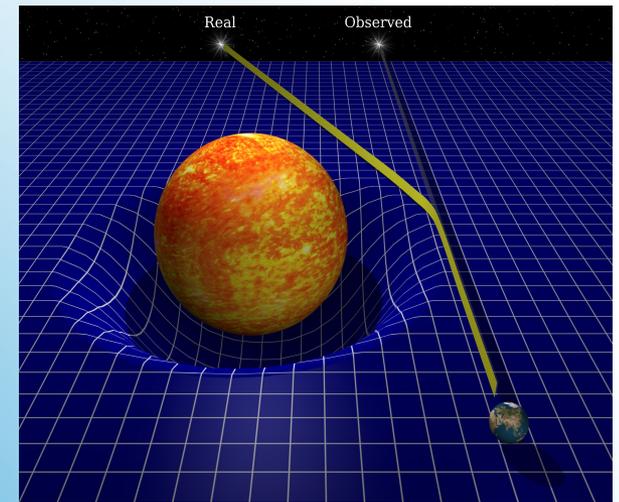
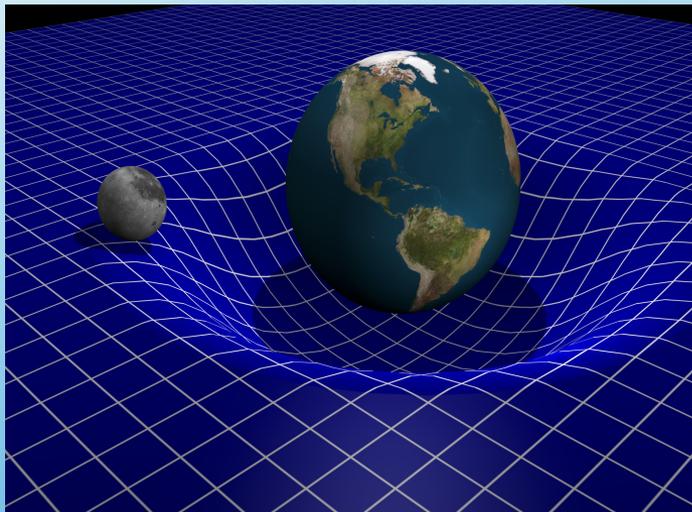


Relatività Generale



Emilio Mariotti

mariotti@unisi.it, <https://sites.google.com/a/unisi.it/emilio-mariotti>

Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente

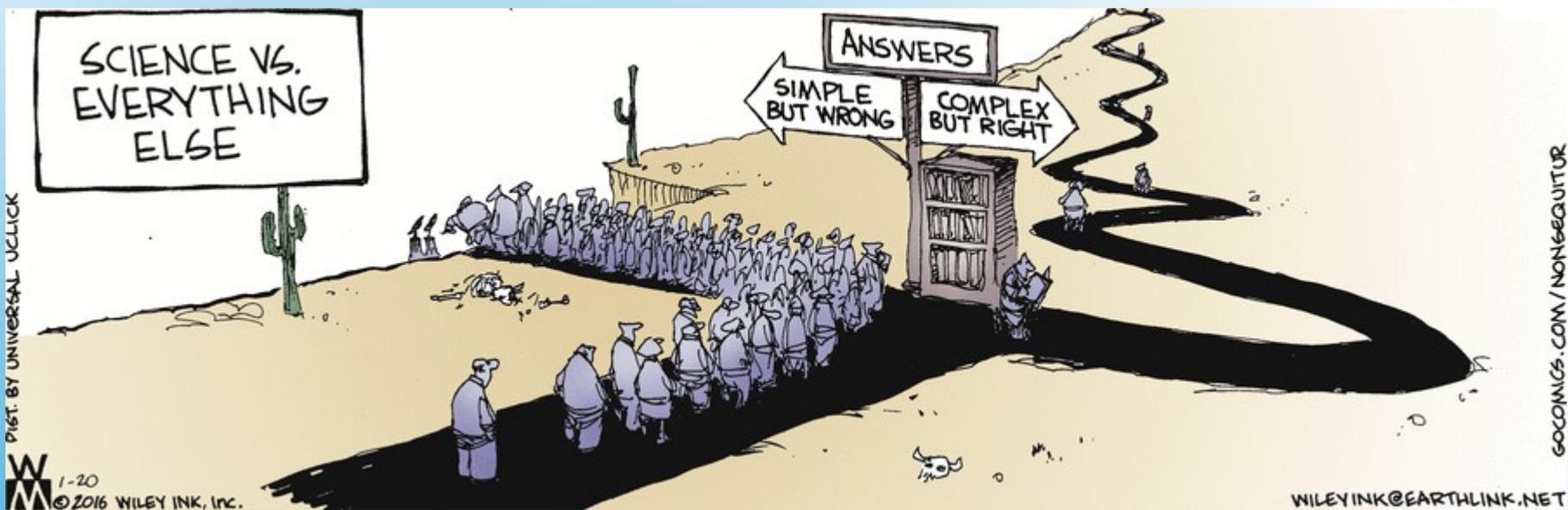
Sezione di Fisica

L'insegnamento della Fisica relativistica
nella Scuola Secondaria di secondo grado
Mathesis Firenze, 19 ottobre 2016



**UNIVERSITÀ
DI SIENA**
1240

AVVISO AI NAVIGANTI



LO SPAZIO E IL TEMPO PER ARISTOTELE

Nello schema aristotelico, lo stato di riposo è dinamicamente privilegiato rispetto agli stati di moto. Un particolare punto dello spazio, in un certo istante, è il medesimo punto in un istante successivo. La rappresentazione della realtà è quella di uno schermo di cinema, dove un punto conserva la sua identità indipendentemente dal moto che vi è proiettato.

Per Aristotele, il tempo manca di una origine privilegiata, perché le leggi fisiche possano rimanere le stesse.

LO SPAZIO E IL TEMPO PER NEWTON

Il tempo assoluto, vero, matematico, in sé e per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, scorre uniformemente; quello relativo, apparente e volgare, è una misura sensibile ed esterna della durata per mezzo del moto, che comunemente viene impiegata al posto del vero tempo: tali sono l'ora, il giorno, il mese, l'anno

Lo spazio assoluto, per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno, rimane sempre uguale ed immobile; lo spazio relativo è una dimensione mobile o misura dello spazio assoluto, che i nostri sensi definiscono in relazione alla sua posizione rispetto ai corpi, ed è comunemente preso come lo spazio immobile.

I. Newton

SPAZIOTEMPO IN GALILEO

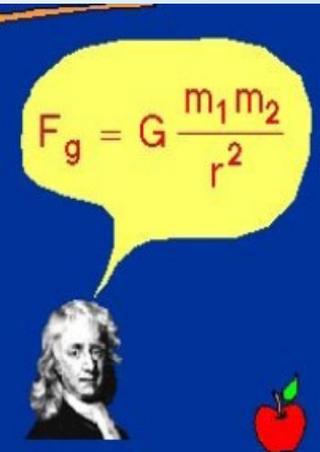
.....Riserratevi con qualche amico nella maggiore stanza che sia sotto coverta di alcun gran navilio, e quivi fate d'aver mosche, farfalle e simili animaletti volanti..... suspendasi anco in alto qualche secchiello, che a goccia a goccia vadia versando dell'acqua in un altro vaso di angusta bocca, che sia posto a basso.....fate muover la nave con quanta si voglia velocità (pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là)... le goccioline cadranno come prima nel vaso inferiore, senza caderne per una verso poppa, benché, mentre la gocciola è per aria, la nave scorra molti palmi;..... e finalmente le farfalle e le mosche continueranno i lor voli indifferentemente verso tutte le parti, né mai accaderà che si riduchino verso la parte che riguarda la poppa, quasi che fussero stracche in tener dietro al veloce corso della nave.

G.GALILEI

SPAZIOTEMPO IN GALILEO

Le leggi dinamiche sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento in moto uniforme. Non vi è alcun elemento che permetta di distinguere la fisica dello stato di riposo da quella di moto uniforme. Non vi è quindi alcun significato dinamico nell'affermare che un punto dello spazio è o non è lo stesso punto in un istante successivo. Non vi è alcuno spazio di sottofondo, nessuno schermo che rimane fisso quando il tempo evolve. Per esempio, un punto fisso sulla superficie terrestre, in un minuto, per effetto della rotazione, si sposta di 16 km, per il moto di rivoluzione intorno al Sole, di una distanza 100 volte più grande, per non parlare del moto del Sole rispetto alla Via Lattea, del moto proprio della galassia nel gruppo locale, ecc.ecc.

LA GRAVITÀ SECONDO NEWTON



Le leggi del moto

$$\vec{R} = \sum \vec{F}_i^{(EXT)} = m \vec{a} = \frac{d\vec{Q}}{dt}$$

e quella della gravitazione,

$$\vec{F}_{M \rightarrow m} = -G \frac{mM}{r^2} \hat{r}$$

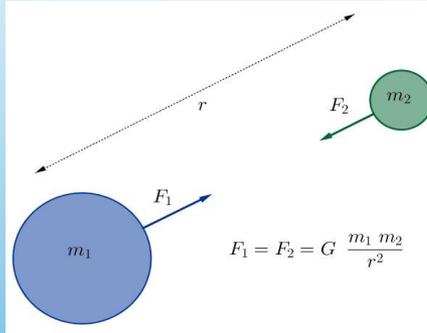
oltre a risolvere la maggior parte dei problemi astronomici e di Fisica Terrestre, spiegano:

- le orbite “eccentriche” delle comete
- le maree e le loro variazioni
- la precessione dell'asse terrestre
- la perturbazione del moto lunare da parte del sole,

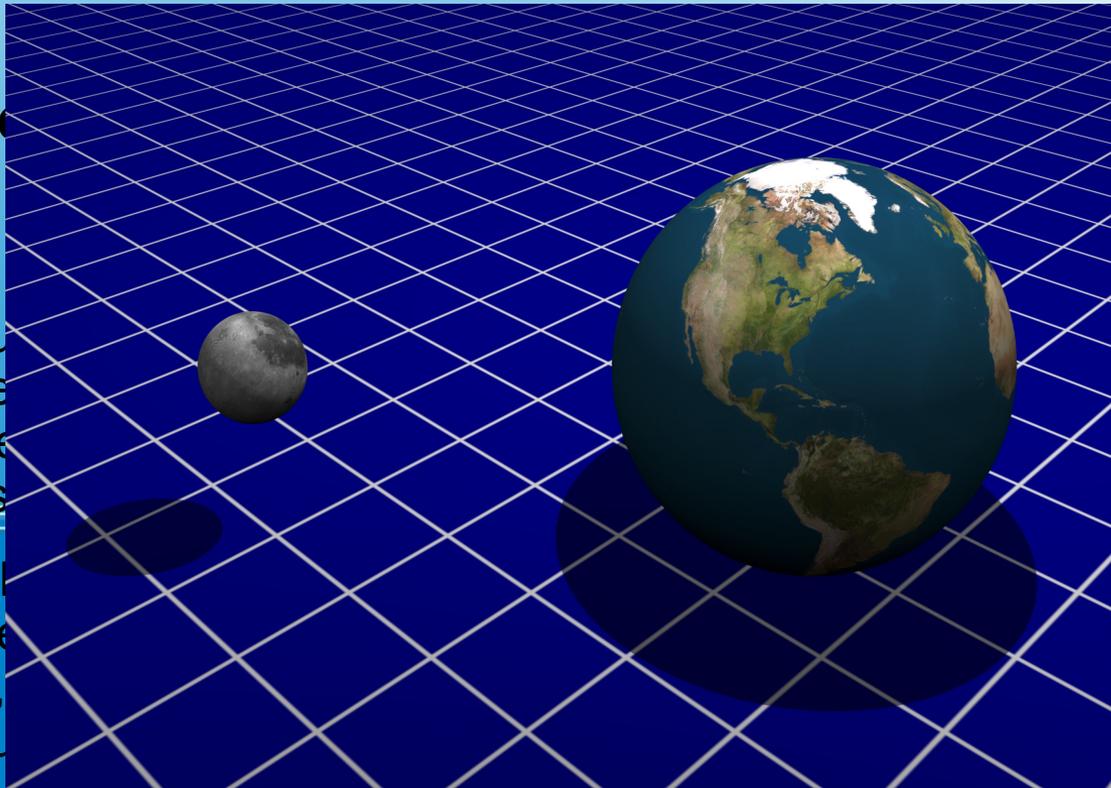
unificando le teorie di Galileo, Copernico e Keplero

LA GRAVITÀ SECONDO NEWTON

Le forze agiscono a distanza, "istantaneamente"



Lo spazio e la dinamica dei corpi (e gli oggetti) si ripete istantaneamente



stabile dove la gravitazione (e gli oggetti) si ripete istantaneamente

Il tempo assoluto e lo spazio assoluto (e gli oggetti) si ripete istantaneamente

senza relazione ad un tempo e un spazio assoluti e volgare, è una concezione comunemente viene chiamata "spazio e tempo assoluti"

Lo spazio assoluto e il tempo assoluto (e gli oggetti) si ripete istantaneamente

di esterno, rimane invariabile o misura dello spazio e del tempo rispetto ai corpi, ed è comune a tutti

LA GRAVITÀ SECONDO NEWTON

PRINCIPIO DI EQUIVALENZA (versione “debole”)

“Il moto di ogni oggetto di prova in caduta libera è indipendente dalla sua composizione e struttura”

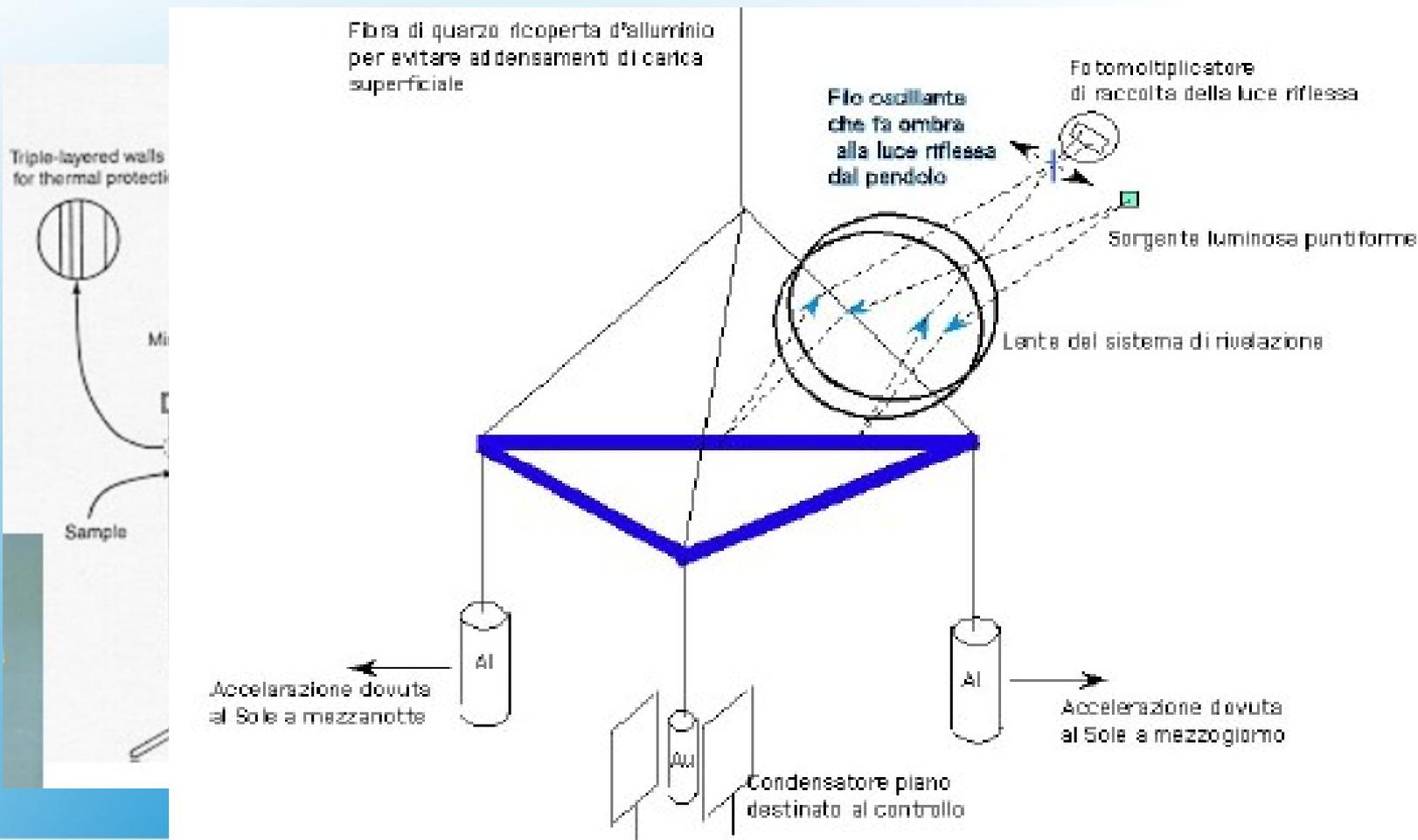


Massa inerziale e massa gravitazionale coincidono (o, meglio, sono proporzionali)

$$m_1 a = G m_1 m_2 / r^2$$

Verificato dall'esperimento di Eötvös – Dicke con precisione di una parte su 10^{11} , con un pendolo di torsione.

LA GRAVITÀ SECONDO NEWTON



Riassunto del metodo

- Se vale WEP, tutto l'apparato cade verso il Sole: assenza di torsione del filo
- Violazione di WEP: Au è accelerato diversamente da Al e l'effetto ha una periodicità giornaliera.

LA GRAVITÀ SECONDO NEWTON

Pendolo di torsione ben simmetrizzato con masse intercambiabili e a geometria variabile per annullare i momenti di multipolo di ordine superiore

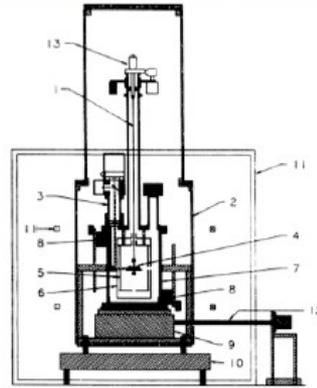
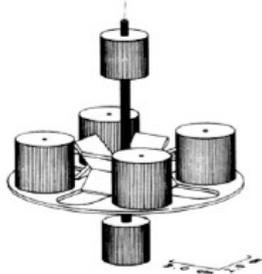


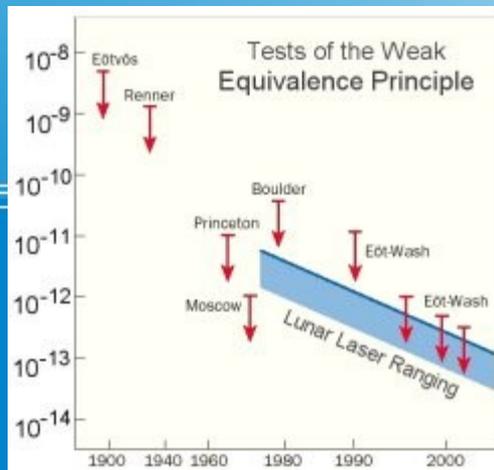
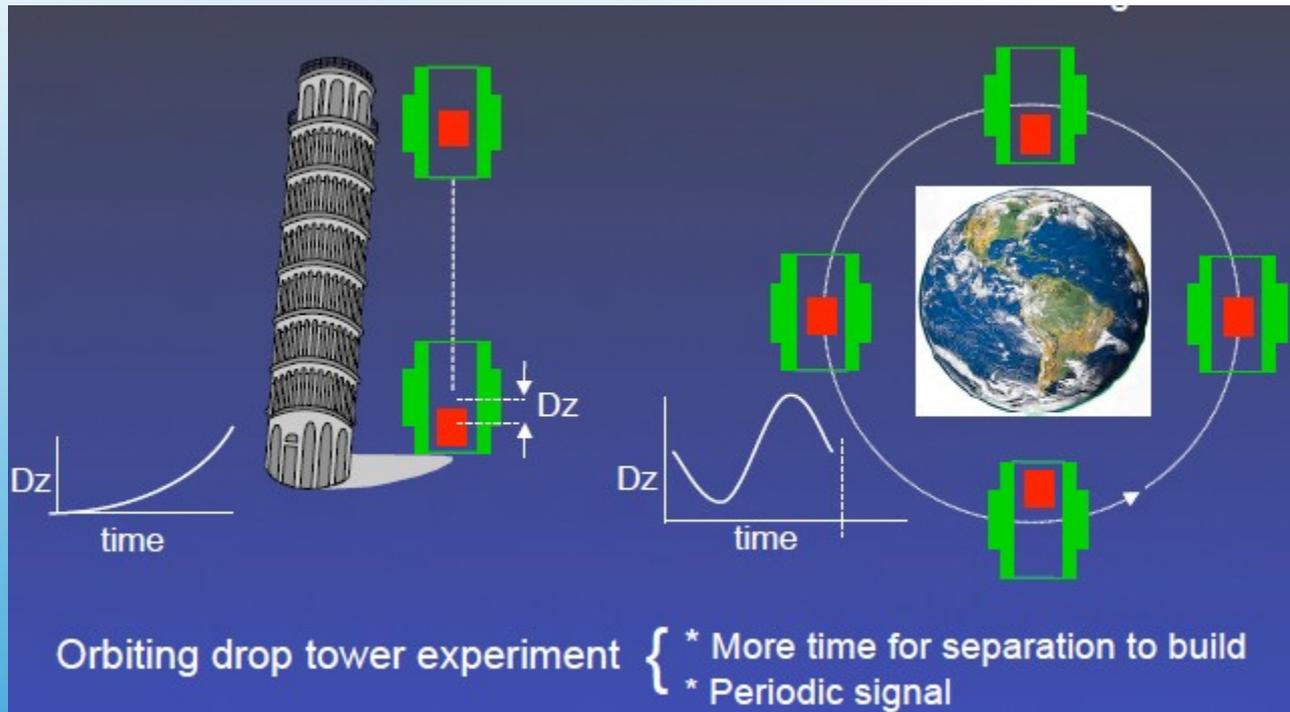
FIG. 1. Cross section of Eöt-Wash apparatus. 1, torsion fiber; 2, autocollimator; 3, rotateable gravity-gradient compensators; 4, magnetic shields; 5, turntable; 6, stationary gravity-gradient compensators; 7, vacuum vessel; 8, pendulum; 9, outer heat shield; 10, Helmholtz coils; 11, concrete block; 12, damper; 13, corotating cable clamp; 14, upper fiber attachment mechanism. The concrete block abuts the hillside wall of the laboratory and is 1.23 m high.

Risoluzione attuale: 10^{-13}

<https://microscope.cnes.fr/en/MICROSCOPE/index.htm>: 10^{-15}



LA GRAVITÀ SECONDO NEWTON

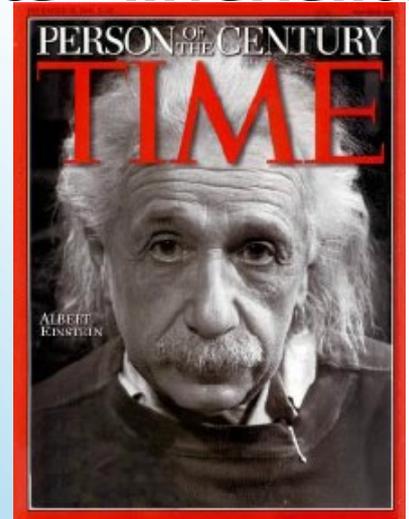


Risoluzione prevista: 10^{-17}

LA RELATIVITÀ SPECIALE

Le distanze spaziali e le durate temporali cambiano tra osservatori in moto relativo, mentre resta invariante l'intervallo spazio - temporale:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2 dt^2$$



Lo spazio e il tempo formano perciò una geometria 4 - dim

Anche energia e quantità di moto cambiano tra osservatori in moto relativo, con l'invarianza della massa a riposo

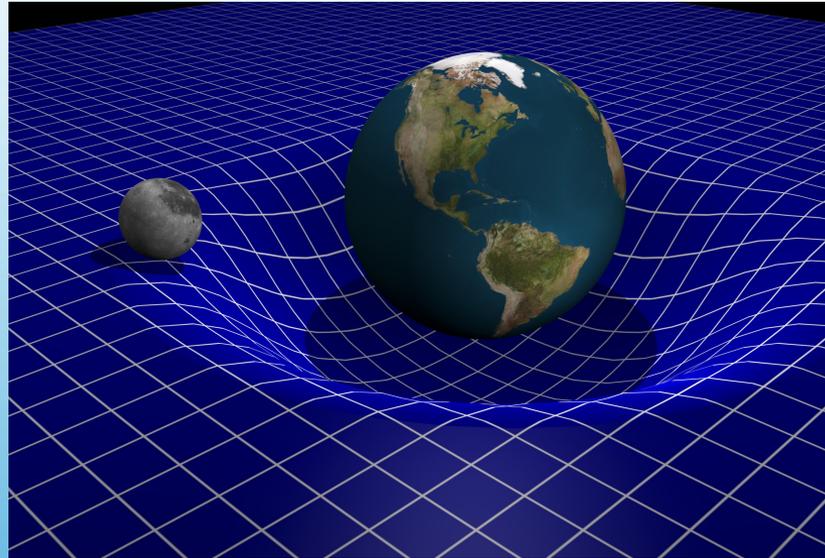
$$(m_0 c^2)^2 = E^2 - (pc)^2$$

SPAZIOTEMPO

.....d'ora innanzi lo spazio in sé e il tempo in sé sono condannati a dissolversi in nulla più che ombre, e solo una specie di congiunzione dei due conserverà una realtà indipendente: lo spaziotempo.

H.Minkowski

GEOMETRIA DELLO SPAZIO – TEMPO

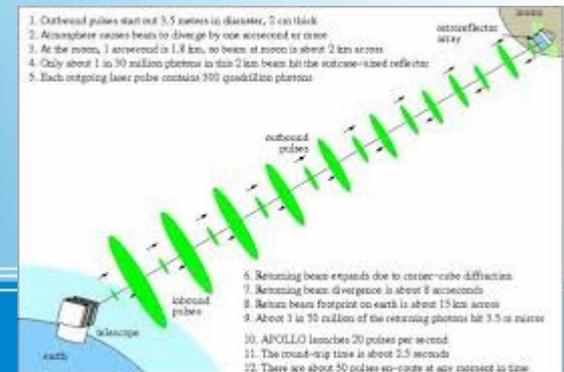
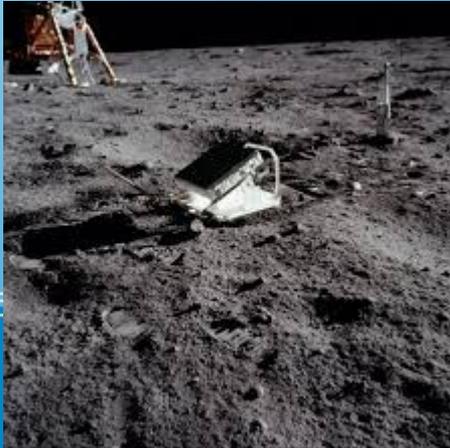


PRINCIPIO DI EQUIVALENZA relativistico (versione “media”)
“In un campo gravitazionale i sistemi di riferimento in caduta libera sono sistemi inerziali”

“per ogni evento di tipo puntiforme dello spazio – tempo esiste un intorno dello spazio – tempo sufficientemente piccolo in cui in ogni sistema locale in caduta libera tutte le leggi non gravitazionali della Fisica sono le leggi della Relatività speciale”

GEOMETRIA DELLO SPAZIO – TEMPO

Questa formulazione implica che l'esistenza di un campo gravitazionale potrebbe essere rivelata in sistemi in caduta libera per via dell'influenza del campo gravitazionale sui fenomeni gravitazionali locali. Per esempio, l'energia di legame gravitazionale di un corpo potrebbe contribuire in modo diverso alla massa inerziale e alla massa gravitazionale e potremmo perciò avere, per diversi oggetti, diversi rapporti m_i/m_g (**effetto Nordtvedt**). Quindi, Luna e Terra potrebbero avere diverse accelerazioni sotto l'influenza del Sole.



Lunar Laser Ranging Experiment:
risultato nullo con precisione 2×10^{-4}

GEOMETRIA DELLO SPAZIO – TEMPO

PRINCIPIO DI EQUIVALENZA relativistico (versione “forte”)

“I fenomeni fisici in sistemi accelerati sono equivalenti a quelli in campo gravitazionale. Nessun esperimento effettuato in un laboratorio permette di distinguere se questo si trovi in un campo gravitazionale o sia accelerato da qualche forza esterna”

“per ogni evento di tipo puntiforme dello spazio – tempo esiste un intorno dello spazio – tempo sufficientemente piccolo in cui in ogni sistema locale in caduta libera tutte le leggi ~~non gravitazionali~~ della Fisica sono le leggi della Relatività speciale”

DILATAZIONE DEI TEMPI –

SPOSTAMENTO GRAVITAZIONALE VERSO IL ROSSO

Consideriamo un fotone che si muove tra A e B in direzione opposta a quella del campo di gravità. Mentre “sale” il fotone compie il lavoro

$$L_{\{A \rightarrow B\}} = \Delta U_{BA}$$

per cui giunge in B con energia ridotta

$$h \nu_B = E_B = E_A - L_{A \rightarrow B} = h \nu_A - L_{A \rightarrow B}$$

Ora,

$$U(r) = \frac{-GMm}{r}$$

E definendo relativisticamente una “massa” del fotone

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{h \nu}{c^2}$$

DILATAZIONE DEI TEMPI –

SPOSTAMENTO GRAVITAZIONALE VERSO IL ROSSO

Si ottiene

$$\nu_B = \nu_A \left(1 - \frac{\Delta U}{mc^2} \right)$$

Ovvero,

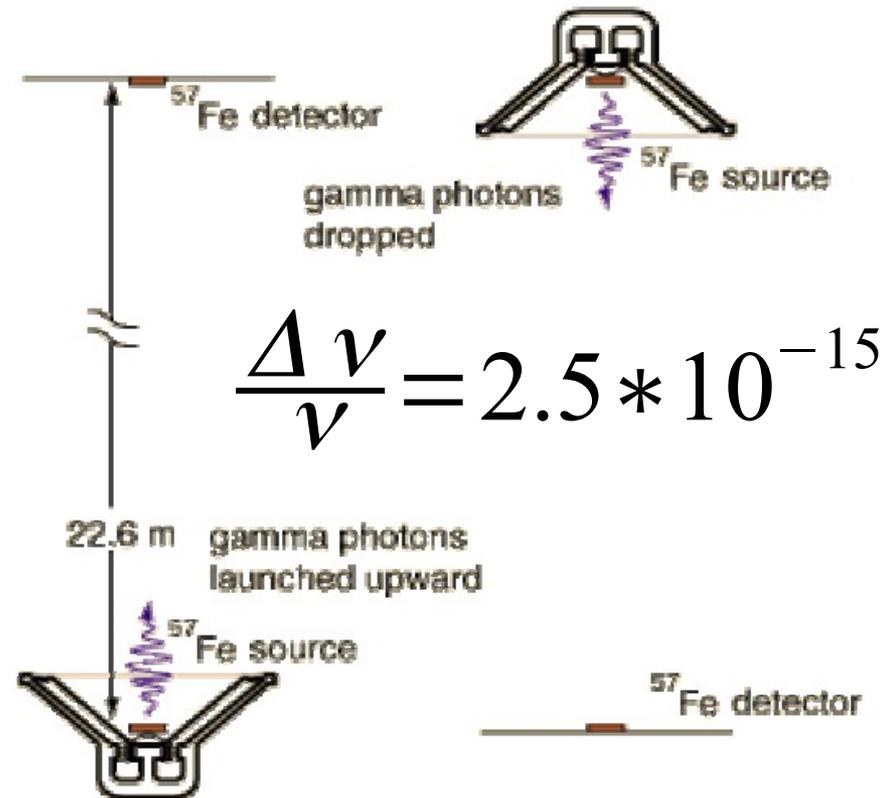
$$\frac{\Delta \nu}{\nu} = \frac{GM}{Rc^2} = \frac{\mathfrak{R}}{2R}$$

se il punto di osservazione è il nostro, a grande distanza da una sorgente di luce (stella) di raggio R . La quantità sarebbe misurabile, se non ci fosse lo spostamento Doppler (spesso incognito) dovuto al moto relativo tra sorgente e ricevitore. Le misure fatte sono relative a nane bianche, 40 Eridani B, Sirio B, Sole.

DILATAZIONE DEI TEMPI – SPOSTAMENTO GRAVITAZIONALE VERSO IL ROSSO

ESPERIMENTO di Pound Snider

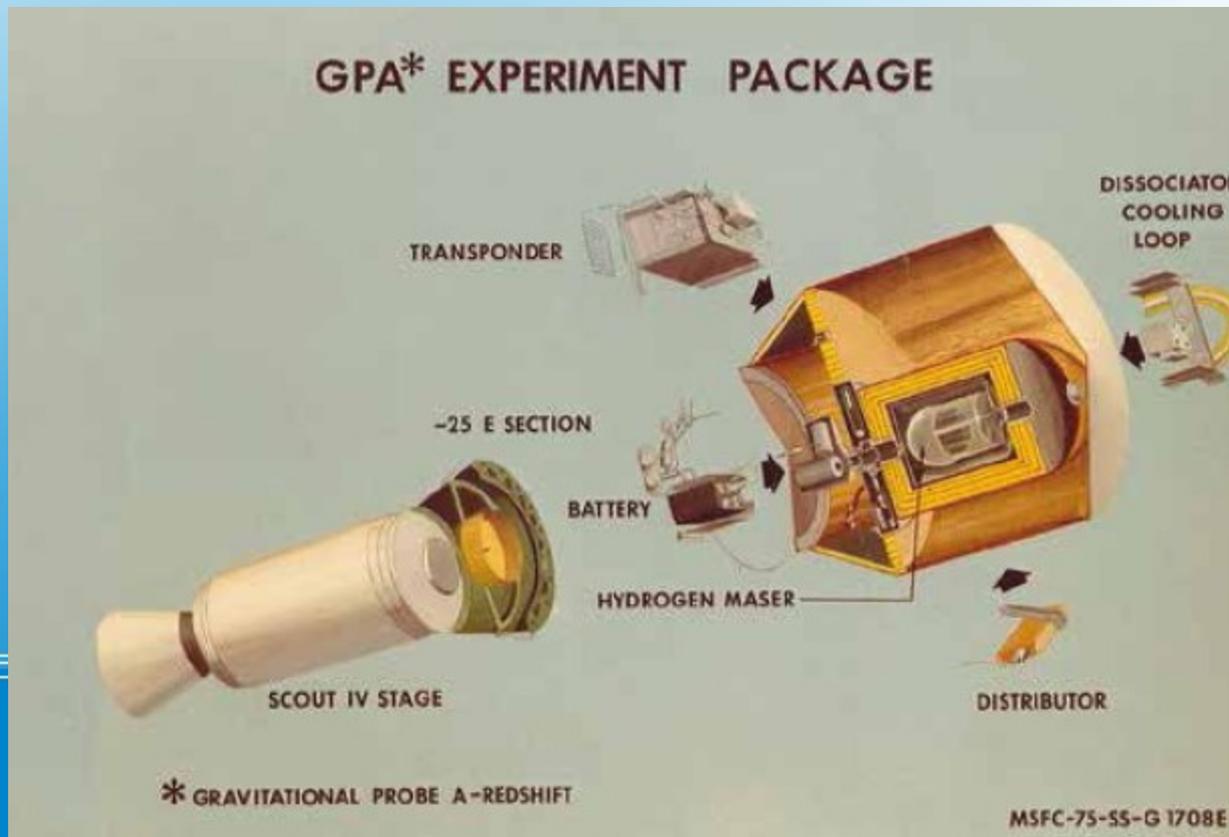
Raggio gamma emesso
per effetto Mössbauer



accuratezza: 10^{-2}

DILATAZIONE DEI TEMPI – SPOSTAMENTO GRAVITAZIONALE VERSO IL ROSSO

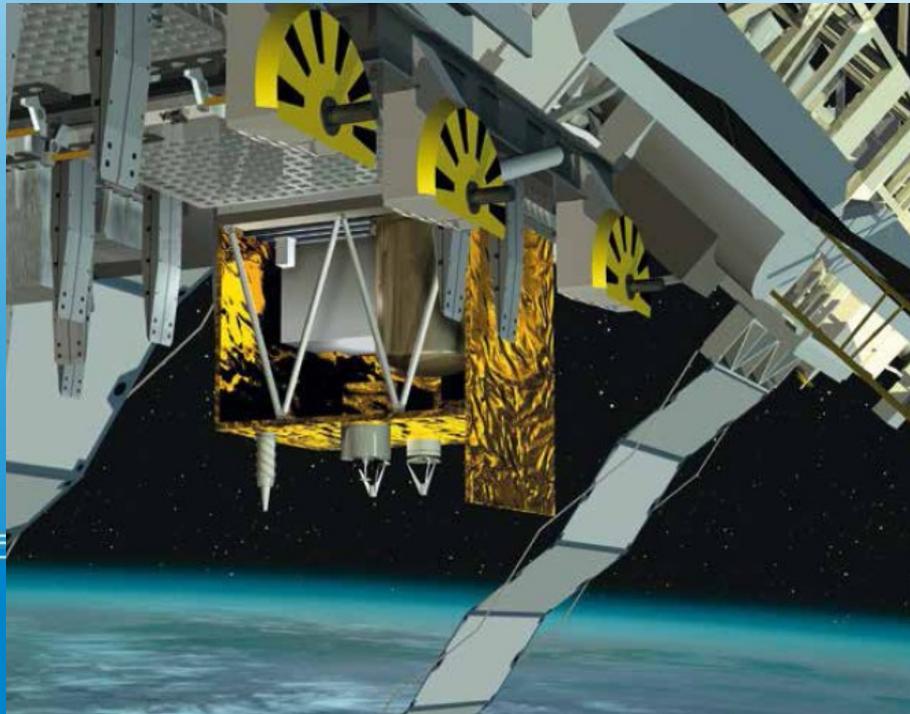
Nell'**esperimento GPA** si confrontano due orologi – MASER all'idrogeno, uno su un razzo a circa 10000 km di quota e l'altro a Terra



accuratezza: 10^{-4}

DILATAZIONE DEI TEMPI – SPOSTAMENTO GRAVITAZIONALE VERSO IL ROSSO

L'esperimento **Atomic Clock Ensemble in Space (ACES)** della European Space Agency (ESA) sarà avviato in questo 2016 e basato su orologi ad atomi freddi trasportati sulla Stazione Spaziale Internazionale



accuratezza: $2 \cdot 10^{-6}$

DILATAZIONE DEI TEMPI – SPOSTAMENTO GRAVITAZIONALE VERSO IL ROSSO

**Gli orologi si muovono più lentamente in prossimità di
grandi masse**

$$T_A = \left(1 - \frac{\mathfrak{R}}{2R} \right) T_B$$

**Ma per la relatività speciale gli orologi rallentano anche se
viaggiano a velocità v**

$$t_A = \sqrt{1 - \frac{v_A^2}{c^2}} T_A \approx \left(1 - \frac{v_A^2}{2c^2} \right) T_A$$

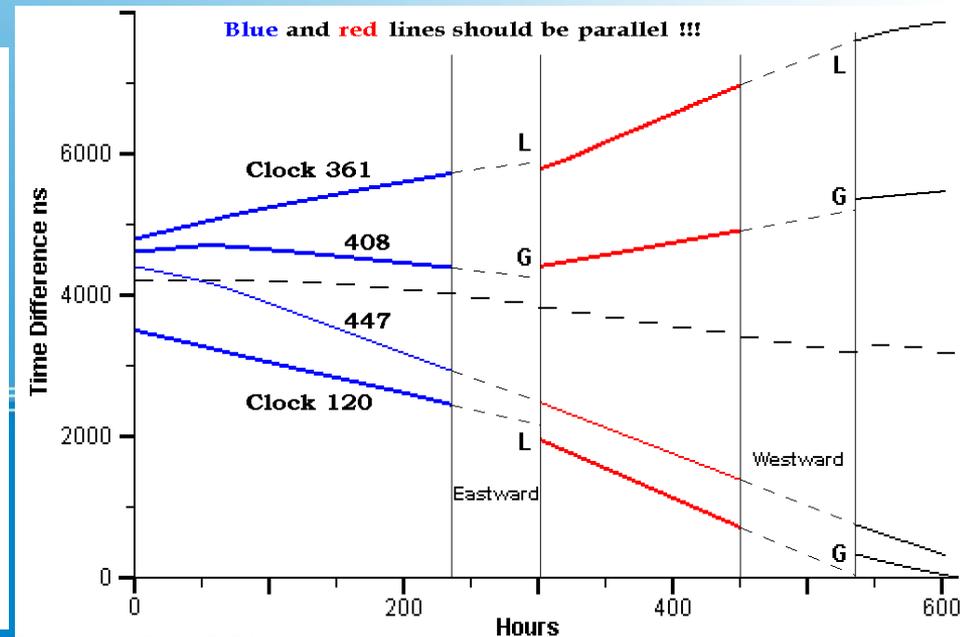
$$t_B \approx \left(1 - \frac{v_B^2}{2c^2} \right) T_B \approx \left(1 + \frac{gH}{c^2} \right) \left(1 - \frac{v_B^2}{2c^2} \right) T_A \approx \left(1 + \frac{gH}{c^2} + \frac{v_A^2}{2c^2} + \frac{v_B^2}{2c^2} \right)$$

DILATAZIONE DEI TEMPI - SPOSTAMENTO GRAVITAZIONALE VERSO IL ROSSO

$$t_A = \sqrt{1 - \frac{v_A^2}{c^2}} T_A \approx \left(1 - \frac{v_A^2}{2c^2}\right) T_A$$

$$t_B \approx \left(1 - \frac{v_B^2}{2c^2}\right) T_B \approx \left(1 + \frac{gH}{c^2}\right) \left(1 - \frac{v_B^2}{2c^2}\right) T_A \approx \left(1 + \frac{gH}{c^2} + \frac{v_A^2}{2c^2} + \frac{v_B^2}{2c^2}\right) T_A$$

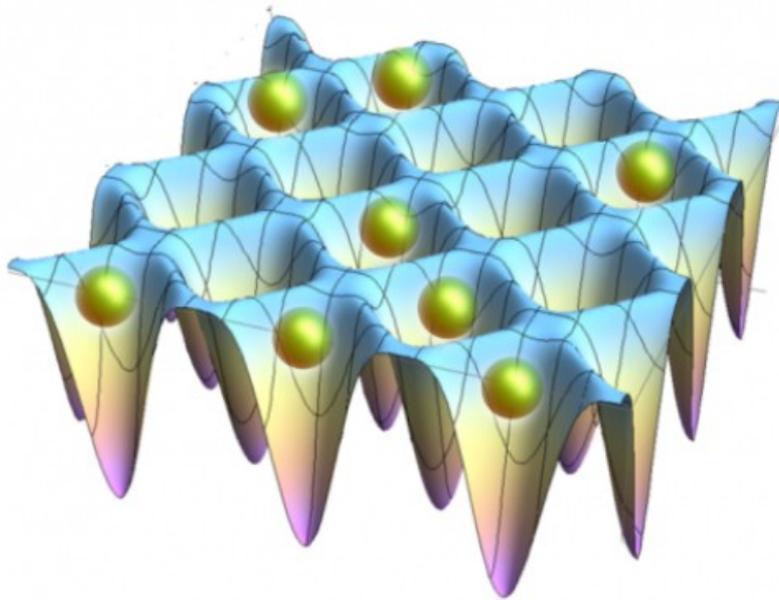
Hafele and Keating Experiment



DILATAZIONE DEI TEMPI – SPOSTAMENTO GRAVITAZIONALE VERSO IL ROSSO

Gli orologi si muovono più lentamente in prossimità di
grandi masse

$$T_A = \left(1 - \frac{\mathfrak{R}}{2R} \right) T_B$$

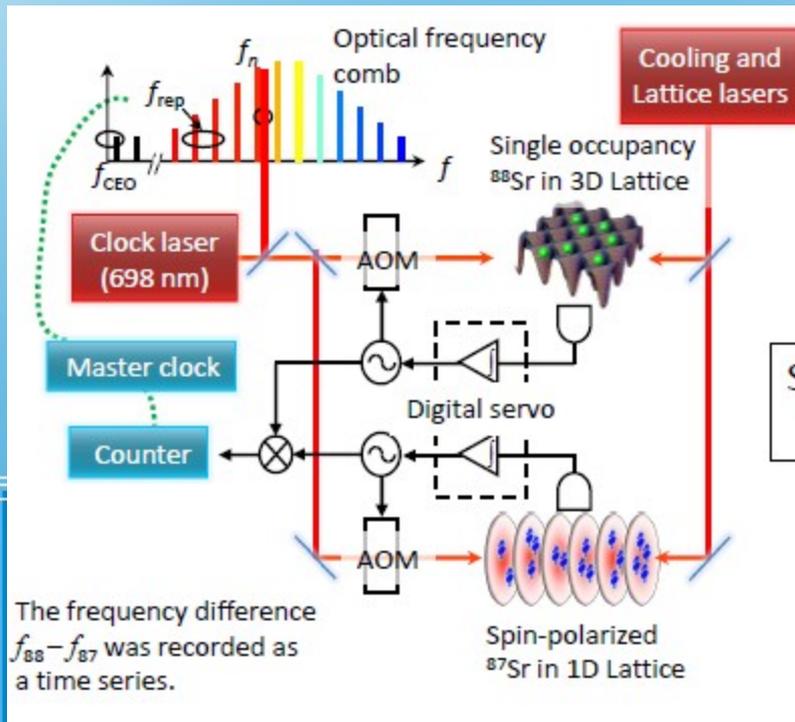


We all like to know our watches keep the time well, but Hidetoshi Katori, of RIKEN's Quantum Metrology Laboratory and the University of Tokyo's Graduate School of Engineering, is taking precision to an entirely new dimension. In work published in *Nature Photonics*, Katori's group demonstrated two cryogenically cooled optical lattice clocks that can be synchronized to a tremendous one part in 2.0×10^{-18} —meaning that they would only go out of synch by a second in 16 billion years. This is nearly 1,000 times more precise than the current international timekeeping standard cesium atomic clock.

DILATAZIONE DEI TEMPI – SPOSTAMENTO GRAVITAZIONALE VERSO IL ROSSO

Gli orologi si muovono più lentamente in prossimità di
grandi masse

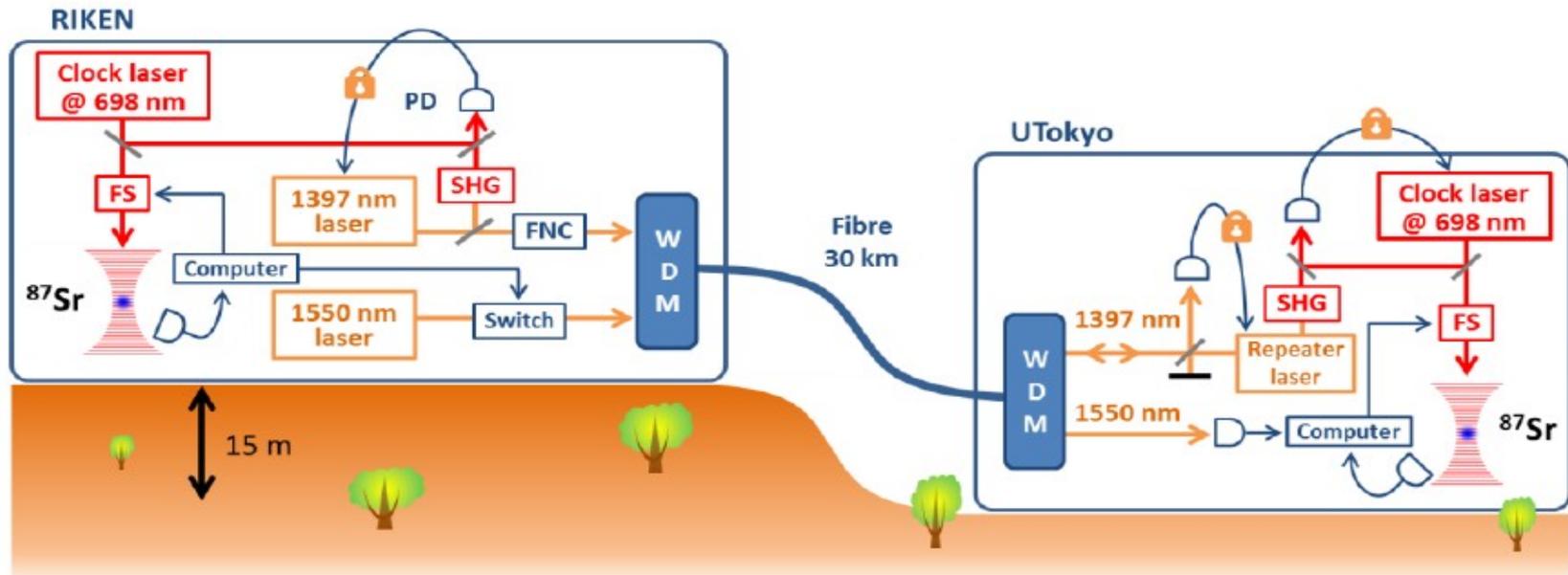
$$T_A = \left(1 - \frac{\mathcal{R}}{2R} \right) T_B$$



DILATAZIONE DEI TEMPI – SPOSTAMENTO GRAVITAZIONALE VERSO IL ROSSO

Gli orologi si muovono più lentamente in prossimità di
grandi masse

$$T_A = \left(1 - \frac{\mathcal{R}}{2R} \right) T_B$$

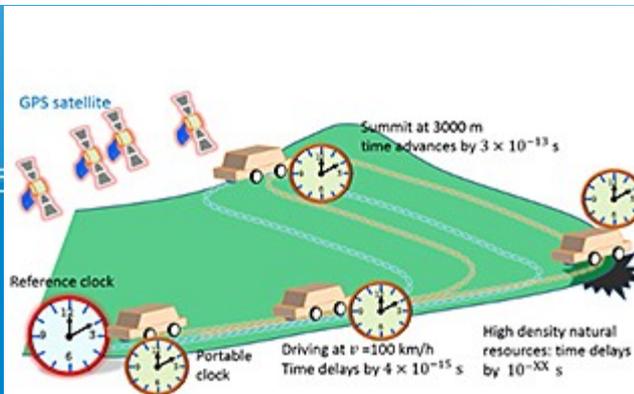


DILATAZIONE DEI TEMPI – SPOSTAMENTO GRAVITAZIONALE VERSO IL ROSSO

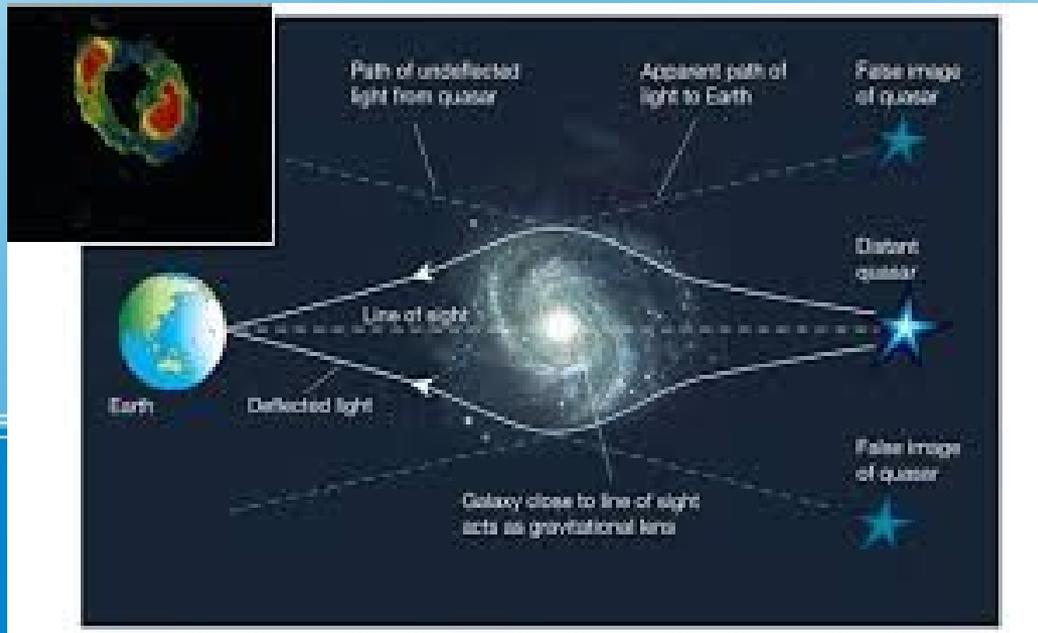
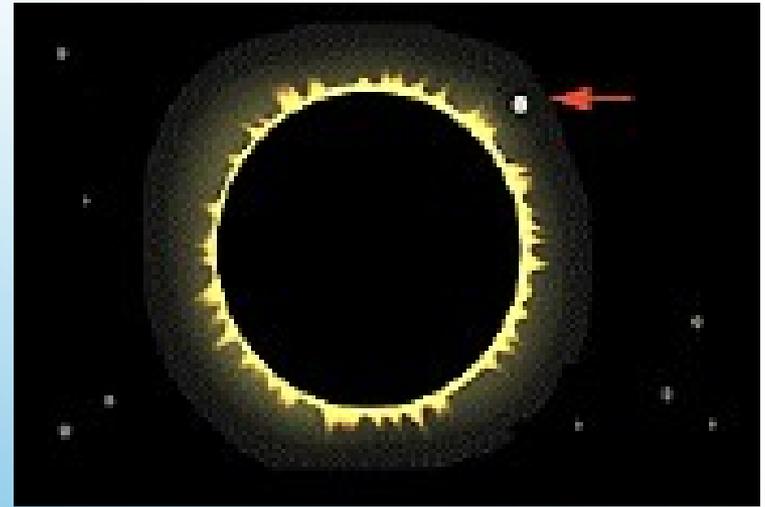
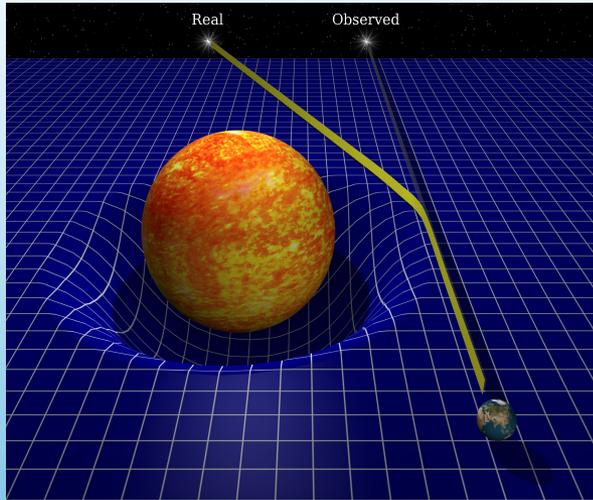
Gli orologi si muovono più lentamente in prossimità di grandi masse

$$T_A = \left(1 - \frac{\mathfrak{R}}{2R} \right) T_B$$

		Numerator ν_a		
		^{87}Sr	^{171}Yb	^{199}Hg
Denominator ν_b	^{87}Sr	(1)	1.207 507 039 343 337 76(29) $u_c/y = 2.4 \times 10^{-16}$	2.629 314 209 898 909 60(22) $u_c/y = 8.4 \times 10^{-17}$
	^{171}Yb	-	(1)	[2.177 473 194 134 565 07(54)] $[u_c/y = 2.5 \times 10^{-16}]$
	^{199}Hg	-	-	(1)
CIPM s^{-1}		429 228 004 229 873.4(4)	518 295 836 590 865.0(1.4)	1 128 575 290 808 162(19)
Ref. [59]		$u_c/\nu_{\text{Sr}} = 1.0 \times 10^{-15}$	$u_c/\nu_{\text{Yb}} = 2.7 \times 10^{-15}$	$u_c/\nu_{\text{Hg}} = 1.7 \times 10^{-14}$



LA DEFLESSIONE DELLA LUCE



$$\delta_{GR} = \frac{2\mathcal{R}}{R} \approx 9 \mu rad$$

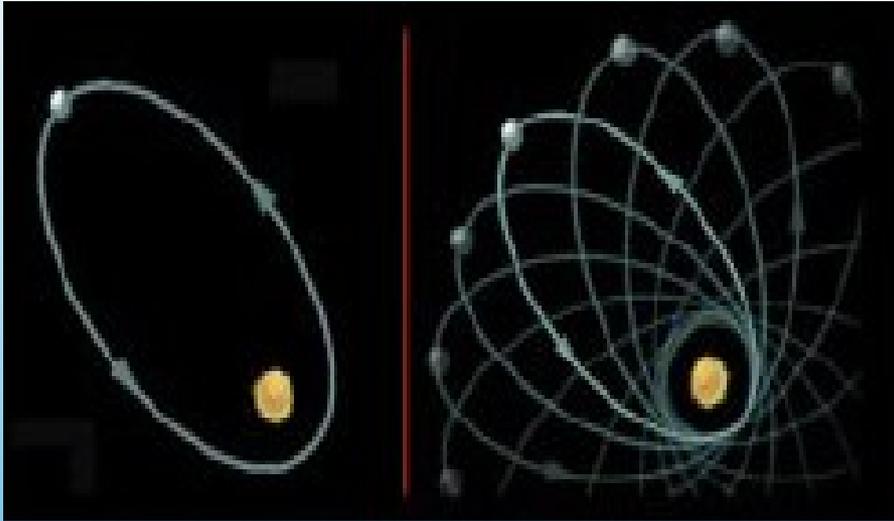
LA DEFLESSIONE DELLA LUCE

Quella stella esplosa di nuovoLa supernova vista in "replay"

Foto Einstein l'aveva previsto

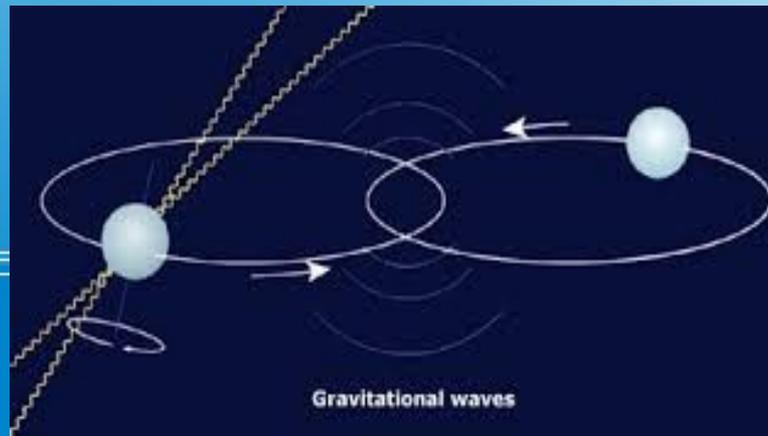


LO SPOSTAMENTO DEL PERIELIO DI MERCURIO

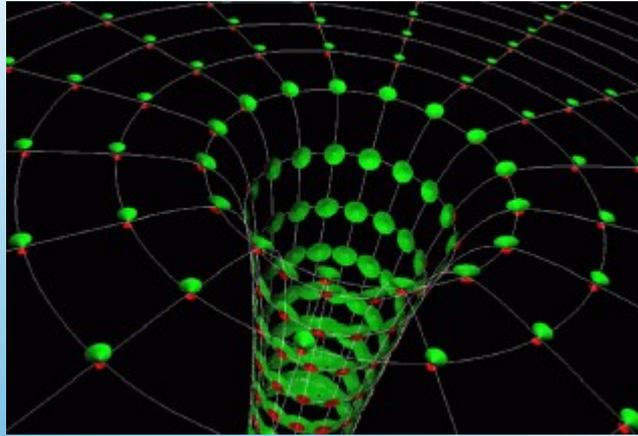


$$\frac{\Psi_{GR}}{2\pi} = \frac{1.5 \mathfrak{R}}{a(1-e^2)}$$

.....E DEL PERIASTRO DI ALTRI CORPI CELESTI



ONDE GRAVITAZIONALI



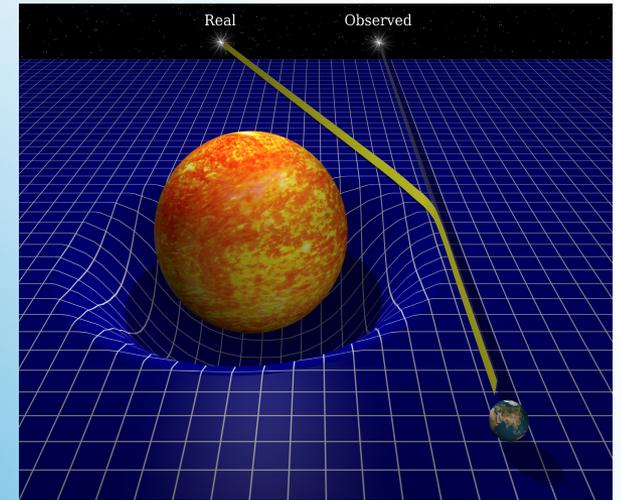
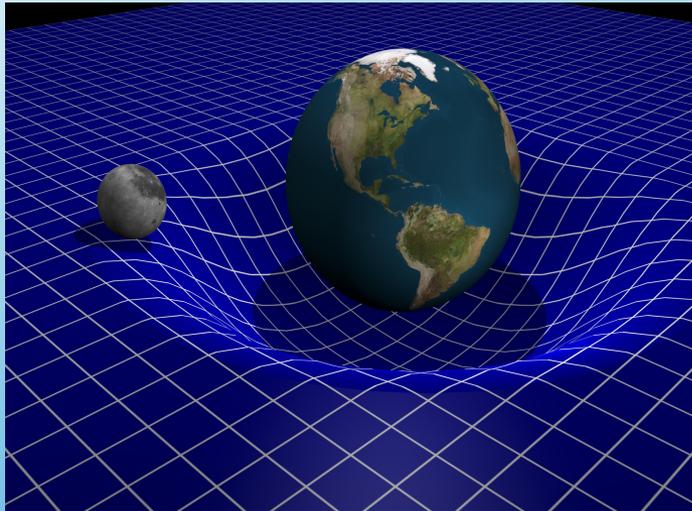
Come abbiamo visto, la maggior parte delle verifiche della relatività generale consiste in deviazioni piccole dalla teoria newtoniana. La curvatura spazio temporale è un effetto piccolo tranne che

- x Subito dopo il bigbang per l'intero universo**
- x Vicino a / nell'orizzonte dei buchi neri**

le onde gravitazionali sono segni della presenza di eventi “non lineari”



Onde gravitazionali



Emilio Mariotti

**mariotti@unisi.it, <https://sites.google.com/a/unisi.it/emilio-mariotti>
Dipartimento di Scienze Fisiche, della Terra e dell'Ambiente
Sezione di Fisica**

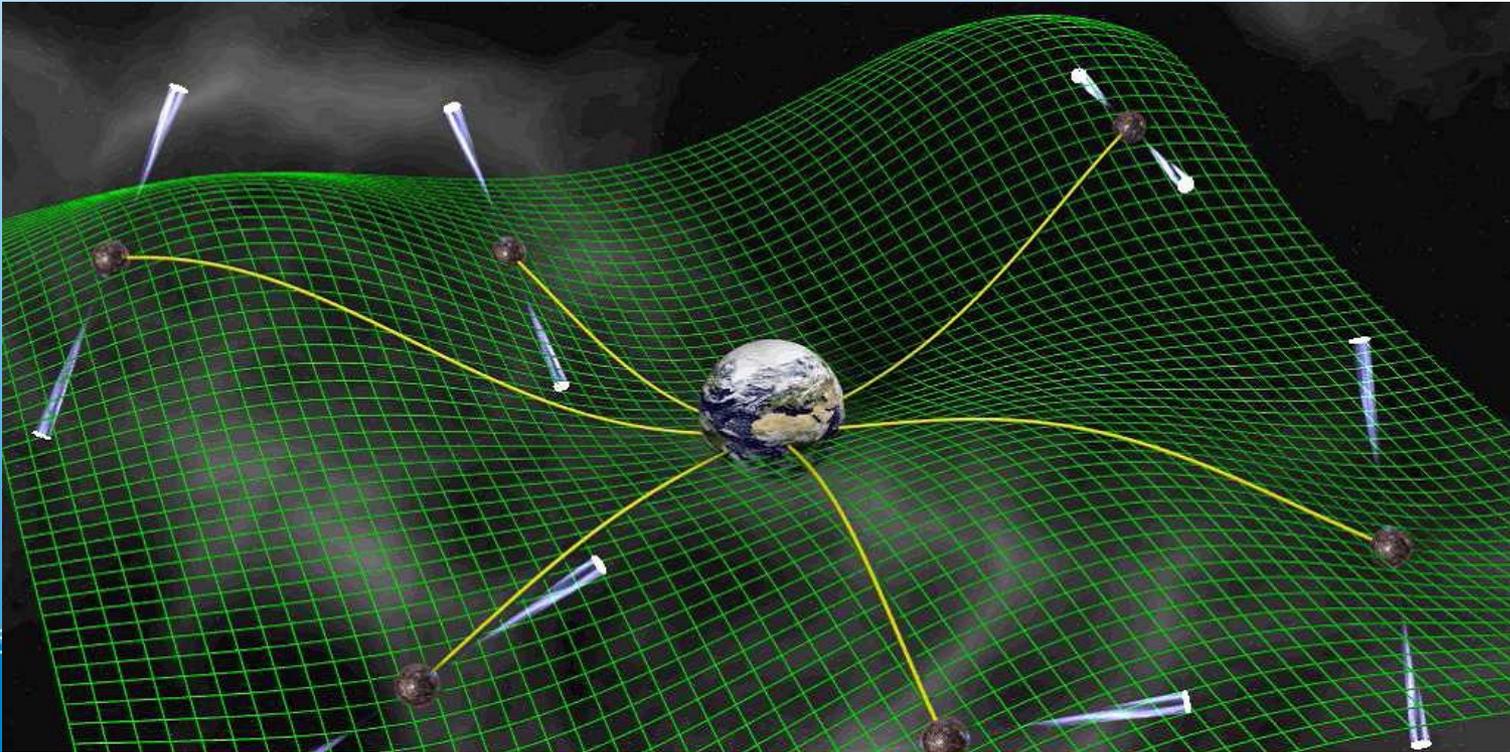
L'insegnamento della Fisica relativistica
nella Scuola Secondaria di secondo grado
Mathesis Firenze, 26 ottobre 2016



**UNIVERSITÀ
DI SIENA**
1240

Onde gravitazionali: cosa sono?

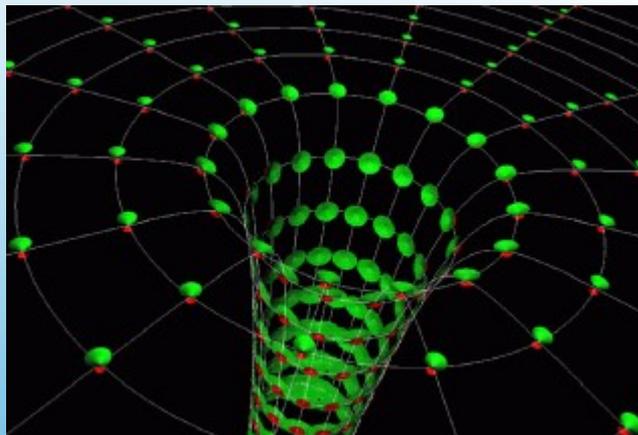
Deformazioni della curvatura dello spaziotempo che si propagano come un'onda.



Onde gravitazionali: dove hanno origine?

- Sistemi binari di stelle;
- Pulsar
- Esplosione di

Confronto con le onde e.m.



E&M	GW
space as medium for field	Space-time itself
incoherent superpositions of atoms, molecules	coherent motions of huge masses (or energy)
wavelength small compared to sources - images	wavelength ~large compared to sources - poor spatial resolution
absorbed, scattered, dispersed by matter	very small interaction; no shielding
10^6 Hz and up	10^3 Hz and down
measure amplitude (radio) or intensity (light)	measure amplitude
detectors have small solid angle acceptance	detectors have large solid angle acceptance

Confronto con le onde e.m.

Cariche accelerate emettono onde e.m. con una potenza totale,

$$P = \frac{2}{3c^3} \sum \ddot{p}_i^2 = \left(\frac{2q^2}{3c^3} \sum a_i^2 \right)$$

con p momento di dipolo elettrico della distribuzione di carica

$$p_i(t) = \int dV \rho(x, t) x_i$$

Confronto con le onde e.m.

Masse accelerate emettono onde gravitazionali con una potenza totale,

$$P = \frac{G}{5c^5} \sum \ddot{Q}_{i,j}^2$$

con Q momento di quadrupolo della distribuzione di massa, e ne descrive le deviazioni dalla sfericità.

$$Q_{i,j}(t) = \int dV \rho(x,t) \left(x_i x_j - \frac{1}{3} \delta_{i,j} r^2 \right)$$

Confronto con le onde e.m.

Supponiamo un moto armonico (non si perde generalità grazie all'analisi di Fourier)

$$P \approx \frac{G}{c^5} \omega^6 \sum Q_{i,j}^2 \approx \frac{G}{c^5} \omega^6 m r^2 = \frac{G}{c^5} \left(\frac{2\pi r}{T} \right)^6 \frac{m^2}{r^2}$$

con r dimensione dell'orbita di un sistema binario formato dalle masse m, M . Dalla gravitazione

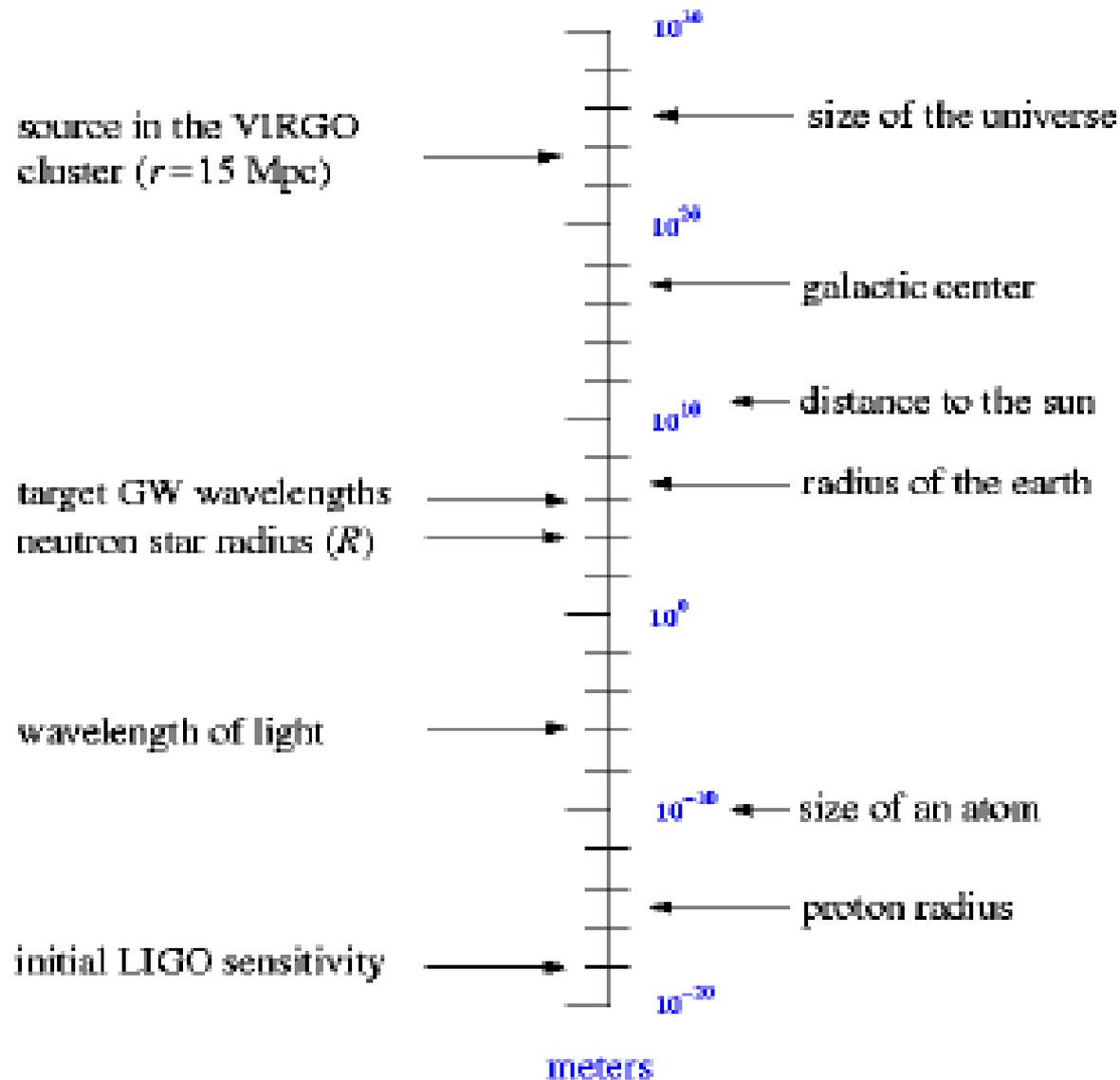
$$v^2 = G \frac{M}{r}$$

Confronto con le onde e.m.

In definitiva,

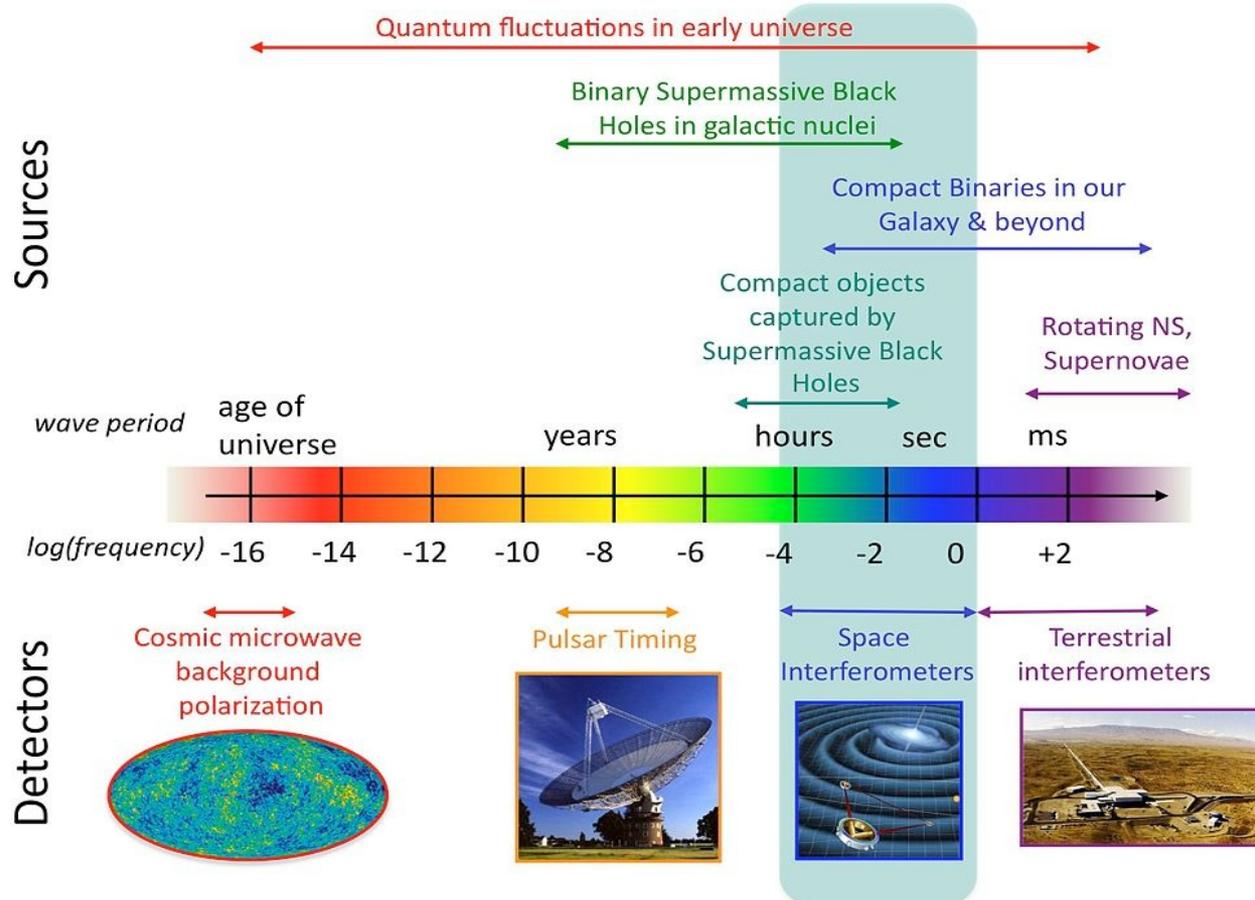
$$P \approx \frac{G}{c^5} \left(\frac{GM}{rc^2} \right)^3 \left(\frac{Gm}{rc^2} \right)^2 = \frac{G}{c^5} \left(\frac{\mathfrak{R}_1}{r} \right)^3 \left(\frac{\mathfrak{R}_2}{r} \right)^2$$

Scale di lunghezza

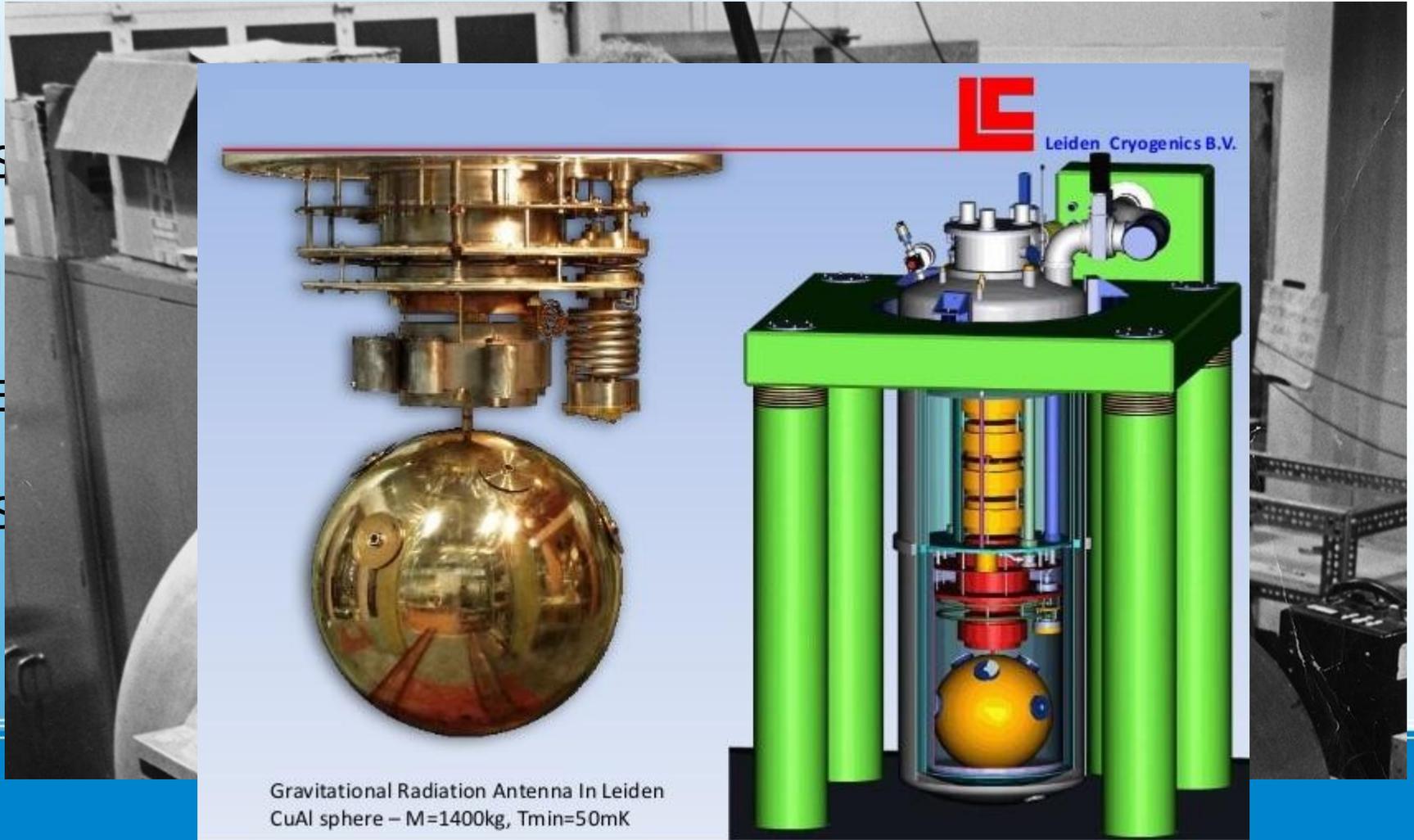


Spettro

The Gravitational Wave Spectrum



Rivelatori



Rivelatori

Resonant bar detectors

- AURIGA bar near Padova, Italy (typical of some ~6 around the world – Maryland, LSU, Rome, CERN, UWA)
- 2.3 tons of Aluminum, 3m long;
- Cooled to 0.1K with dilution fridge in LiHe cryostat
- $Q = 4 \times 10^6$ at $< 1K$
- Fundamental resonant mode at ~900 Hz; narrow bandwidth
- Ultra-low-noise capacitive transducer and electronics (SQUID)



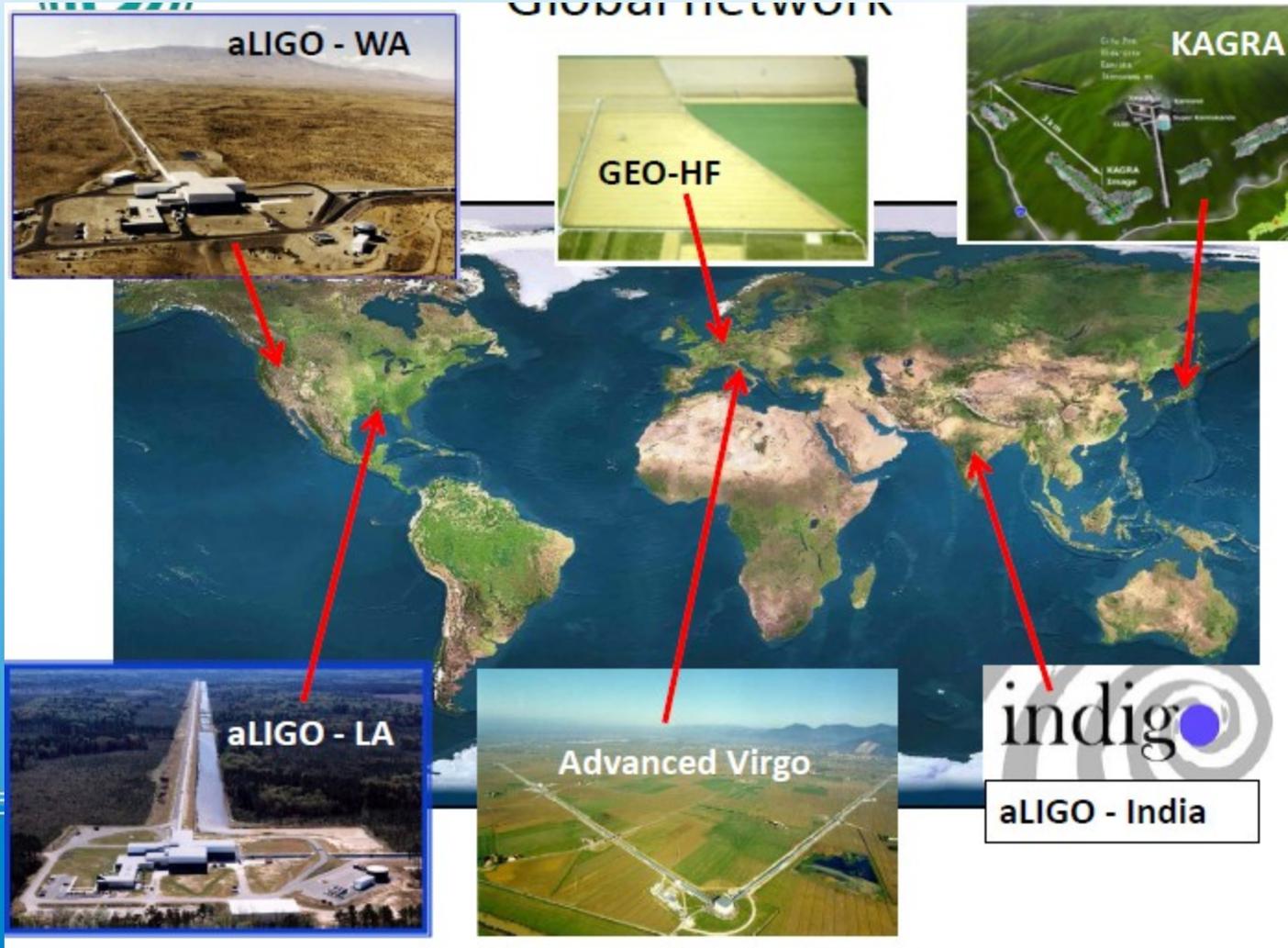
Rivelatori

La proposta dell'utilizzo di un interferometro si deve allo stesso Weber e ai sovietici Gertsenshtein e Pustovoyt, alla fine degli anni '60;

Nel 1967, Reiner Weiss del MIT propose ed iniziò la costruzione di un prototipo di interferometro laser, ma la costruzione fu sospesa;

Nel 1968 Robert Forward degli *Hughes Research Laboratories* costruì un interferometro completo con bracci di 40 m, seguito Weiss del MIT, Billing di Garching e Drever e Hough di Glasgow;

Interferometria

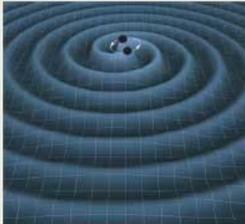


Da Le Scienze

LA SUPER ANTENNA PER LE ONDE GRAVITAZIONALI

LE ONDE GRAVITAZIONALI

Stelle doppie, stelle ruotanti, supernovae e, in generale, ogni collasso gravitazionale produce rapidi cambiamenti nello spazio-tempo che si propagano alla velocità della luce: le onde gravitazionali. La forza gravitazionale è la più debole dell'Universo, quindi è difficilissimo "vederla"



L'INTERFEROMETRO VIRGO

Per cercare di rivelare questo tipo di onde, l'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare italiano (INFN) e il Centre National de la Recherche Scientifique francese (CNRS) hanno creato presso Cascina (PI) l'Osservatorio Gravitazionale Europeo (EGO). Qui è stata costruita l'antenna gravitazionale Virgo.



COM'È FATTO VIRGO

Virgo è un interferometro laser di tipo Michelson con due bracci di 3 km disposti ad angolo retto. Una serie di specchi fa rimbalzare avanti e indietro la luce e "allunga" così virtualmente i bracci fino a oltre 300 km.

CAVITÀ RISONANTE FABRY-PEROT

Formata da due specchi, estende la lunghezza ottica da 3 a circa 300 km per via delle riflessioni multiple della luce.

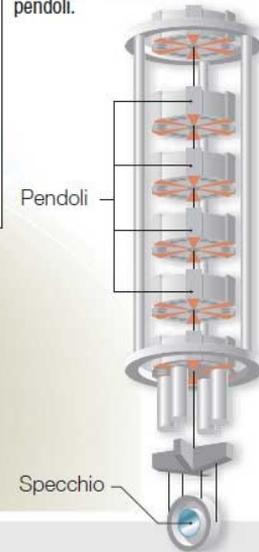
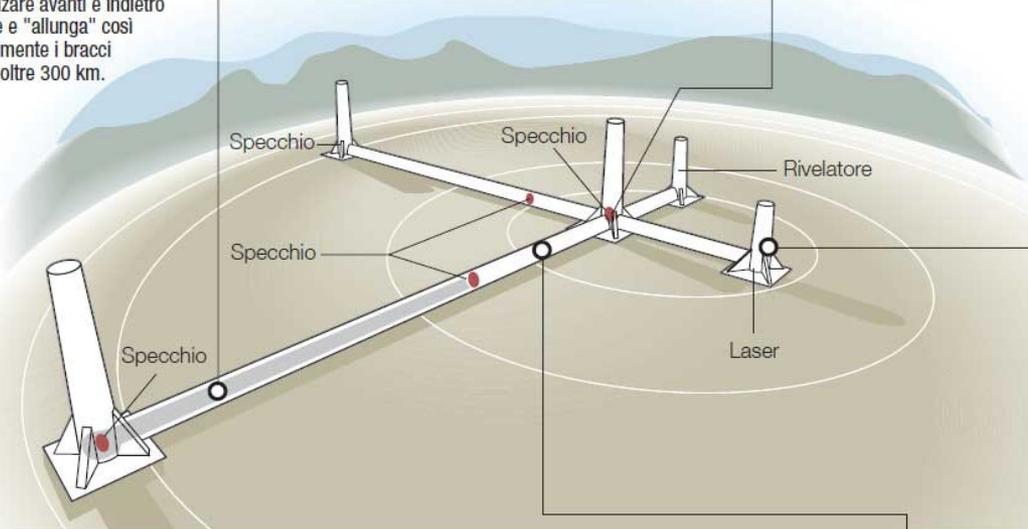
Serve ad amplificare l'effetto del passaggio dell'onda gravitazionale.

SPECCHIO SEMITRASPARENTE

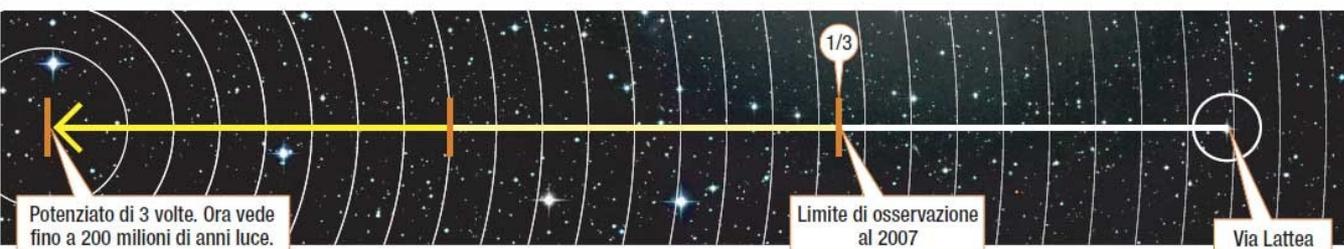
Divide il fascio laser incidente in due componenti uguali mandate nei due bracci dell'interferometro

LE TORRI

Proteggono al loro interno gli specchi. Ogni specchio è sospeso ad un sistema di isolamento sismico realizzato con una catena di pendoli.



RAGGIO DI AZIONE DI VIRGO

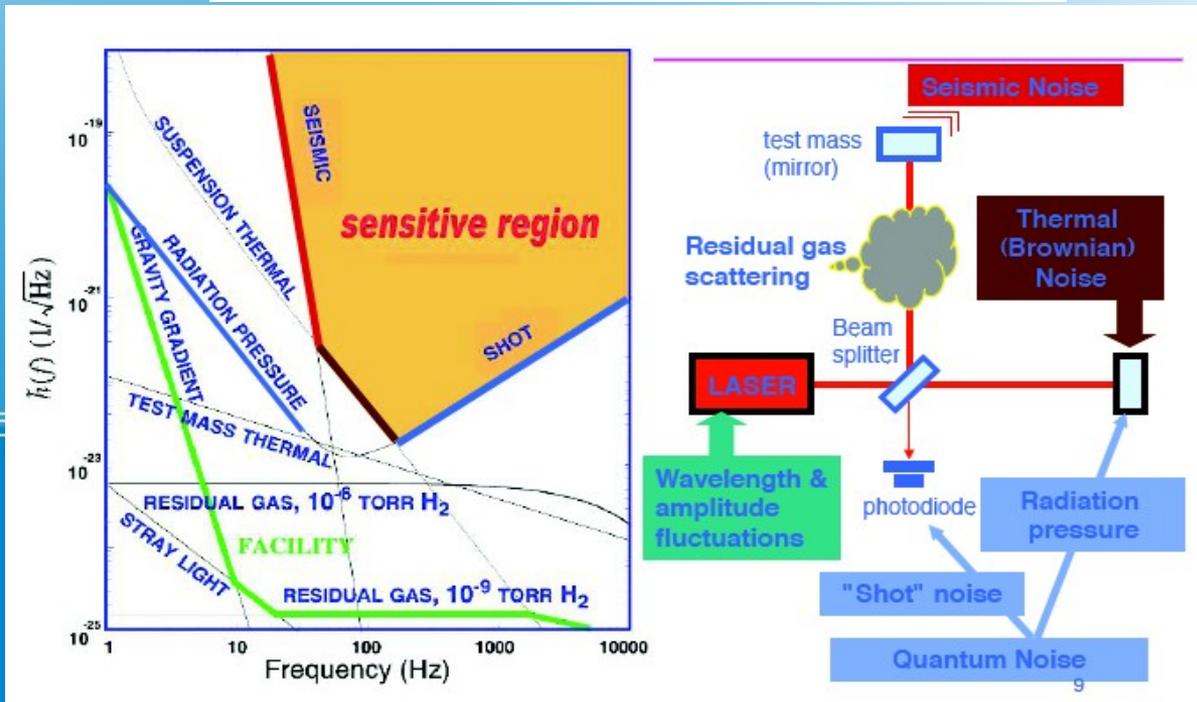
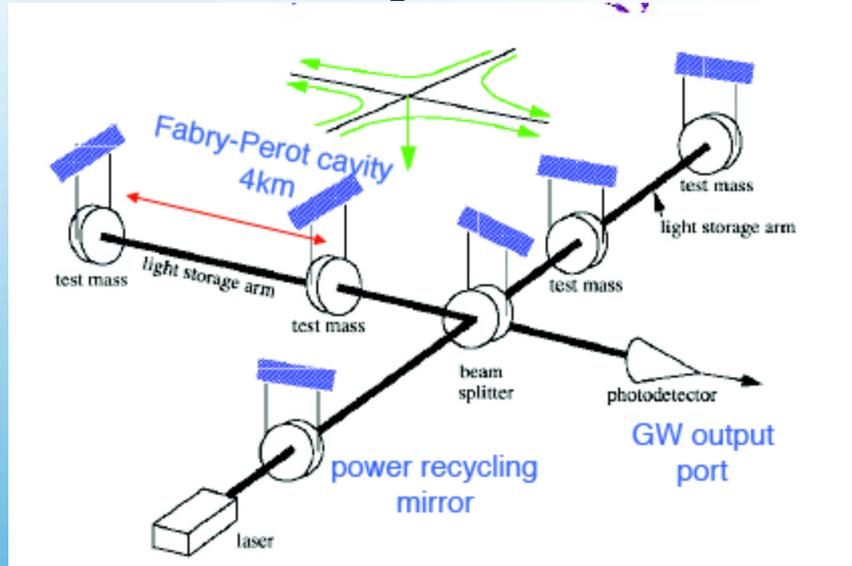


TUBI A ULTRA ALTO VUOTO

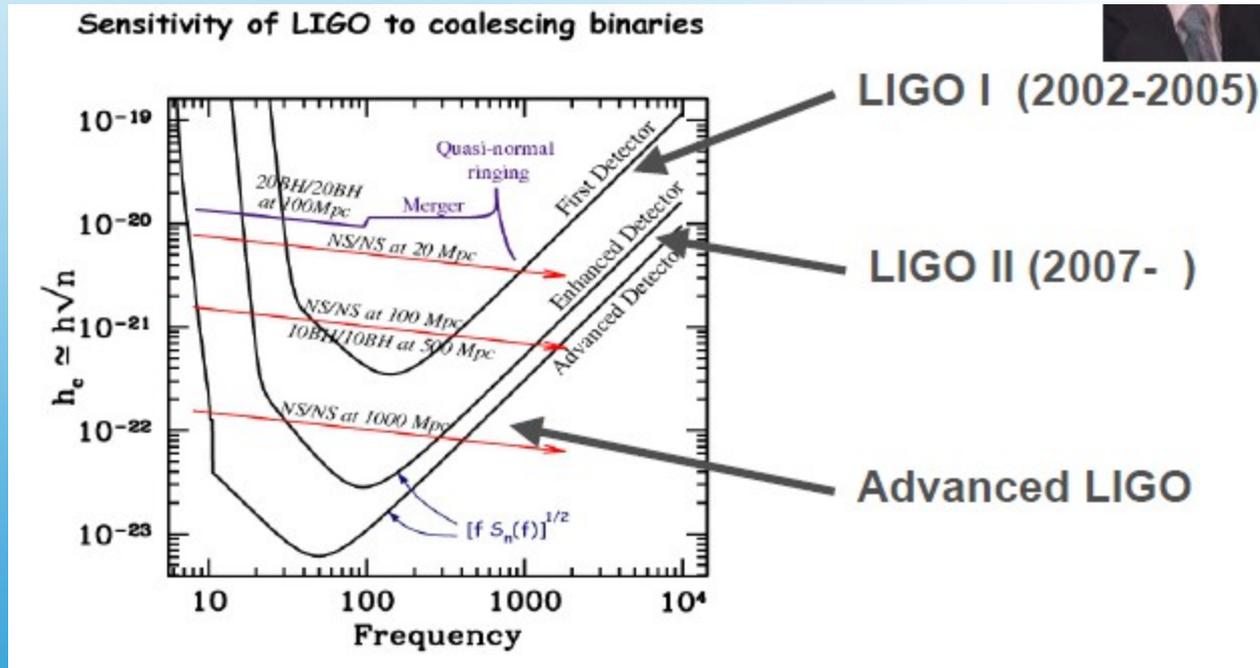
Siccome la presenza di gas residuo perturberebbe la misura, il percorso del fascio di luce tra gli specchi deve trovarsi alla pressione estremamente bassa di 10^{-12} atmosfere. Ciò in ultra alto vuoto.



LIGO/VIRGO



Sensibilità



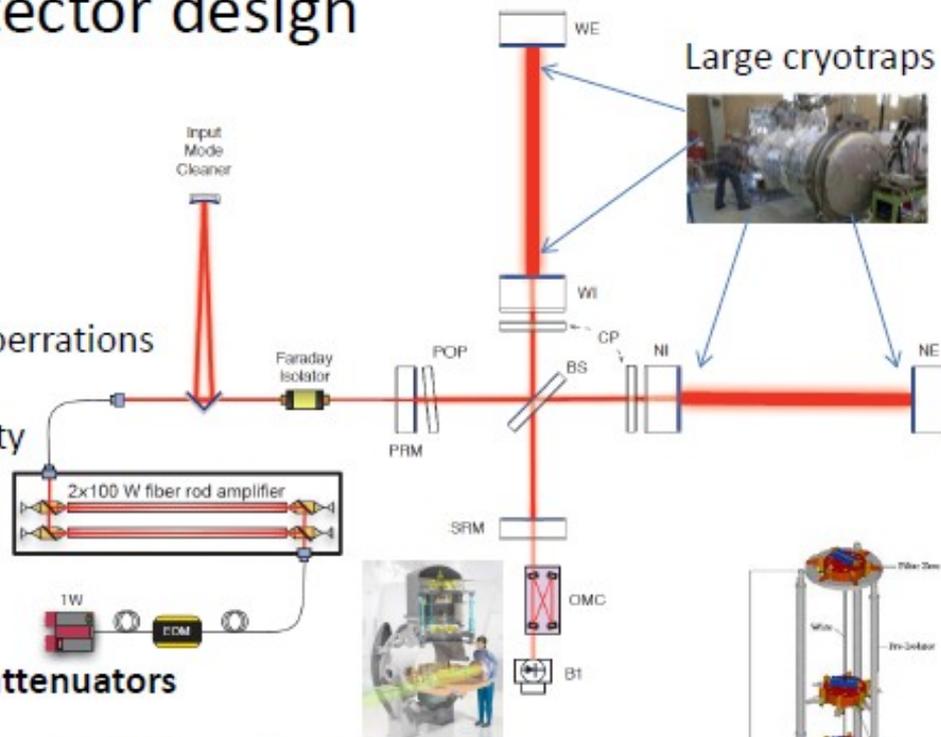
ONDE GRAVITAZIONALI



Detector design

MAIN CHANGES wrt Virgo+

- larger beam
- heavier mirrors (x2): 42 Kg
- higher quality optics
- larger finesse (x3): $F \approx 450$
- Improved thermal control of aberrations
- photodiodes under vacuum
- DC detection → new OMC cavity
- Upgraded vacuum in the arms
- *200W fiber laser* } installation postponed
- *signal recycling* } postponed

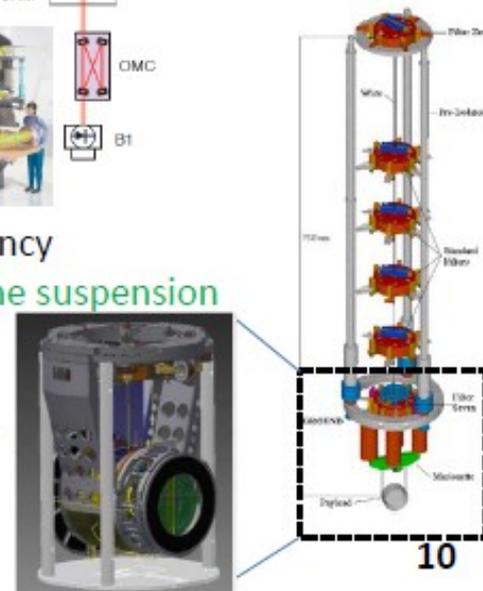


Vibration isolation by Virgo super-attenuators

- performance demonstrated
- large experience gained with commissioning at low frequency
- Upgrade needed for heavier payloads / better control of the suspension

Monolithic suspensions:

- Test masses suspended with fused silica fibers as in Virgo+
- Improvement of silica-steel interface at the upper stage
- New payload design adapted to new mirrors and baffles

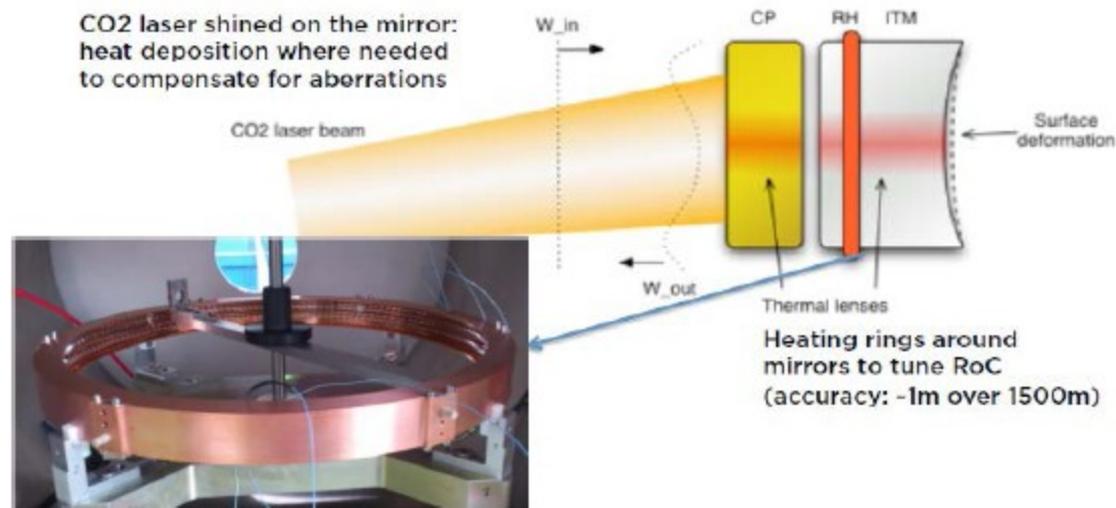


ONDE GRAVITAZIONALI



Thermal Compensation

- Optical aberrations measured with two complementary sensors : phase cameras and Hartmann wavefront sensors
- Mirror radius of curvature adjusted with heating ring
- Thermal lensing and other cylindrically symmetric defect compensated with CO2 laser shined on an auxiliary optics: the compensation plate
- If needed: a scanning laser at lower power will compensate for defects with arbitrary geometry (first tested by R Lawrence) → promising results in lab



ONDE GRAVITAZIONALI

□ 1st generation interferometric detectors

- Initial LIGO, Virgo, GEO600



Virgo commissioning started in 2003

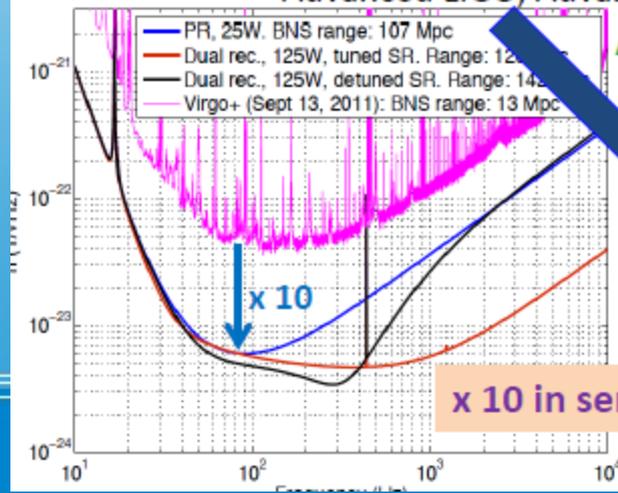
1st science run in 2007

- Enhanced LIGO, Virgo+ (2008 - 2011)



□ 2nd generation detectors

- Advanced LIGO, Advanced Virgo, GEO-HF, KAGRA, LIGO-India



Advanced Virgo planning:

Construction: 2011-2015

Commissioning of full interferometer starts in 2015

First observation run in 2016 with intermediate config.

2016-2021: commissioning and observations runs

→ progressing towards nominal sensitivity



Unlikely detection

- Science data taking
- First rate upper limits
- Set up network observation
- Lay ground for multi-messenger astronomy

Validation of technologies for ground-based interferometers

Likely detection

- Beginning of routine observations
- GW astronomy

Tecnologia richiesta: ottica

Polishing completed, coating of large mirrors nearly

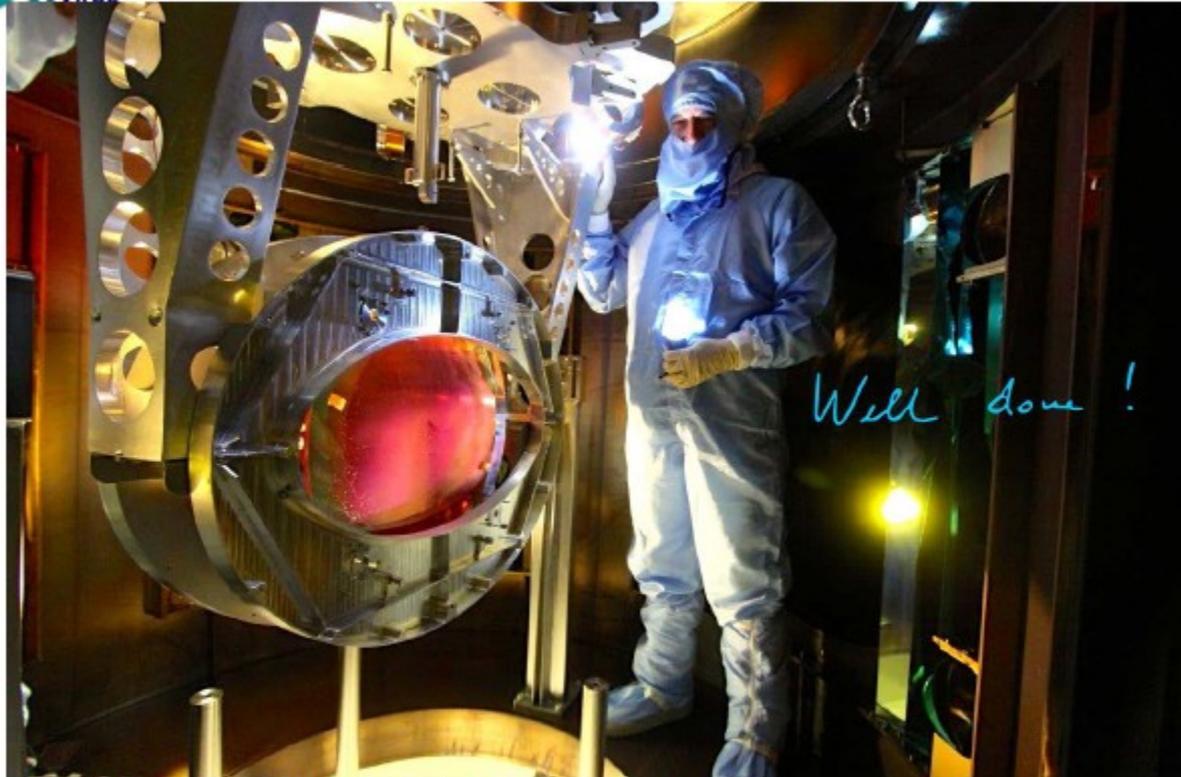


	Advanced VIRGO Requirements	LMA Measurements
Flatness R.M.S. Surface 1 Incidence 0°	< 0.5 nm RMS on Ø150mm (Curvature, Astigmatism removed)	0.31 nm RMS Ø150 mm
Radius of Curvature (m) Surface 1	1425 ± 10 m Ø 150 mm	1424.56 m Ø150 mm
Astigmatism amplitude (Zernike term) ³	< 5nm Ø 150 mm	0.52 nm Ø150 mm
Transmitted wavefront Incidence 0° (before coating)	x	0.77 nm RMS Ø150 mm (Curvature removed)
Average Scattering (45° incidence) Surface 1	< 10 ppm Ø 150 mm	3 ppm Ø 150 mm
Absorption HR Surface 1	< 0.5 ppm	0.22 ± 0.06 ppm Ø150 mm
Transmission at 1064 nm 1° incidence	1.4 ± 0.1%	1.375 % ± 0.007% Ø150 mm
Transmission at 532 nm 0° incidence	0.5% < T < 2%	1.01% (witness sample, spectrophotometric measurement)
Reflectivity AR Surface 2 at 1064 nm 3° incidence	< 100 ppm	58 ± 9 ppm Ø 150mm
Reflectivity AR Surface 2 at 800 nm 0° incidence	< 1%	# 0.1% (witness sample, spectrophotometric measurement)
Reflectivity AR Surface 2 at 532 nm 0° incidence	< 2%	# 0.2% (witness sample, spectrophotometric measurement)

Tecnologia richiesta: ottica



Payload assembly: beam splitter



Large beam splitter integrated in December 2014

New payload concept thoroughly tested

Superattenuator/payload precommissioning completed

Tower in vacuum

26/03/2015 50th Rencontres de Moriond - Gravitation - Status of the Advanced Virgo gravitational wave detector

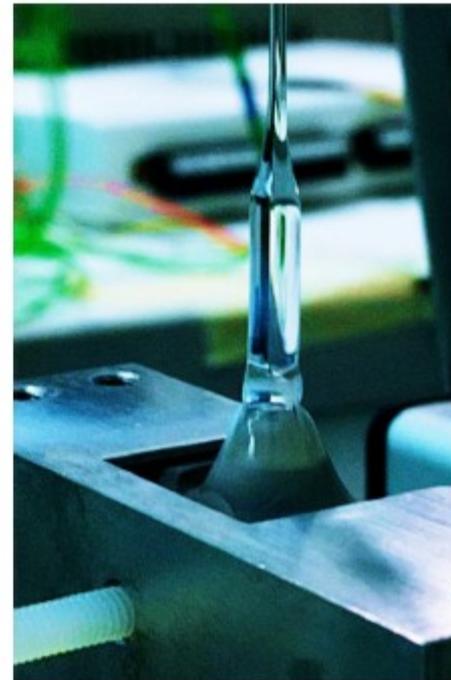
Tecnologia richiesta: meccanica



Payload assembly: test mass



- WI payload ready for the integration of test mass & compensation plate with final suspension
- Silica fibers produced



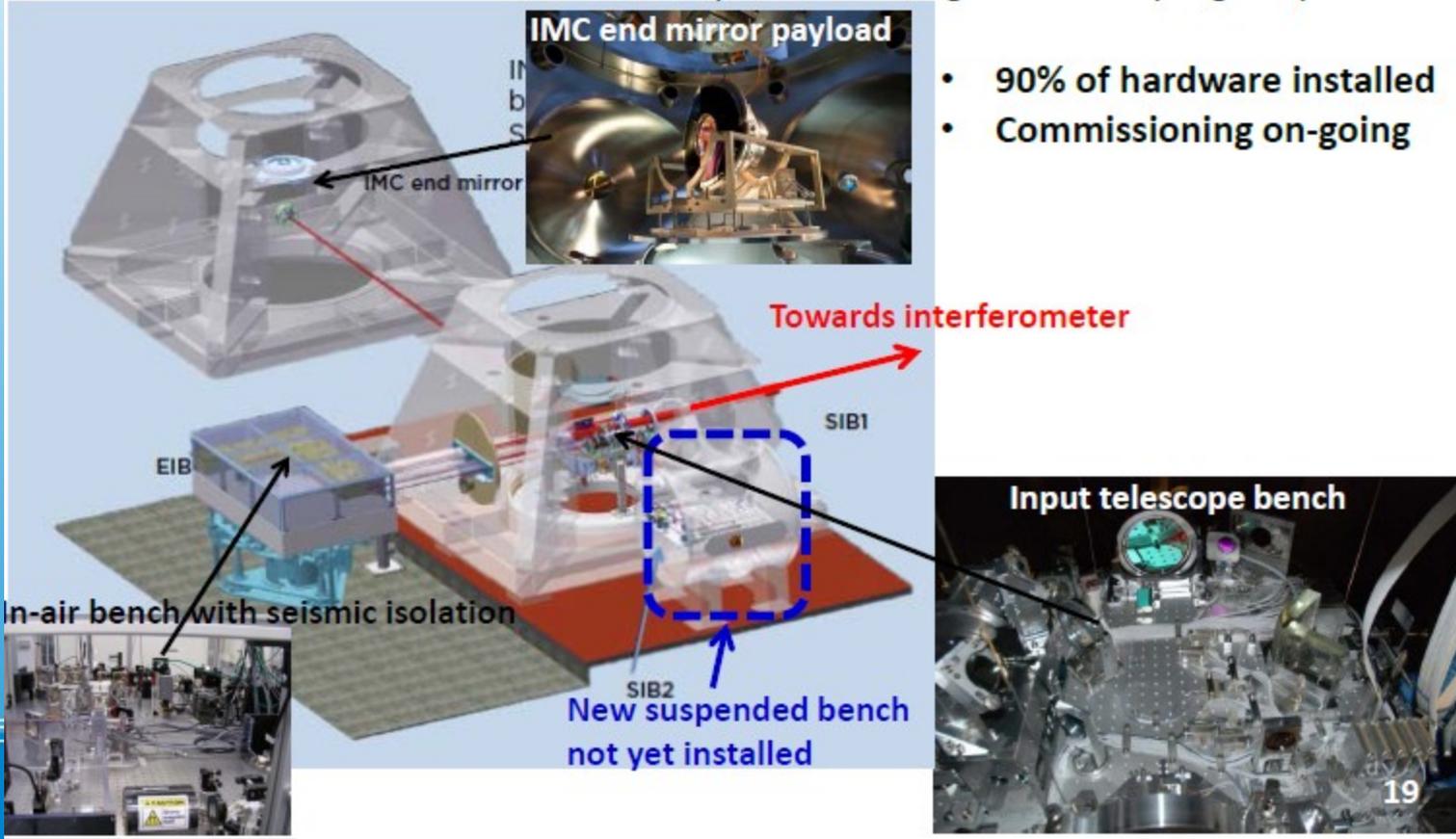
Tecnologia richiesta: laser



Injection system installation

Upgrades of the input optics:

- providing up to 200 W of laser power
- better beam positioning & power stabilization
- telescope suitable for larger beam in recycling cavity

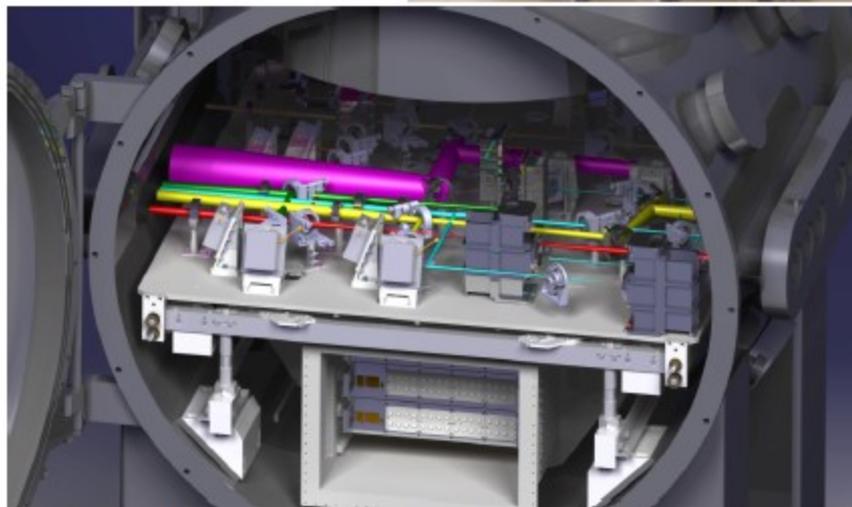


Tecnologia richiesta: vuoto



New vacuum chambers & suspended benches

- 3 vacuum chambers (out of 5) with suspension system installed → will host photodiodes benches
- Suspensions being pre-commissioned with dummy mass
- Assembly of optical benches started



Tecnologia richiesta: vuoto

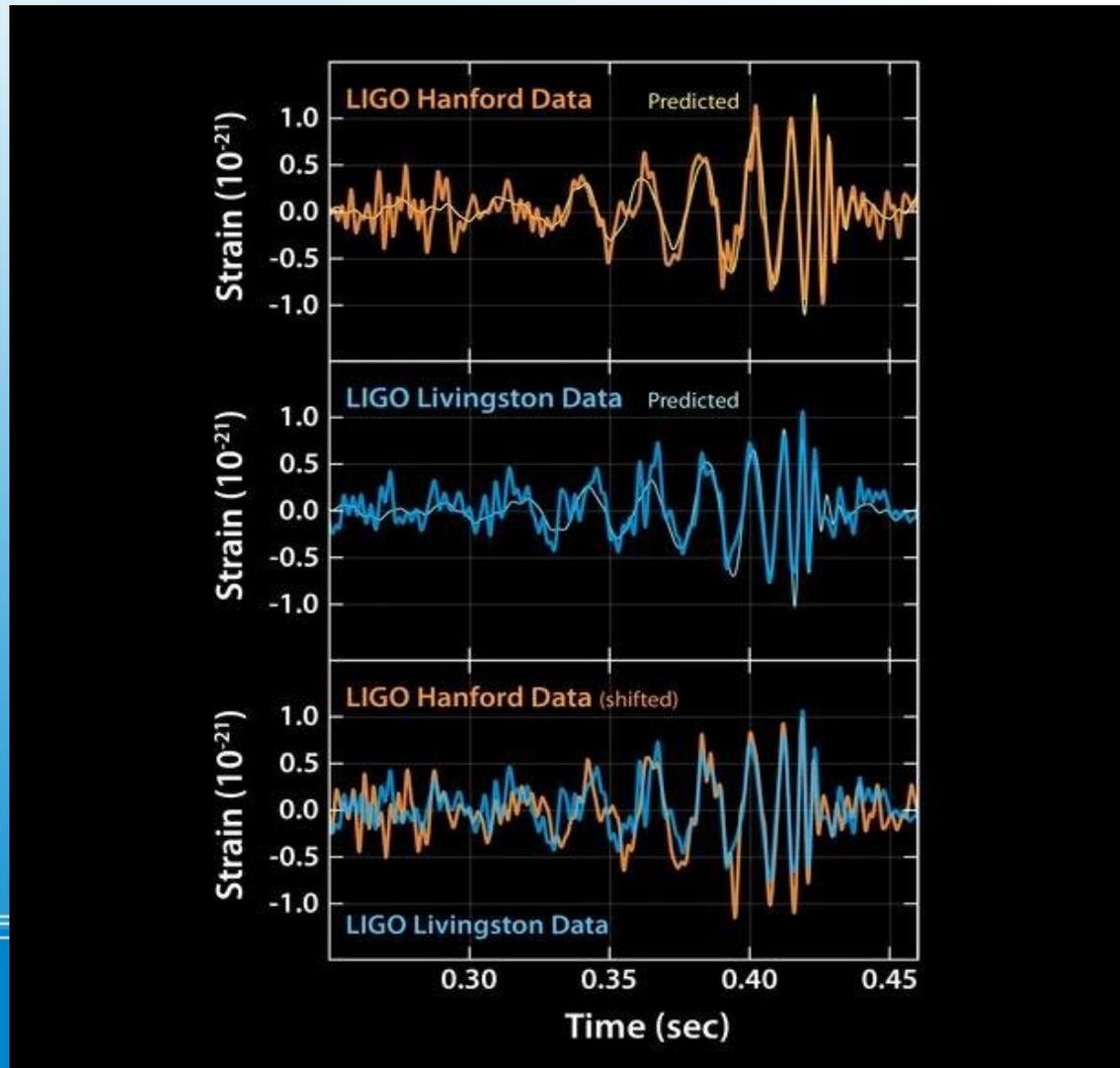


Vacuum links in central interferometer



INSTALLATION OF LARGER VACUUM
LINKS AND BAFFLES COMPLETED

Il segnale rivelato da LIGO



BIBLIOGRAFIA

C.V. Durell, La relatività con le quattro operazioni, Boringhieri, 1926

E. Fabri, Insegnare relatività nel XXI secolo,

R. Penrose, La strada che porta alla realtà, Rizzoli, 2004

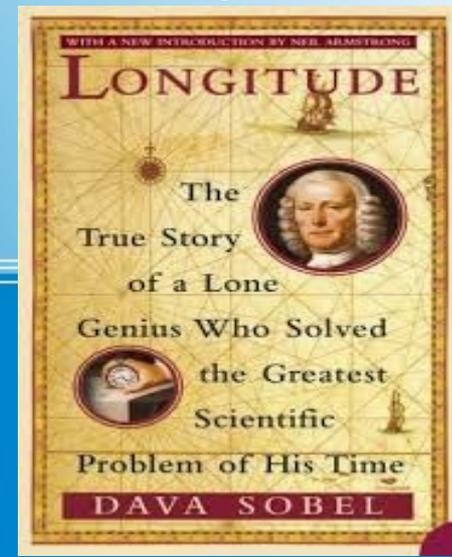
R.&H. Sexl, Nane bianche buchi neri, Boringhieri, 1975



MISURE DI TEMPO

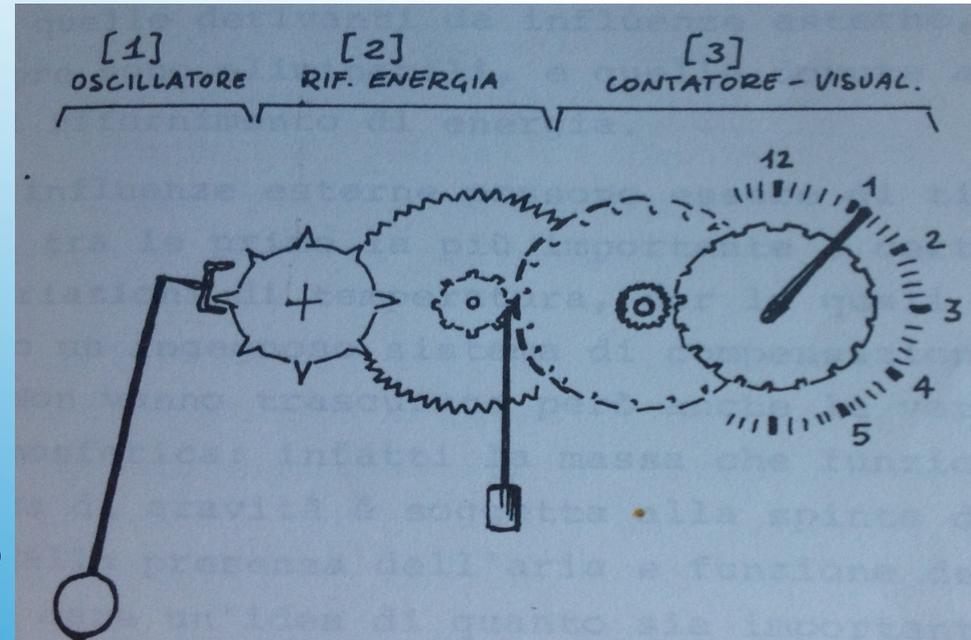
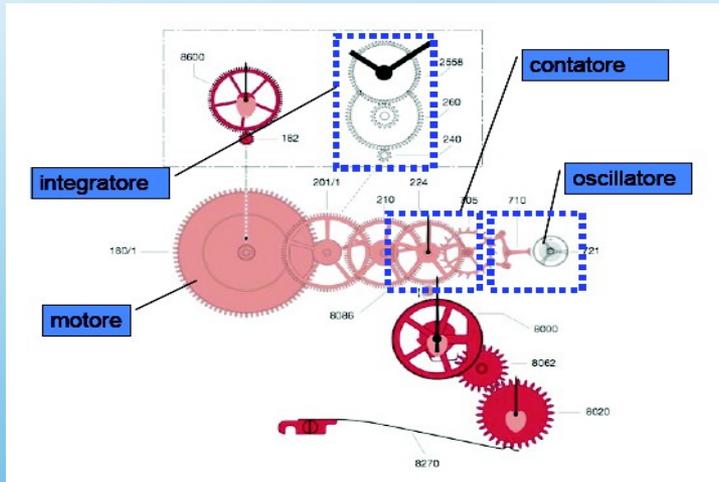
Orologi meccanici

Le meridiane furono sostituite dai progressi tecnologici degli orologi, incentivati dalla necessità di calcolare la longitudine durante la navigazione, operazione in cui serve conoscere sia l'ora locale che quella al meridiano di riferimento (longitudine zero). Un errore di 4 s negli orologi comporta un'imprecisione di 1 miglio all'equatore. A inizi '700 l'Osservatorio di Greenwich, creato ad hoc nel 1675, bandisce un premio di 20mila sterline per limitare l'errore a 30 miglia in longitudine dopo 6 settimane di navigazione, circa 3 s al giorno.



MISURE DI TEMPO

Orologi meccanici



Limitazioni intrinseche del pendolo

1. Sistematiche: variazioni di temperatura, variazioni di pressione (nel vuoto si hanno accelerazioni fino a 10 s per giorno);

2. Statistiche: azioni elettrostatiche, magnetiche, variazioni di umidità (osservati 0.1 s in 8 ore), microsismi e cambiamenti nel supporto, variazioni locali di g

MISURE DI TEMPO

Orologi meccanici

Limitazioni date dall'eccitatore

1. la legge di isocronismo del pendolo è valida solo nell'approssimazione di piccole oscillazioni, per cui ogni variazione di ampiezza è una variazione di periodo. Il rifornimento di energia deve essere costante;

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{l}{g}} \left(1 + \frac{1}{4} \sin^2 \frac{\phi_0}{2} + \frac{9}{64} \sin^4 \frac{\phi_0}{2} + o(\sin^4 \frac{\phi_0}{2}) \right) = T_0(l, g) \mathcal{F}(\phi_0)$$

2. lo scappamento assoggetta il pendolo a spinte periodiche, perturbandone il moto. Se l'azione dello scappamento è irregolare per attriti, difetti di lavorazione, ecc., il moto diventa irregolare.

MISURE DI TEMPO

Orologi meccanici

Il pendolo migliore è perciò quello che ha le interazioni più piccole possibile con l'esterno e, quindi, il minimo scambio di energia con l'eccitatore. Il parametro che misura questo scambio è il fattore di merito

$$\theta(t) = \theta_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) \exp\left(\frac{-\gamma t}{2}\right)$$

$$E(t) = E_0 \exp(-\gamma t) \rightarrow \frac{dE}{dt} = -\gamma E$$

$$E_{\text{assorbita}}(T) = \gamma E T = \frac{2\pi\gamma E}{\omega_0} = \frac{2\pi E}{Q}$$

$$Q = \frac{\omega_0}{\gamma} = \omega_0 \tau = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_{\text{ris}}}$$

Nei pendoli di precisione si può arrivare a $Q = 5000$, con stabilità in frequenza di circa 10^{-8} (alcuni millisecondi il giorno).

MISURE DI TEMPO

Stabilità e incertezza

Sono in effetti due le caratteristiche che descrivono le proprietà di ogni orologio:

- **Stabilità:** è la misura della precisione con cui possiamo dichiarare il valore di una quantità. Viene di solito espressa in termini del tempo di media usato su più misure ripetute per abbassare l'influenza del "rumore".
- **Incertezza assoluta:** ci dice quanto siamo in grado di comprendere i processi fisici che possono spostare la frequenza del sistema dal valore "imperturbato naturale" (effetti sistematici).

MISURE DI TEMPO

A questo punto la situazione si è ribaltata, il Sole e le meridiane non servono più, e si fa strada negli scienziati l'intuizione astratta di Newton di un tempo assoluto, uniforme, inalterabile, per via di tre fattori:

1. il tempo si usa e si confronta;
2. esistono strumenti attendibili per riconoscerne la regolarità;
3. la meccanica newtoniana viene applicata con successo allo studio dei fenomeni celesti

L'idea di un tempo comune si è fatta strada in tutto il mondo, la sua diffusione ha richiesto un adeguato sviluppo tecnologico.

MISURE DI TEMPO

OROLOGI ATOMICI

Tutti gli atomi sono uguali tra loro, il loro comportamento è perciò identico. Un sistema basato sulle proprietà di un particolare atomo è autodefinito (i parametri che ne regolano il funzionamento sono legati esclusivamente alla natura dell'atomo).

Si mettono in risonanza la transizione tra due livelli atomici o molecolari con le oscillazioni di un sistema noto, che viene obbligato a rimanere agganciato alla transizione: la frequenza della radiazione emessa o assorbita nella transizione, eventualmente demoltiplicata, viene utilizzata per incrementare i contatori che registrano il trascorrere del tempo.

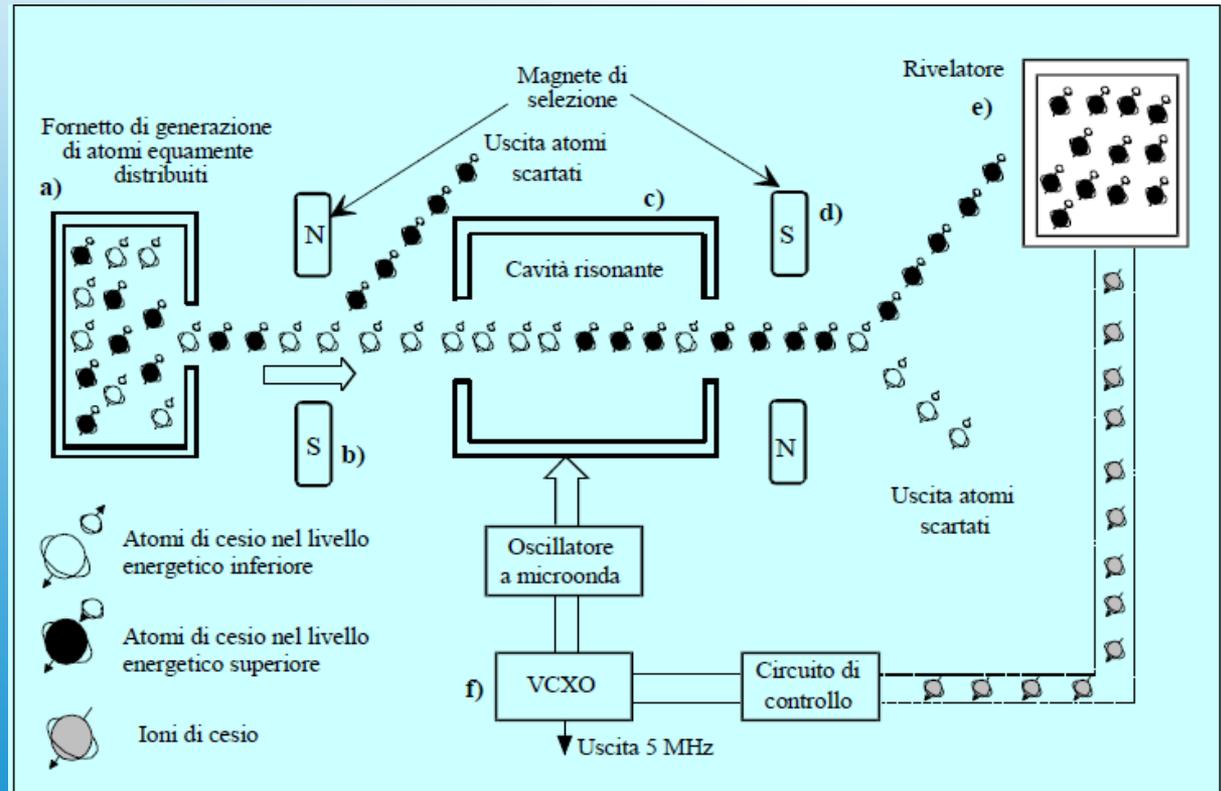
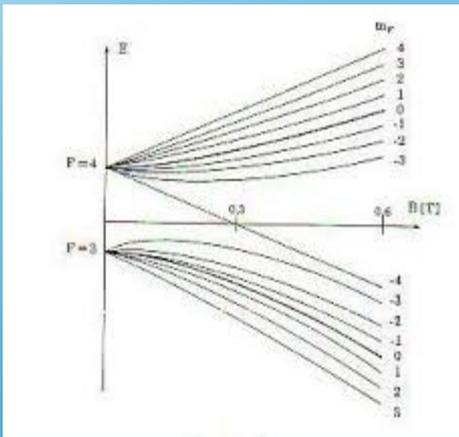
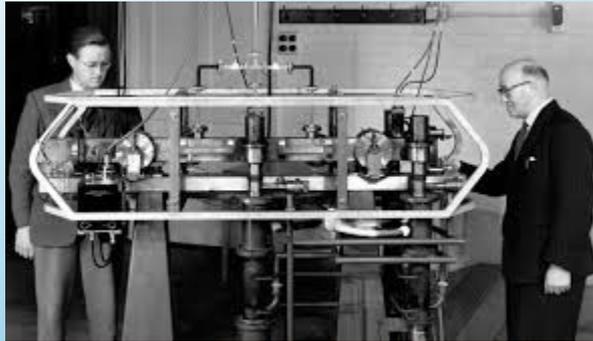
MISURE DI TEMPO

OROLOGI ATOMICI

Finora al risonatore atomico si connetteva una parte elettronica in grado di seguire direttamente le oscillazioni, e quindi con limite intorno a 10 GHz, corrispondente a una lunghezza d'onda di 3 cm e a una differenza di energia di 10^{-4} - 10^{-5} eV (intervallo delle microonde, che hanno avuto grande sviluppo nel periodo bellico e postbellico). I livelli energetici a distanza opportuna sono quelli della struttura iperfine, dovuta all'interazione tra spin elettronico e spin nucleare.

MISURE DI TEMPO

OROLOGIO AL CESIO

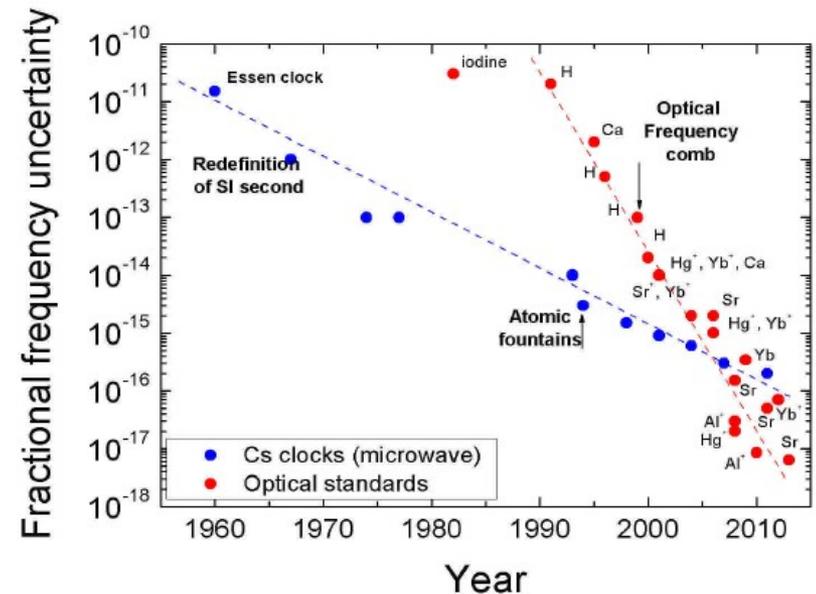
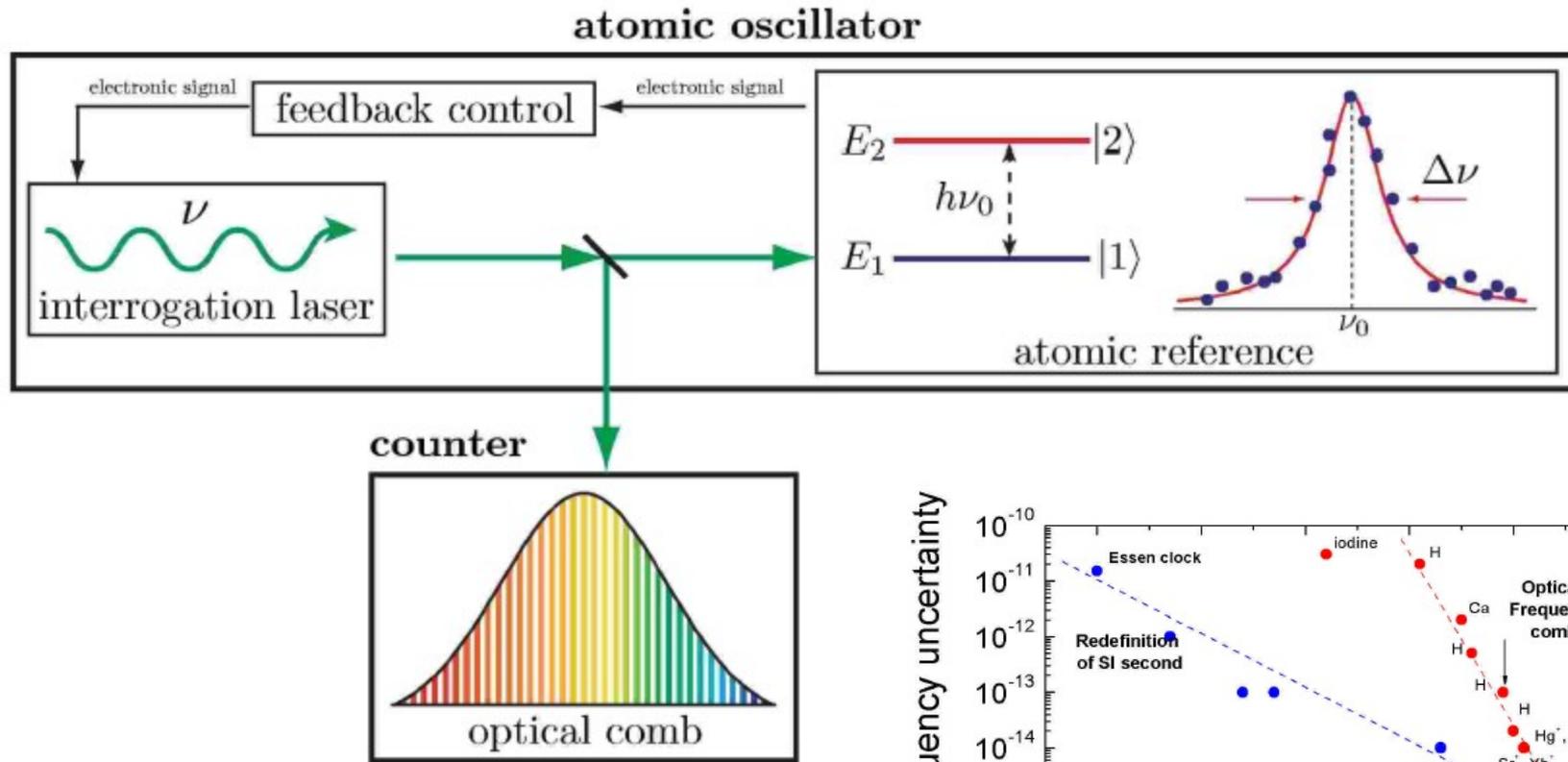


Il fattore di merito è circa $Q = 3 \cdot 10^7$. La stabilità che ne consegue è di 10^{-14} su diversi mesi.

$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{\Delta\nu}{\nu_0 \sqrt{N}} \sqrt{\frac{T_c}{\tau}}$$

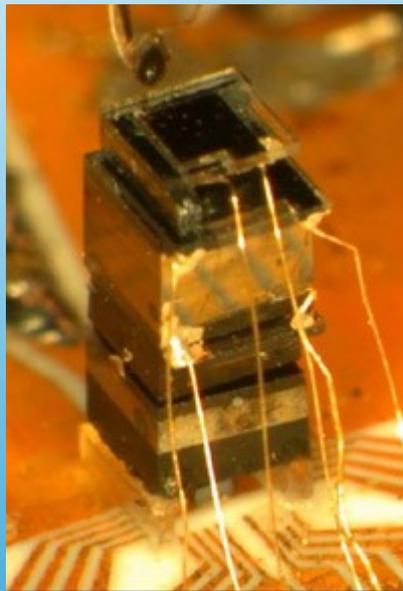
MISURE DI TEMPO

OROLOGI ATOMICI OTTICI



MISURE DI TEMPO

OROLOGI ATOMICI OTTICI



PHILOSOPHICAL
TRANSACTIONS
— OF —
THE ROYAL SOCIETY



Phil. Trans. R. Soc. A (2011) **369**, 4109–4130
doi:10.1098/rsta.2011.0237

When should we change the definition of the second?

BY PATRICK GILL*

National Physical Laboratory, Teddington, Middlesex, TW11 0LW, UK

The microwave caesium (Cs) atomic clock has formed an enduring basis for the second in the International System of Units (SI) over the last few decades. The advent of laser cooling has underpinned the development of cold Cs fountain clocks, which now achieve frequency uncertainties of approximately 5×10^{-16} . Since 2000, optical atomic clock research has quickened considerably, and now challenges Cs fountain clock performance. This has been suitably shown by recent results for the aluminium Al^+ quantum logic clock, where a fractional frequency inaccuracy below 10^{-17} has been reported. A number of optical clock systems now achieve or exceed the performance of the Cs fountain primary standards used to realize the SI second, raising the issues of whether, how and when to redefine it. Optical clocks comprise frequency-stabilized lasers probing very weak absorptions either in a single cold ion confined in an electromagnetic trap or in an ensemble of cold atoms trapped within an optical lattice. In both cases, different species are under consideration as possible redefinition candidates. In this paper, I consider options for redefinition, contrast the performance of various trapped ion and optical lattice systems, and point to potential limiting environmental factors, such as magnetic, electric and light fields, collisions and gravity, together with the challenge of making remote comparisons of optical frequencies between standards laboratories worldwide.