



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TORINO

18 maggio 2016

Le lezioni di Einstein

Vincenzo Barone



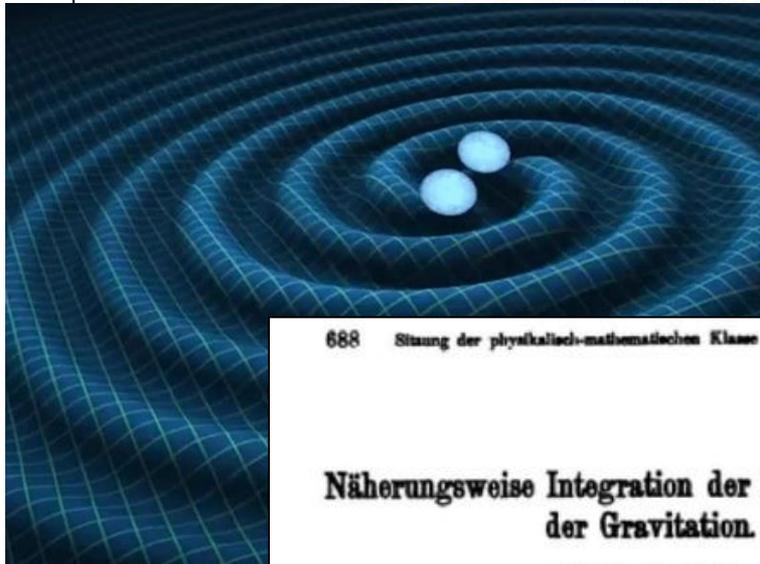


Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

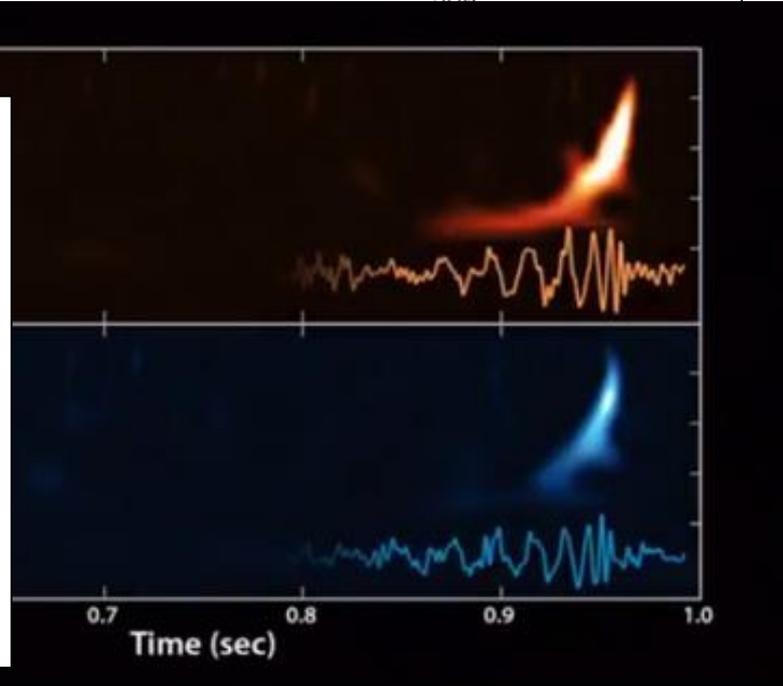
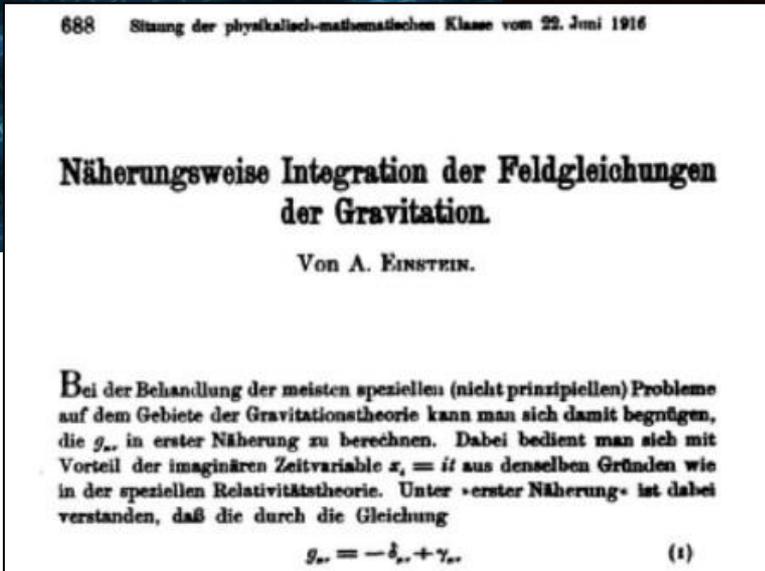
B. P. Abbott *et al.**

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

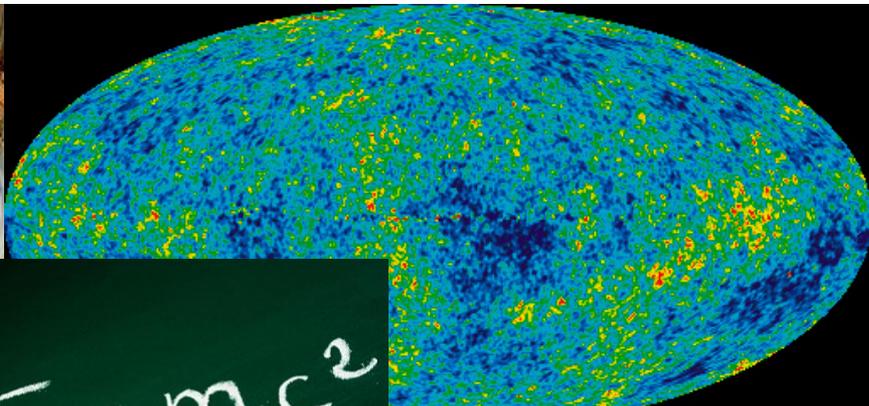
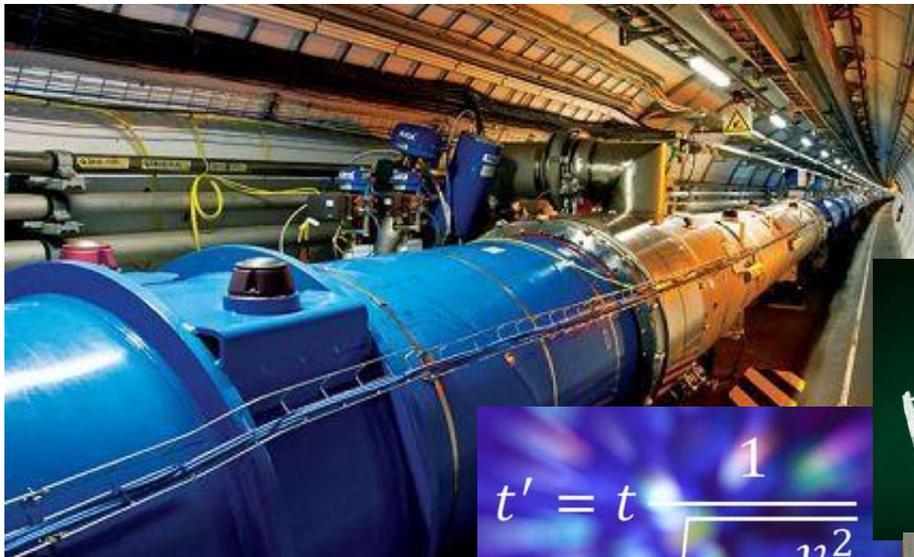
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)



...C the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave
 transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in
 gravitational-wave strain of 1.0×10^{-21} . It matches the waveform
 spiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the
 as observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a
 n 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater



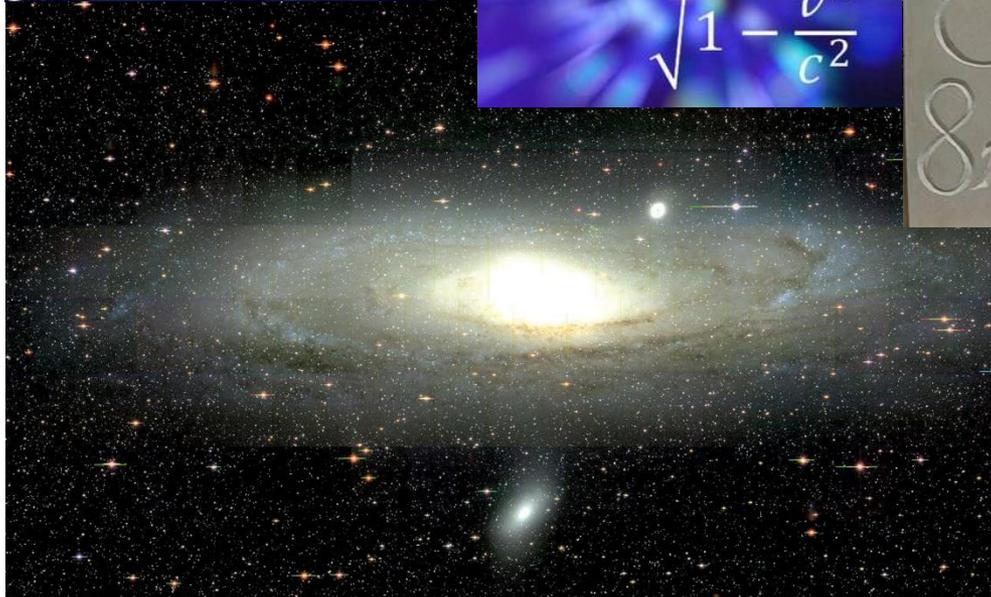
- [1] A. Einstein, Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss. **1**, 688 (1916).
- [2] A. Einstein, Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss. **1**, 154 (1918).
- [3] P. R. Saulson, Gen. Relativ. Gravit. **43**, 3289 (2011).
- [4] K. Schwarzschild, Sitzungsber. K. Preuss. Akad. Wiss. **1**, 189 (1916).
- [5] D. Finkelstein, Phys. Rev. **110**, 965 (1958).
- [6] M. D. Kruskal, Phys. Rev. **119**, 1743 (1960).
- [7] R. P. Kerr, Phys. Rev. Lett. **11**, 237 (1963).
- [8] C. V. Vishveshwara, Nature (London) **227**, 936 (1970).
- [9] W. H. Press, Astrophys. J. **170**, L105 (1971).
- [10] S. Chandrasekhar and S. L. Detweiler, Proc. R. Soc. A **344**, 441 (1975).
- [11] L. Blanchet, T. Damour, B. R. Iyer, C. M. Will, and A. G. Wiseman, Phys. Rev. Lett. **74**, 3515 (1995).
- [12] L. Blanchet, Living Rev. Relativity **17**, 2 (2014).
- [13] A. Buonanno and T. Damour, Phys. Rev. D **59**, 084006 (1999).
- [14] F. Pretorius, Phys. Rev. Lett. **95**, 121101 (2005).

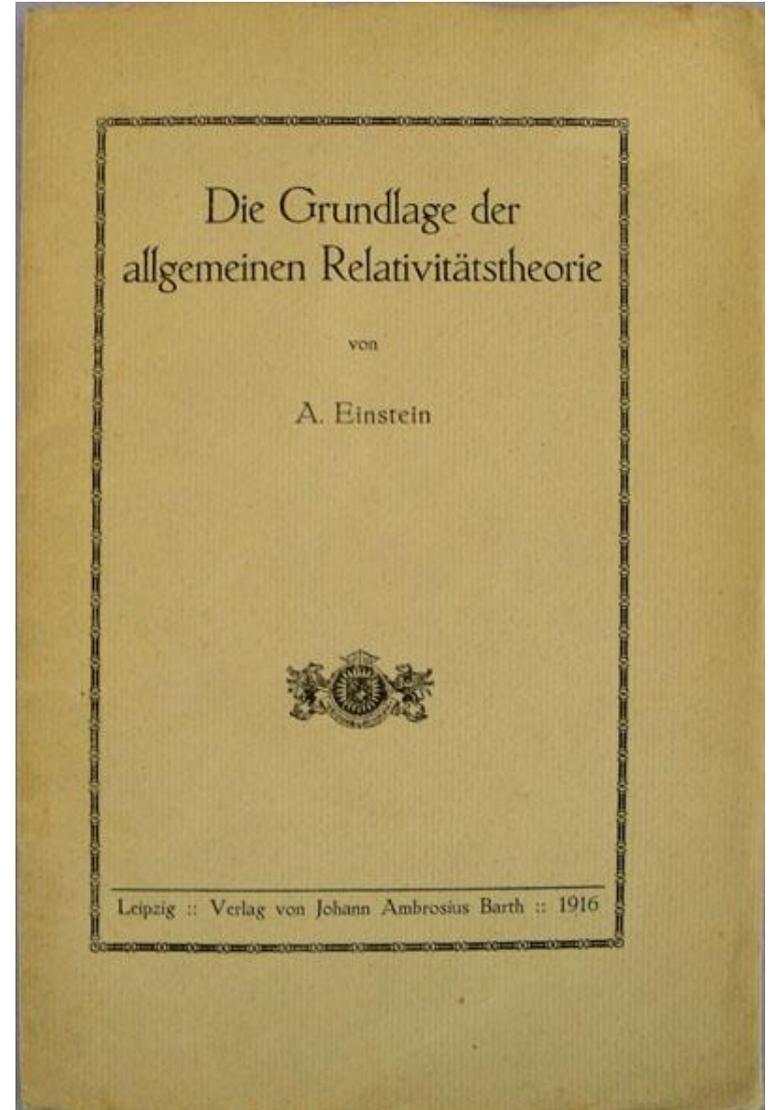
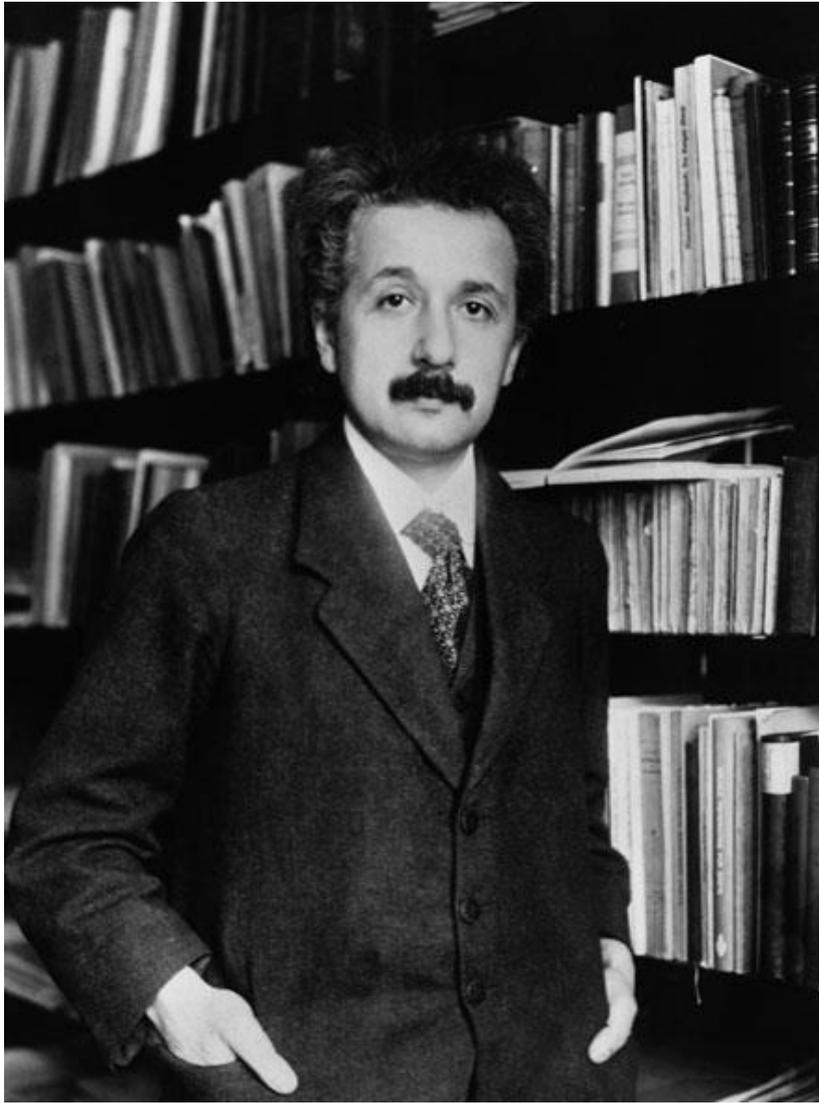


$$t' = t \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$E = mc^2$$

$$G_{\mu\nu} = \delta\pi G_{\mu\nu}$$





L'equazione di Einstein della relatività generale



«Lo spazio dice alla materia come muoversi;
la materia dice allo spazio come curvarsi» (J.A. Wheeler)

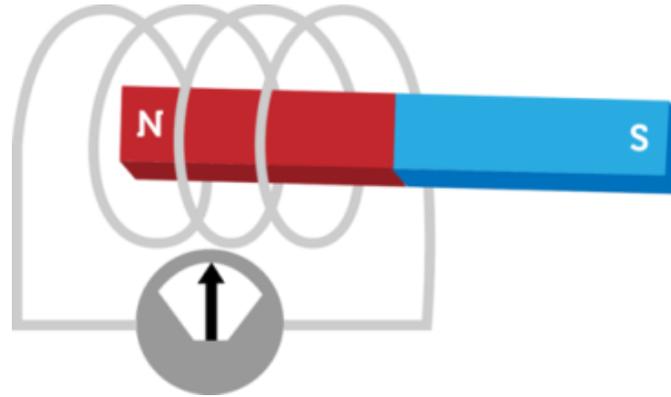


Le domande giuste

Le origini delle due relatività

Relatività speciale:

Sull'elettrodinamica dei corpi in movimento (1905)



«E' noto che l'elettrodinamica di Maxwell, così come essa è comunemente intesa, conduce, nelle sue applicazioni a corpi in movimento, ad asimmetrie che non sembrano conformi ai fenomeni»

Il problema non è, come per gli altri fisici, il «vento d'etere»

Principio di relatività speciale:

Le leggi fisiche sono le stesse in tutti i sistemi di riferimento inerziali

Postulato della costanza della velocità della luce:

La velocità della luce nel vuoto è la stessa in tutti i sistemi di riferimento inerziali



Relatività del tempo e della simultaneità, contrazione delle lunghezze, dilatazione degli intervalli temporali, tempo come quarta dimensione, conversione di massa in energia, ecc.

La strada verso la relatività generale (1905-1915)

«Una volta giustificata l'introduzione del principio speciale di relatività, ogni mente portata alla generalizzazione sentirà la tentazione di azzardare il passo verso il principio generale di relatività»

- 1) Estendere il principio di relatività ai **sistemi non inerziali**

(Il principio di inerzia non soddisfa la «clausola del significato»: non è possibile definire operativamente i sistemi inerziali)

- 2) Descrivere la **gravità**

La legge della gravitazione di Newton non è compatibile con la relatività ristretta

Einstein intuisce che i due problemi sono legati e devono essere risolti assieme

Relazione tra inerzia e gravità

«Principio di Mach»:

I sistemi di riferimento inerziali sono i sistemi non accelerati rispetto alle stelle fisse, cioè **rispetto a una media di tutta la materia dell'universo**.

L'**origine delle forze inerziali** risiede nell'**attrazione gravitazionale** esercitata dalle masse (stelle, galassie, ecc.) presenti nell'universo.

La **massa gravitazionale** e la **massa inerziale** di un corpo sono uguali. Tutti i corpi cadono con la stessa accelerazione (Galileo)
Perché le due masse sono uguali?

Il legame tra **inerzia** e **materia** (quindi tra **inerzia** e **gravitazione**) rimane misterioso nella fisica newtoniana

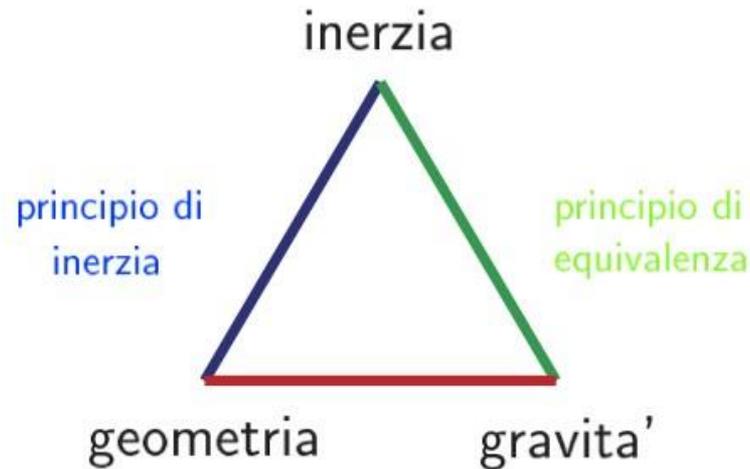
Relazione tra geometria e inerzia

Il **principio di inerzia** visto da Einstein

“Se si desidera dare un esatto significato al principio classico di inerzia si deve introdurre lo **spazio** come la **causa indipendente del comportamento inerziale** dei corpi.” (Einstein, 1954)

D'altra parte, **se lo spazio-tempo agisce sui corpi, questi devono agire su di esso** (lo spazio-tempo deve essere un ente dinamico).

La sintesi



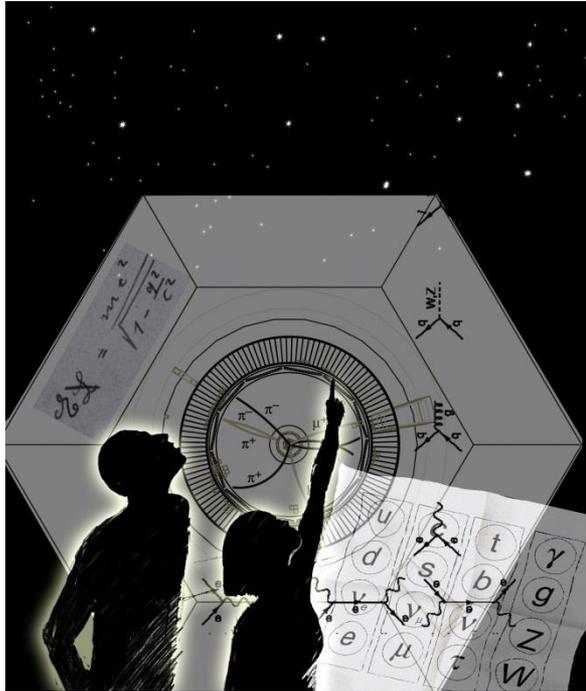
Il principio di inerzia stabilisce un legame tra spazio (geometria) e inerzia

Il principio di equivalenza stabilisce un legame tra inerzia e gravità

Einstein ipotizza un legame tra geometria e gravità

La gravità si manifesta come curvatura dello spazio-tempo

Il campo gravitazionale è lo spazio-tempo



Unità e semplicità logica

«Il fine della scienza è, da una parte, **la comprensione più completa possibile** della connessione fra le esperienze sensoriali nella loro totalità, dall'altra, il raggiungimento di questo fine mediante l'uso di un **numero minimo di concetti e di relazioni primarie** (mirando, per quanto è possibile, all'unità logica della rappresentazione del mondo)»

Fisica e realtà (1936)

Un nuovo livello di comprensione della Natura

Simmetrie

Principi generali
Superleggi



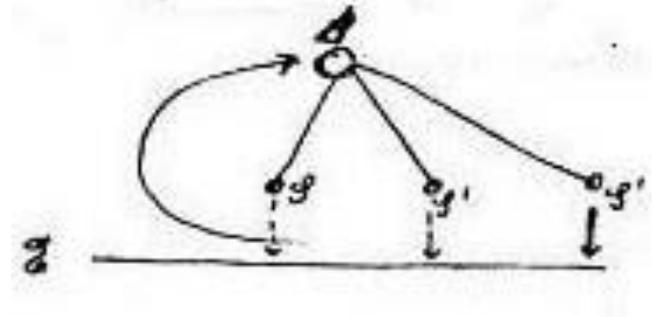
regolano
(spiegano)

Leggi



regolano
(spiegano)

Eventi



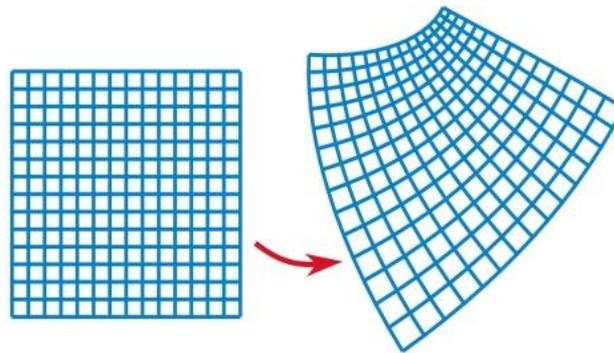
I **principi di simmetria** sono leggi che le leggi di natura devono rispettare
(E. Wigner)

Principio di Relatività Speciale:

Simmetria delle leggi fisiche rispetto a una trasformazione del sistema di riferimento inerziale (cioè a una trasformazione di Lorentz delle coordinate)

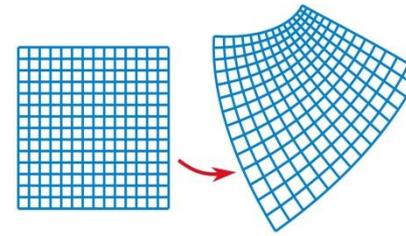
Principio di Relatività Generale:

Simmetria delle leggi fisiche rispetto a una trasformazione arbitraria del sistema di riferimento (cioè a una trasformazione arbitraria delle coordinate)

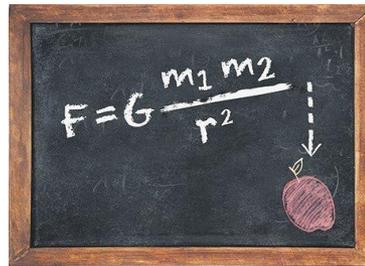


Gravità newtoniana vs. Relatività generale

Perché la forza di gravità varia proprio come l'inverso del quadrato della distanza?



Simmetria generale dello spazio-tempo

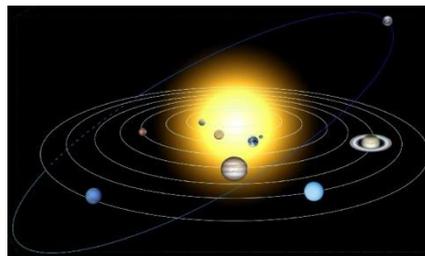


Legge di Newton

← caso particolare



Legge di Einstein (Relatività generale)



Moto degli astri

Le unificazioni di Einstein

Quelle realizzate:

Meccanica ed elettromagnetismo sotto il principio di relatività

Spazio e tempo nello spazio-tempo (Minkowski)

Energia e massa

Inerzia e gravità sotto il principio di equivalenza

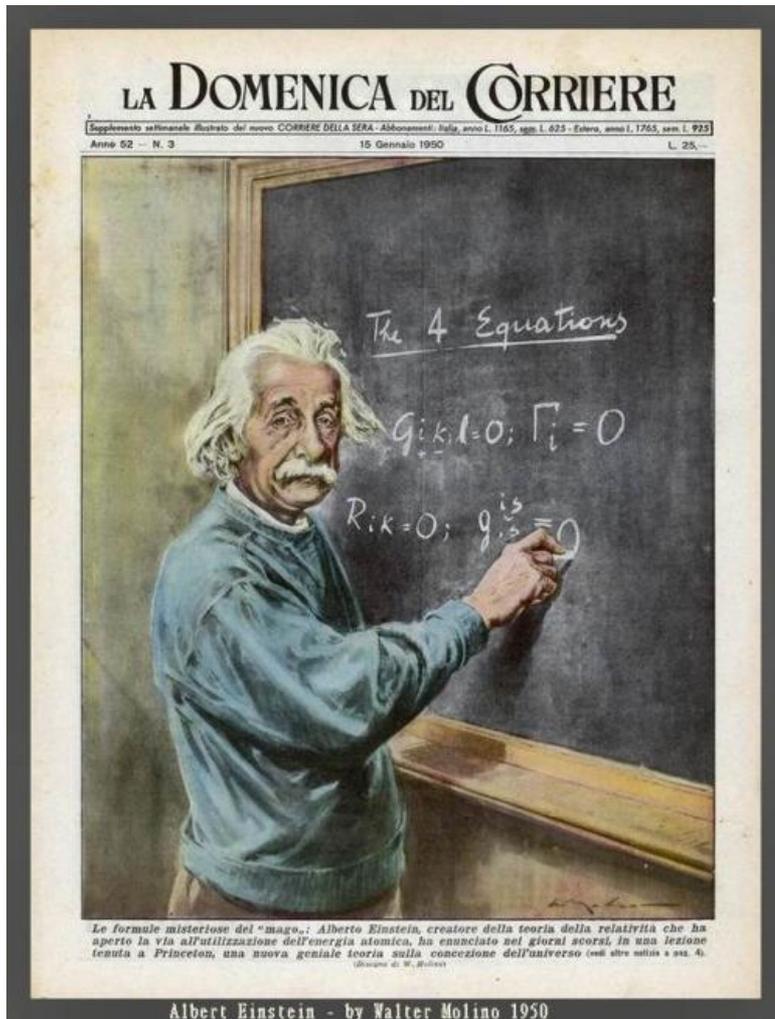
Geometria e fisica sotto il principio di relatività generale

Quelle tentate:

Gravità ed elettromagnetismo

Particelle e campi

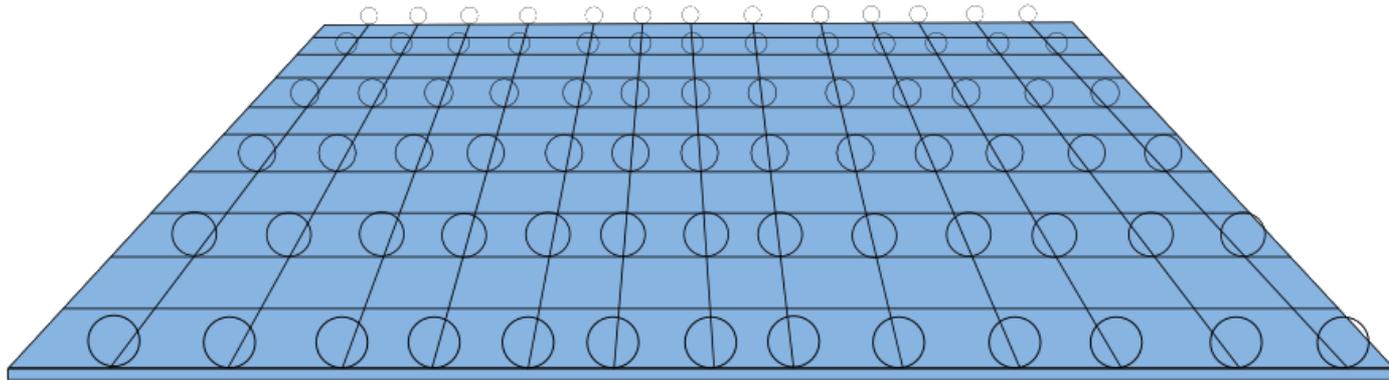
La teoria unificata del 1950



La teoria quantistica dei campi
(Feynman, Schwinger, ...)

Unificare gravità ed elettromagnetismo in 5D

(Kaluza – Klein)



L'idea delle dimensioni extra arrotolate è incorporata nella **teoria delle stringhe**

Descrivere e unificare le forze mediante una simmetria

Hermann Weyl



Simmetria di "gauge"



Forza elettromagnetica

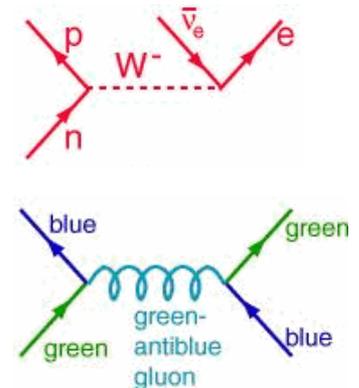
Chen Ning Yang



Simmetrie di "gauge"

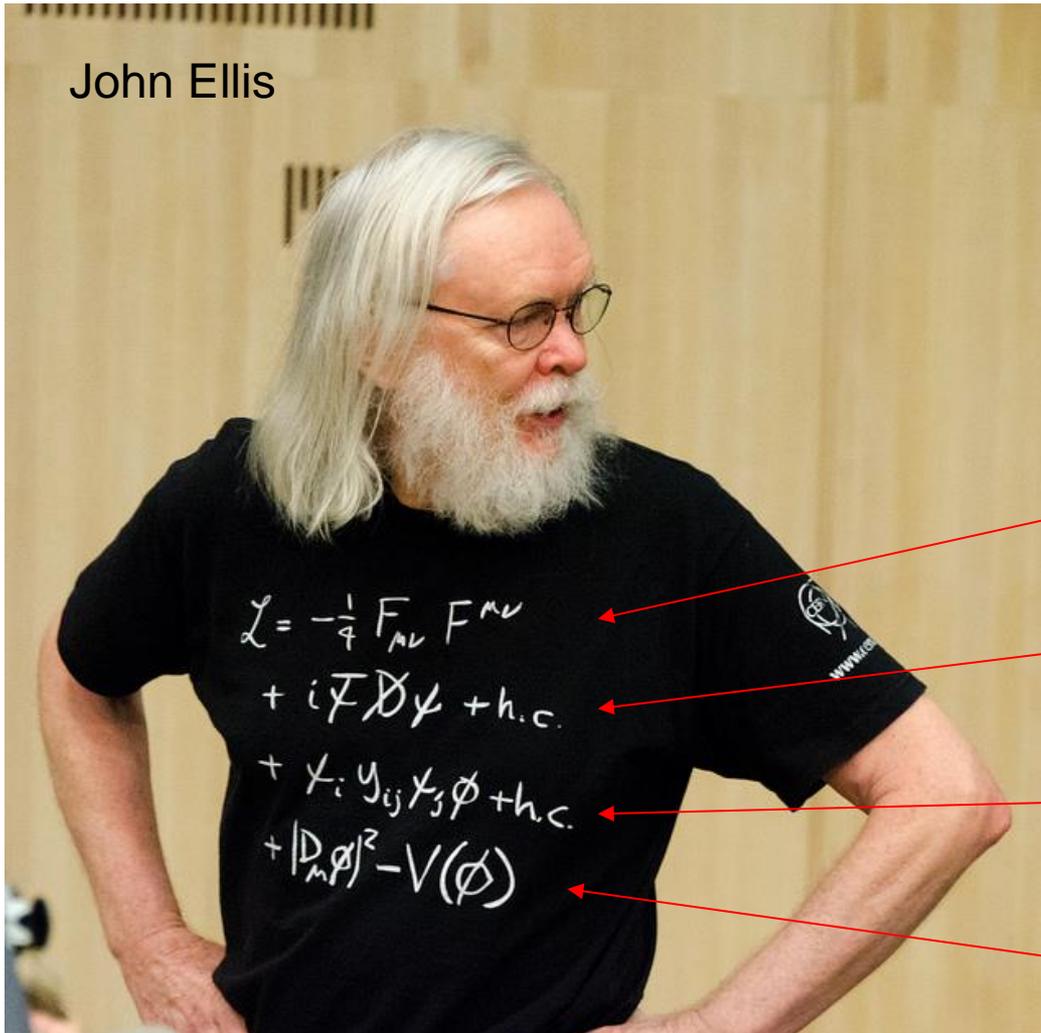


Forza forte, Forza elettrodebole



Il Modello Standard delle particelle e delle forze

John Ellis



Una teoria (parzialmente) unificata basata sulla simmetria relativistica e sulla simmetria di gauge

Particelle di forza (fotoni, W, Z, gluoni)

Particelle di materia (quark e leptoni)

Particelle di materia e Higgs

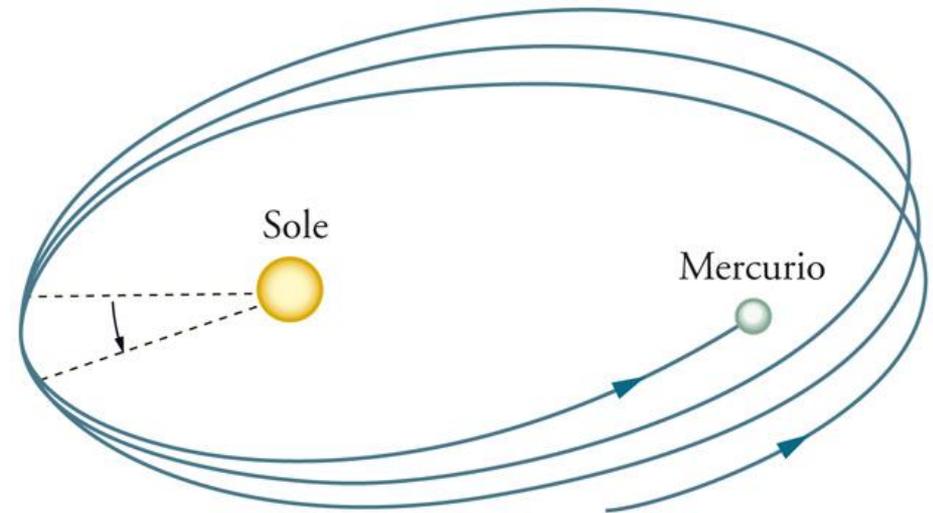
Bosone di Higgs



Teoria vs. esperimento

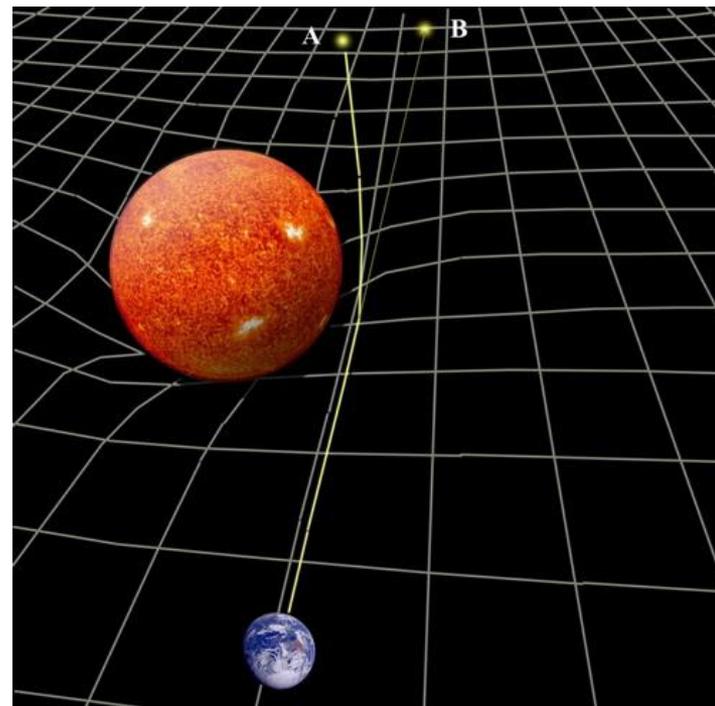
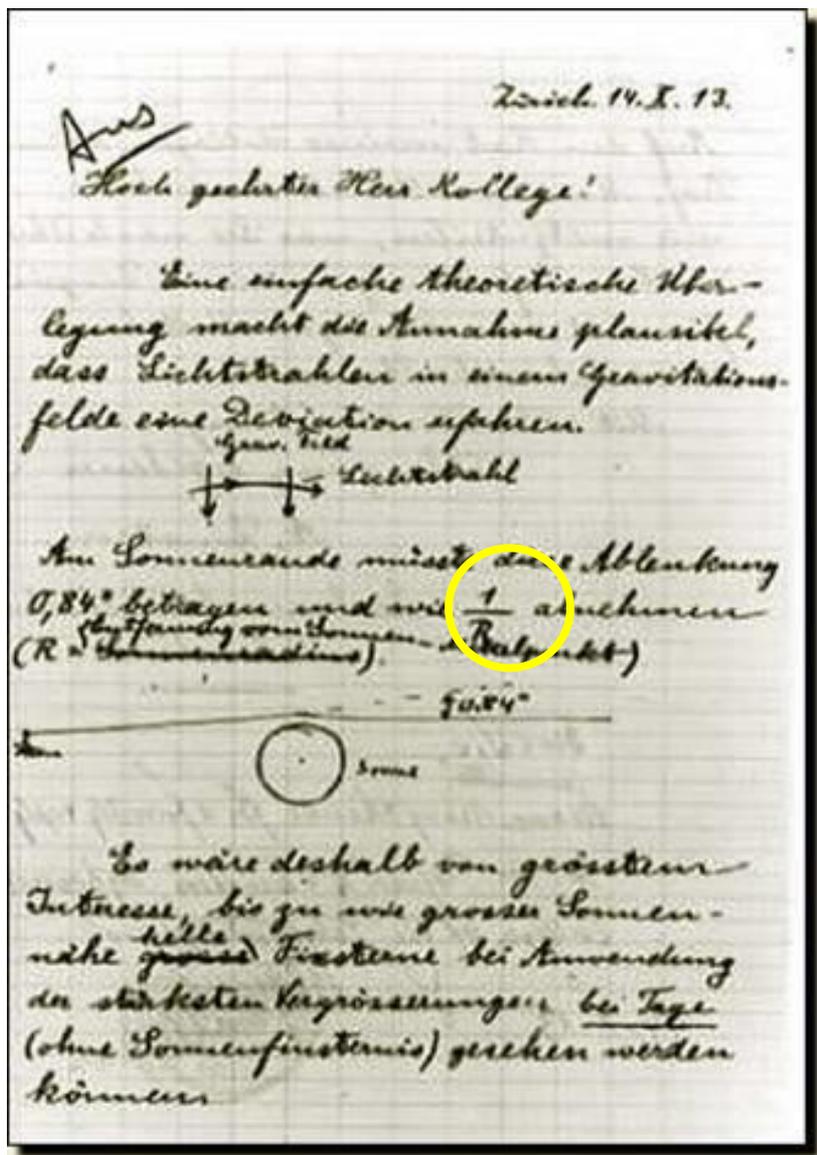
Precessione del perielio di Mercurio

Rotazione di 43 secondi d'arco a lungo inspiegata:
primo successo della relatività generale



«Ero fuori di me per la gioia e l'eccitazione»
(Einstein a Ehrenfest)

Deflessione gravitazionale della luce



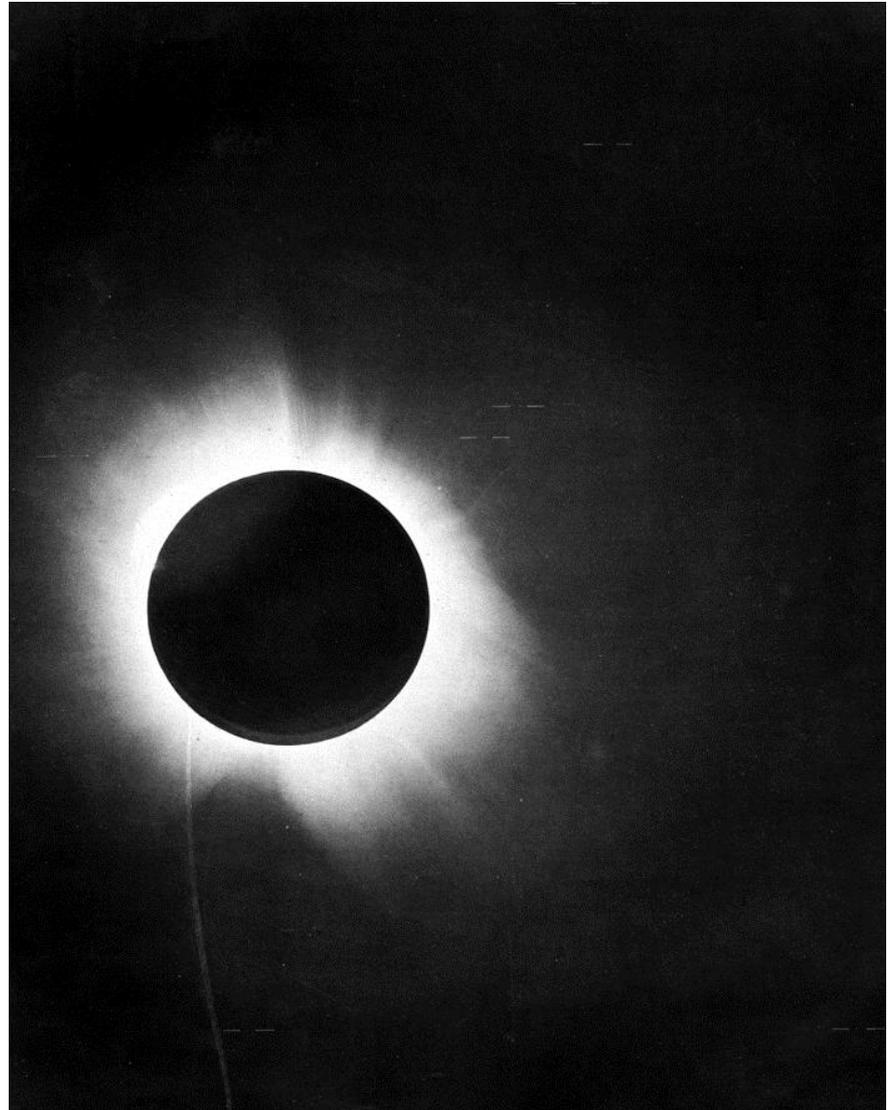
La luce proveniente dalle stelle si incurva a causa della gravità del Sole

L'effetto è minuscolo (1,7 secondi d'arco) e può essere misurato durante un'eclissi solare

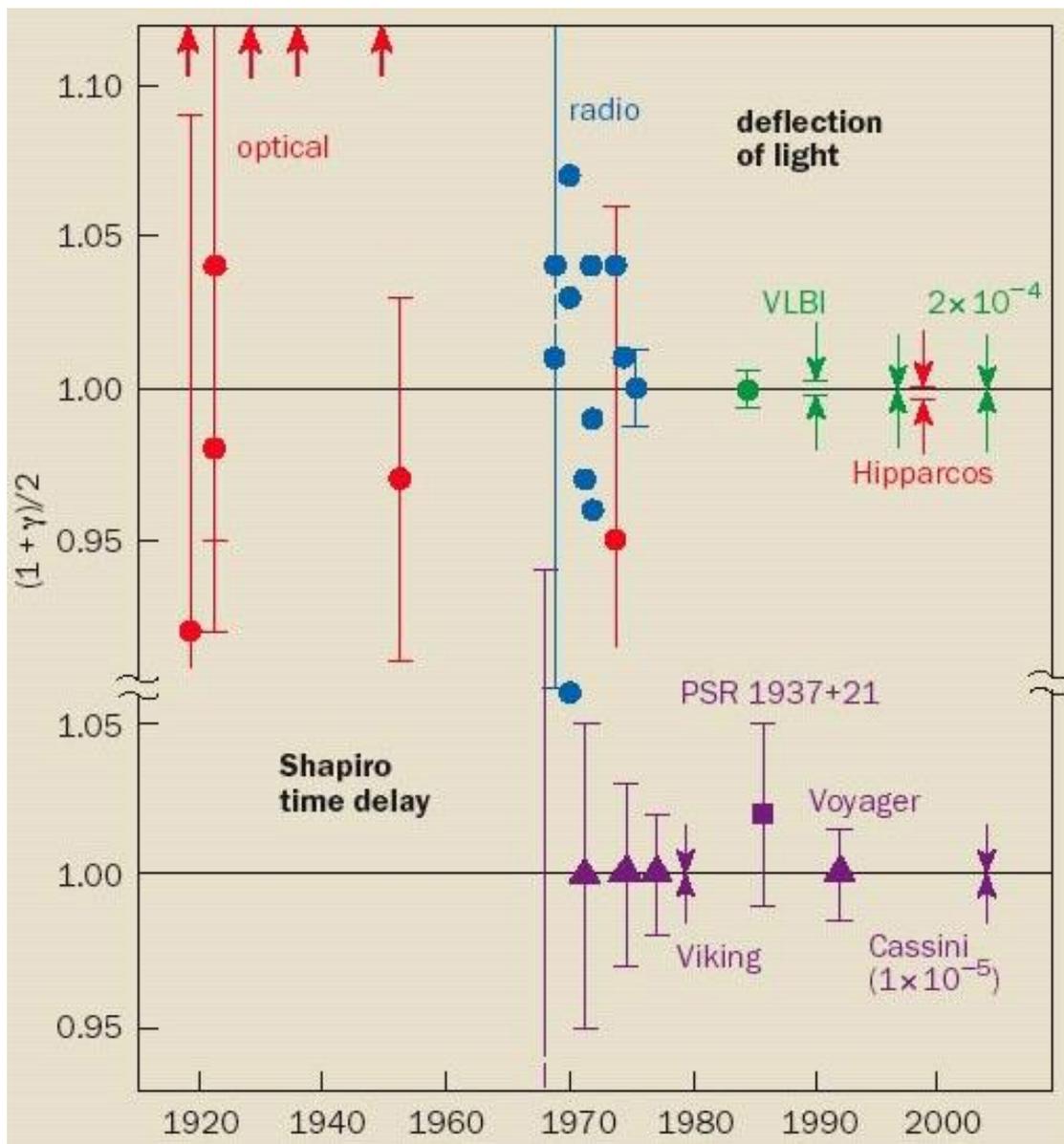
L'eclissi del 1919: Sobral e Isola di Principe



La spedizione di Eddington

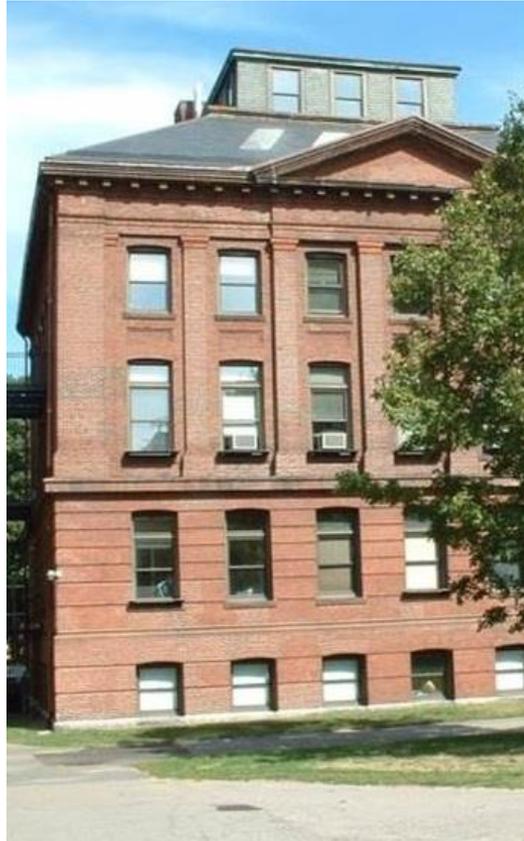
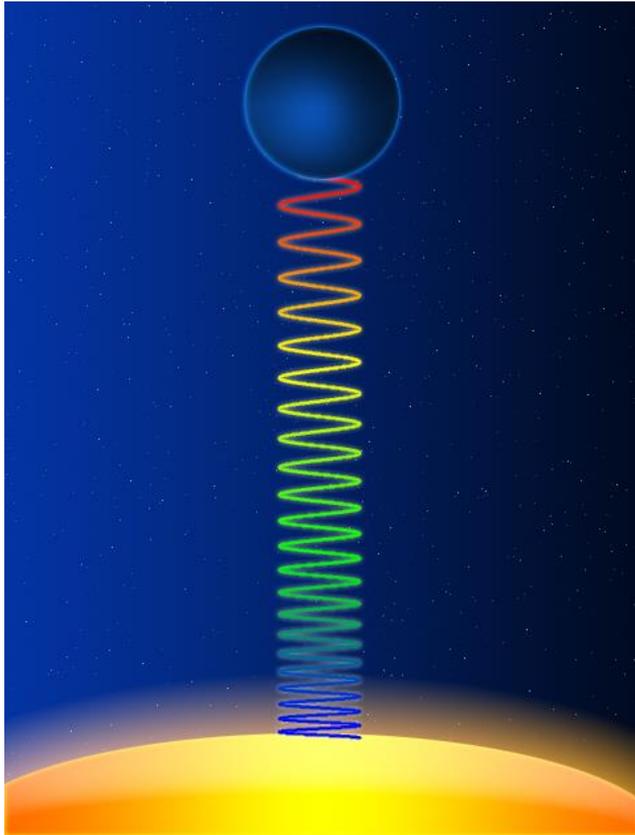


Deflessione gravitazionale della luce e delle onde radio



Spostamento gravitazionale verso il rosso

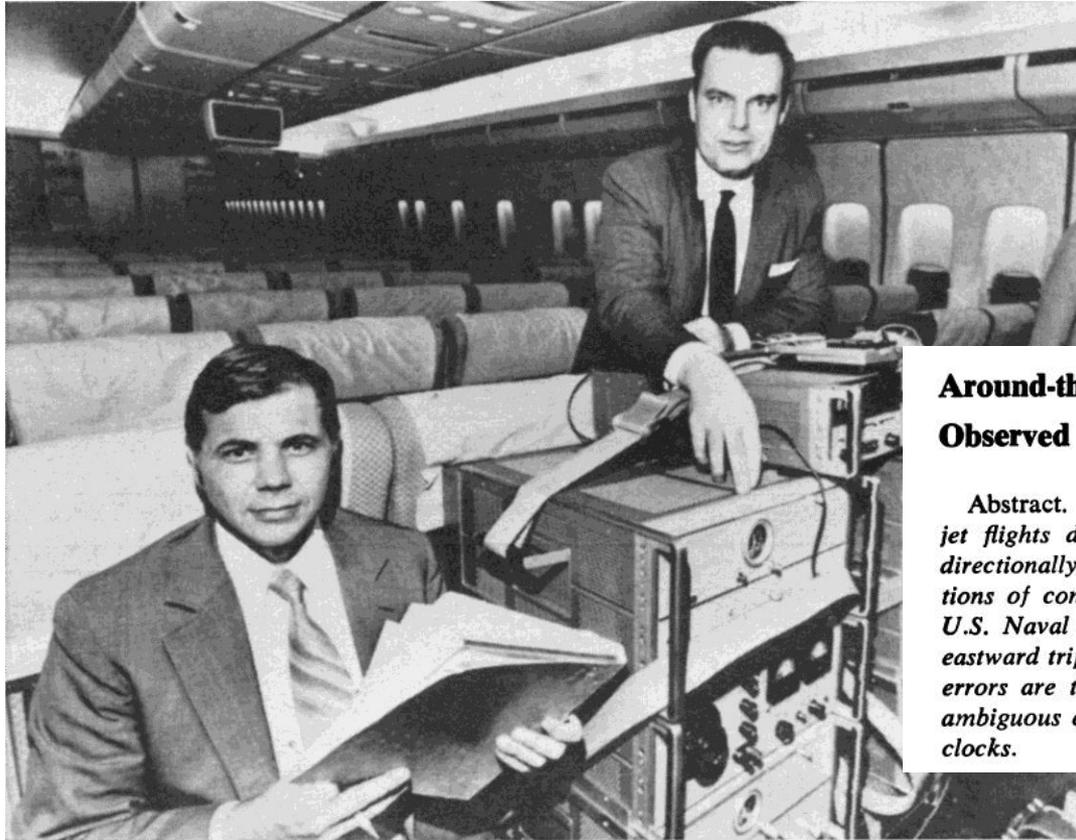
(Pound, Rebka, 1960)



Su un dislivello di 22 metri, una variazione della frequenza della luce dello 0, 000 000 000 000 2 %

Dilatazione del tempo

Giro del mondo di un orologio atomico
a bordo di un aereo di linea
(Hafele e Keating 1971)



Around-the-World Atomic Clocks: Observed Relativistic Time Gains

Abstract. Four cesium beam clocks flown around the world on commercial jet flights during October 1971, once eastward and once westward, recorded directionally dependent time differences which are in good agreement with predictions of conventional relativity theory. Relative to the atomic time scale of the U.S. Naval Observatory, the flying clocks lost 59 ± 10 nanoseconds during the eastward trip and gained 273 ± 7 nanoseconds during the westward trip, where the errors are the corresponding standard deviations. These results provide an unambiguous empirical resolution of the famous clock "paradox" with macroscopic clocks.

Differenza dell'ordine di 100 nanosecondi rispetto a un orologio rimasto a terra

Evidence for the Earth Gravitational Shift by Direct Atomic-Time-Scale Comparison (*).

L. BRIATORE

*Istituto di Fisica Generale dell'Università - Torino
Laboratorio di Cosmogeofisica del CNR - Torino*

S. LESCHIUTTA

Istituto Elettrotecnico Nazionale « Galileo Ferraris » - Torino

(ricevuto il 14 Luglio 1976)

Summary. — On the basis of the height difference between the CNR cosmic-ray laboratory at Plateau Rosa, 3500 m, and Turin, 250 m above s.l., a direct measurement of the terrestrial gravitational shift has been made by the comparison of the time scales of two cesium beam atomic frequency standards of the Istituto Elettrotecnico Nazionale « Galileo Ferraris ». The principle of equivalence predicts the effect $\Delta t/t = -\Delta U/c^2 = 3.54 \cdot 10^{-13}$, corresponding to the gain of the standard at mountain altitudes $\Delta t/t = 30.6$ ns/d. The results $\Delta t/t = (33.8 \pm 6.8)$ ns/d and $\Delta t/t = (36.5 \pm 5.8)$ ns/d, derived with two independent operating criteria, have been obtained from 1584 h of actual measurement, with reference to an atomic time scale whose linearity was continuously and carefully tested. The results are discussed in terms of the current gravitational theories and in view of future experimental researches, which will be permitted by the advancements of the metrology of time.

1. — Introduction.

We already pointed out that the recent advancements of the metrology of time, both as physical characteristics and improved technological performances of the standards, permit, at least in the limits of the measurement

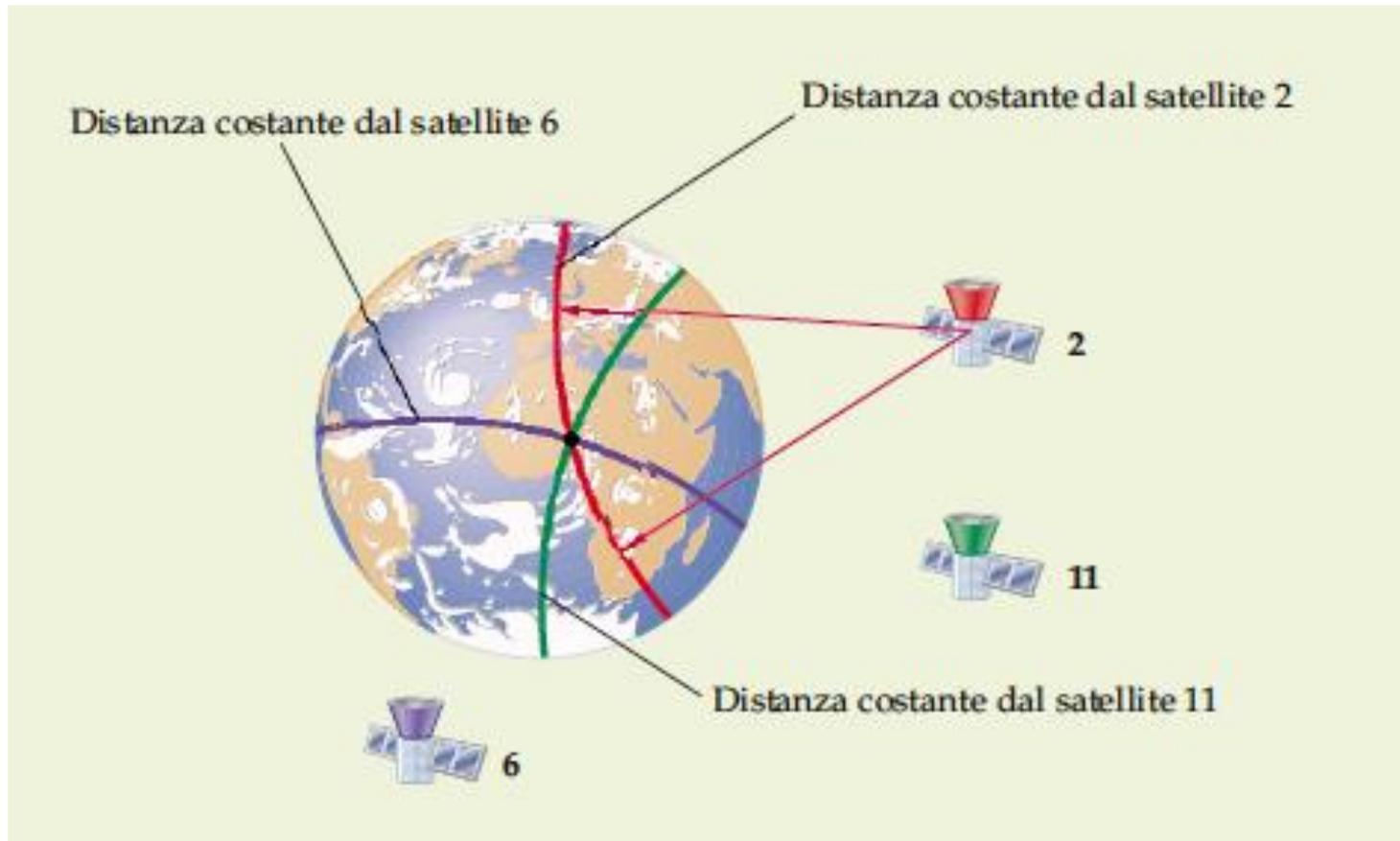
(*) To speed up publication, the authors of this paper have agreed to not receive the proofs the correction.

Esperimento di Briatore e Leschiutta (1976)

Dilatazione puramente gravitazionale

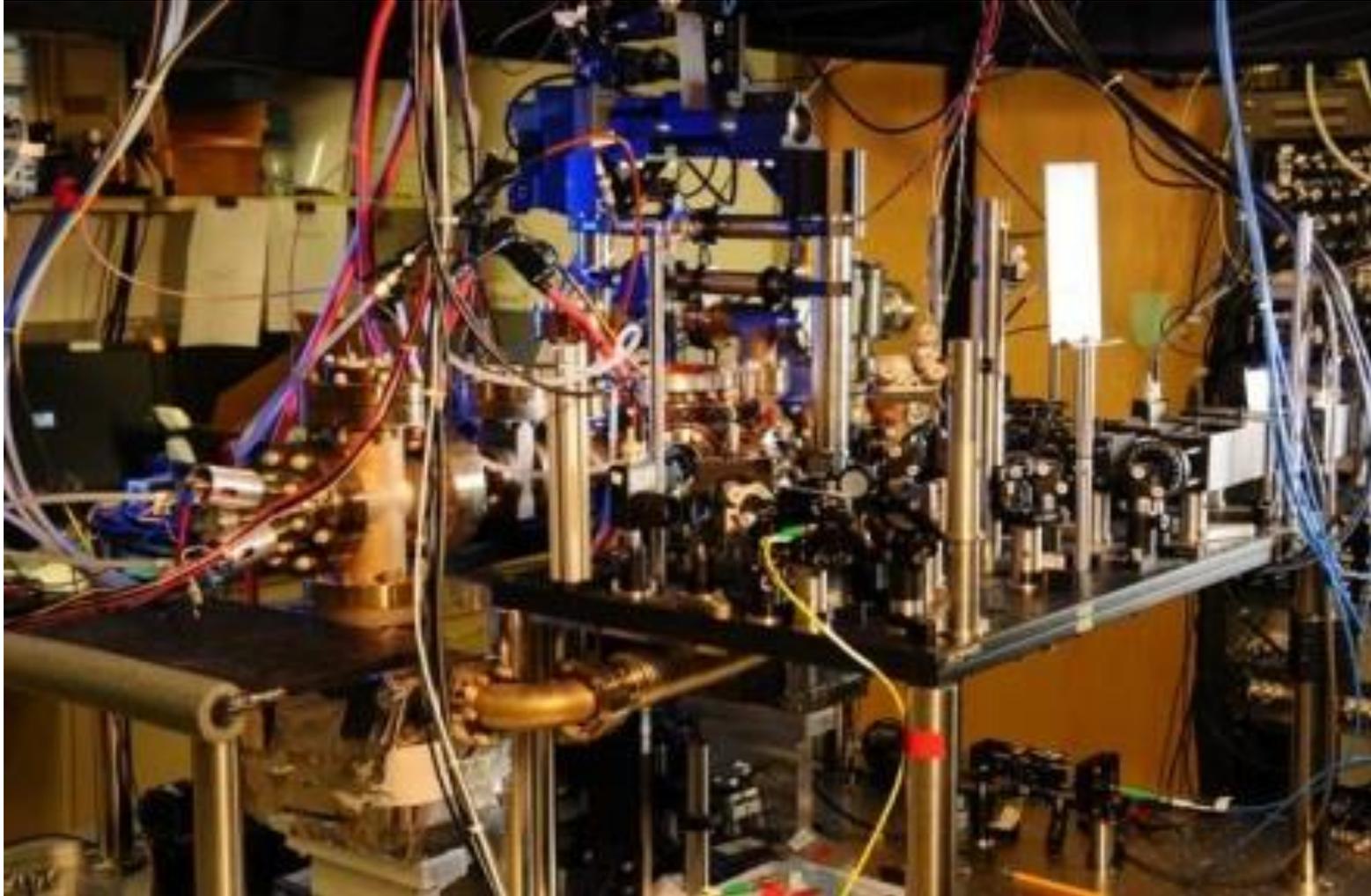
Differenza di circa 30 ns/giorno
tra un orologio a Torino (250 m)
e uno sul Plateau Rosa (3500 m)

GLOBAL POSITIONING SYSTEM (GPS)

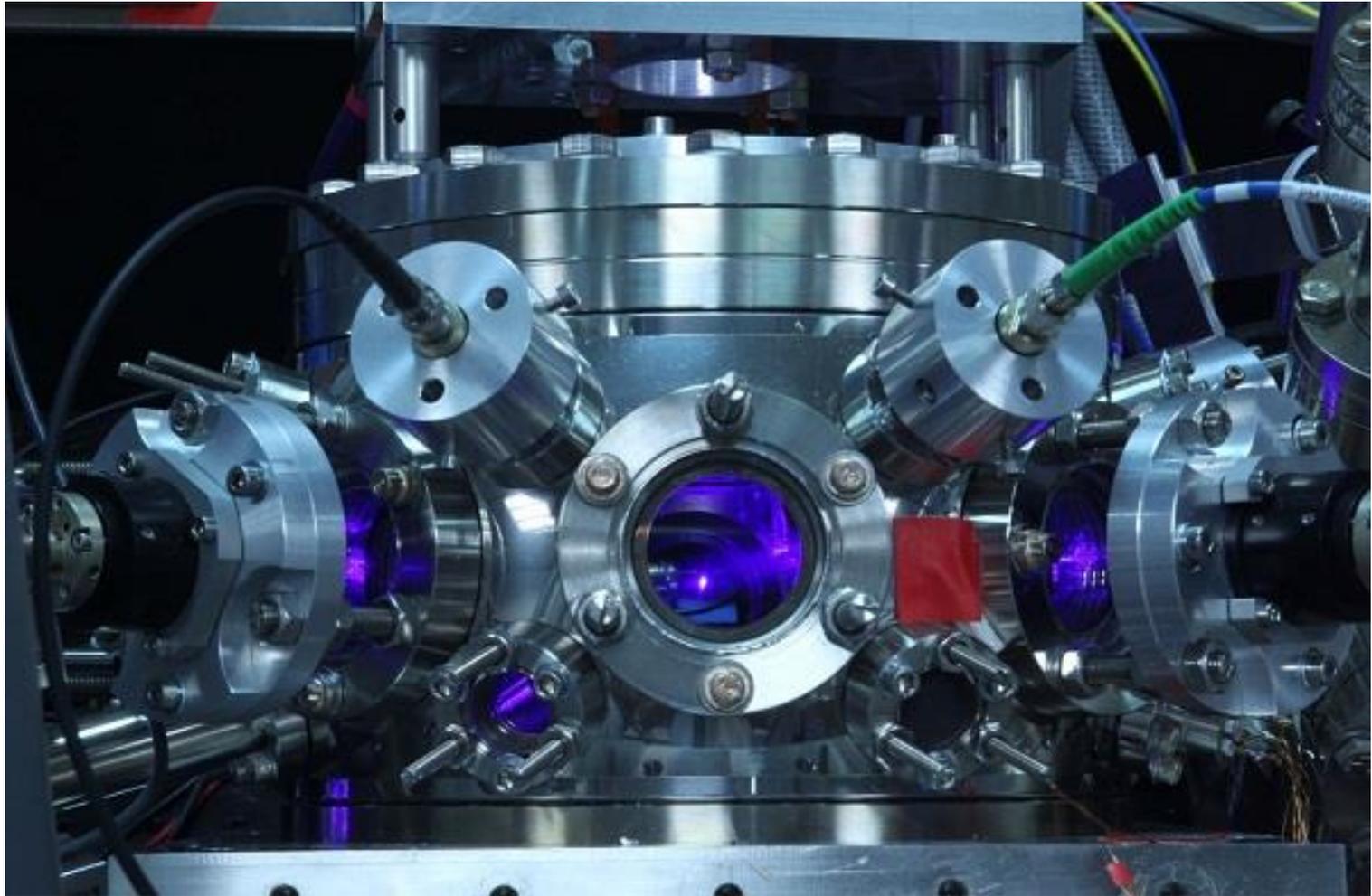


Le correzioni relativistiche sono di circa **40 microsecondi/giorno**. Senza queste correzioni la posizione di un oggetto sulla Terra sarebbe determinata con un errore di 10 km (la precisione del GPS è di 10 metri).

Gli attuali orologi atomici nelle frequenze ottiche sbagliano di 1 secondo ogni 10 miliardi di anni



Il cuore di un orologio ottico: un atomo intrappolato



Optical Clocks and Relativity

C. W. Chou,* D. B. Hume, T. Rosenband, D. J. Wineland

Observers in relative motion or at different gravitational potentials measure disparate clock rates. These predictions of relativity have previously been observed with atomic clocks at high velocities and with large changes in elevation. We observed time dilation from relative speeds of less than 10 meters per second by comparing two optical atomic clocks connected by a 75-meter length of optical fiber. We can now also detect time dilation due to a change in height near Earth's surface of less than 1 meter. This technique may be extended to the field of geodesy, with applications in geophysics and hydrology as well as in space-based tests of fundamental physics.

Albert Einstein's theory of relativity forced us to alter our concepts of reality. One of the more startling outcomes of the theory is that we have to give up our notions of simultaneity.

This is manifest in the so-called twin paradox (1), in which a twin sibling who travels on a fast-moving rocket ship returns home younger than the other twin. This "time dilation" can be

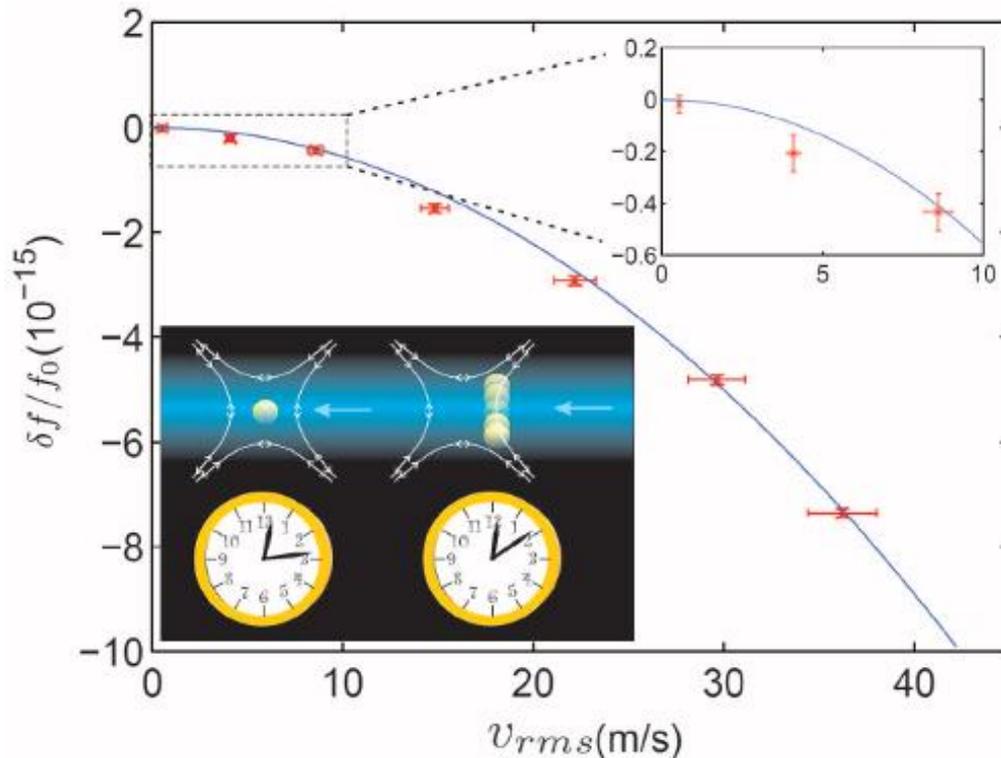
quantified by comparing the tick rates of identical clocks that accompany the traveler and the stationary observer. Another consequence of Einstein's theory is that clocks run more slowly near massive objects. In the range of speeds and length scales encountered in our daily life, relativistic effects are extremely small. For example, if two identical clocks are separated vertically by 1 km near the surface of Earth, the higher clock emits about three more second-ticks than the lower one in a million years. These effects of relativistic time dilation have been verified in several important experiments (2-6)

Time and Frequency Division, National Institute of Standards and Technology (NIST), Boulder, CO 80305, USA.

*To whom correspondence should be addressed. E-mail: chinwen@nist.gov

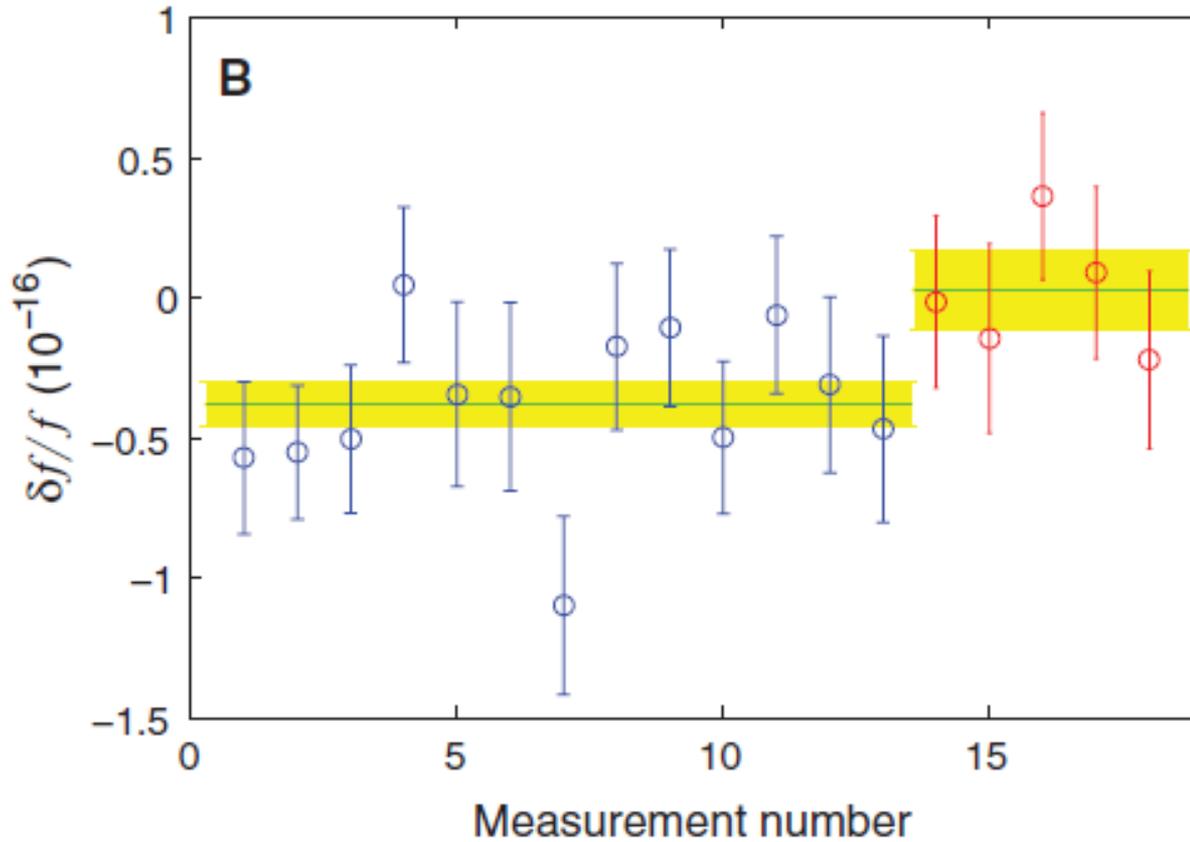
)

24 SEPTEMBER 2010 VOL 329 SCIENCE www.sciencemag.org



Dilatazione cinematica del tempo

Dilatazione gravitazionale del tempo: un orologio sul pavimento va più lento di un orologio sul tavolo



Dislivello di 50 cm !

Le onde gravitazionali

Giugno 1916

Gennaio 1918

688 Sitzung der physikalisch-mathematischen Klasse vom 22. Juni 1916

Näherungsweise Integration der Feldgleichungen der Gravitation.

VON A. EINSTEIN.

Bei der Behandlung der meisten speziellen (nicht prinzipiellen) Probleme auf dem Gebiete der Gravitationstheorie kann man sich damit begnügen, die $g_{\mu\nu}$ in erster Näherung zu berechnen. Dabei bedient man sich mit Vorteil der imaginären Zeitvariable $x_4 = it$ aus denselben Gründen wie in der speziellen Relativitätstheorie. Unter »erster Näherung« ist dabei verstanden, daß die durch die Gleichung

$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

154 Gesamtsitzung vom 14. Februar 1918. — Mitteilung vom 31. Januar

Über Gravitationswellen.

VON A. EINSTEIN.

(Vorgelegt am 31. Januar 1918 [s. oben S. 79].)

Die wichtige Frage, wie die Ausbreitung der Gravitationsfelder erfolgt, ist schon vor anderthalb Jahren in einer Akademiarbeit von mir behandelt worden¹. Da aber meine damalige Darstellung des Gegenstandes nicht genügend durchsichtig und außerdem durch einen bedauerlichen Rechenfehler verunstaltet ist, muß ich hier nochmals auf die Angelegenheit zurückkommen.

Wie damals beschränke ich mich auch hier auf den Fall, daß das betrachtete zeiträumliche Kontinuum sich von einem »galileischen« nur sehr wenig unterscheidet. Um für alle Indizes

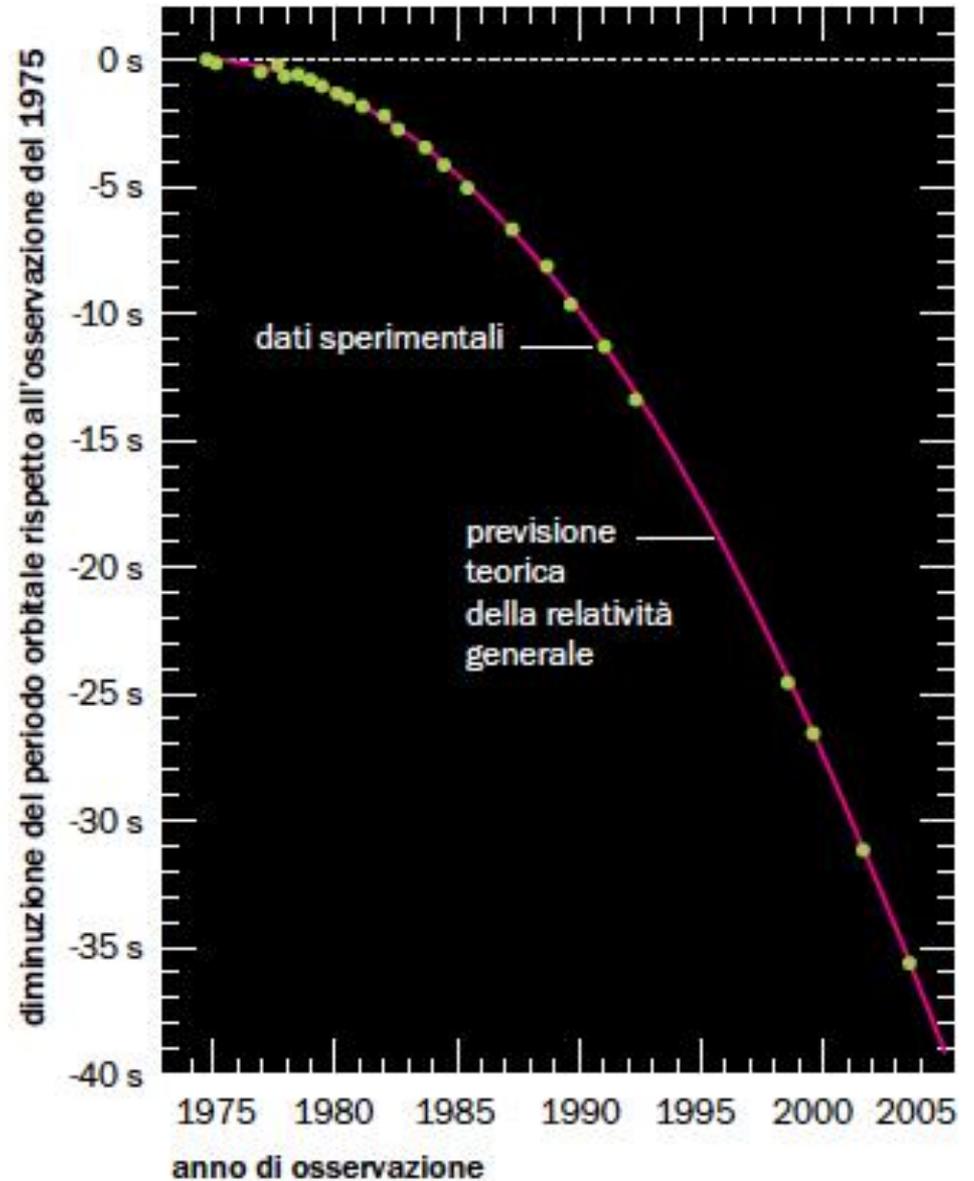
$$g_{\mu\nu} = -\delta_{\mu\nu} + \gamma_{\mu\nu} \quad (1)$$

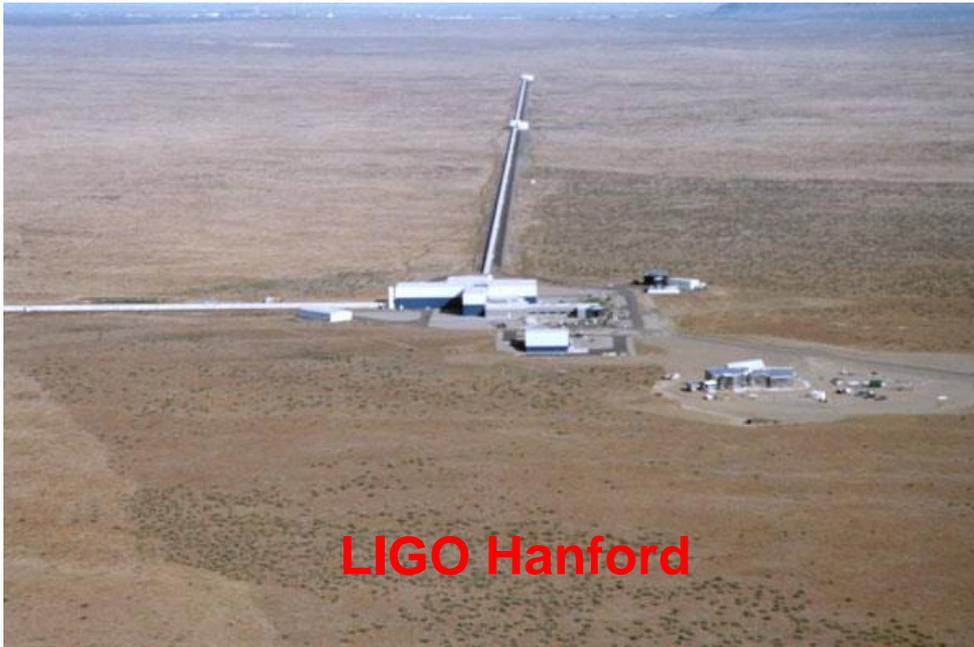
«Integrazione approssimata delle equazioni di campo della gravitazione»

«Sulle onde gravitazionali»

Emissione di onde gravitazionali dalla pulsar binaria 1913 + 16

Hulse e Taylor, Nobel 1993





LIGO Hanford



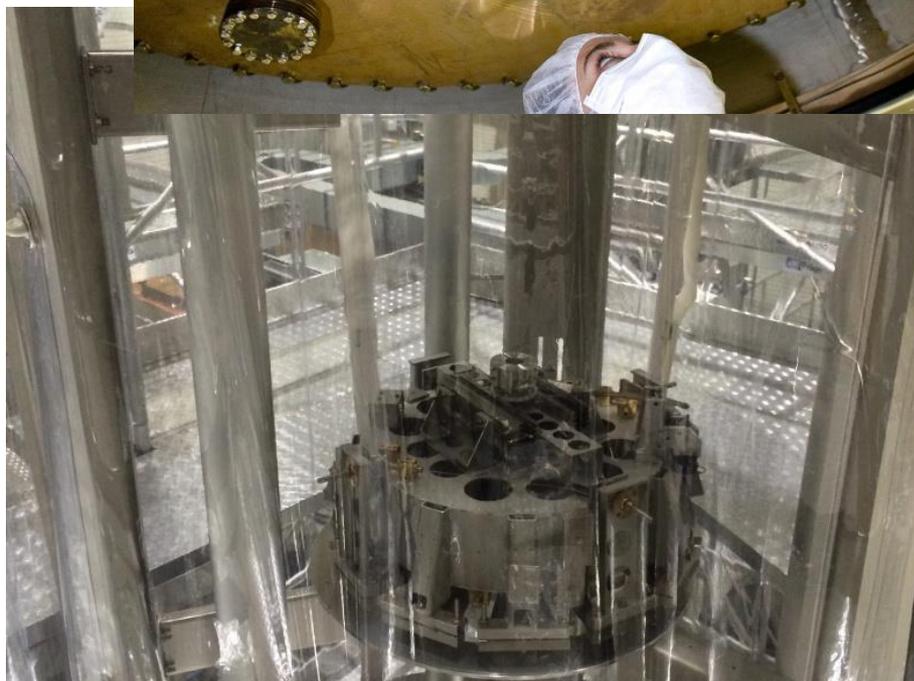
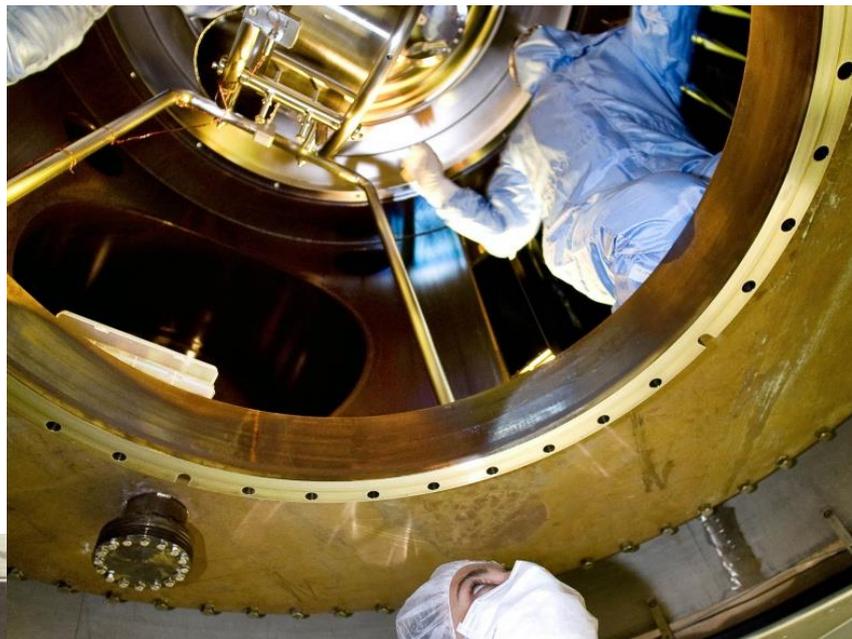
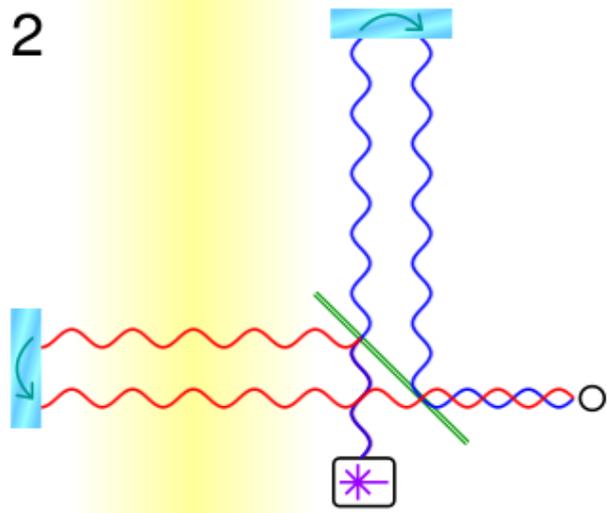
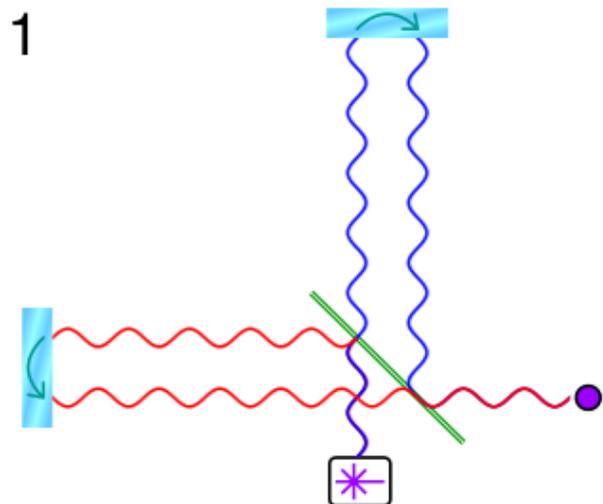
LIGO Livingston



VIRGO Pisa

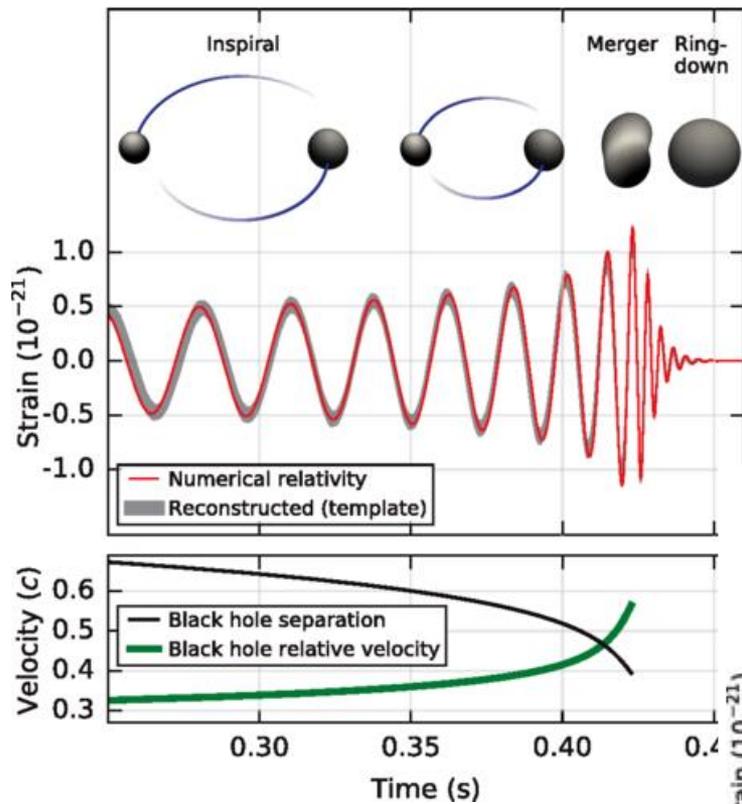
Gli interferometri
gravitazionali

Come funziona un interferometro

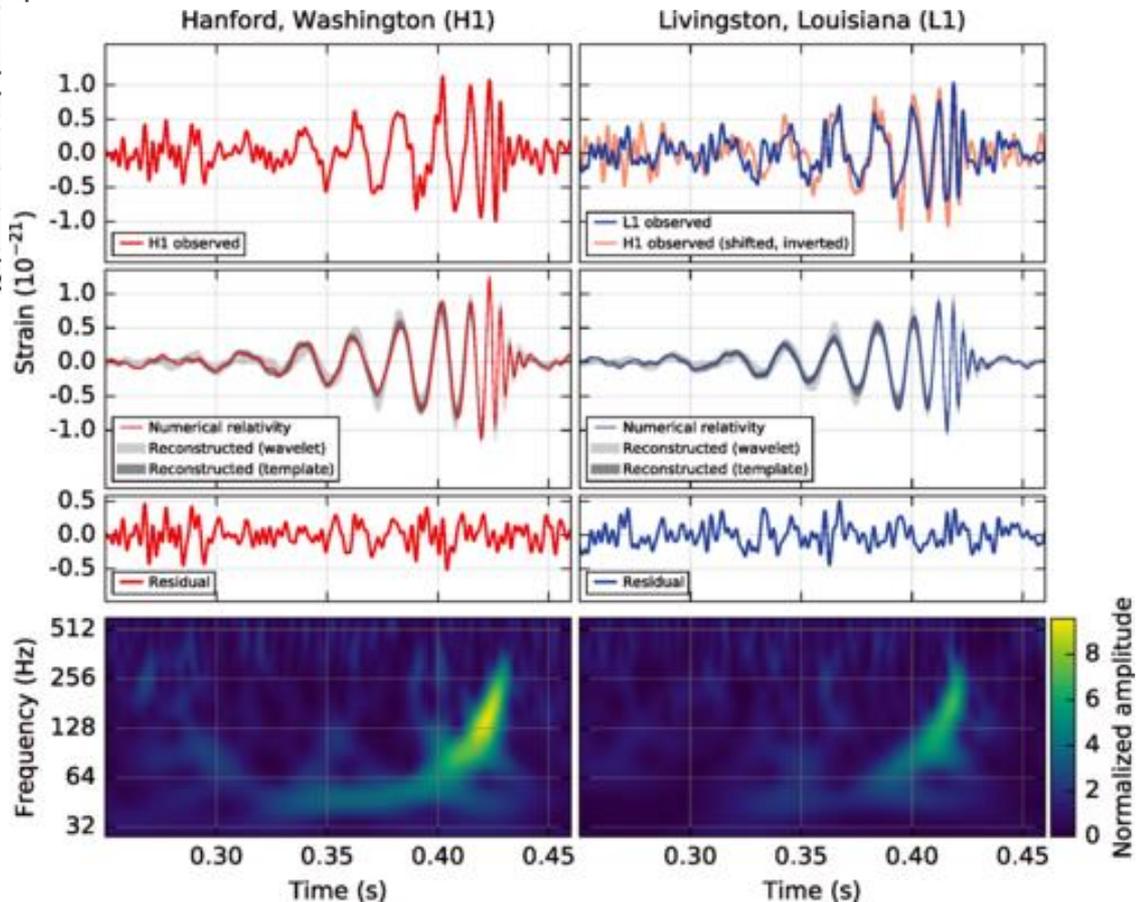


Deformazione: 10^{-18} metri

L'identikit di un'onda emessa da due buchi neri che si fondono



I segnali captati da LIGO





«Non smettiamo mai di guardare come bambini incuriositi il grande mistero che ci circonda» (A. Einstein)