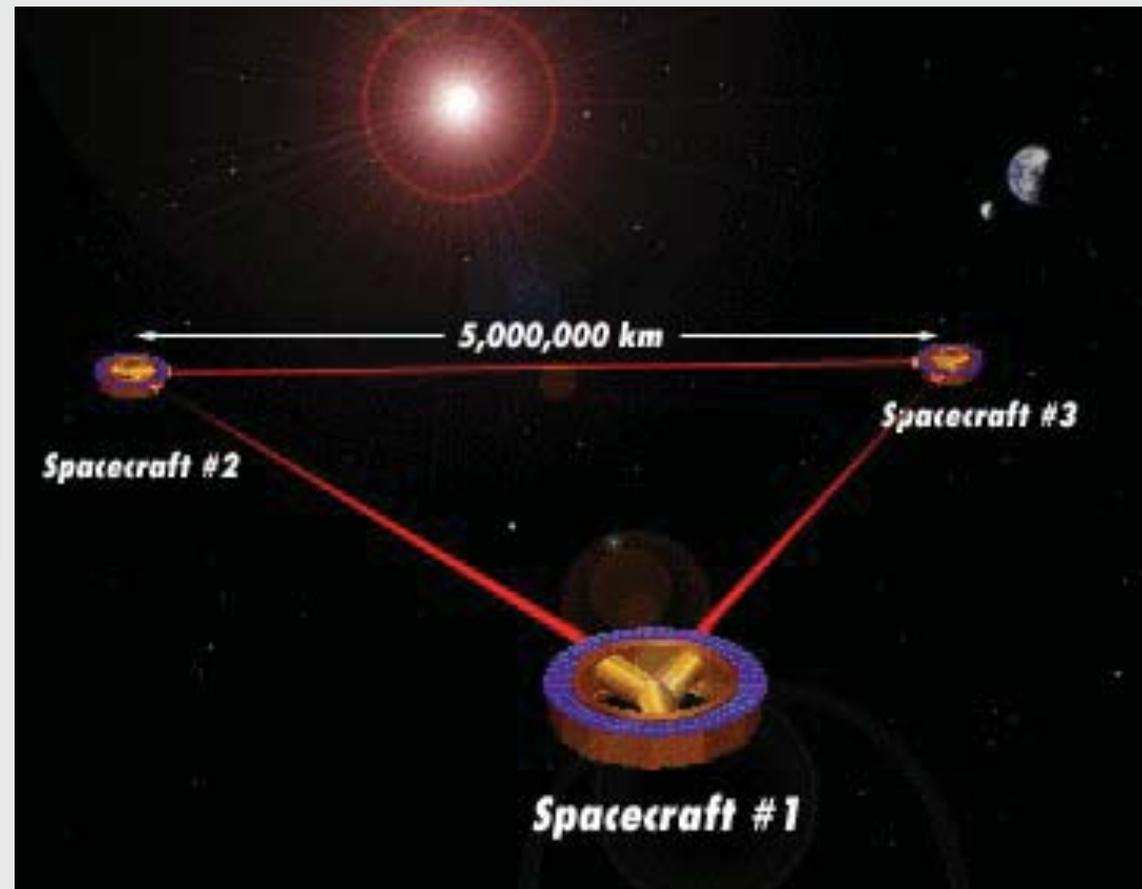


Tramite le cavità si ha una risposta interferometrica ad altissimo guadagno, ma entro un range piccolissimo !!
=> sistemi di controllo fondamentali

La rivelazione nello spazio

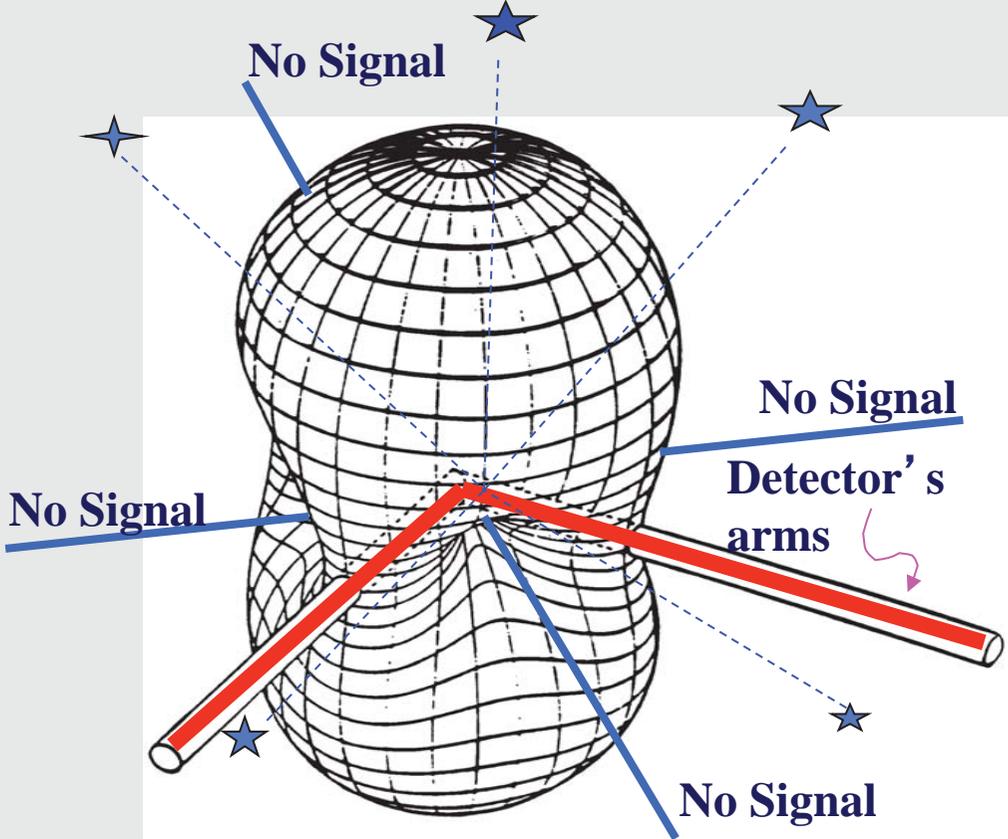
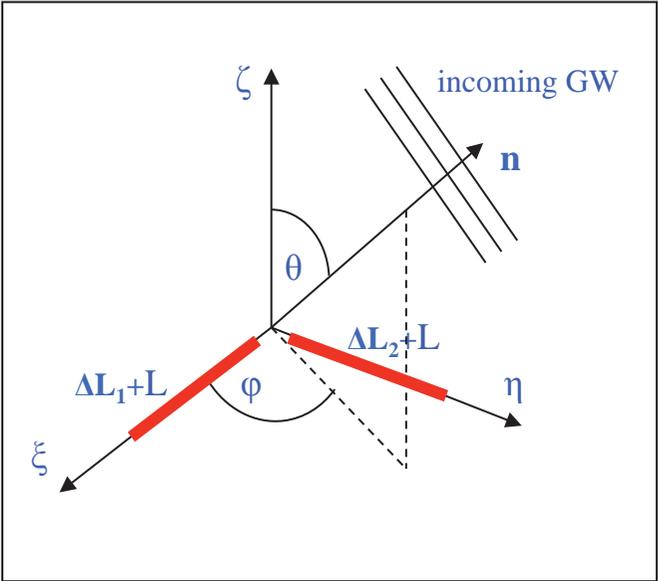
Un progetto per il futuro...

Laser
Interferometer
Space Antenna
LISA



Antenna Pattern for free-mass detectors

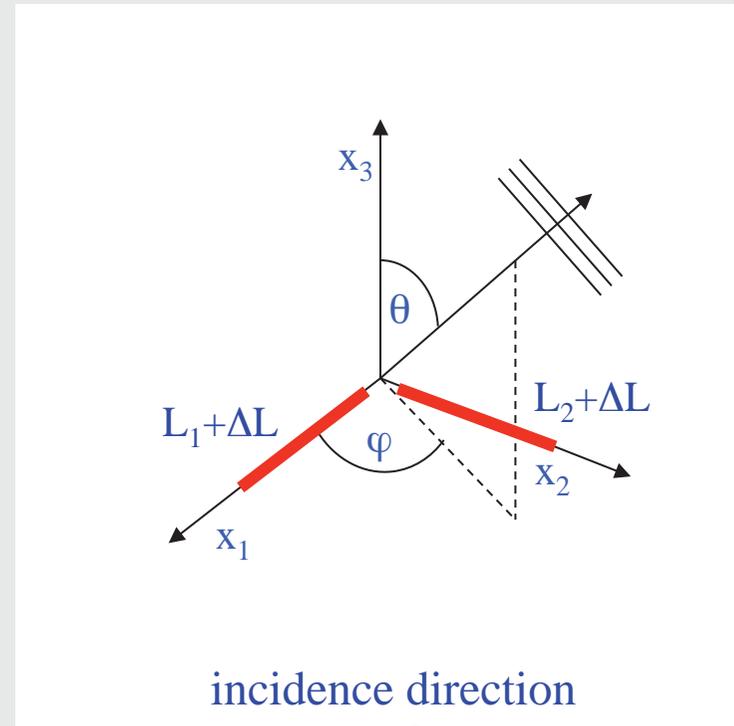
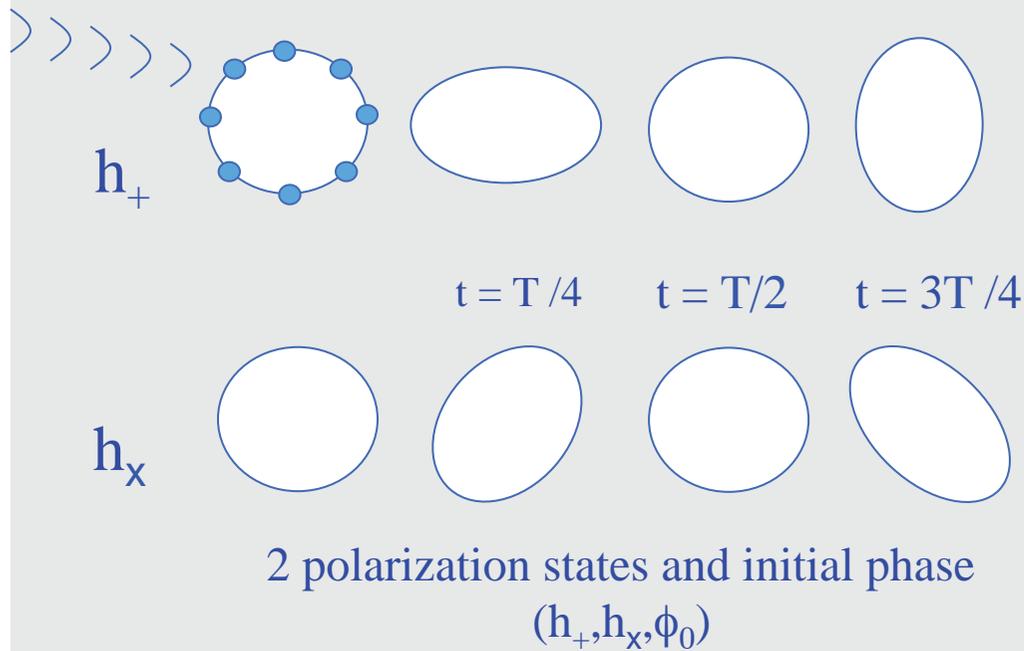
$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta L_1 + \Delta L_2}{L} = \frac{1 + \cos^2 \theta}{2} \cos(2\varphi) h^+ + \cos \theta \sin(2\varphi) h^x$$



Network of gravitational wave detectors as a global instrument

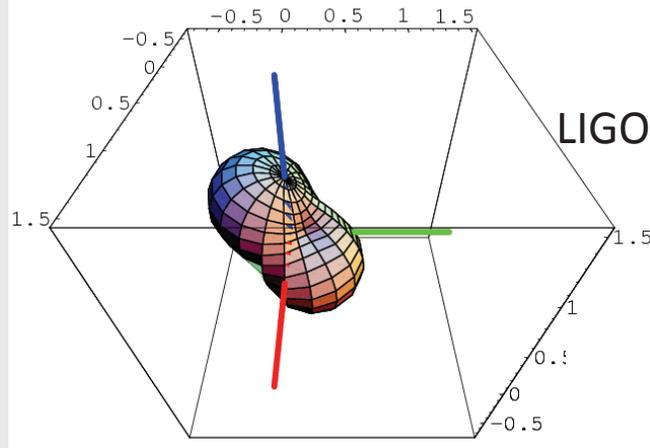
Coherent analysis with several detectors:

crucial to detect the signal and to reconstruct the 5 parameters of the wave

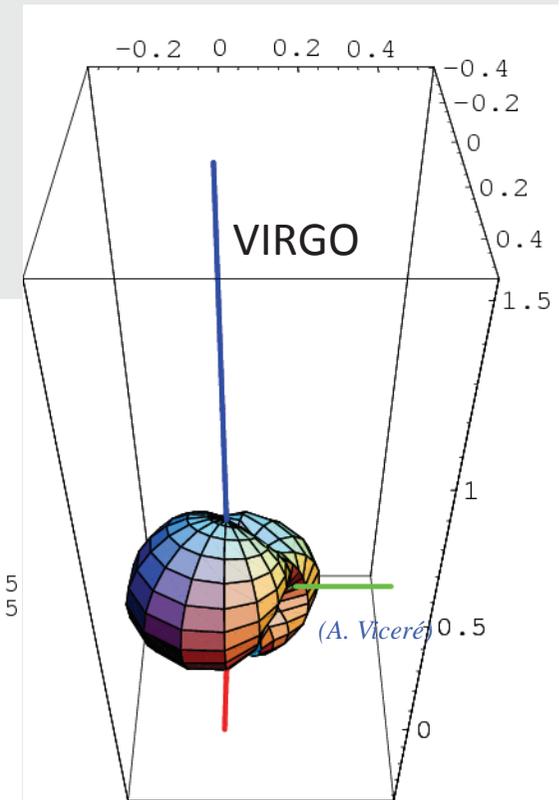
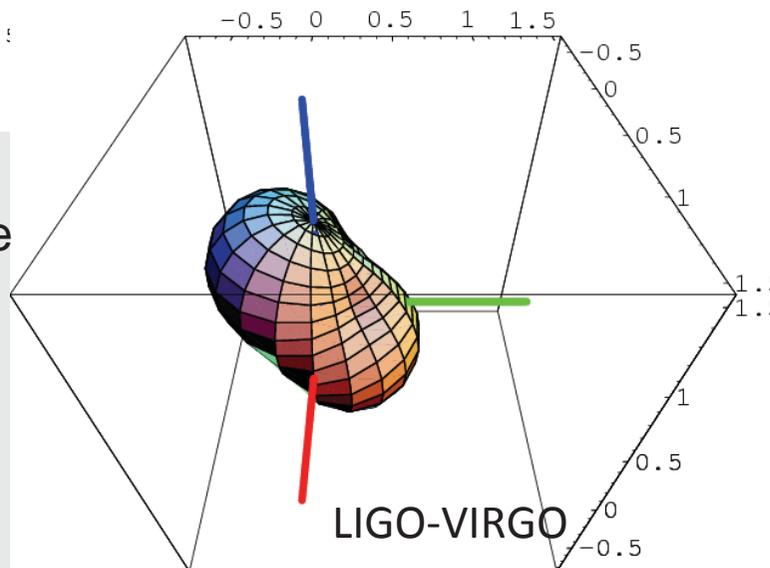


incidence direction (φ, θ)

International enterprise, Network patterns, accettanze di antenne **CON SIMILE SENSIBILITÀ**



Environmental monitoring and engineering signals are used to discard big local disturbances. Coincidence analysis is essential to discard false alarms at the level of the residual noise affecting the single detectors.



For example, coherent combination advanced LIGO-H/LIGO-L/Virgo (SNR=8, eff. 90%), enlarges the BNS detection distance at which BNS from 150-170 Mpc of the single antennas → 270 Mpc

Michelson ITF, basic formalism (solo un esercizio passatempo, non drammatizzare !)

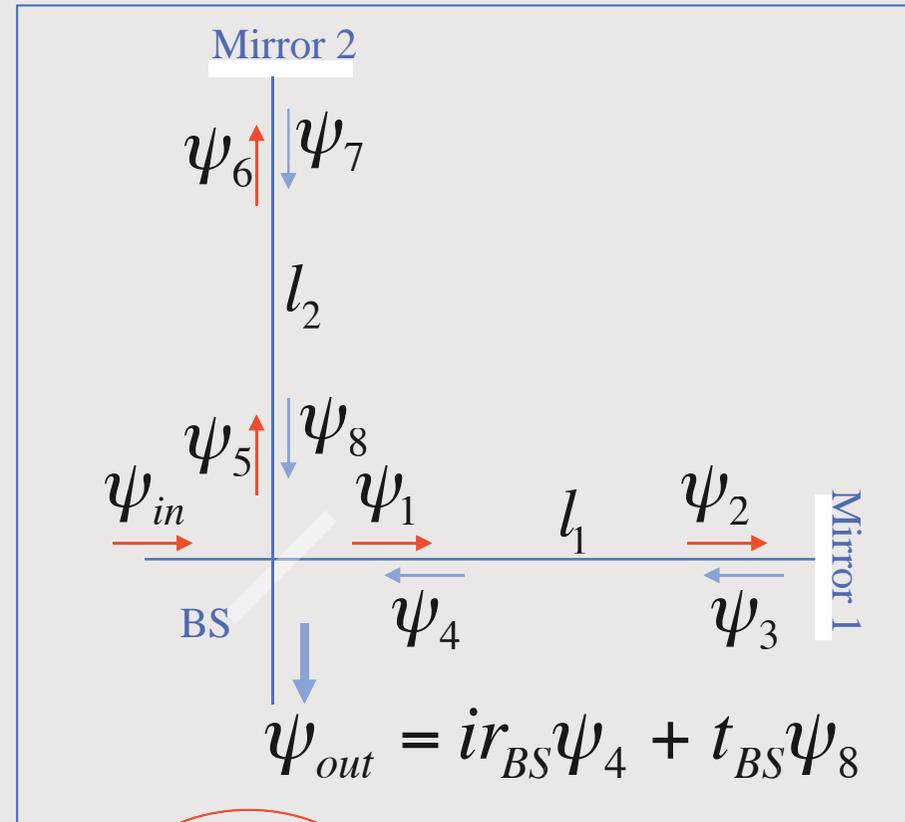
$$\psi_{in} = K e^{i\chi}$$

$$\psi_1 = t_{BS} \psi_{in} \quad \psi_5 = ir_{BS} \psi_{in}$$

$$\psi_2 = e^{-ikl_1} \psi_1 \quad \psi_6 = e^{-ikl_2} \psi_5$$

$$\psi_3 = ir_1 \psi_2 \quad \psi_7 = ir_2 \psi_6$$

$$\psi_4 = e^{-ikl_1} \psi_3 \quad \psi_8 = e^{-ikl_2} \psi_7$$



$$|\psi_{out}|^2 = P_{in} r_{BS}^2 t_{BS}^2 (r_1^2 + r_2^2) \left(1 + \frac{2r_1 r_2}{r_1^2 + r_2^2} \cos(2k \cdot \delta l) \right)$$

$$C = \text{contrast} = \frac{2r_1 r_2}{r_1^2 + r_2^2} = \frac{P_{out}^{\max} - P_{out}^{\min}}{P_{out}^{\max} + P_{out}^{\min}} \quad l_1 - l_2$$

Michelson ITF, basic formalism (uno spunto di riflessione)

Given a GW source at distance r
the effect due to optimal coupling
of polarization “+” is:

$$l_1 \rightarrow l_1 \left(1 + \frac{1}{2} h_+ \right)$$

$$l_2 \rightarrow l_2 \left(1 - \frac{1}{2} h_+ \right)$$

$$P_{out} = \frac{P_{in}}{2} \left(1 + C \cos(2k \cdot \delta l) + Ck(l_1 + l_2) \cdot h_+ \sin(2k \cdot \delta l) \right)$$

$$= P_{Mich.} + \delta P_{GW}$$

$$\delta P_{GW} \propto \text{Amplitude}_{GW}$$

ITF **power** signal is sensitive to the **amplitude** of gravitational waves (and not to their **power**, as in e.m. wave detection).

ITF GW signal fades as $1/r$ (and not as $1/r^2$ as in e.m. telescopes):
the number detectable sources increases as $\Delta \text{Sensitivity}^3$

Sensitivity intrinsically limited by the noise source affecting the power at the detection port: **shot noise**. Dark-fringe ($P_{out}^{\min} = 0$) ensures the best SNR

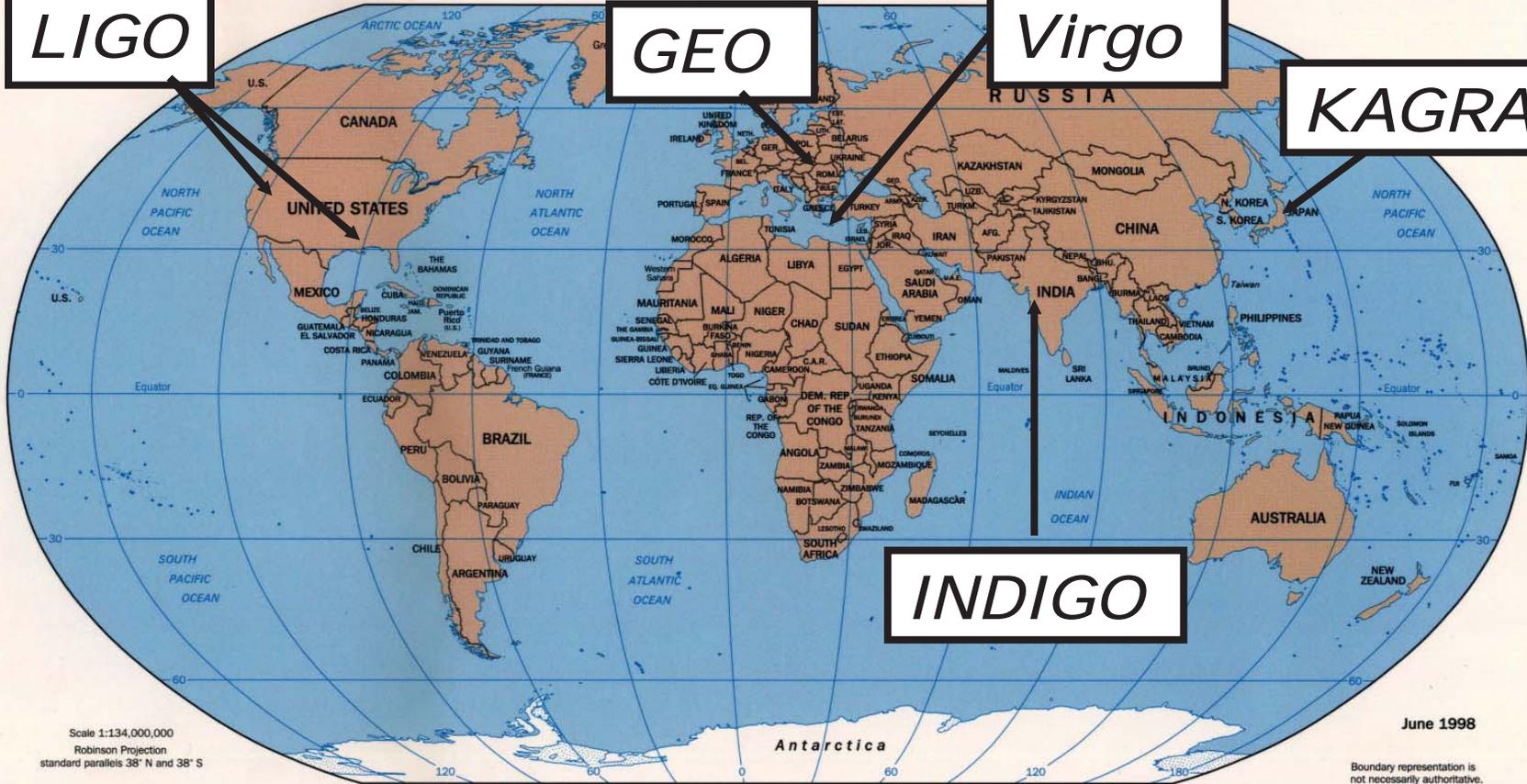
Esperimenti

LIGO

GEO

Virgo

KAGRA



Scale 1:134,000,000
Robinson Projection
standard parallels 38° N and 38° S

June 1998

Boundary representation is not necessarily authoritative.

802599 (R00352) 6-98

Una ricerca condotta a livello internazionale



GEO600 (British-German)
Hannover, Germany



LIGO (USA)
Hanford, WA and Livingston, LA



KAGRA (Japan)
Kamioka



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



VIRGO (French-Italian)
Cascina, Italy

Centre
National de la
Recherche
Scientifique



Annecy
Lyon
Nice
Orsay
Paris

Istituto
Nazionale di
Fisica
Nucleare



Firenze-Urbino
Genova
Napoli
Perugia
Pisa
Roma
Trento

200 Fisici, ingegneri, tecnici

1997-2003 costruzione,
2004 -2006 messa a punto
dal 2007 Fisica e miglioramenti

- Relatività Generale
- Astronomia
- Cosmologia

dal 2006 Amsterdam



dal 2009 Budapest



Warszawa



Il sito di Virgo a Cascina - Pisa

Rivelare onde gravitazionali vuol dire:

Misurare spostamenti di 10^{-18} metri *una misura estremamente difficile*

per **Virgo** sono state sviluppate **tecnologie estreme** per battere i “**rumori**” che possono produrre falsi segnali, molto piu’ grandi di quelli generati dalle onde gravitazionali:

vibrazioni sismiche

specchi sospesi a “superattenuatori” **$\times 10^{-12}$**

fluttuazioni di pressione

ultra alto vuoto **$P = 10^{-12}$ bar**

laser

$\nu = 10^{15}$ Hz **$\Delta\nu = 10^{-6}$ Hz**

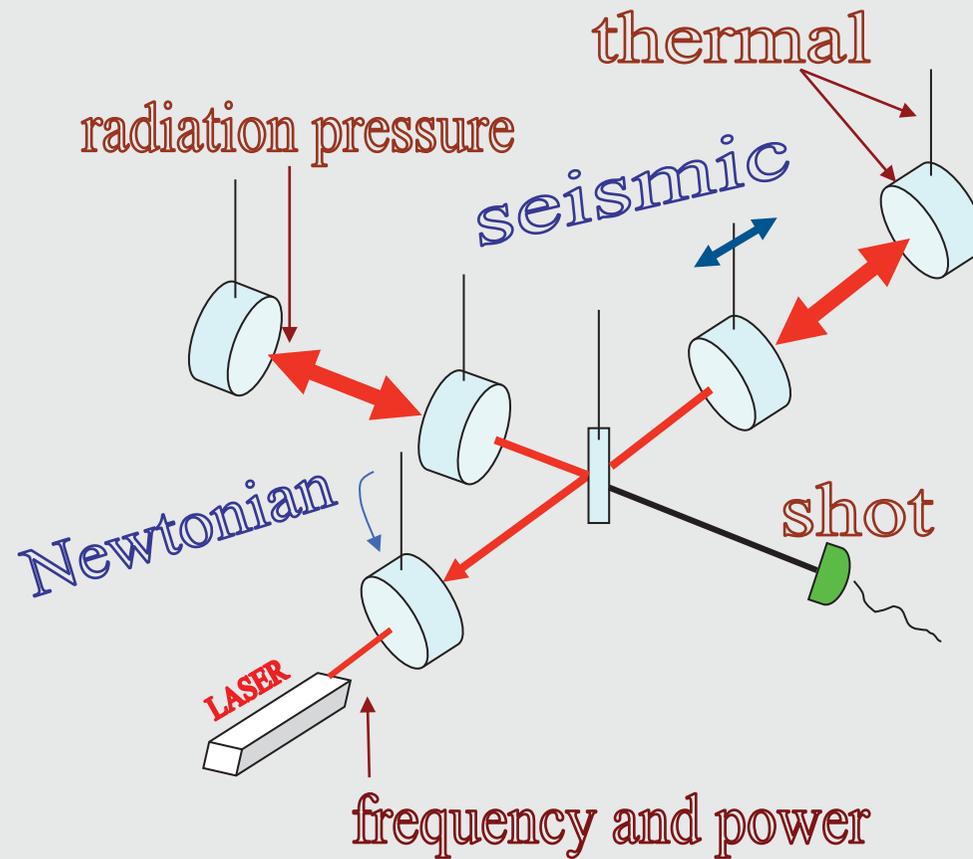
specchi

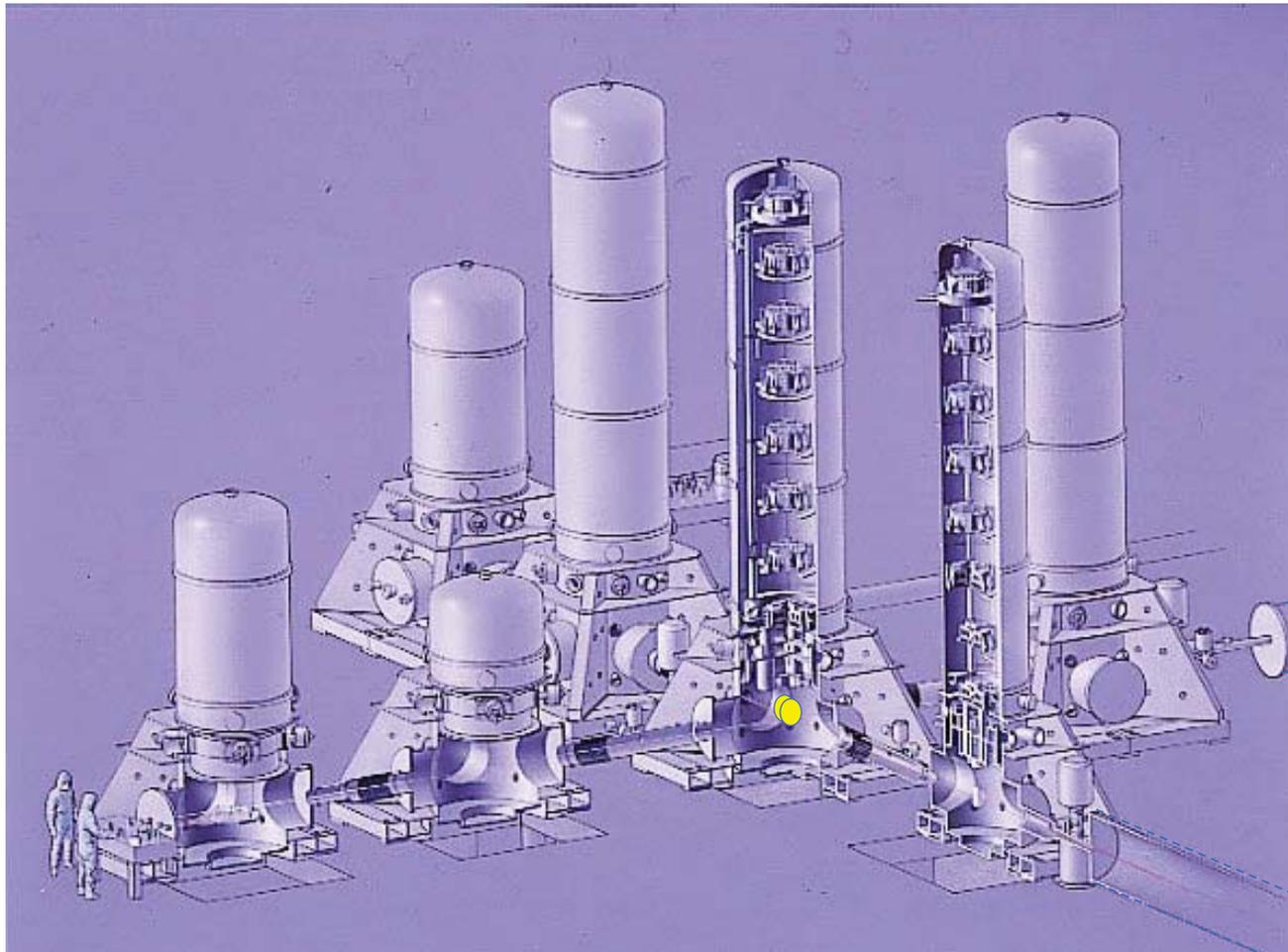
rugosita’ **10^{-8} m**

rumore termico

temperature criogeniche (in futuro)

Molte sorgenti di rumore disturbano il rivelatore, per poter rivelare le OG, occorre limitarne gli effetti, le problematiche sono simili per tutti I rivelatori inteferometrici realizzati sulla Terra.





Tubo Ovest

3 km

Tubo Nord

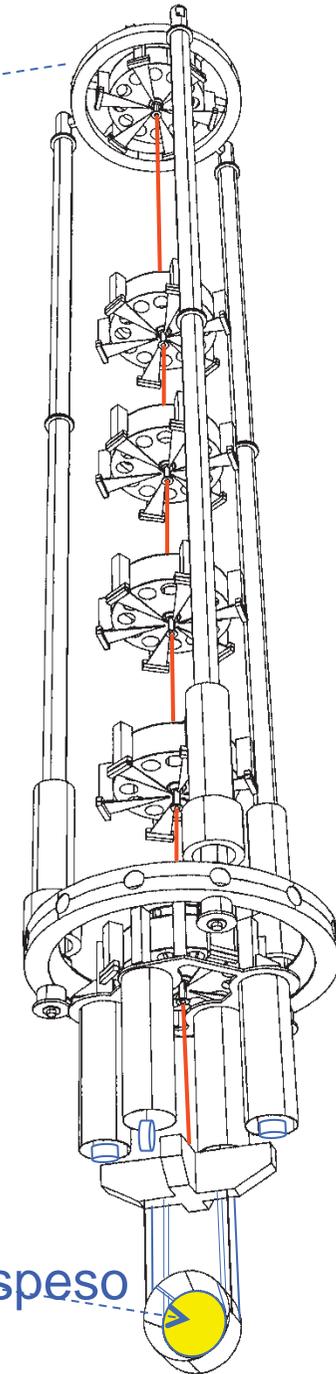
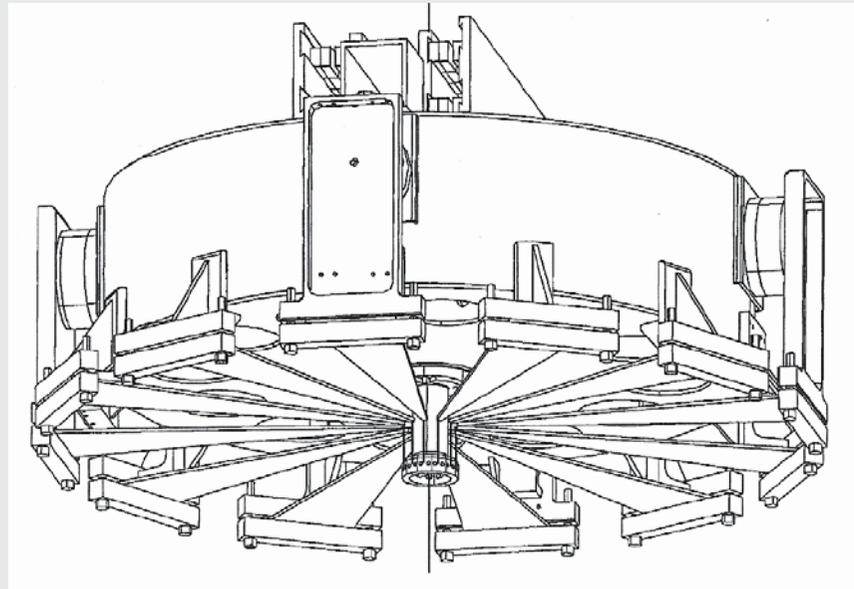
3 km

Virgo - Il sistema da vuoto

Un volume di 7000 m³ a un milionesimo di milionesimo di atmosfera: il piu' grande sistema da "ultra-alto-vuoto" d' Europa

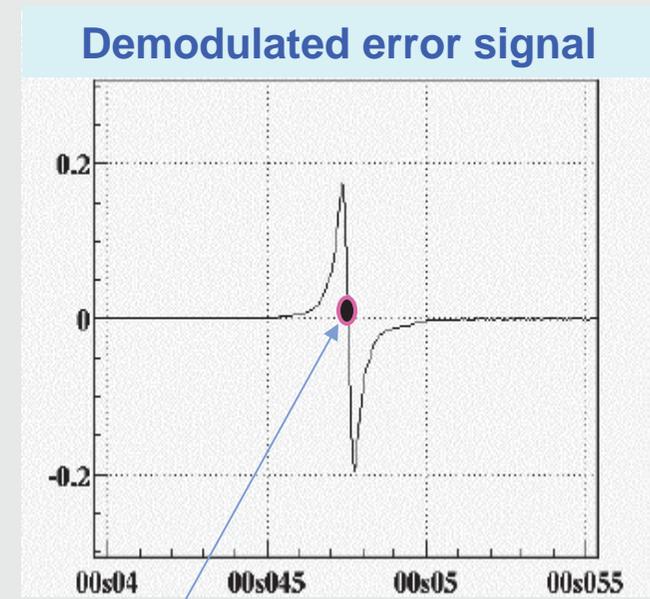
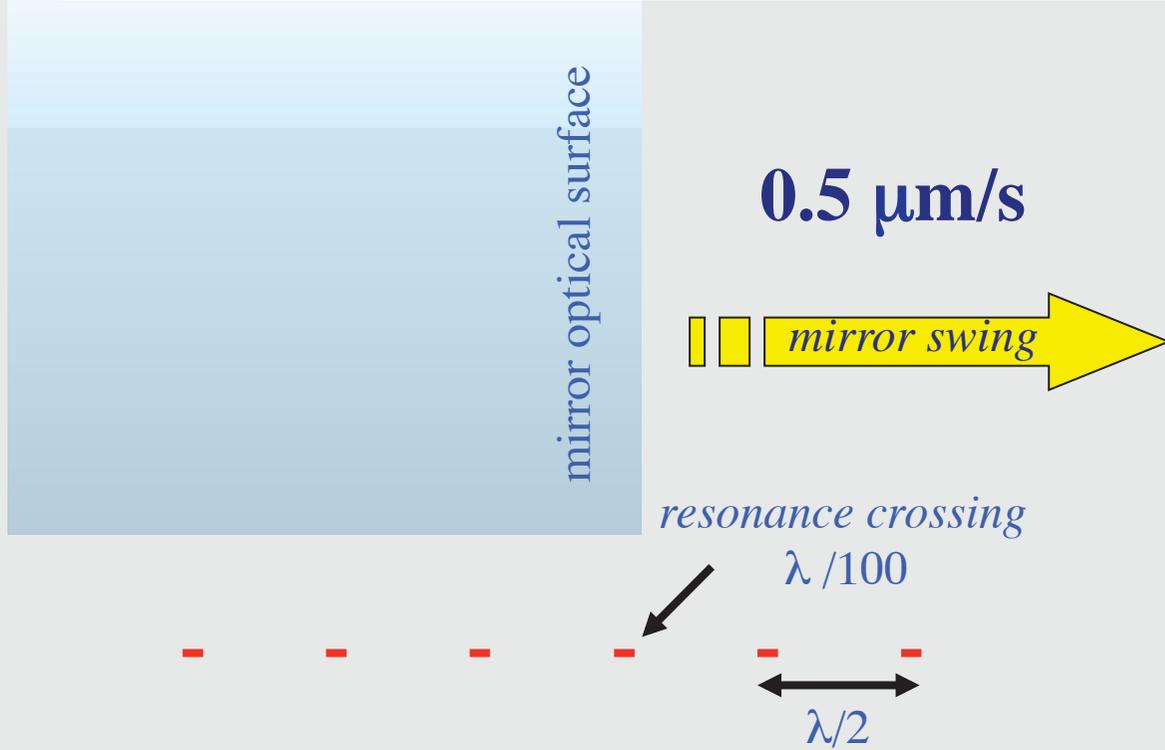
Virgo - il “ Superattenuatore ”

riduce le vibrazioni sismiche degli specchi di almeno un fattore 10^{12} (un milione di milioni di volte)



specchio sospeso

Ordini di grandezza, bloccare il rivelatore sul punto di lavoro è un fine gioco di feedback (non guardare formule!)



Longitudinal working point (to be locked)

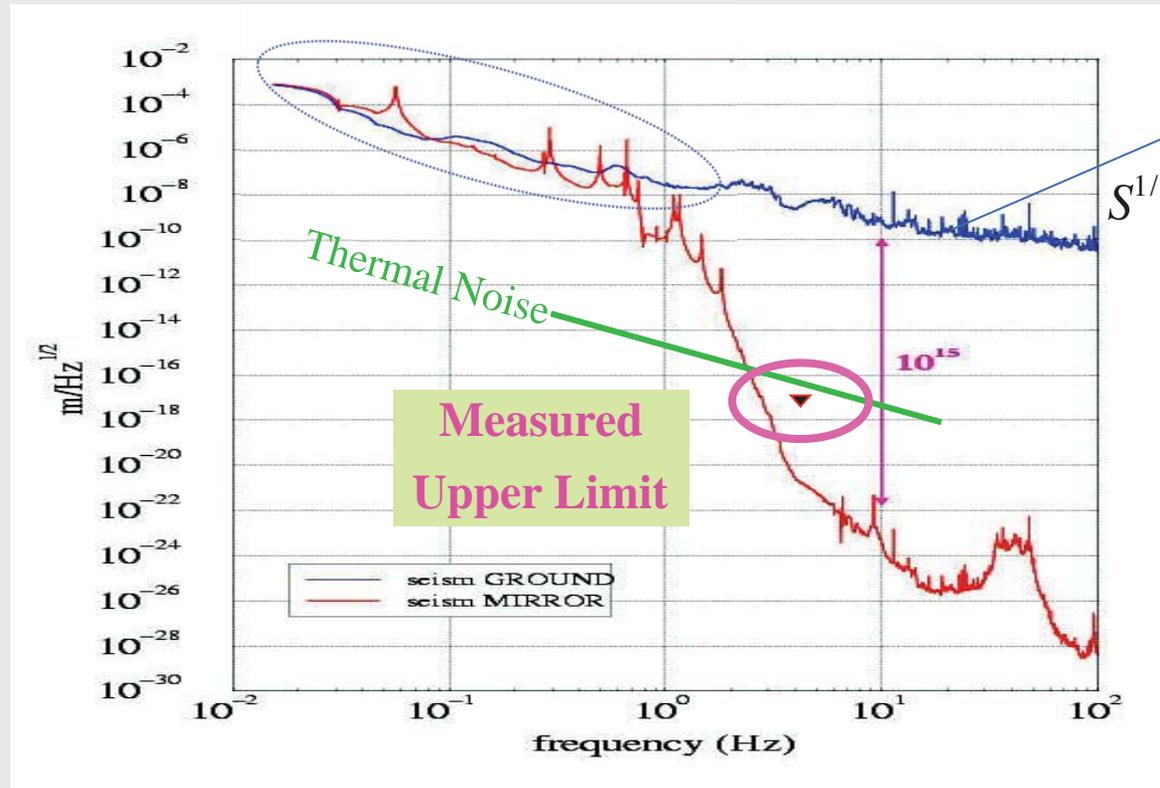
$$f = 10mN \times \left(\frac{v}{1\mu m/s} \right)^2 \times \frac{F}{250}$$

$$\Delta t = 2 \cdot 10^{-3} s \times \left(\frac{1\mu m/s}{v} \right) \times \frac{F}{250}$$

Few mN, few ms range
For actual detectors

Thermal noise limit required → Super attenuation required → control system required

The mechanics of SA suspension is designed to reach 10^{-18} m/Hz^{1/2} at 10 Hz (thermal noise)



seism at the ground

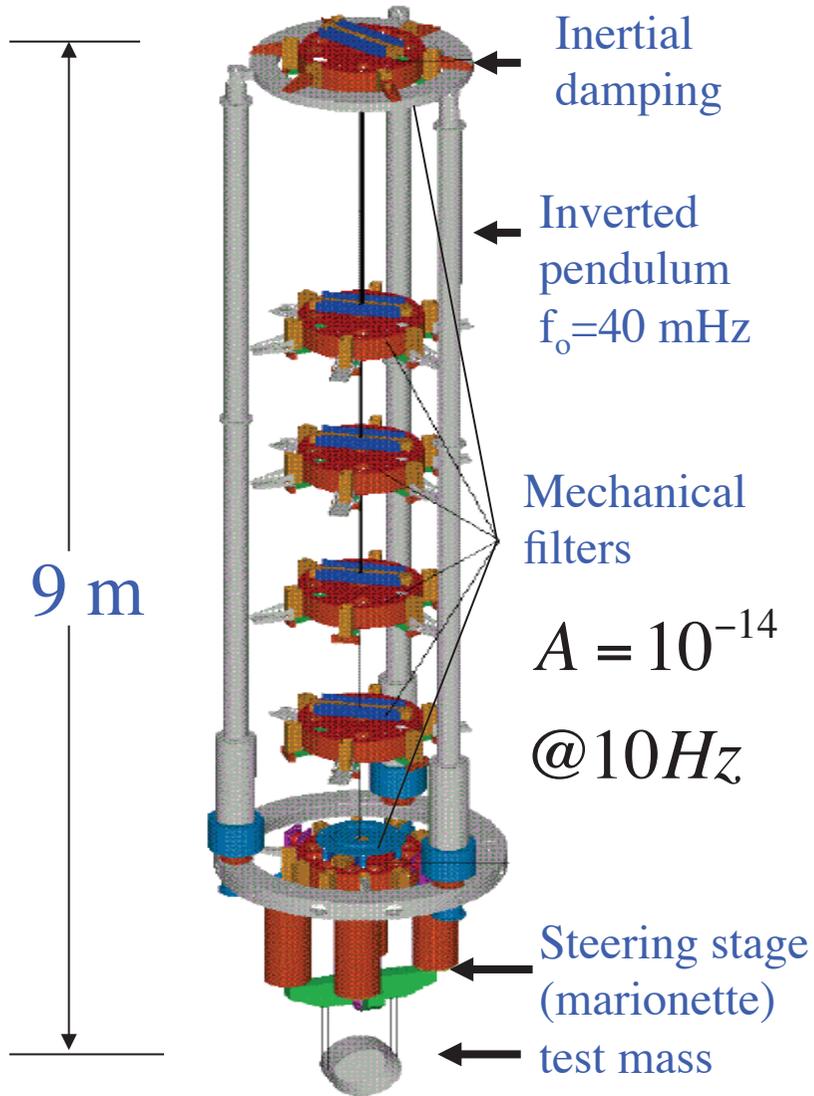
$$S^{1/2}(f) \approx \frac{10^{-7}}{f^2} \text{ m} / \sqrt{\text{Hz}} \quad (f > 1 \text{ Hz})$$

- The SA filters off the seismic noise above 4 Hz
- Below 4 Hz the mirror moves at the SA resonances few tens of μm
- ITF locking requires resonance damping

TOP: Sophisticated control system for the suspension chain

BOTTOM: Efficient and noiseless payload control

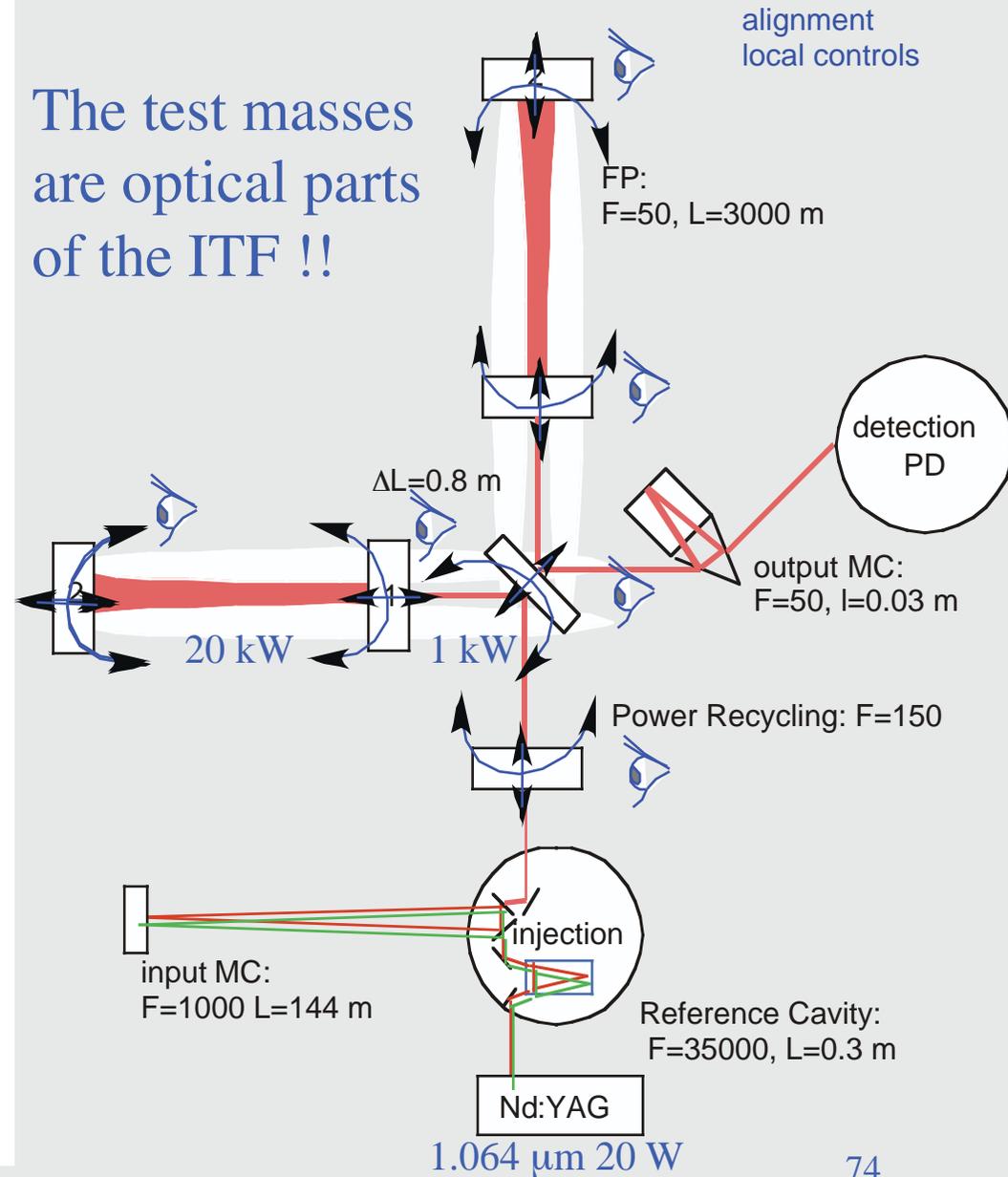
SA



EMVESF270710
EMVESF270710

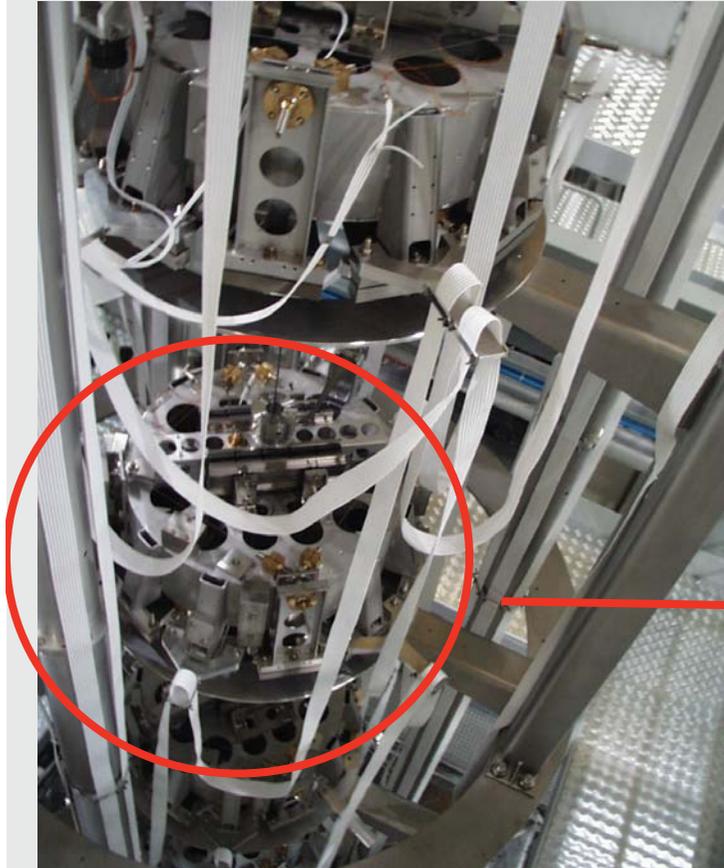
meter

The test masses are optical parts of the ITF !!

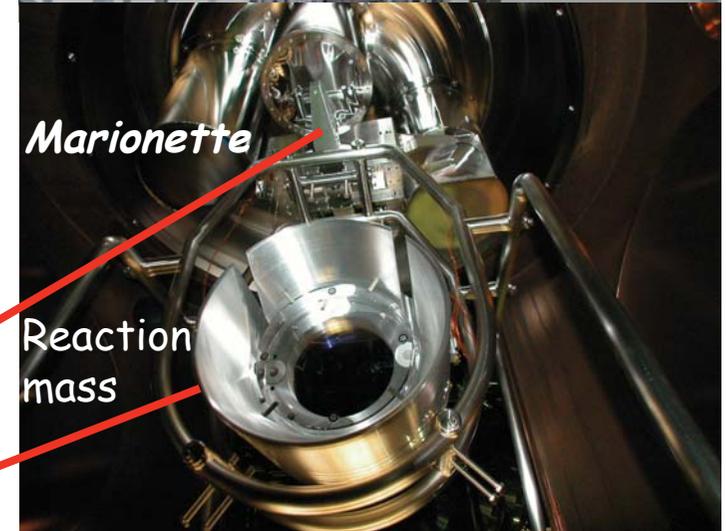
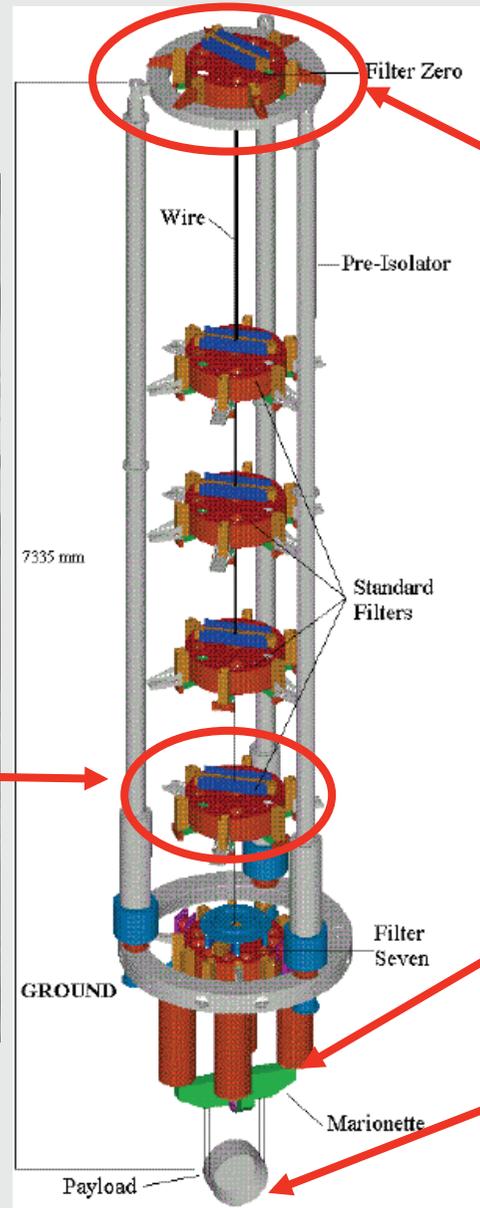




Susp-gallery



At 10 Hz seismic displacement is 10^{12} times larger than expected GW



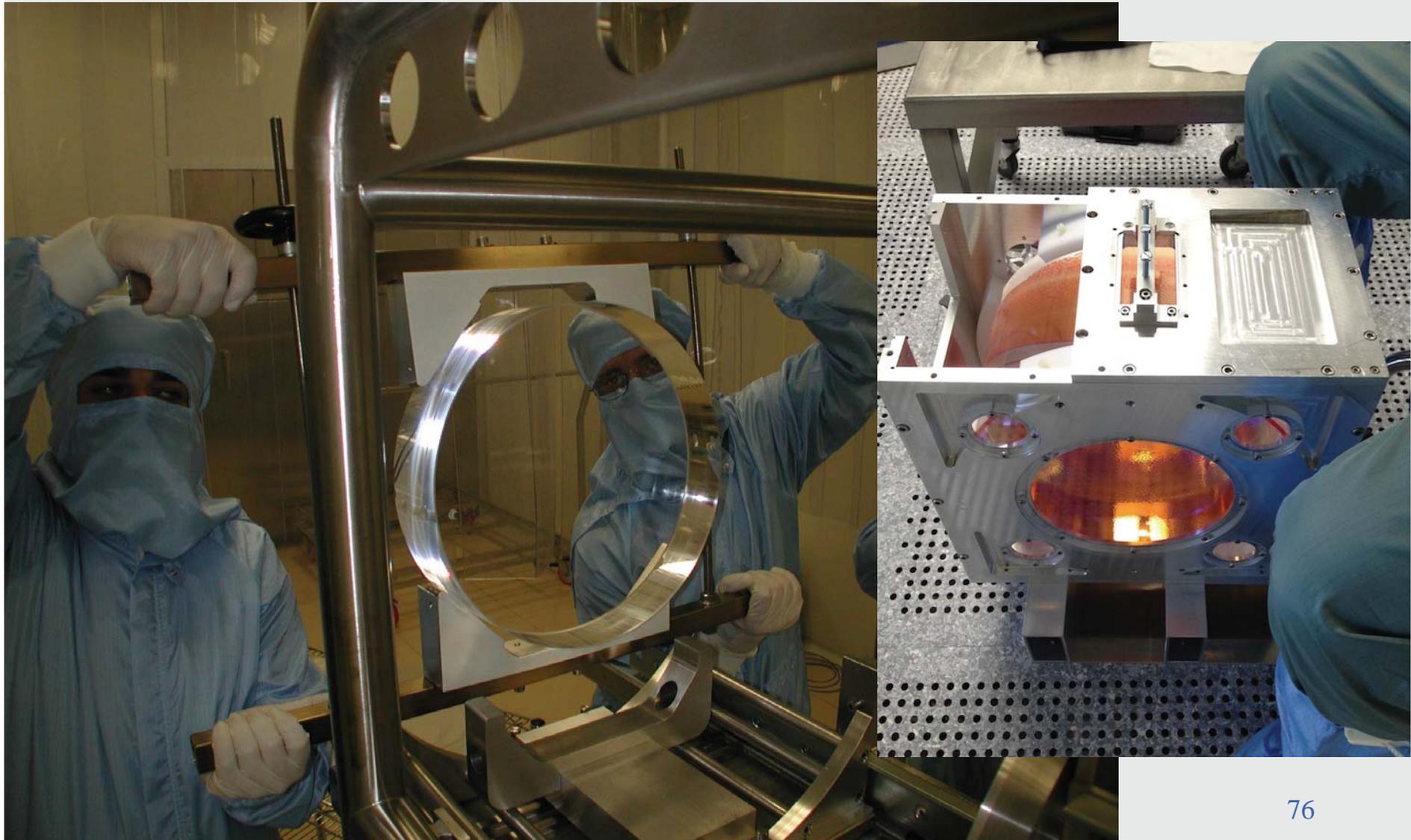
Specchi di quarzo fuso di altissima qualità

35 cm di diametro, 10 cm di spessore → PER AdV 20 cm, 42 kg !!!

assorbimento del quarzo: 1 ppm (parti per milione)

perdite in riflessione: <5 ppm

deformazioni della superficie: 0.01 micron



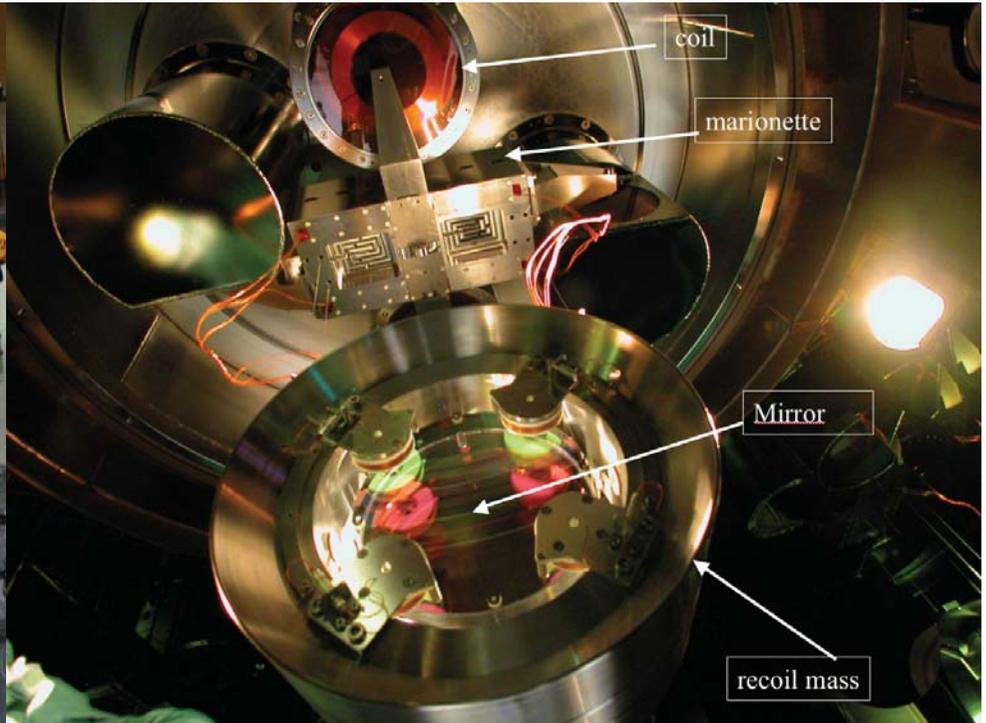
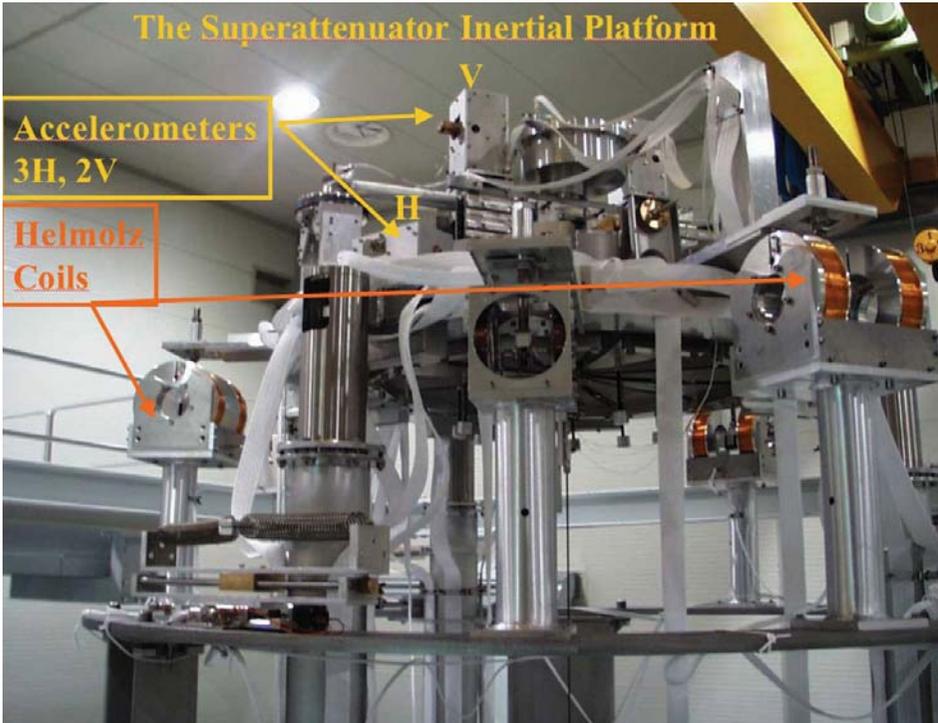
The Superattenuator Inertial Platform

Accelerometers
3H, 2V

Helmoltz
Coils

V

H

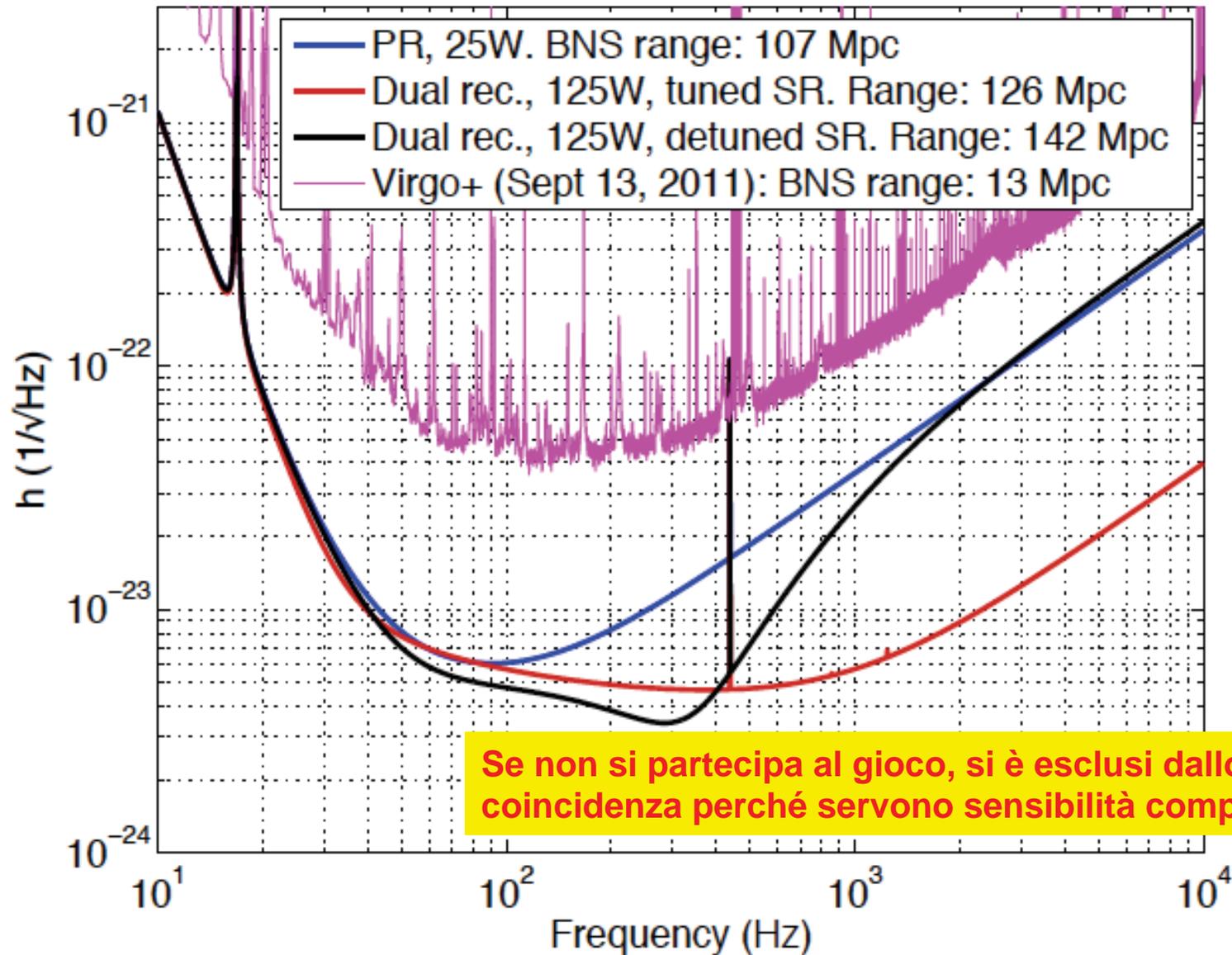


suspended to a Superattenuator

Virgo+ (è attualmente in fase di upgrade)

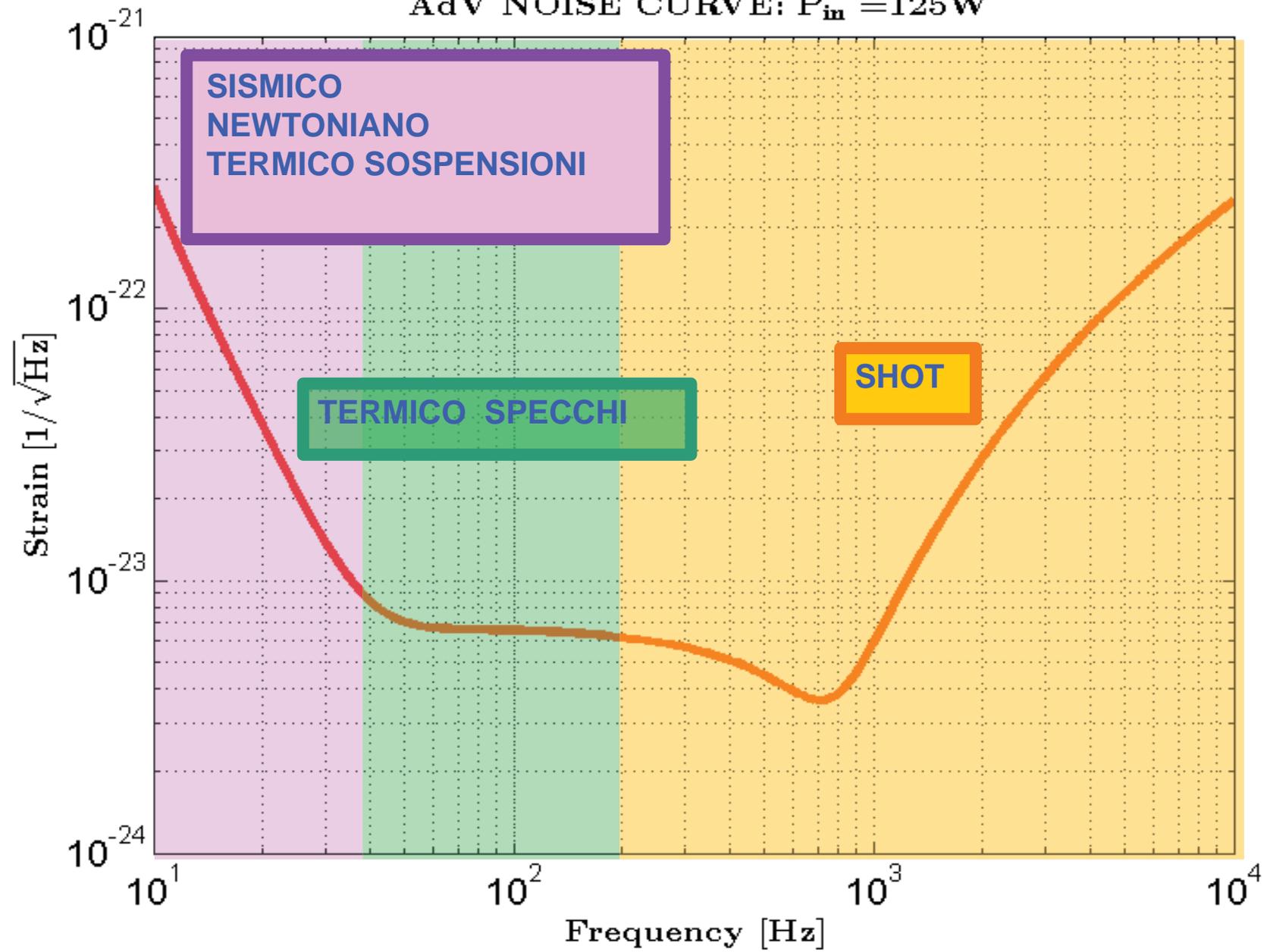


V+ versus AdV: migliorare di un fattore 10 la sensibilità per poter osservare qualche evento/anno



Se non si partecipa al gioco, si è esclusi dallo studio in coincidenza perché servono sensibilità comparabili

AdV NOISE CURVE: $P_{in} = 125W$



L'orizzonte di Virgo si sta allargando

Abbiamo imparato a far funzionare regolarmente l'interferometro.

Il "Noise hunting", la caccia al rumore è molto avanzata.

Migliorare la sensibilità significa aumentare l'orizzonte entro cui riusciamo a rivelare una sorgente

2005 Orizzonte: 5 milioni di anni luce (*Andromeda!*)

2007 il primo "Science Run" assieme a LIGO

4 mesi di raccolta dati ininterrotta: Orizzonte 15 milioni di anni-luce

2009 il secondo "Science Run" sempre assieme a LIGO (7/7/2009 - 9/1/2010).

2010 il terzo "Science Run" sempre assieme a LIGO (11/8/2010 – 19/10/2010).

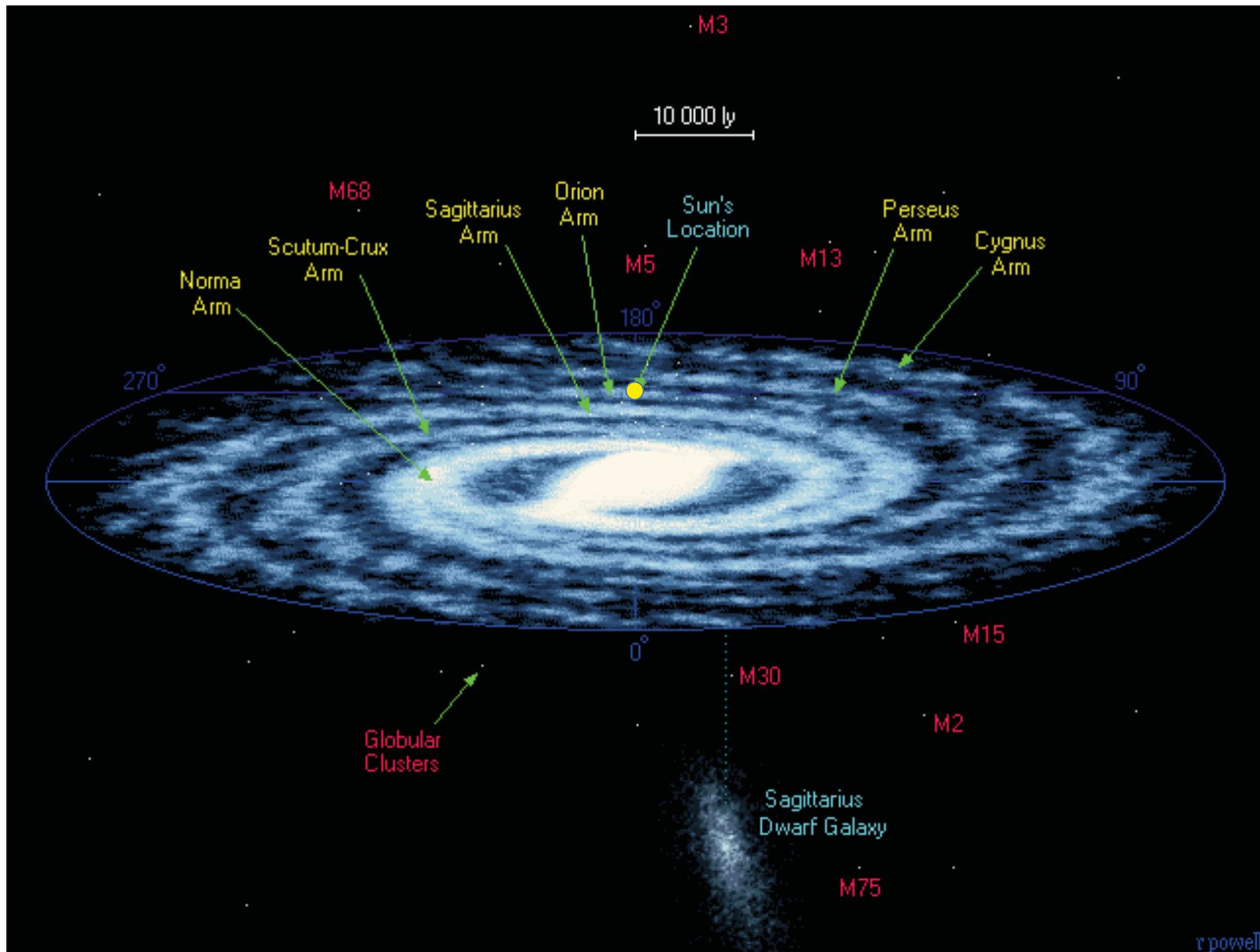
Raccolta dati intervallata con brevi periodi di messa a punto per migliorare la sensibilità (dilatare l'orizzonte).

Oggi l'orizzonte è a 30 milioni di anni-luce → un evento ogni 20-50 anni

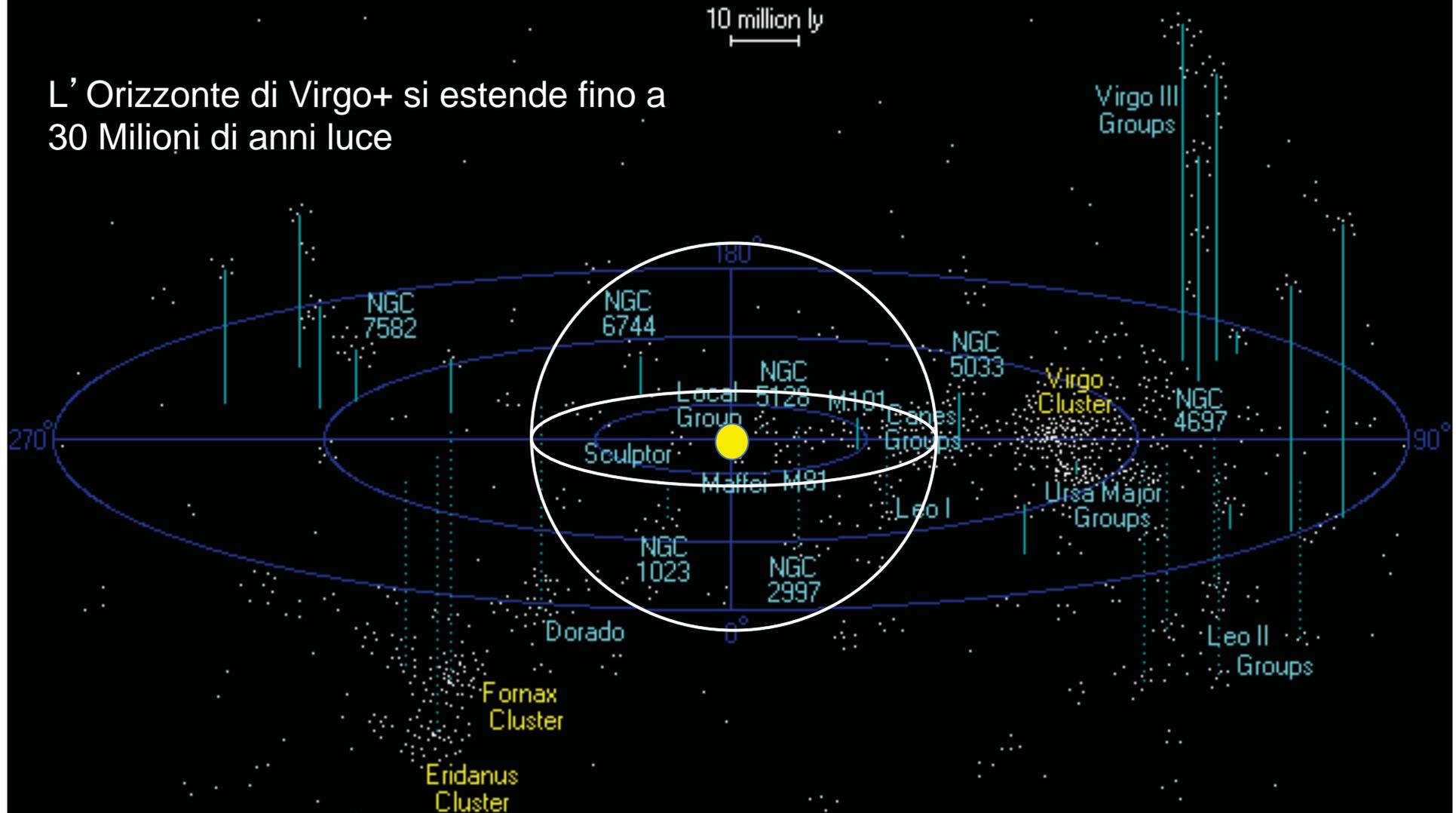
2010-2015 graduale trasformazione in **Advanced Virgo** (e **Advanced LIGO**)

traguardo: 300 milioni di anni luce → decine di eventi all'anno

inizierà l'Astronomia Gravitazionale

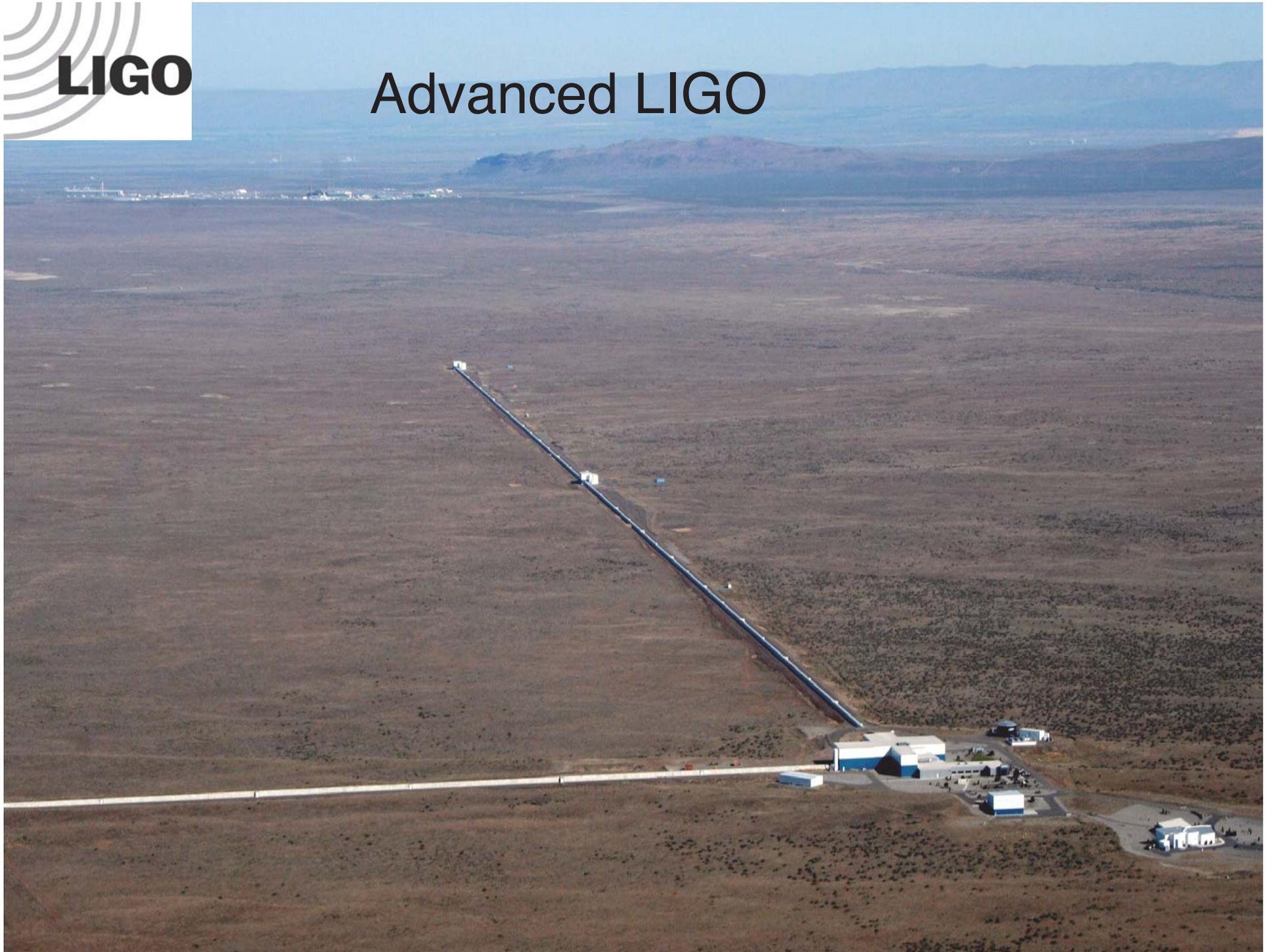


L' Orizzonte di Virgo+ si estende fino a 30 Milioni di anni luce





Advanced LIGO

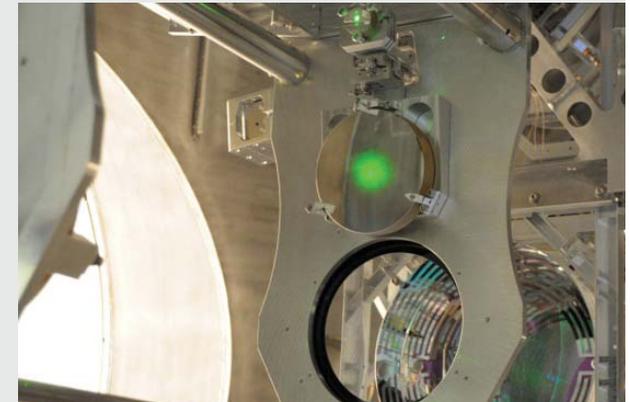
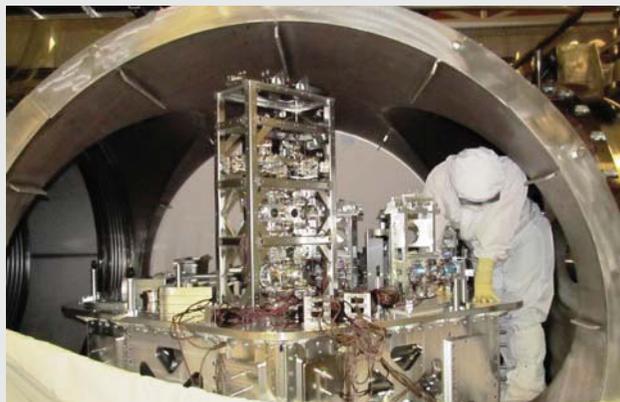




LIGO

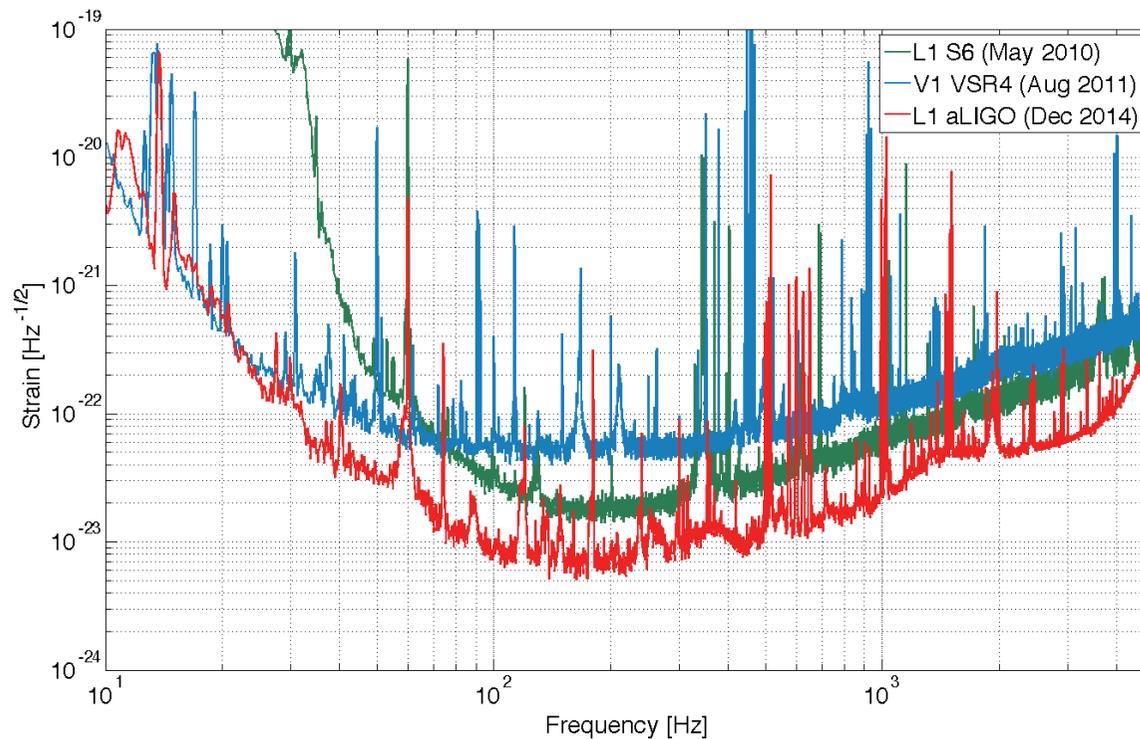
Advanced LIGO

- **Advanced LIGO is a complete redesign and rebuild of the LIGO interferometers**
 - » 10x more sensitive, 1000x more of the universe probed
- **Advanced LIGO funded April 2008**
 - » \$205.1M in funding from NSF; capital contributions from partners in UK, Germany, and Australia totaling \$30M
- **Three 4 km long interferometers are being built**
 - » One for Hanford, one for Livingston, one for future installation in India
- **Construction by LIGO Laboratory with participation by member groups of the LIGO Scientific Collaboration**
- **On schedule and on budget to complete in March 2015**



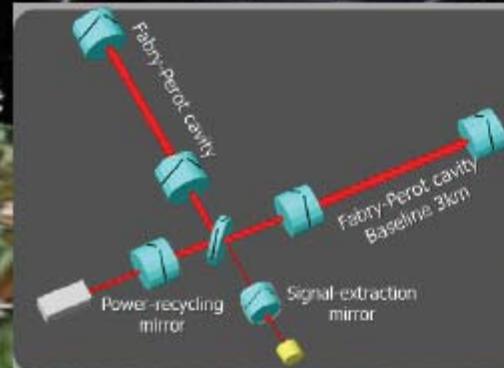
NEWS FROM LIGO

- **LIGO (L1 and H1) progressing faster than the best expectations (BNS inspiral range of 50 Mpc achieved in 6 months!)**
 - » **Detection rate already ~15 larger than the initial LIGO**
 - » **First observation run (O1) at mid 2015**
 - » **O2 in 2016**
 - » **Join O2 is the main mid-term priority for Adv**

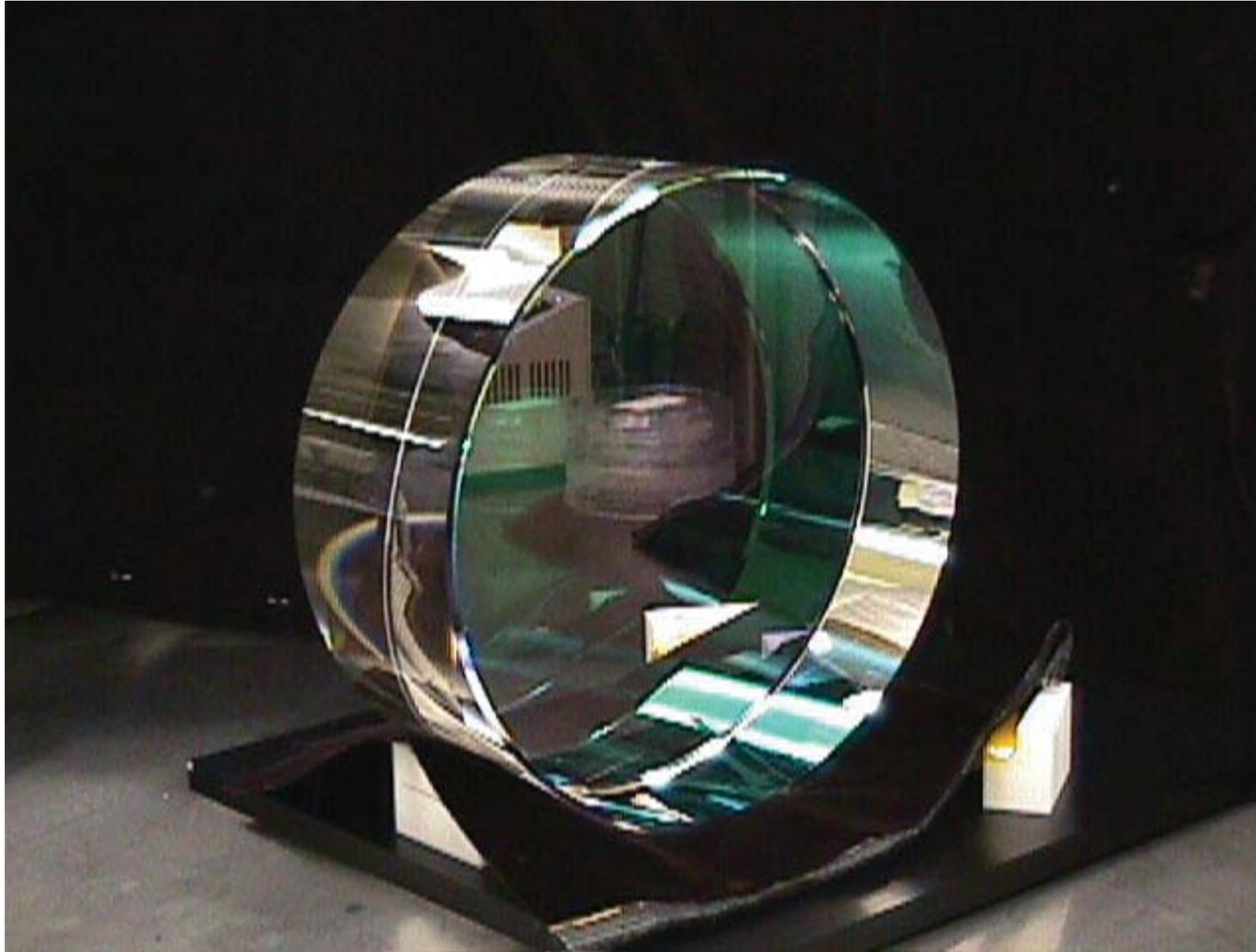




The Japanese project KAGRA (2018) Cryogenics @ & underground !!



OTTICA: gli specchi



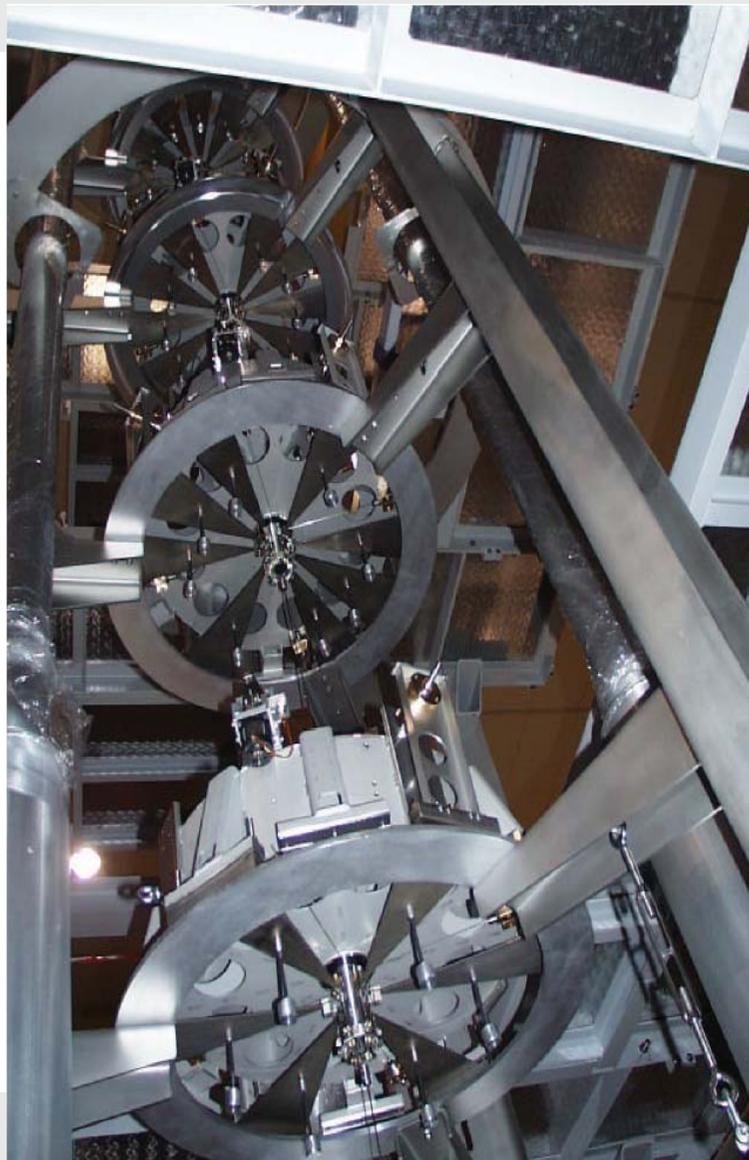
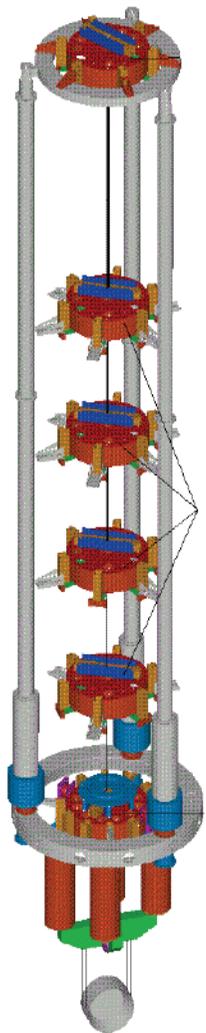
Substrato: SiO_2

35 cm di
diametro,
10 cm
spessore

Omogeneità <
 5×10^{-7}

Uniformità
della
superficie
< $1 \cdot 10^{-9} \text{ m}$

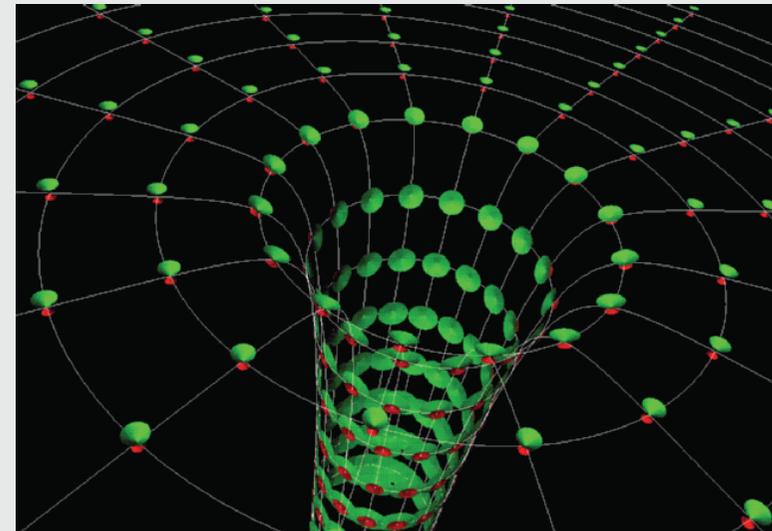
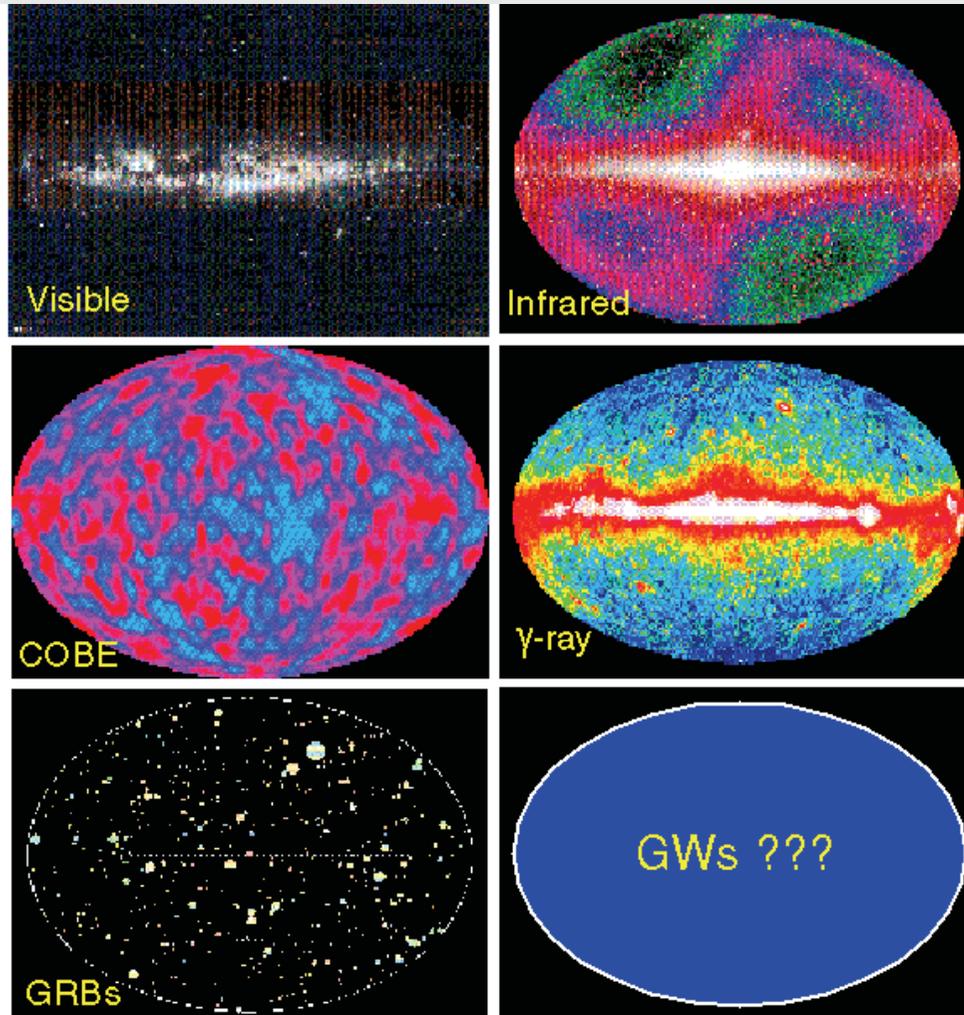
Riduzione del rumore sismico



Riduzione della Luce Diffusa: il Vuoto



Una Nuova Finestra sull'Universo, che va aperta insieme



Le Onde
Gravitazionali