

# ONDE GRAVITAZIONALI

---



# La figura di Albert Einstein

- Descrizione di Leopold Infeld (pag. 138 de “L’uomo e lo scienziato. La teoria della relatività e la sua influenza sul mondo contemporaneo.”, Leopold Infeld/Piccola biblioteca Einaudi)
- La questione dell’eleganza va lasciata ai sarti e ai calzolai (pag. 13 di Leopold Infeld ...)

Lasciò la Germania per trascorrere gli ultimi 20 anni della sua vita a Princeton nel dicembre del 1932. Quando lo informarono che era stato pubblicato un libro, per volontà del regime nazista, dal titolo “Cento scienziati contro Einstein”, egli disse: *“Perché cento? Se fossi in errore ne basterebbe uno”*.

*Nel 1948 gli fu offerta la presidenza del nuovo stato di Israele, ma rifiutò. Una volta disse: “La politica dura un attimo, mentre un’equazione dura in eterno”*

“Einstein, non dire a Dio che cosa deve fare” lettura pag. 74 da “La guerra dei buchi neri”, Leonard Susskind/Adelphi



# La figura di Albert Einstein



# La scoperta delle onde gravitazionali

14 settembre 2015 alle 11:50 ora italiana

Il giorno 11 febbraio 2016, le Collaborazioni LIGO e VIRGO, durante due conferenze stampa in contemporanea a Washington DC e a Cascina (Pisa), annunciano la prima rivelazione diretta di un segnale di onde gravitazionali.



CASCINA

WASHINGTON DC



Foto: MAUR

# La pubblicazione scientifica

PRL 116, 061102 (2016)

Selected for a Viewpoint in *Physics*  
PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending  
12 FEBRUARY 2016



## Observation of Gravitational Waves from a Binary Black Hole Merger

B. P. Abbott *et al.*\*

(LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration)

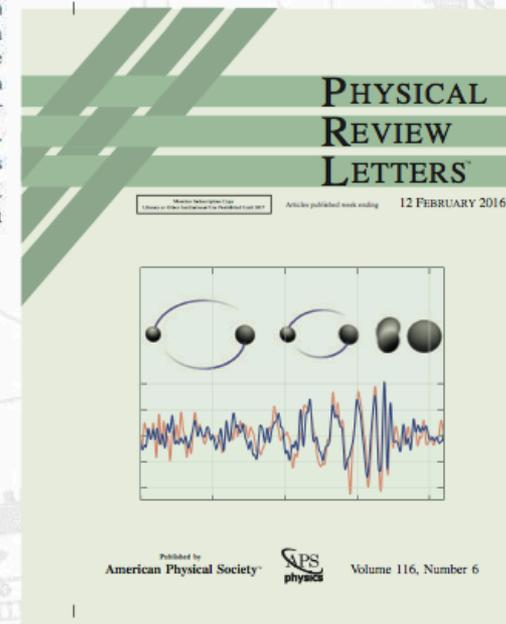
(Received 21 January 2016; published 11 February 2016)

On September 14, 2015 at 09:50:45 UTC the two detectors of the Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory simultaneously observed a transient gravitational-wave signal. The signal sweeps upwards in frequency from 35 to 250 Hz with a peak gravitational-wave strain of  $1.0 \times 10^{-21}$ . It matches the waveform predicted by general relativity for the inspiral and merger of a pair of black holes and the ringdown of the resulting single black hole. The signal was observed with a matched-filter signal-to-noise ratio of 24 and a false alarm rate estimated to be less than 1 event per 203 000 years, equivalent to a significance greater than  $5.1\sigma$ . The source lies at a luminosity distance of  $410^{+160}_{-180}$  Mpc corresponding to a redshift  $z = 0.09^{+0.03}_{-0.04}$ . In the source frame, the initial black hole masses are  $36^{+4}_{-4} M_{\odot}$  and  $29^{+4}_{-4} M_{\odot}$ , and the final black hole mass is  $62^{+4}_{-4} M_{\odot}$ , with  $3.0^{+0.5}_{-0.5} M_{\odot} c^2$  radiated in gravitational waves. All uncertainties define 90% credible intervals. These observations demonstrate the existence of binary stellar-mass black hole systems. This is the first direct detection of gravitational waves and the first observation of a binary black hole merger.

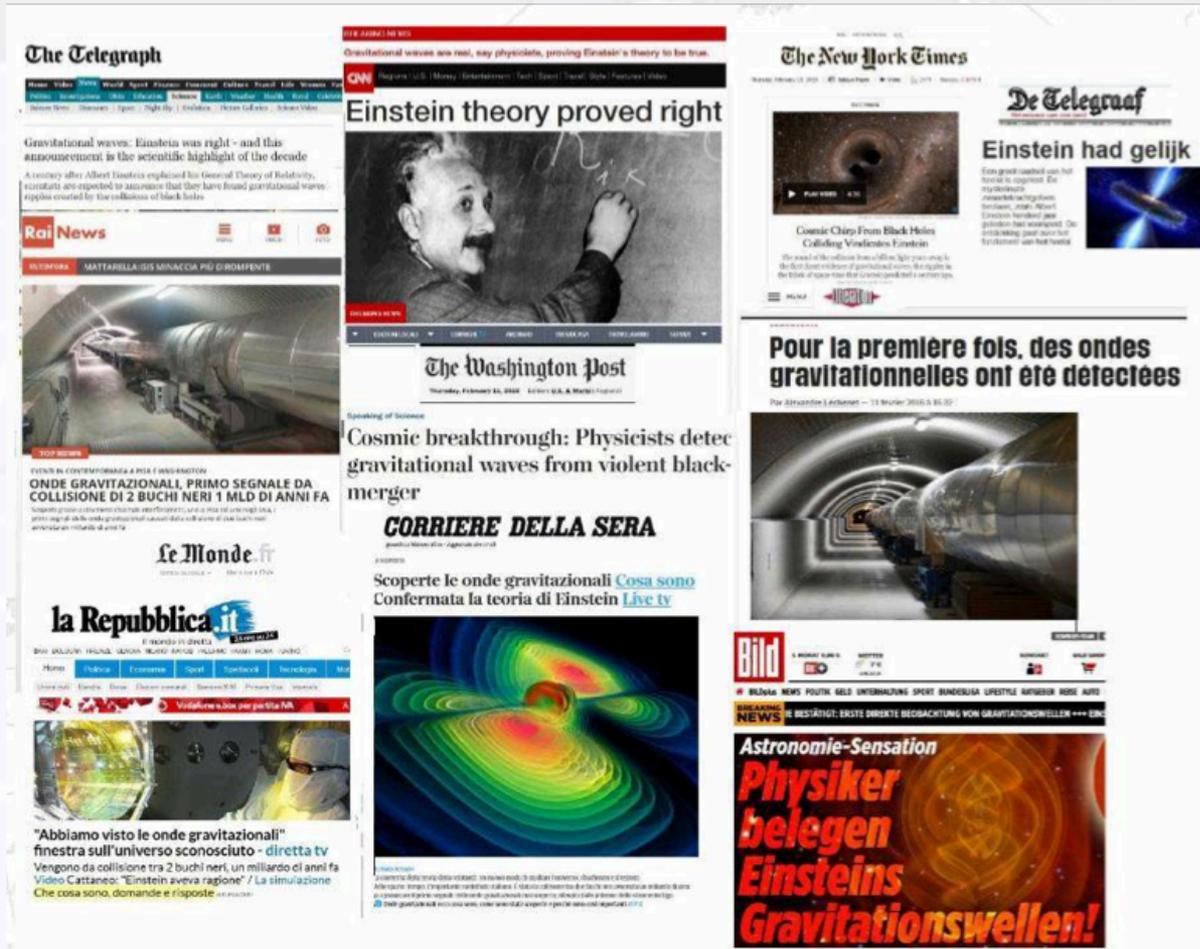
DOI: 10.1103/PhysRevLett.116.061102

229,000 paper downloads from APS in the first 24 hours

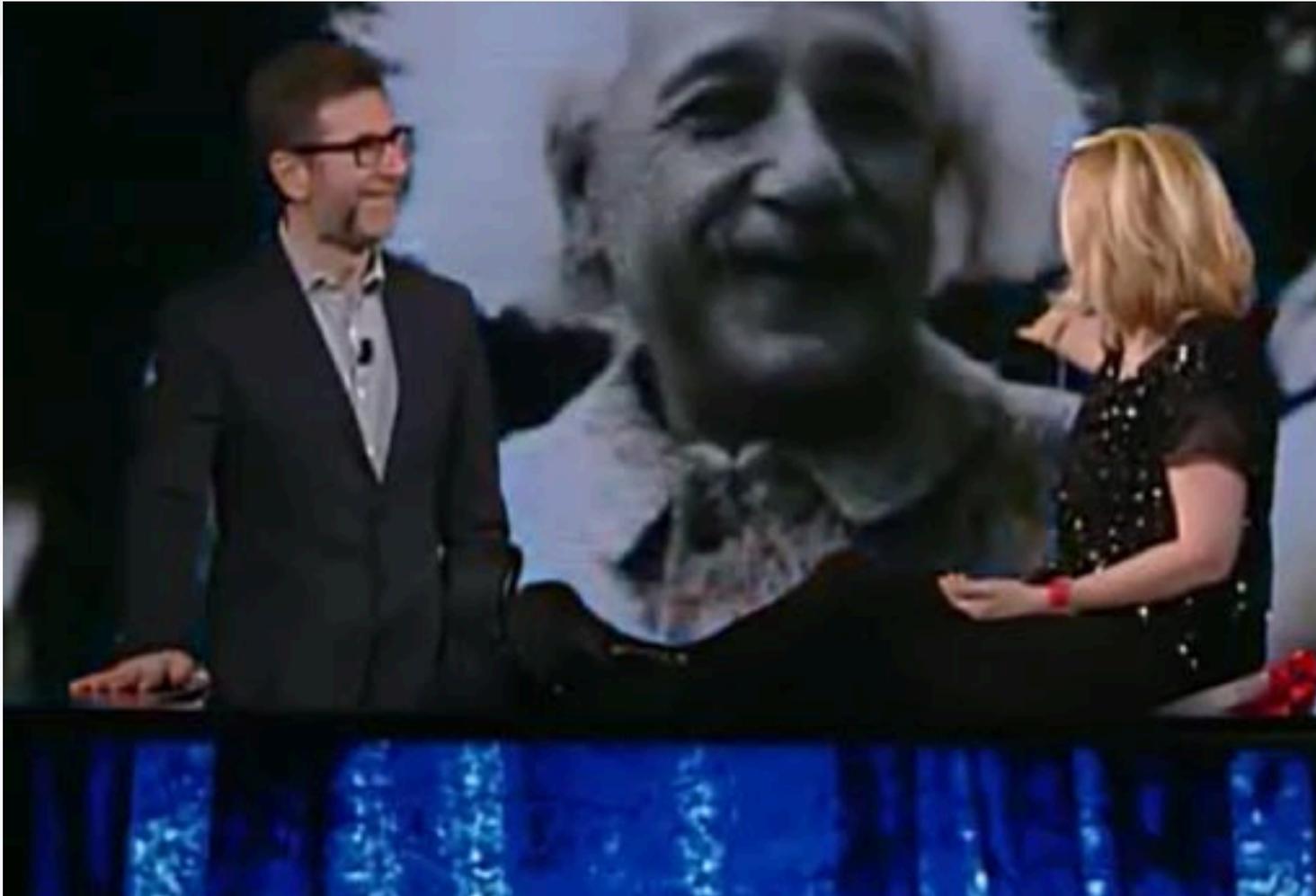
[Phys. Rev. Lett. 116, 061102 \(2016\)](#)



# La notizia fa il giro del mondo



Anche in trasmissioni non di taglio scientifico...





# La Luna cade sulla Terra! [Newton]



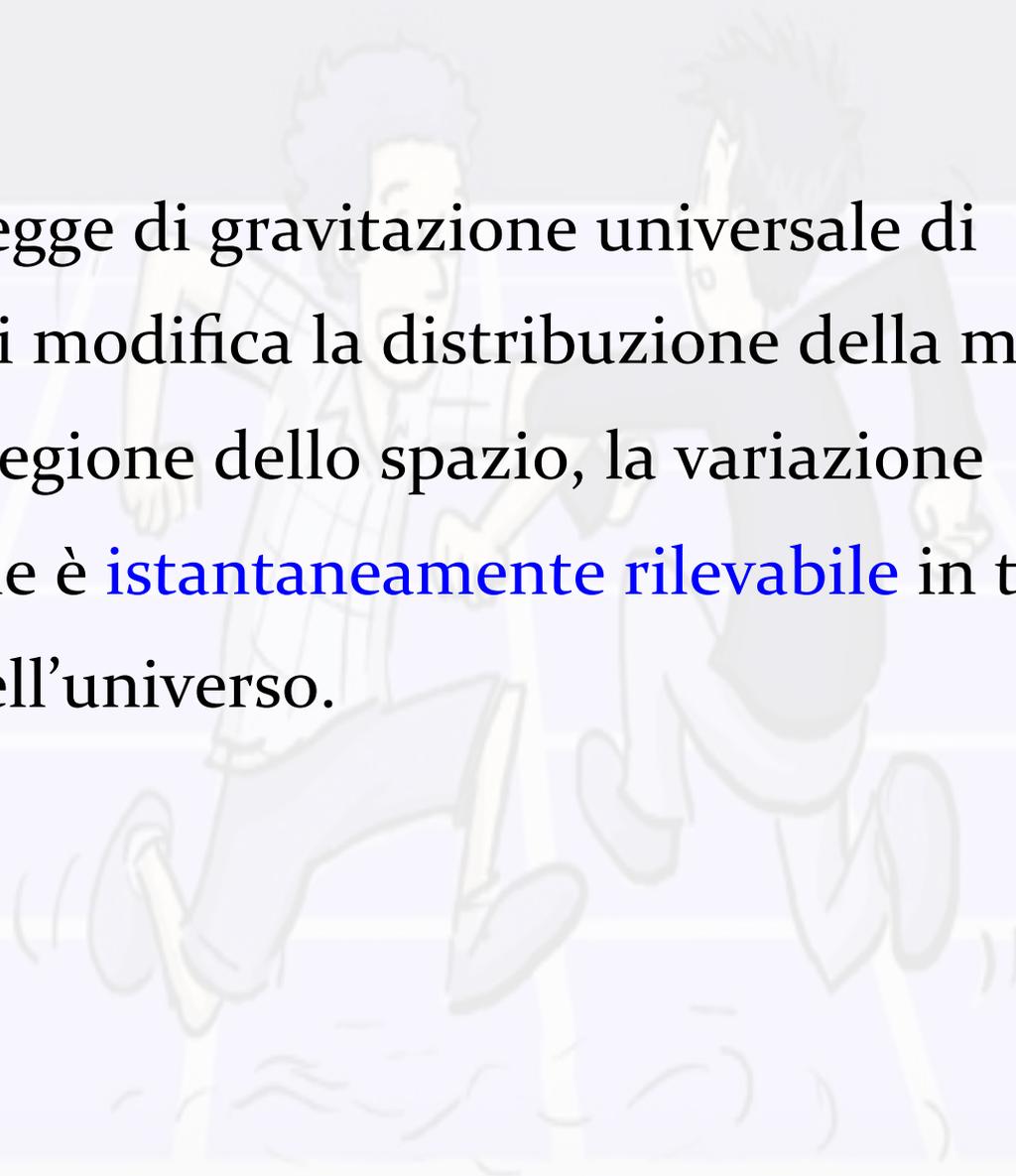
# Gravitazione Universale (1687)

Spiegava molti problemi irrisolti in astronomia e fisica terrestre

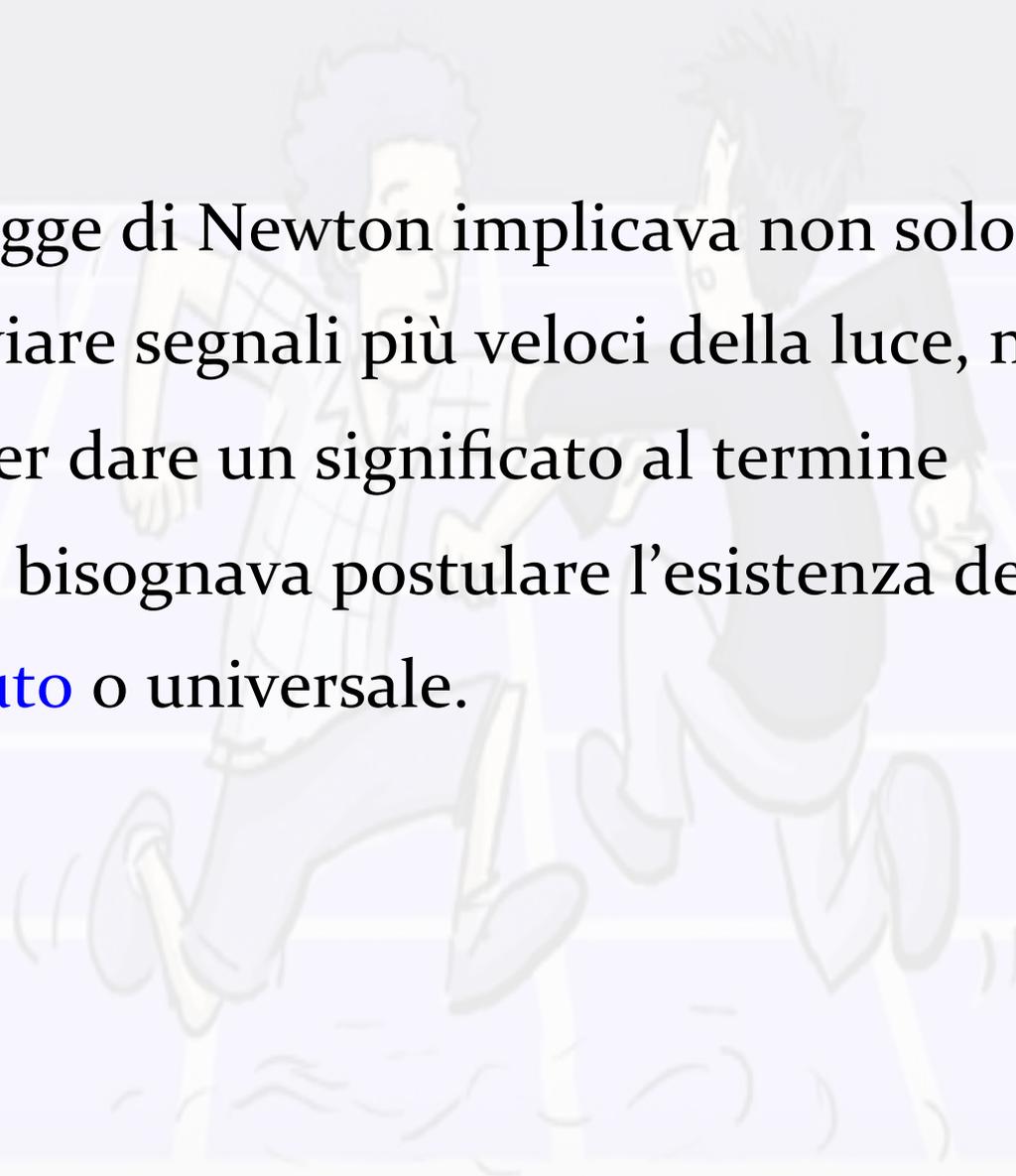
- Eccentricità delle orbite delle comete
- Le maree
- La perturbazione del moto della Luna a causa dell'attrazione del Sole
- Scoperta del pianeta Nettuno (1846)



- Secondo la legge di gravitazione universale di Newton, se si modifica la distribuzione della materia in una data regione dello spazio, la variazione gravitazionale è **istantaneamente rilevabile** in tutti gli altri punti dell'universo.

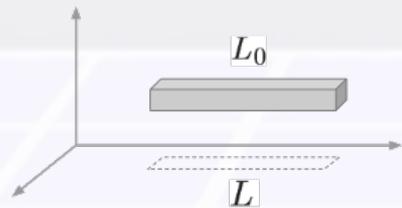


- Dunque la legge di Newton implicava non solo che si potevano inviare segnali più veloci della luce, ma anche che, per dare un significato al termine “istantaneo”, bisognava postulare l’esistenza del **tempo assoluto** o universale.

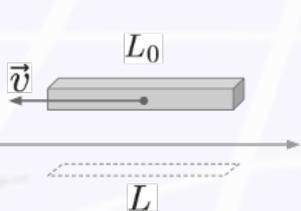


- Il 10 dicembre 1915 Einstein scrisse all'amico Michele Besso dicendo di sentirsi "felice, ma un po' distrutto". Ne aveva tutte le ragioni: era riuscito a completare il suo capolavoro, la relatività generale, universalmente considerata la più bella teoria della fisica.
- Quando A.E. divenne universalmente famoso, il "New York Times" scrisse che i suoi lavori potevano essere capiti solo da una dozzina di uomini in tutto il mondo.
- Cent'anni dopo, le due teorie della relatività sono entrate a pieno diritto nel sapere comune e persino nella nostra vita quotidiana.

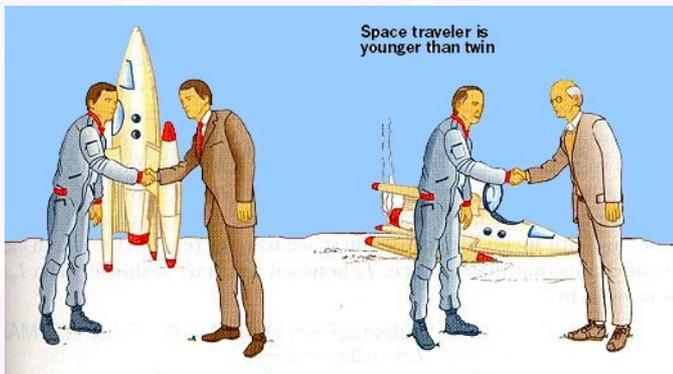
# La relatività ristretta di Einstein (1905)



Contrazione delle lunghezze



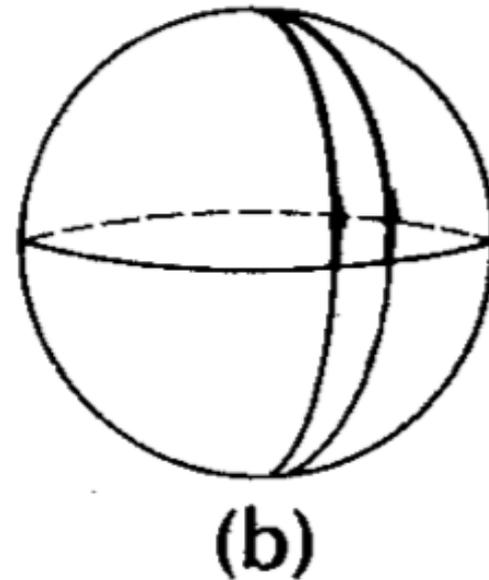
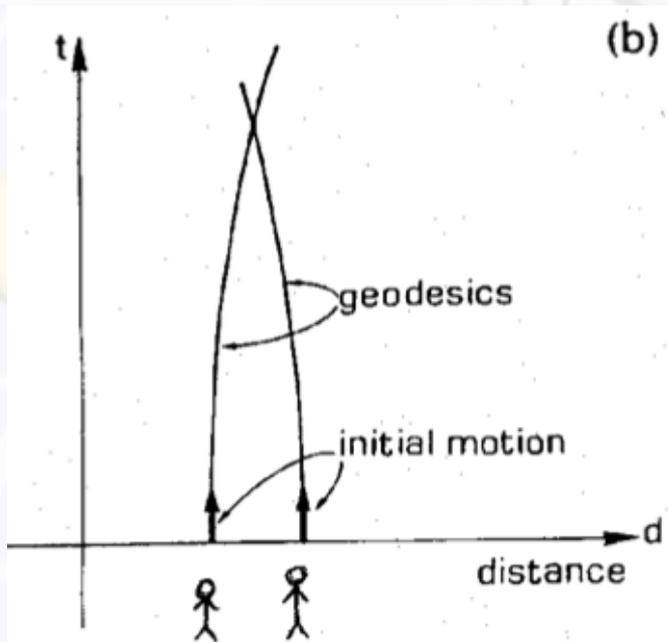
Dilatazione dei tempi



Crisi del concetto di simultaneità assoluta

# Il passaggio da Newton ad Einstein

- La gravità non è una forza ma una proprietà dello spazio-tempo

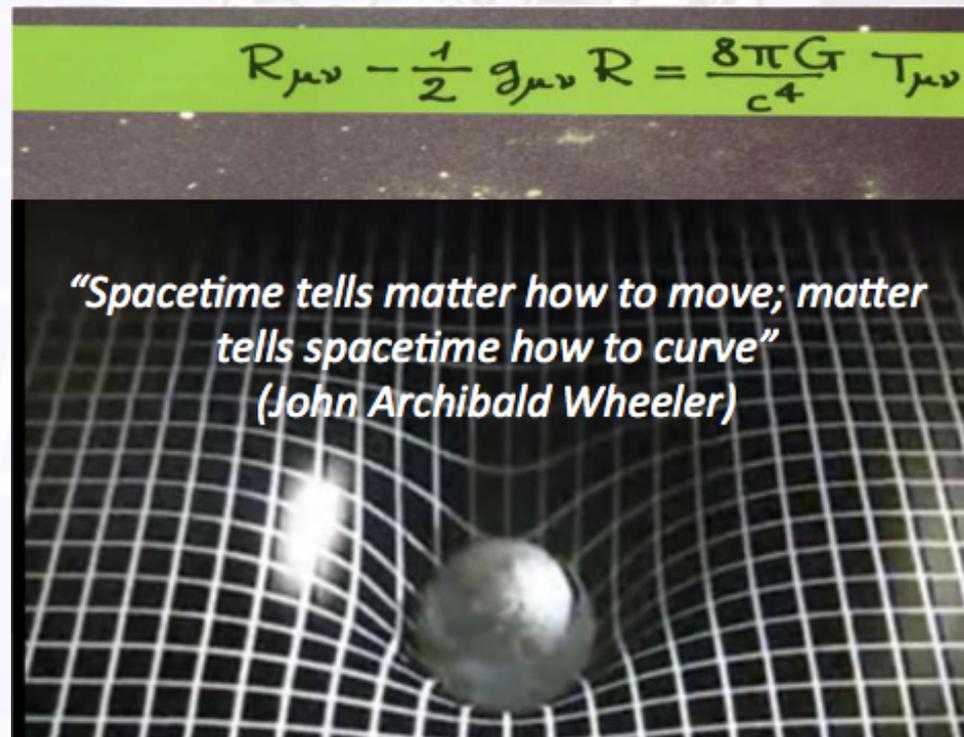


# La relatività di Einstein

- Sorpassa definitivamente il concetto ottocentesco di tempo e spazio assoluti.
- Introduce il concetto di spazio-tempo.
- Einstein impiegò poco meno di 10 anni per capire come formulare una teoria che includesse la forza gravitazionale e che fosse compatibile con la relatività speciale: nel 1915 infatti pubblica la teoria della Relatività Generale.

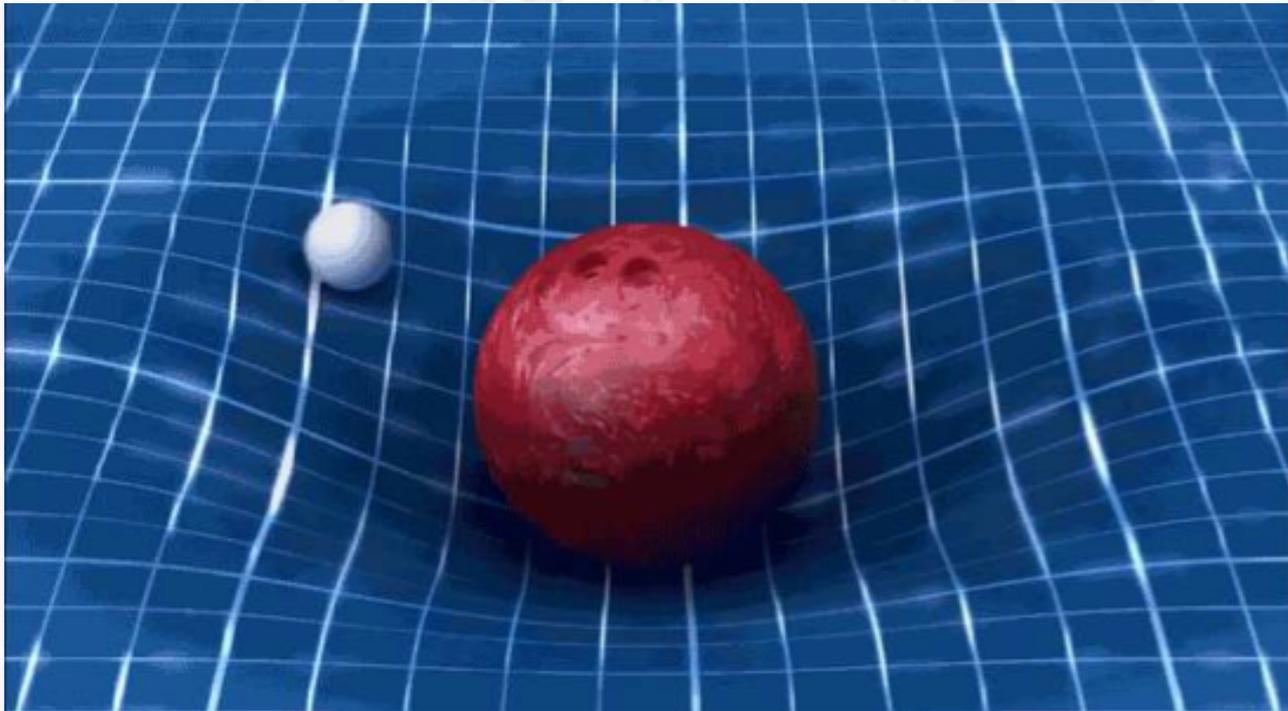
# La Relatività generale.

- La gravità non è una forza, ma una proprietà dello spazio-tempo.
- Lo spazio-tempo viene curvato dai corpi dotati di massa.



# La Relatività generale.

Gli oggetti si muovono lungo il cammino più breve in uno spazio-tempo curvo.



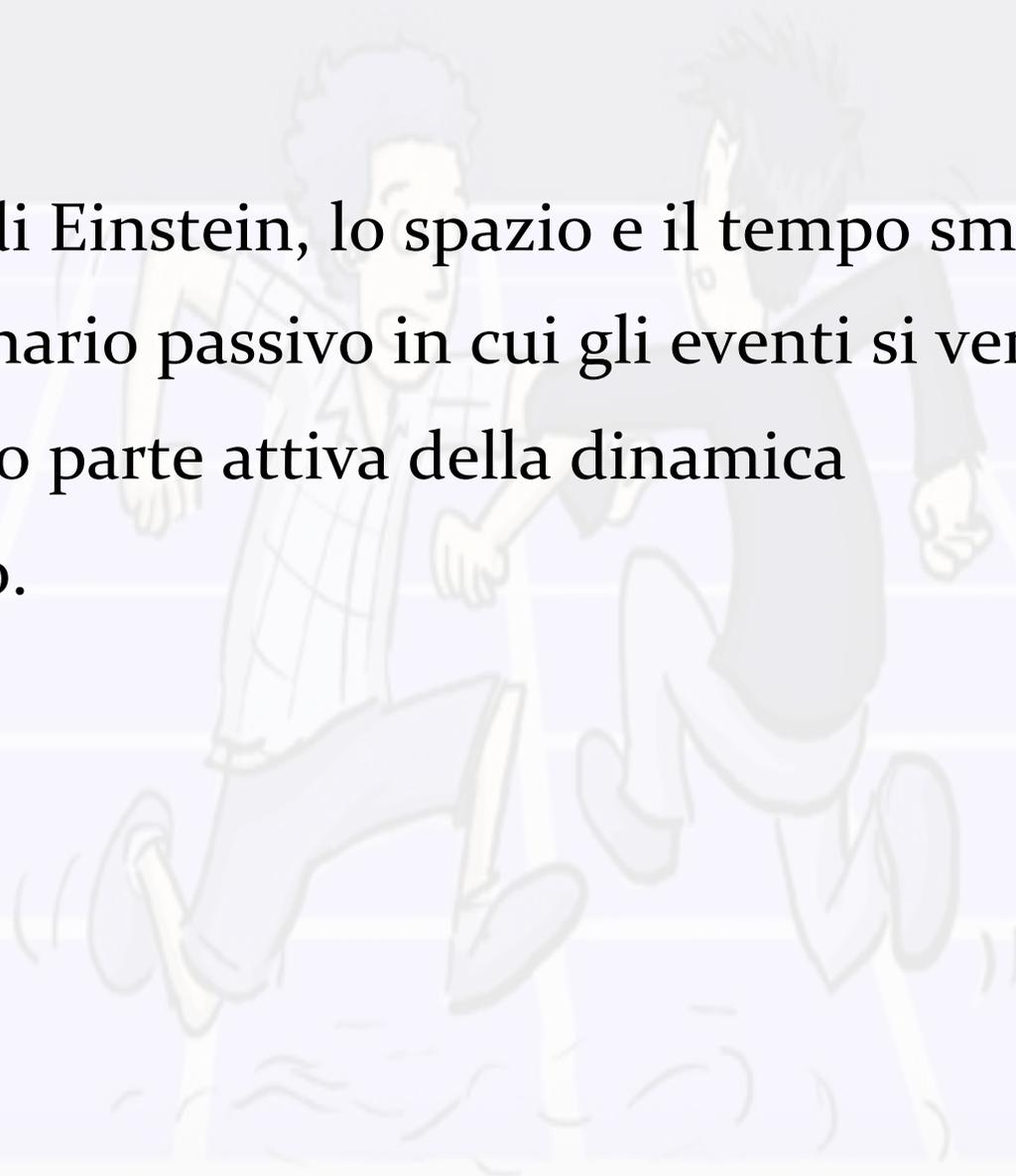
Primo successo della relatività generale: risolve la discrepanza del calcolo newtoniano sulla precessione del perielio di Mercurio

L'orbita di Mercurio attorno al Sole è un'orbita aperta.  
Precessione del perielio di Mercurio: spostamento di  $43''$ /secolo in più rispetto a quanto determinato da Newton



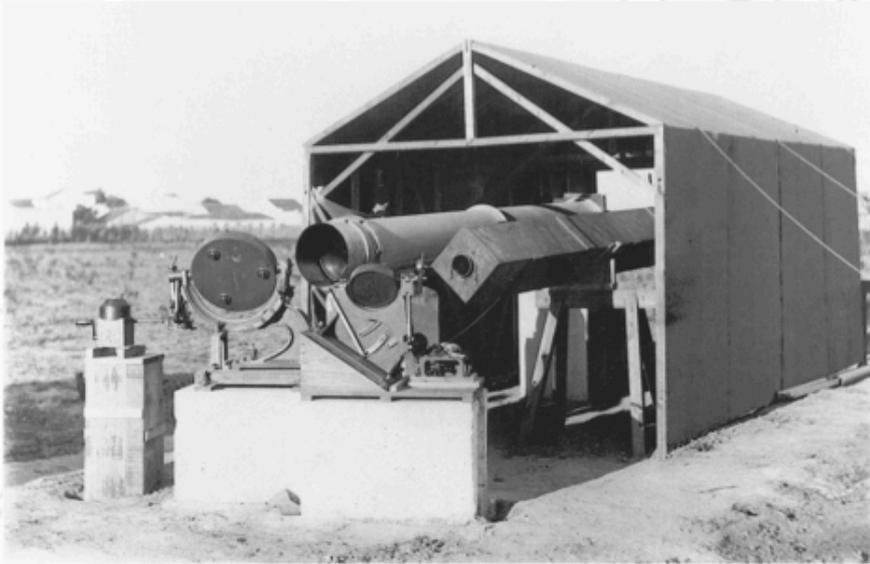
video

- Con la R.G. di Einstein, lo spazio e il tempo smisero di essere lo scenario passivo in cui gli eventi si verificano e diventarono parte attiva della dinamica dell'Universo.



# La conferma dalle osservazioni

L'astronomo inglese Sir Arthur Eddington guidò una spedizione per fotografare l'eclisse solare del 29 maggio 1919

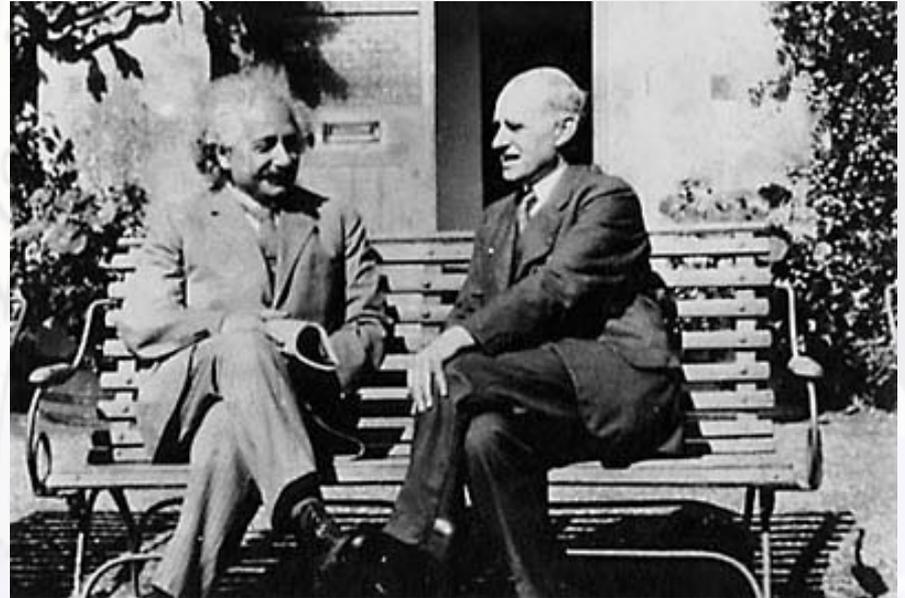


- Dal diario Di Sir Artur Eddington (1919)

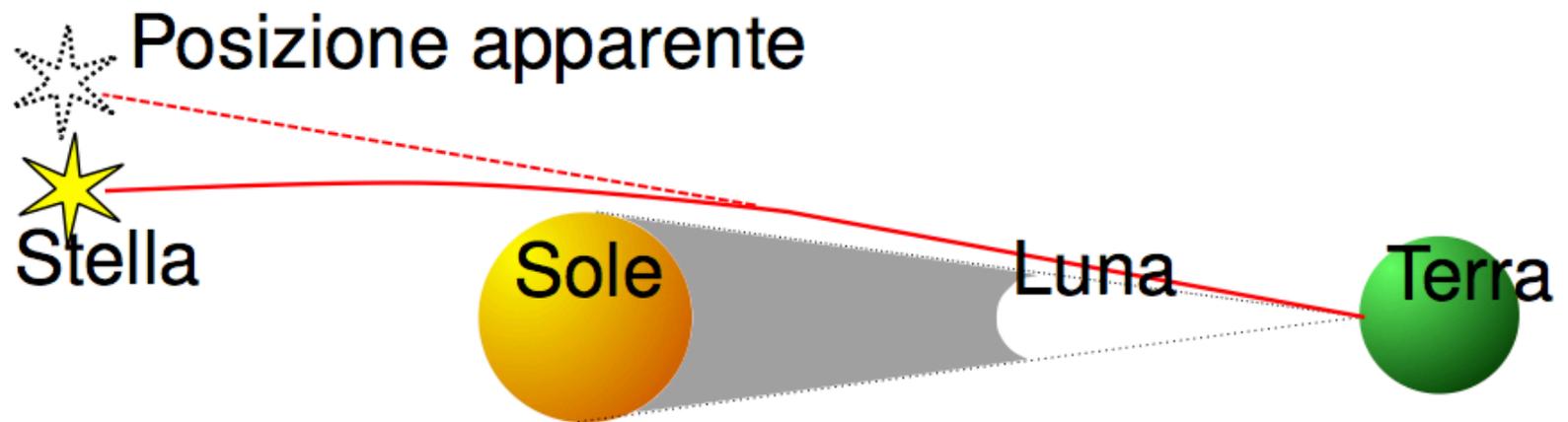
“ Io non vidi l’eclisse. Ero troppo impegnato a cambiare le lastre. Ogni tanto davo un’occhiata per essere sicuro che fosse cominciata e per controllare quante nuvole c’erano in cielo.

Scattammo 16 fotografie. Mostrano tutte il Sole con le sue protuberanze.

Le ultime fotografie mostrano poche immagini che però possono fornirci i dati che ci servono. In una fotografia che ho analizzato, ho ottenuto dati in accordo con quanto previsto da Einstein”



Eddington e Einstein



Il percorso della luce viene “piegato” quando questa passa vicino ad un oggetto dotato di massa (come il Sole).



Stella



Terra

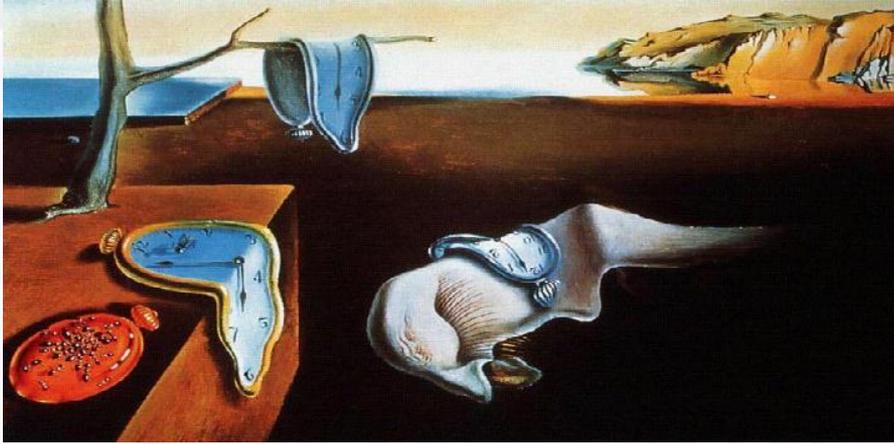
# Titoli quotidiani

- **Times (Londra, 7 novembre 1919):**
  - “Rivoluzione nel mondo della scienza: nuova teoria dell’universo. Detronizzate le idee di Newton”
- **New York Times (S.U., 9 novembre 1919):**
  - “La luce viaggia curva in cielo”
  - “Trionfo della teoria di Einstein”
  - “Le stelle non son là dove si crede, ma...è inutile preoccuparsi”
  - “Una teoria per 12 saggi. Nessun’altra persona al mondo è in grado di comprenderla”

# Effetti della relatività generale sul tempo



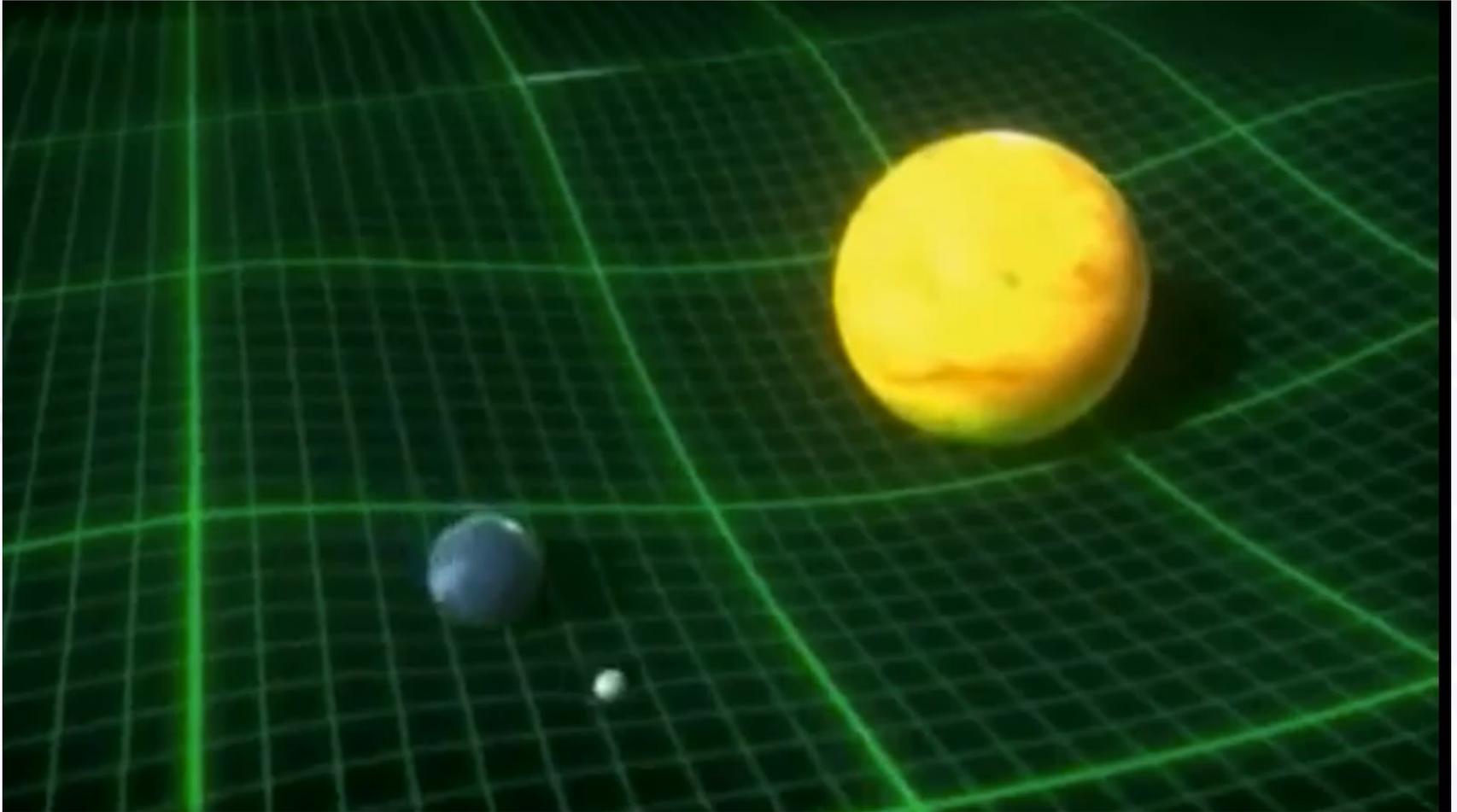
Il tempo scorre più lentamente all'aumentare del campo gravitazionale, cioè vicino a corpi massivi. (Funzionamento GPS)



La persistenza della memoria,  
Salvador Dalí

- Dawn Ades scrisse: "Gli orologi molli sono un simbolo inconscio della relatività dello spazio e del tempo, una meditazione surrealistica sul crollo delle nostre nozioni riguardo ad un sistema cosmico immutabile" (*Ades, Dawn. Dalí. Thames and Hudson, 1982*).

# Un breve video



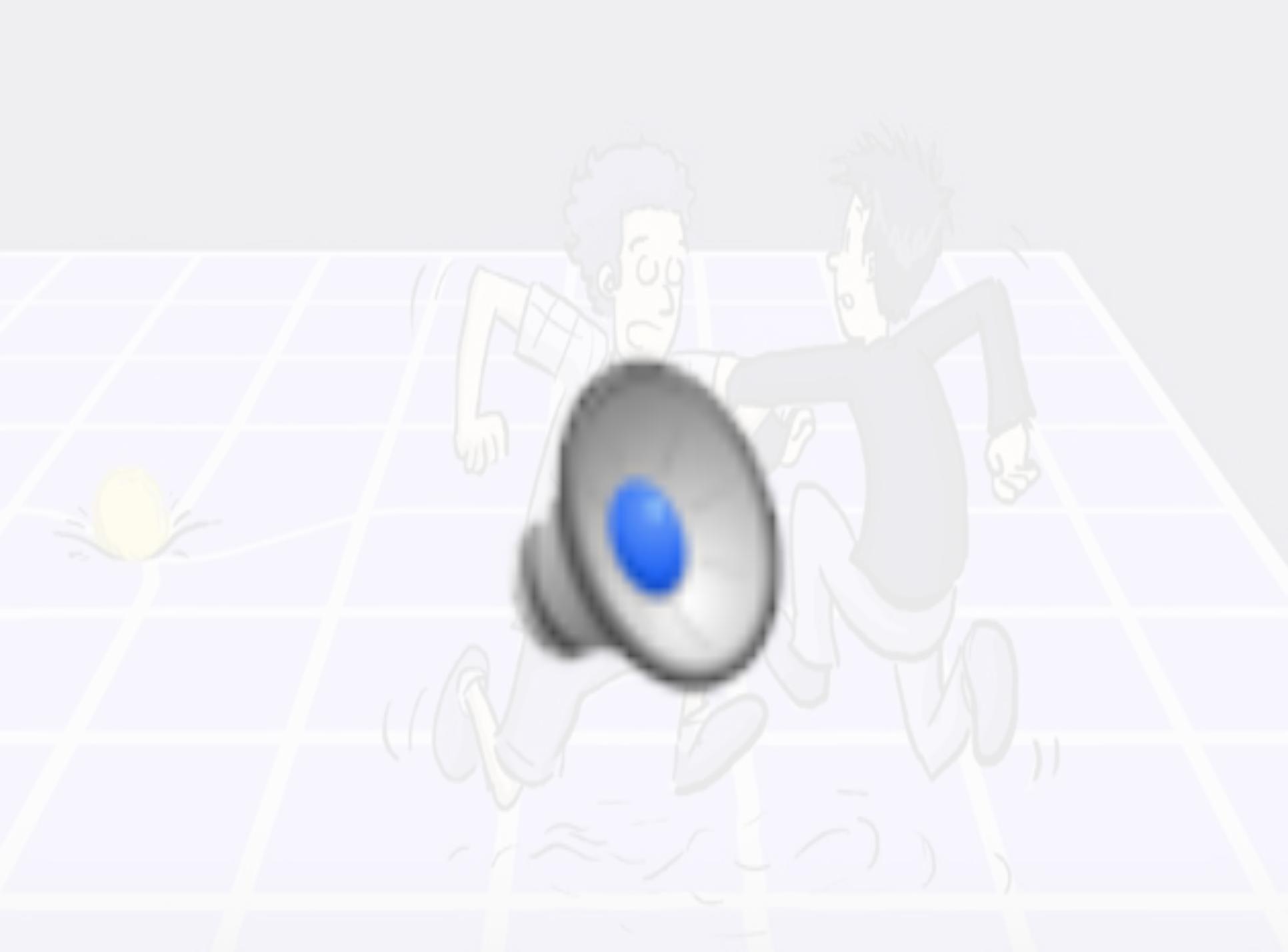
# La R.G. prevede la nascita dell'universo con il Big Bang.

- *Roger Penrose e Stephen Hawking hanno dimostrato che la R.G. prevede che l'universo sia iniziato con il **Big Bang**, anche se la stessa teoria R.G. cessa di valere in corrispondenza del Big Bang (perché incompatibile con la teoria dei quanti). La teoria di Einstein implica che il tempo abbia un inizio, anche se a lui quest'idea non piaceva affatto (da *L'universo in un guscio di noce*, Stephen Hawking, Mondadori)*
- Einstein era convinto che le stelle massicce giunte al termine del proprio ciclo vitale, avrebbero assunto una configurazione finale. Oggi sappiamo che non esistono configurazioni finali per stelle dotate di massa più che doppia rispetto a quella del Sole: esse continuano a contrarsi fino a diventare buchi neri, regioni dello spazio-tempo in cui il campo gravitazionale è così intenso da non lasciar uscire neanche la luce.



# Un altro effetto delle relatività generale: le onde gravitazionali





# Alcune sorgenti di onde gravitazionali

- Collasso gravitazionale (quando una stella esaurisce la sua scorta di combustibile nucleare collassa in un buco nero o una stella di neutroni)
- Sistemi binari (due pulsar; una stella di neutroni e un buco nero; due buchi neri)

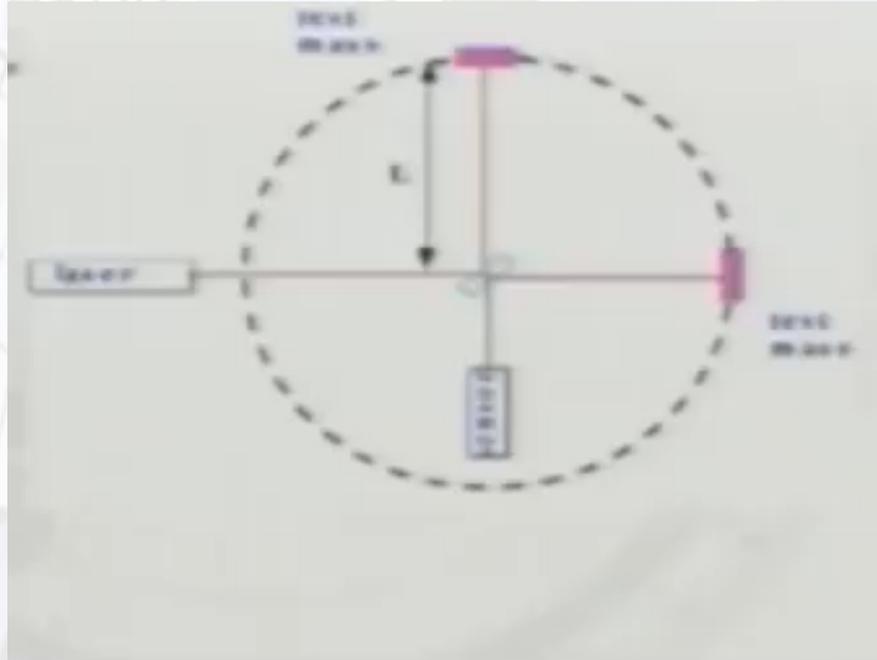
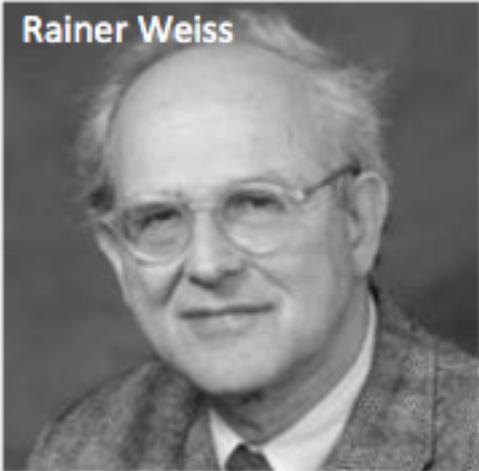


Quando i due corpi spiraleggianti sono molto vicini, l'intensità delle onde emesse aumenta, così come la frequenza, fino al momento dello scontro e dell'eventuale collasso, durante il quale avviene una copiosa e impulsiva emissione di radiazione.

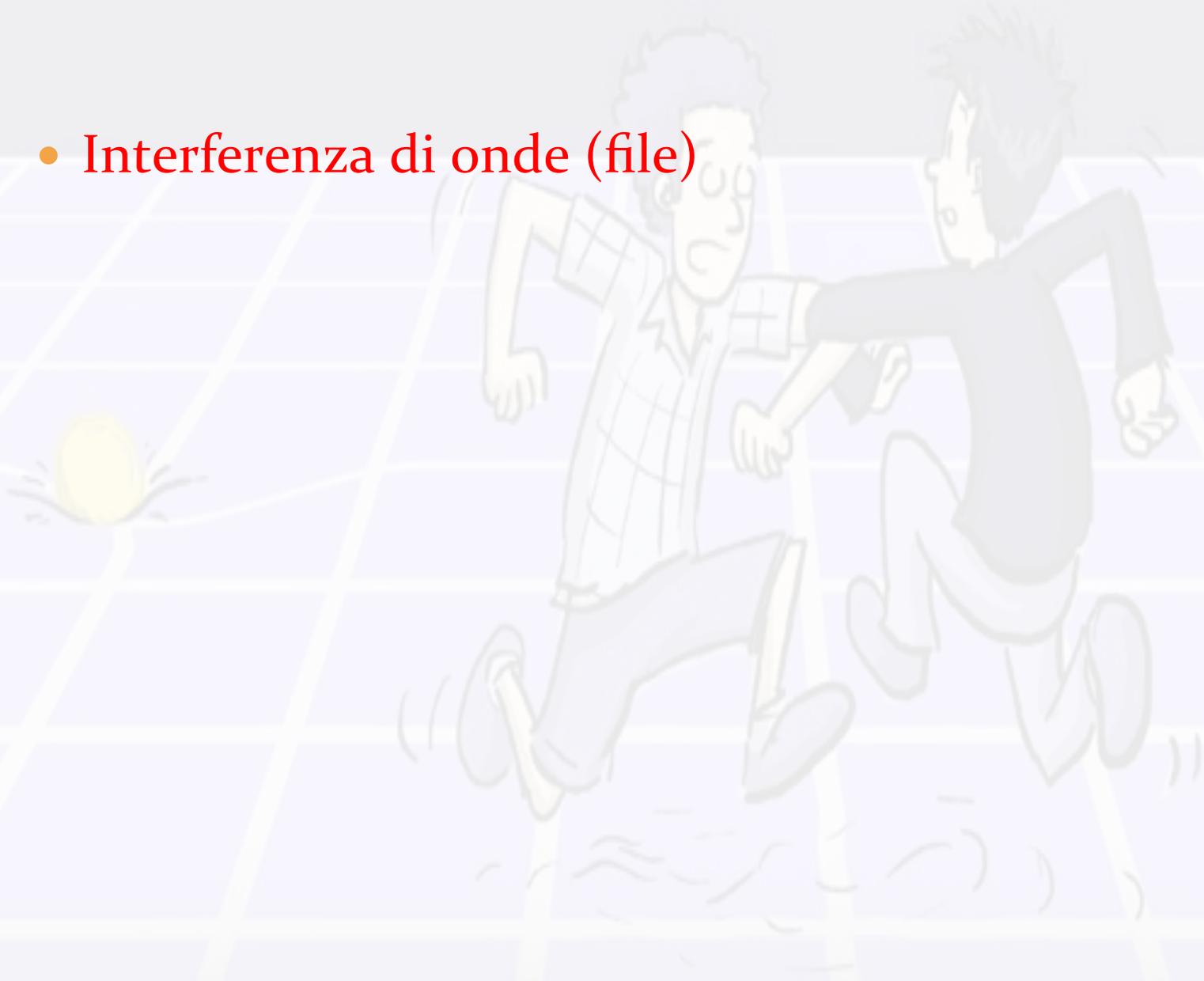
# Effetto di un'onda gravitazionale

- Le onde gravitazionali sono formate da campi gravitazionali trasversali che si propagano nello spazio, anche vuoto, con velocità pari a quella della luce. Al loro passaggio determinano sulla materia che incontrano una distribuzione di sforzi che hanno direzione giacente nel piano perpendicolare alla direzione di propagazione.

Rainer Weiss



- Interferenza di onde (file)



L'effetto prodotto sul rivelatore è proporzionale alla lunghezza dei bracci dell'interferometro

$$\Delta L \approx hL \rightarrow \text{servono bracci molto lunghi}$$

- ampiezza dell'onda  $\sim 10^{-21}$
- $L = 1 \text{ km}$

$$\rightarrow \Delta L \sim 10^{-18} \text{ m}$$

## QUANTO E' PICCOLO $10^{-18}$ m?



Credit: A Chiummo

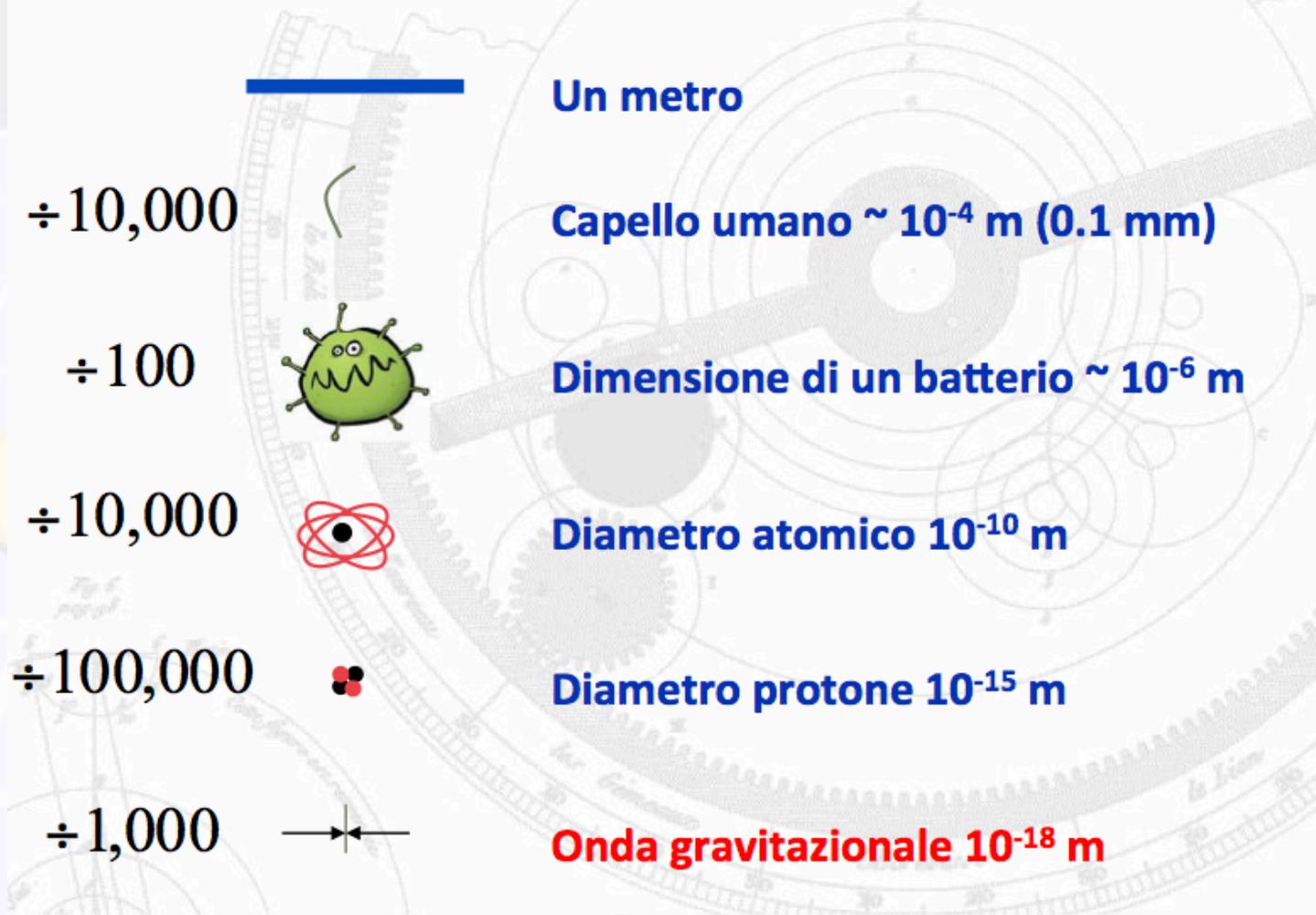
- Quanto cresce il livello del mare se ci verso un bicchiere d'acqua?

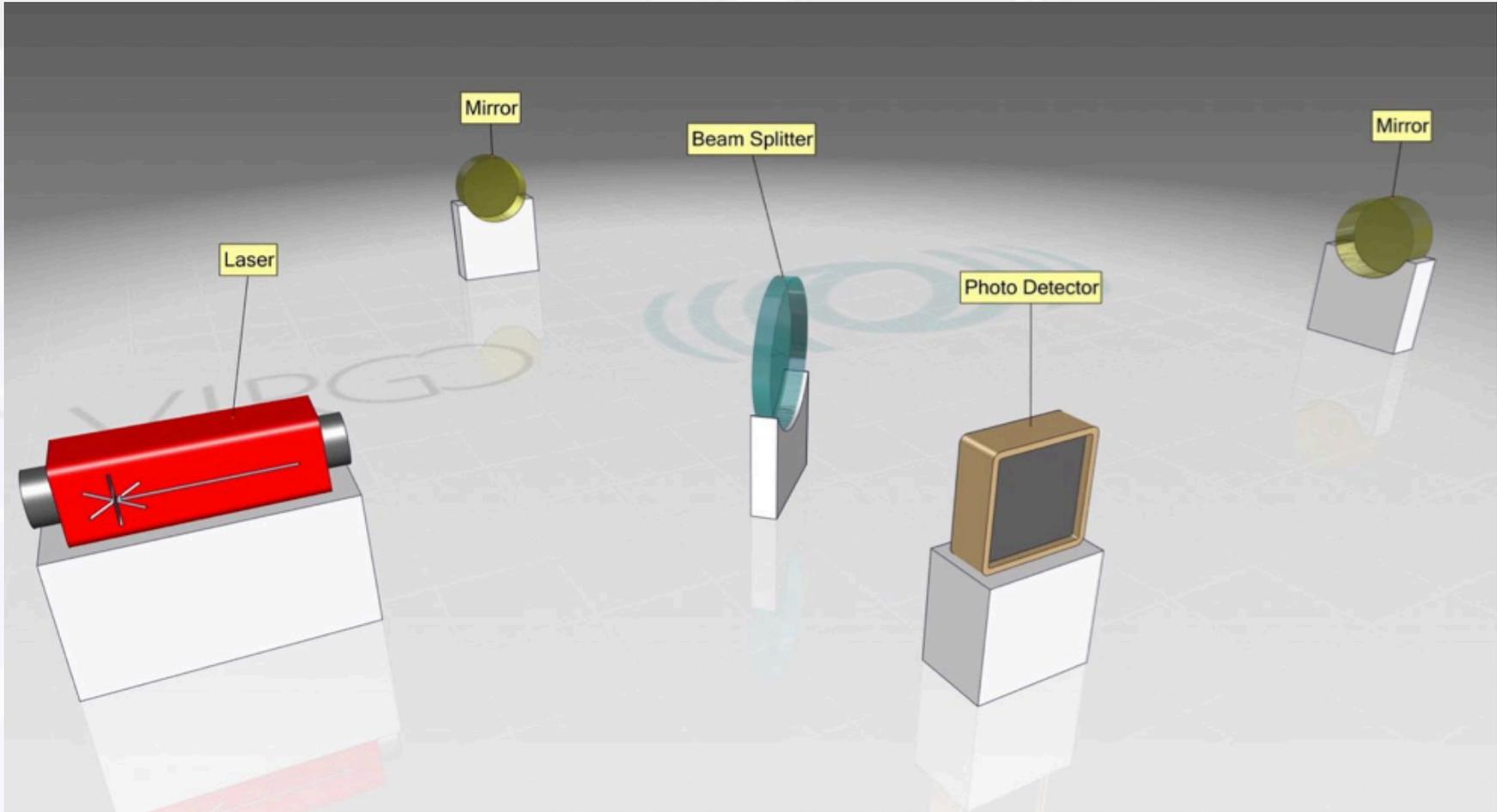
**Superficie del mare:**  $S_{\text{ocean}} = 70\%$  della superficie terrestre  $\sim 3.6 \cdot 10^{14} \text{ m}^2$

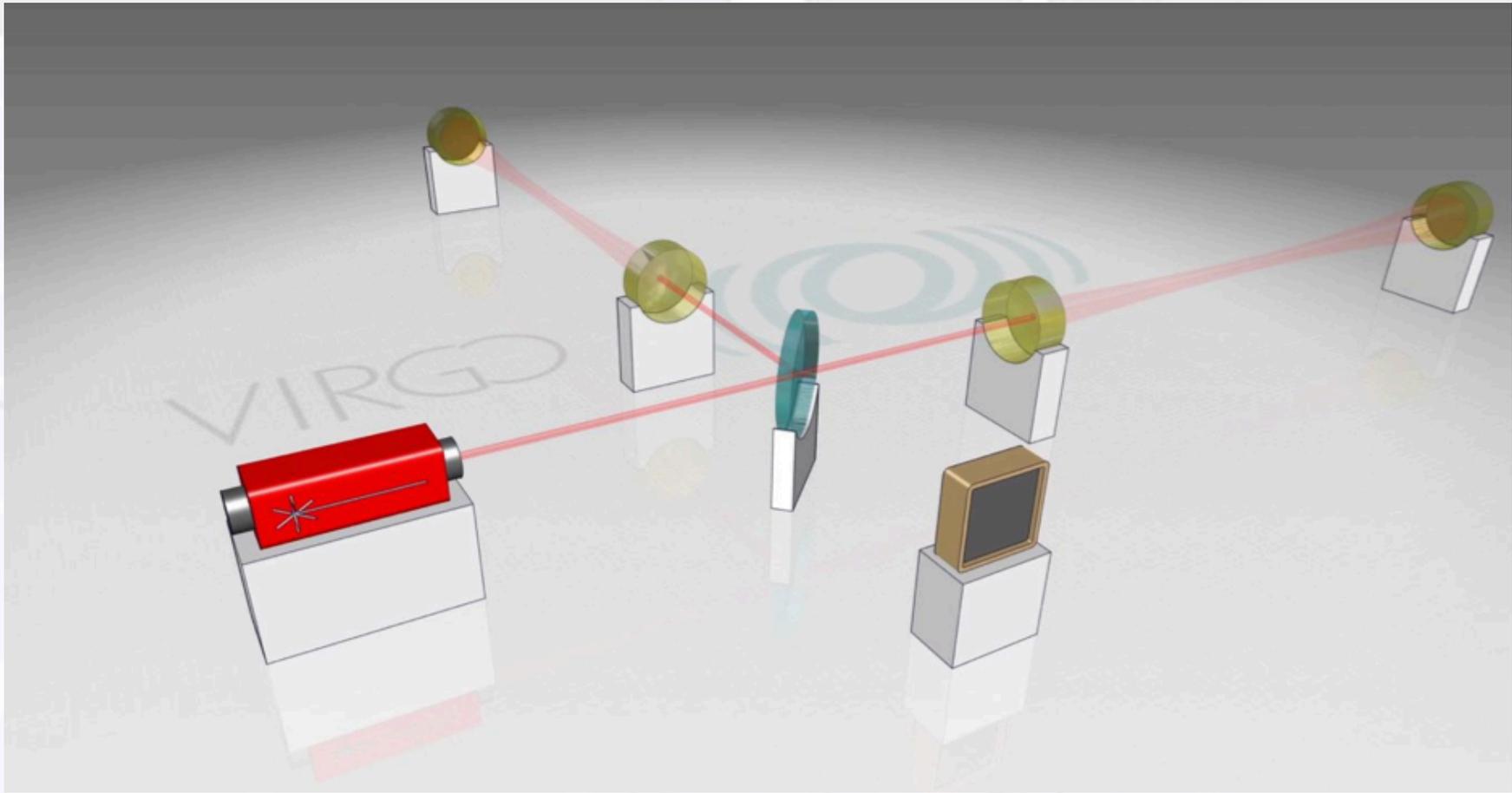
**Volume di un bicchiere d'acqua:**  $V_{\text{glass}} = 200 \text{ ml} = 2 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3$

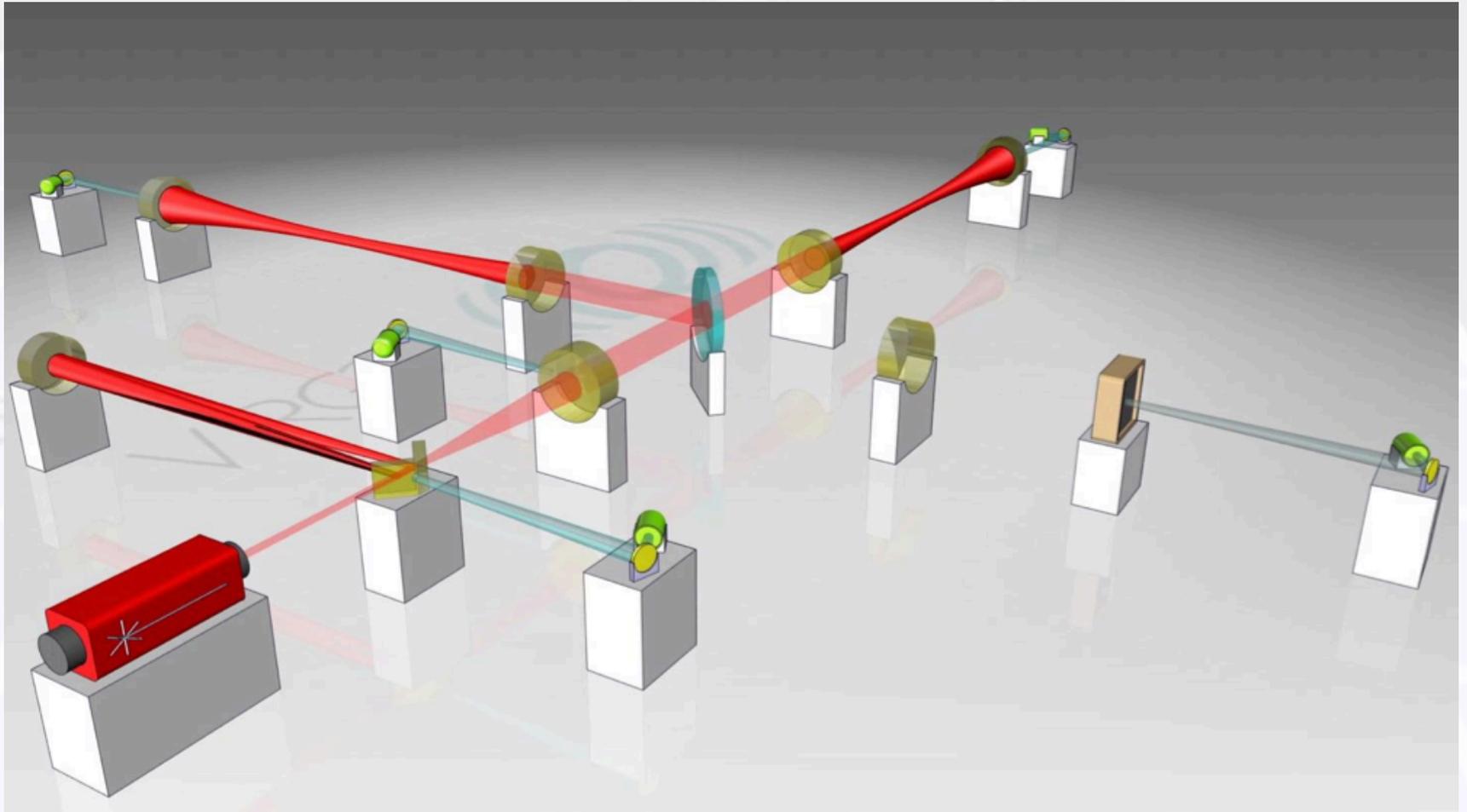
**Incremento del livello del mare:**  $dh = V_{\text{glass}}/S_{\text{ocean}} \sim 0.5 \cdot 10^{-18} \text{ m}$

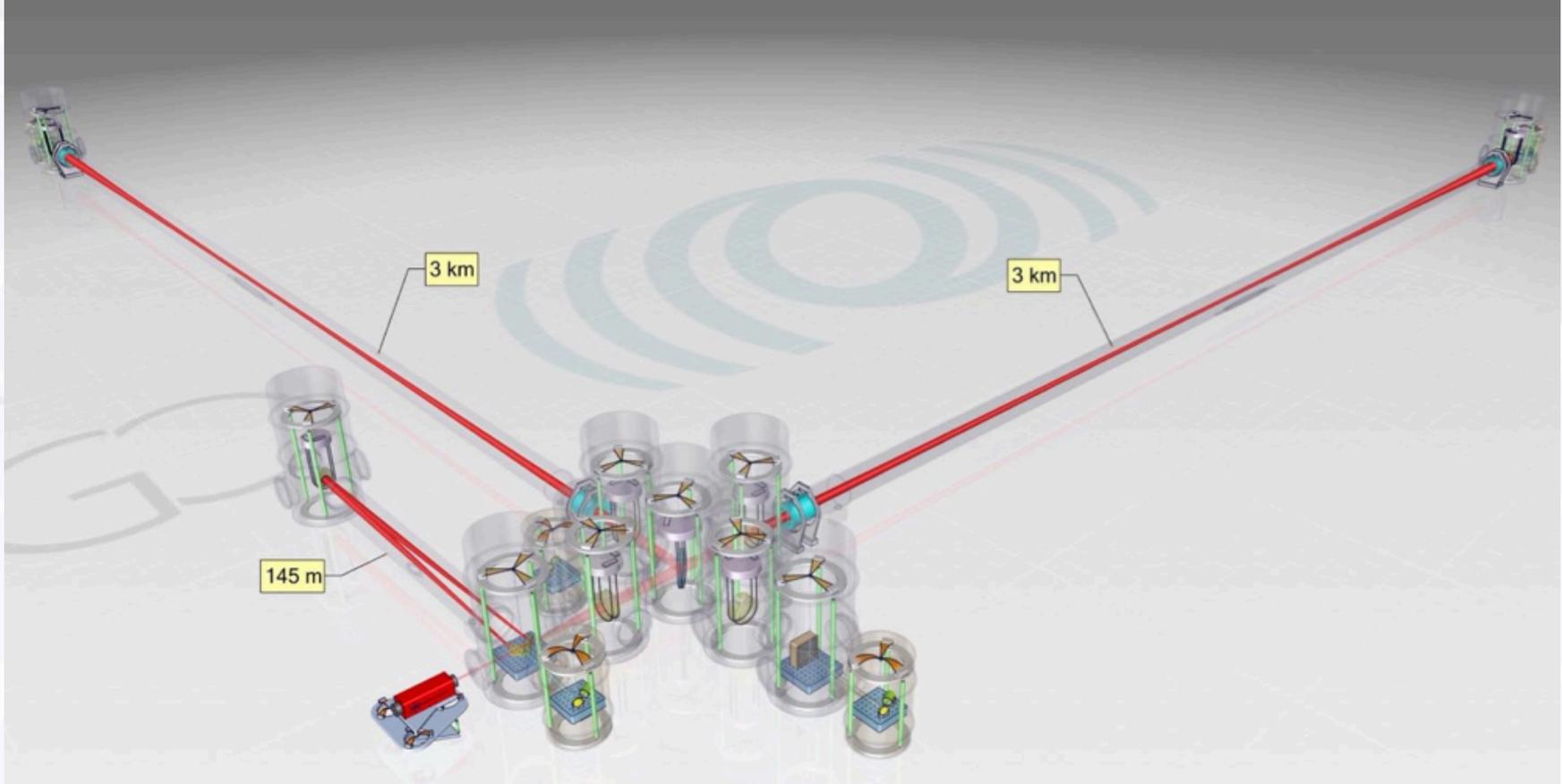
# Quanto è piccolo $10^{-18}$ m?



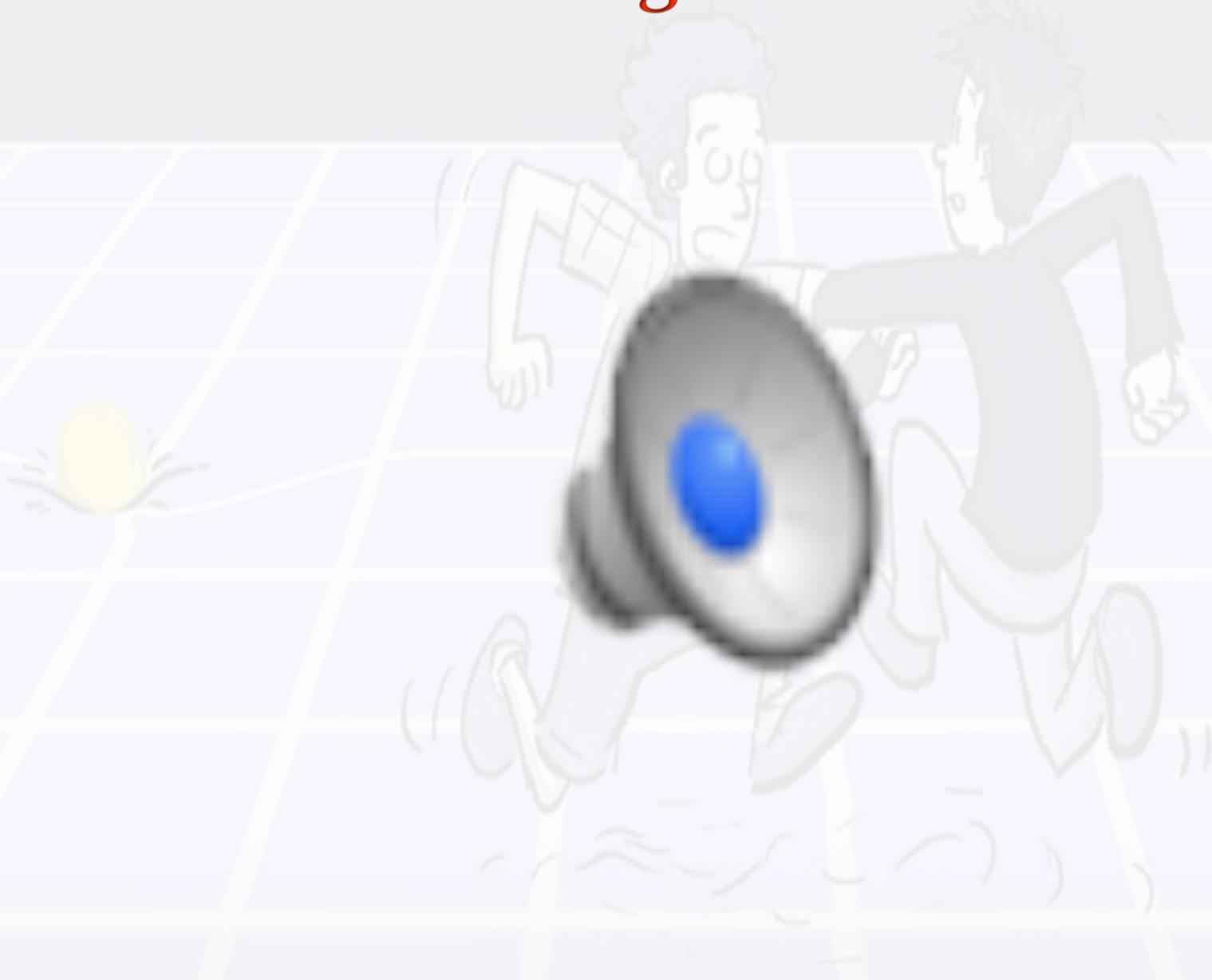








# Rivelatore di onde gravitazionali con la luce



# QUALCHE DATO

SEGNALE GIUNTO A NOI  
DA UNA DISTANZA DI  
1,3 MILIARDI DI ANNI LUCE

DUE BUCHI NERI DA 29 E 36 MASSE SOLARI...

SI FONDONO A VELOCITA'  $\sim c/2$

FORMANDO UN BUCO NERO DA 62 MASSE SOLARI

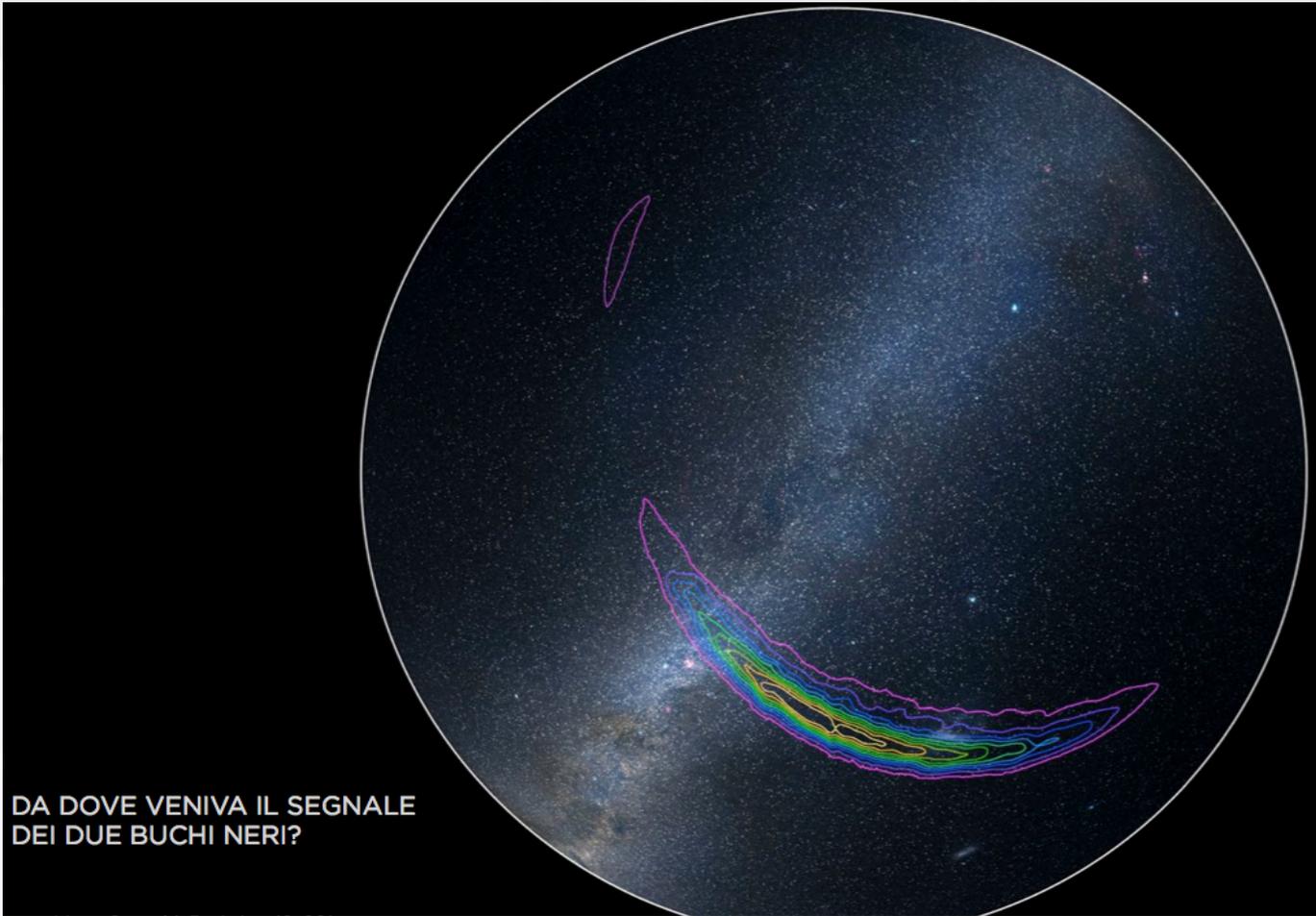
3 MASSE SOLARI VENGONO "TRASFORMATE" IN ONDE GRAVITAZIONALI

IL RAGGIO DEI BUCHI NERI E'  $\sim 150$  KM

ENERGIA EMESSA IN UN SECONDO:  
5 10<sup>47</sup> JOULE

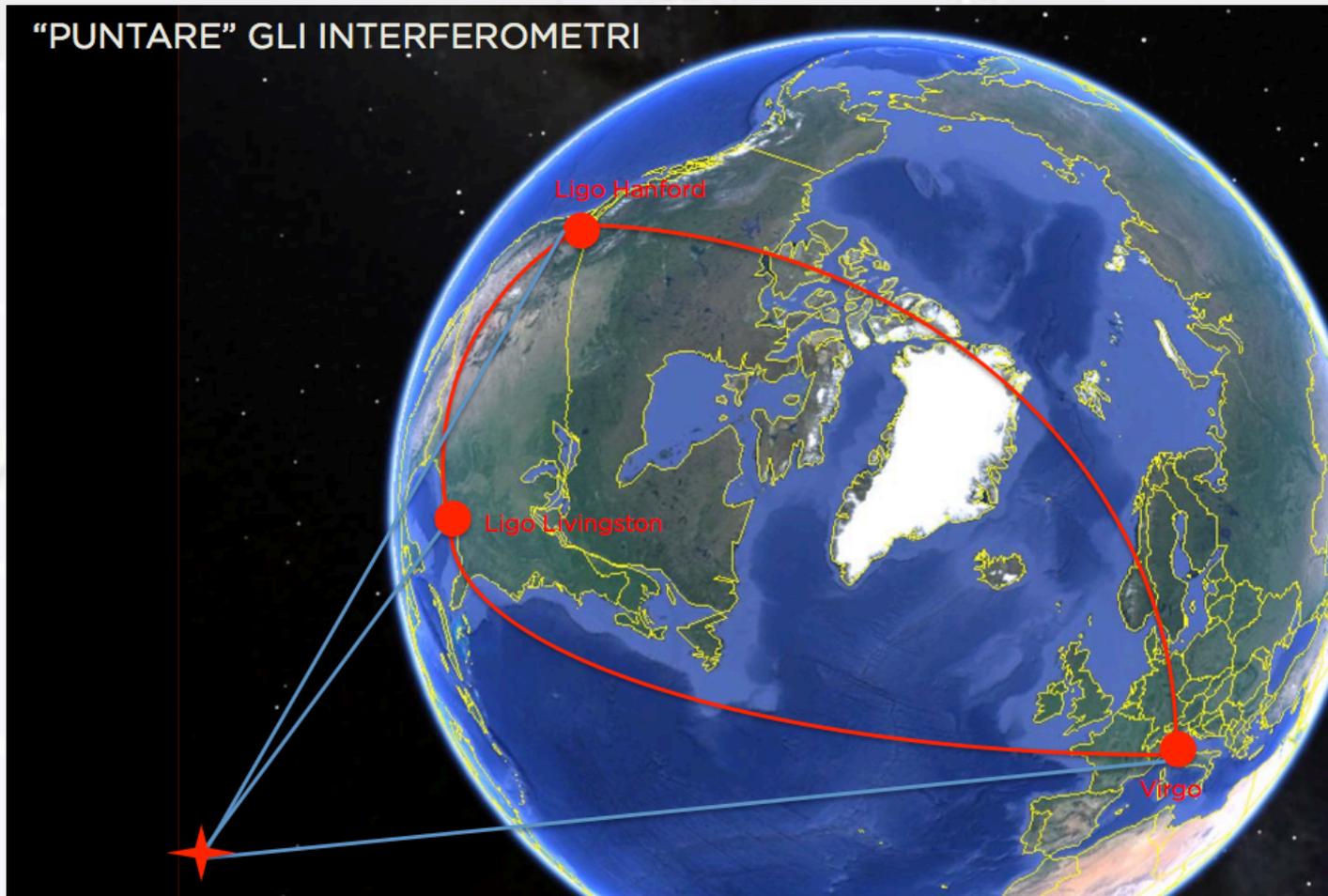
5 000000000000000000000000000000000000...  
...00000000000000000000000000 J

L'EVENTO PIU' "LUMINOSO" MAI OSSERVATO



DA DOVE VENIVA IL SEGNALE  
DEI DUE BUCHI NERI?

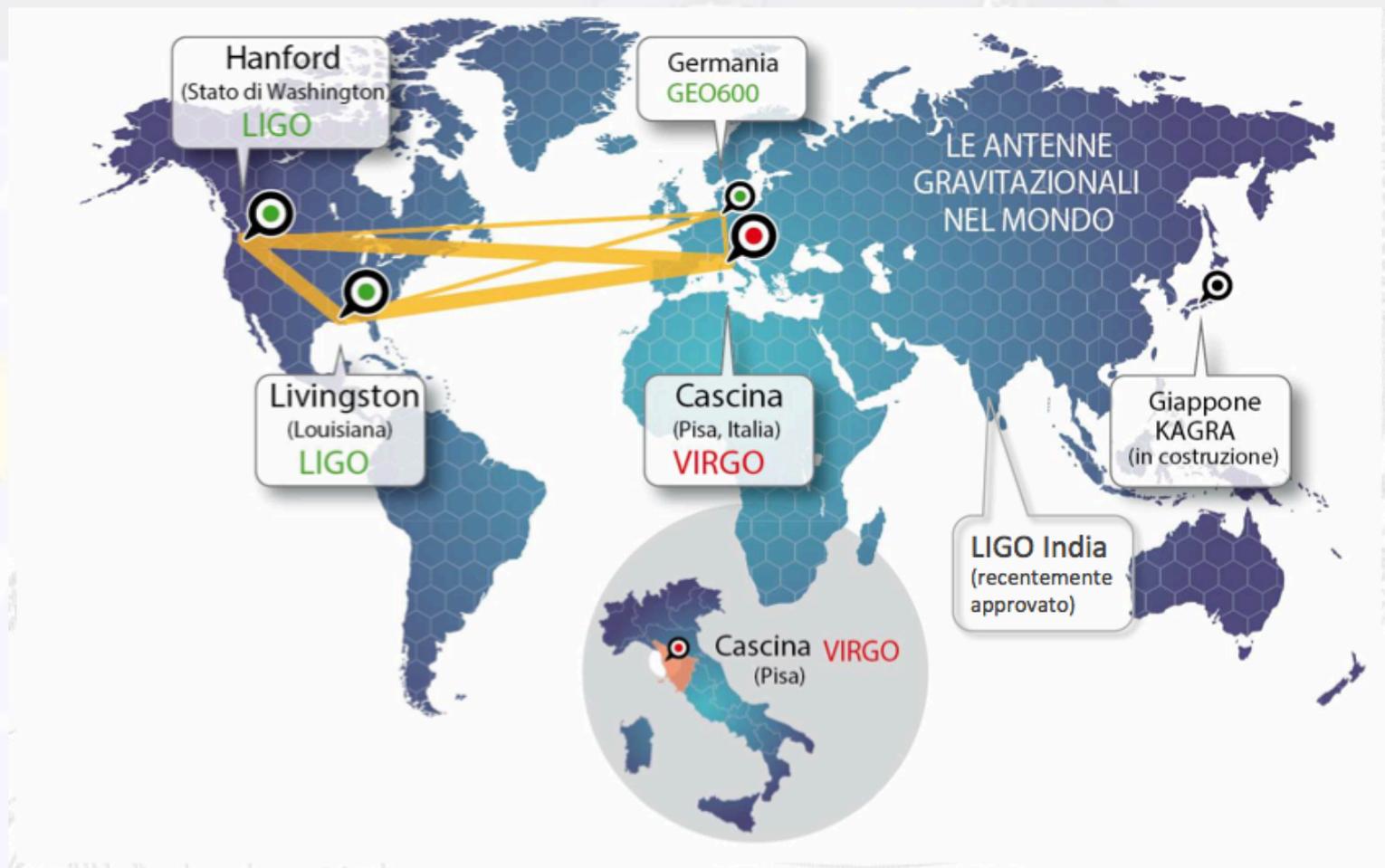
## “PUNTARE” GLI INTERFEROMETRI



# Il rivelatore Virgo (Cascina, Pisa)

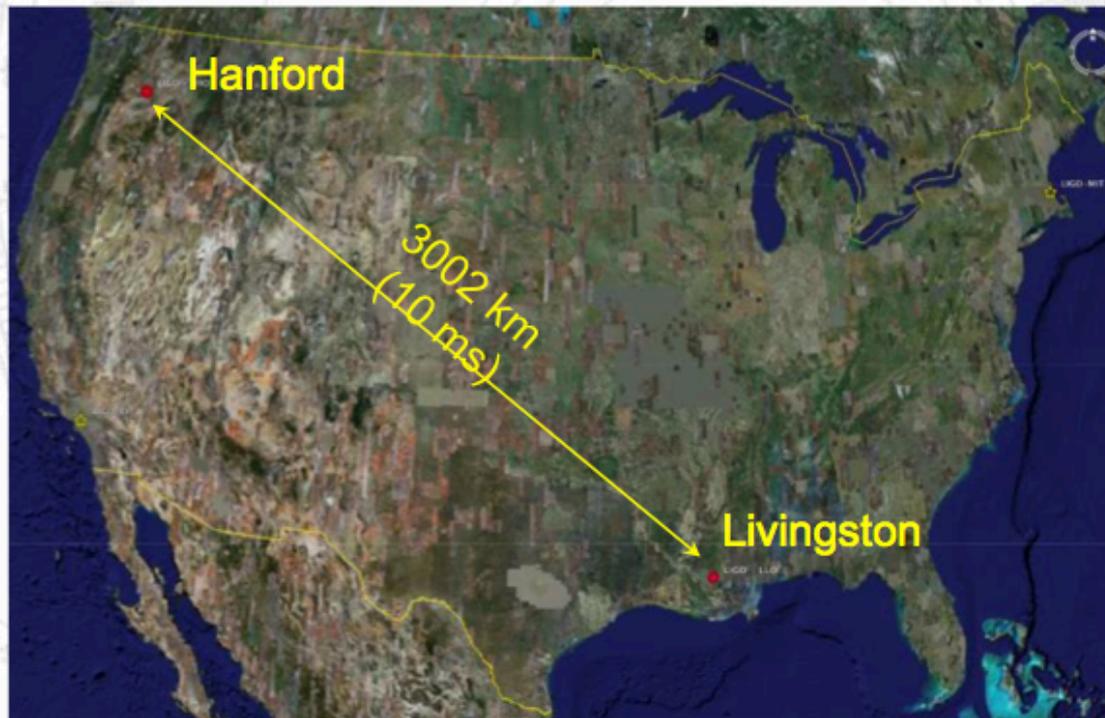


# Una sinergia mondiale

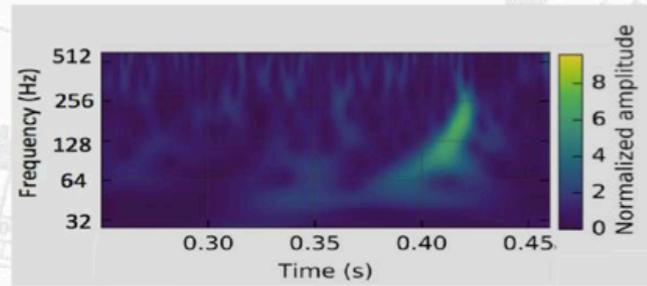
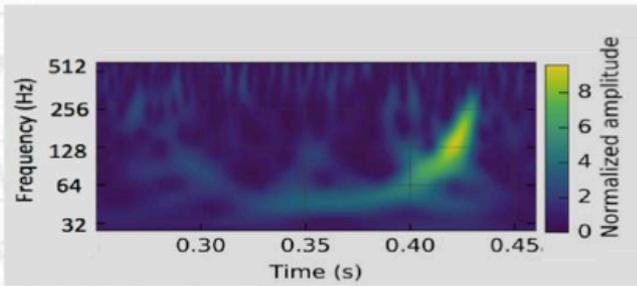
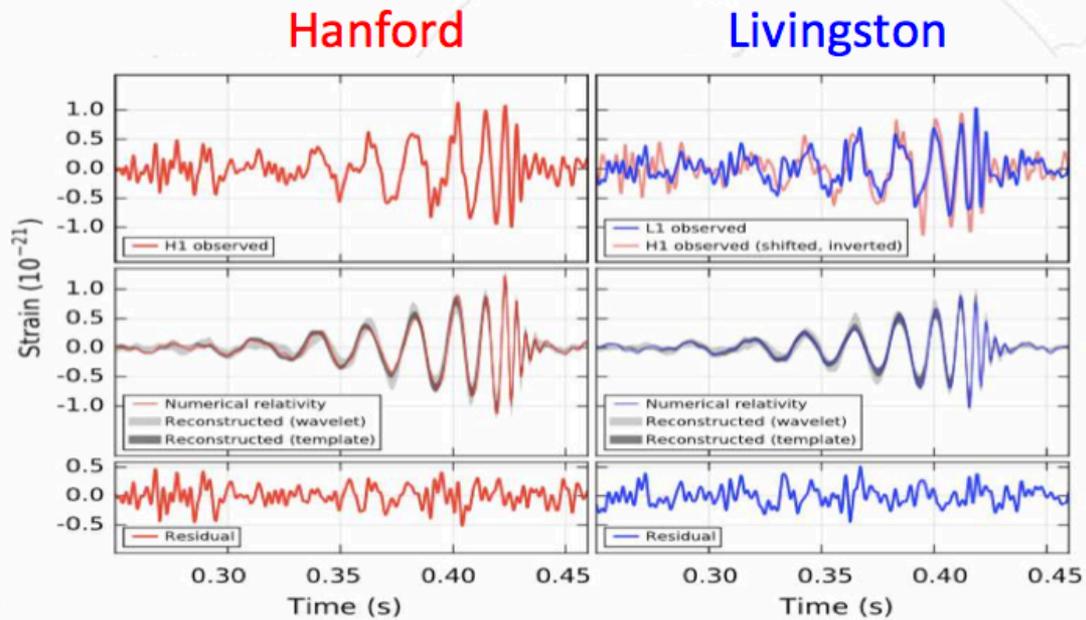


# La scoperta

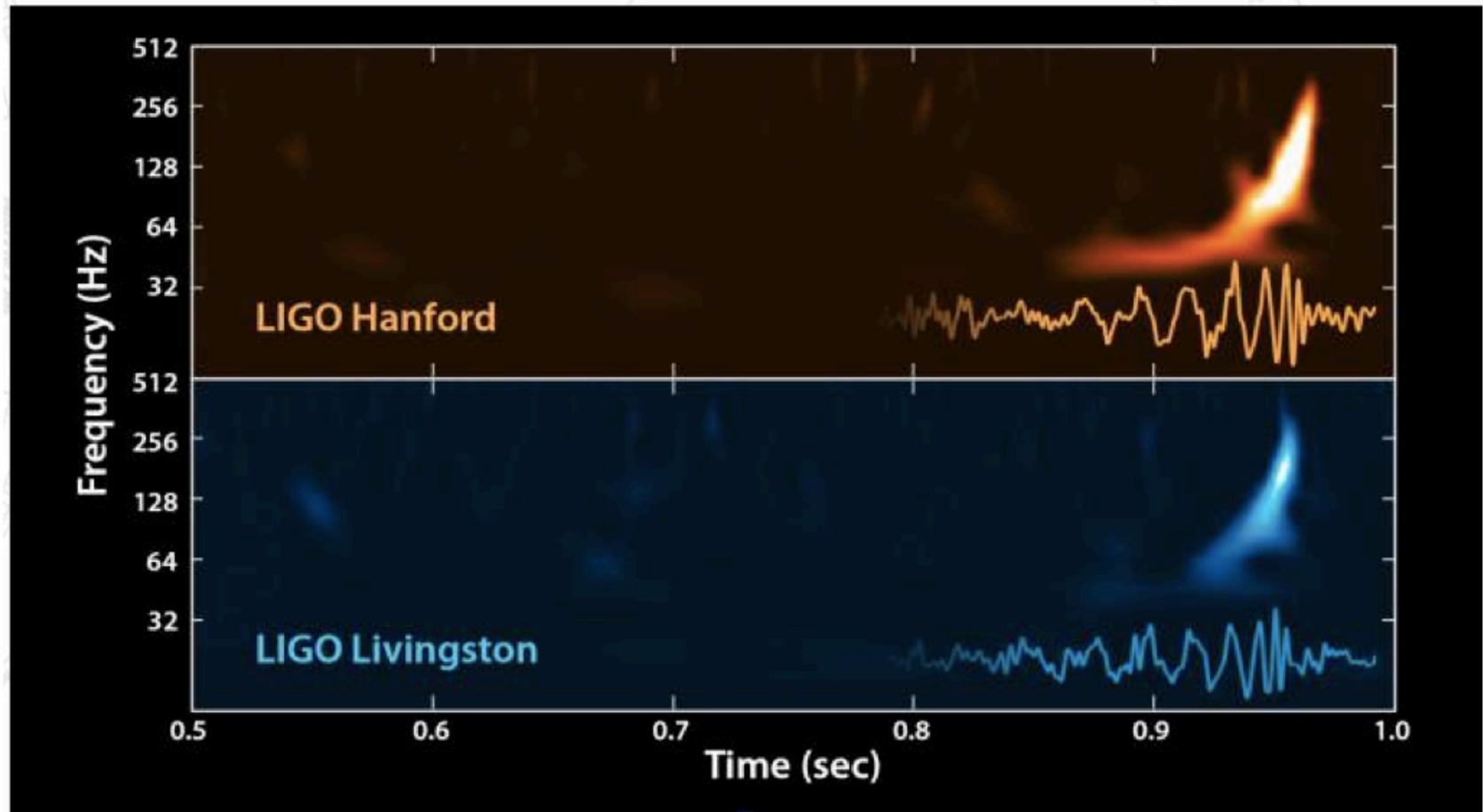
**14 Settembre 2015 alle 10:50:45 ora Italiana**



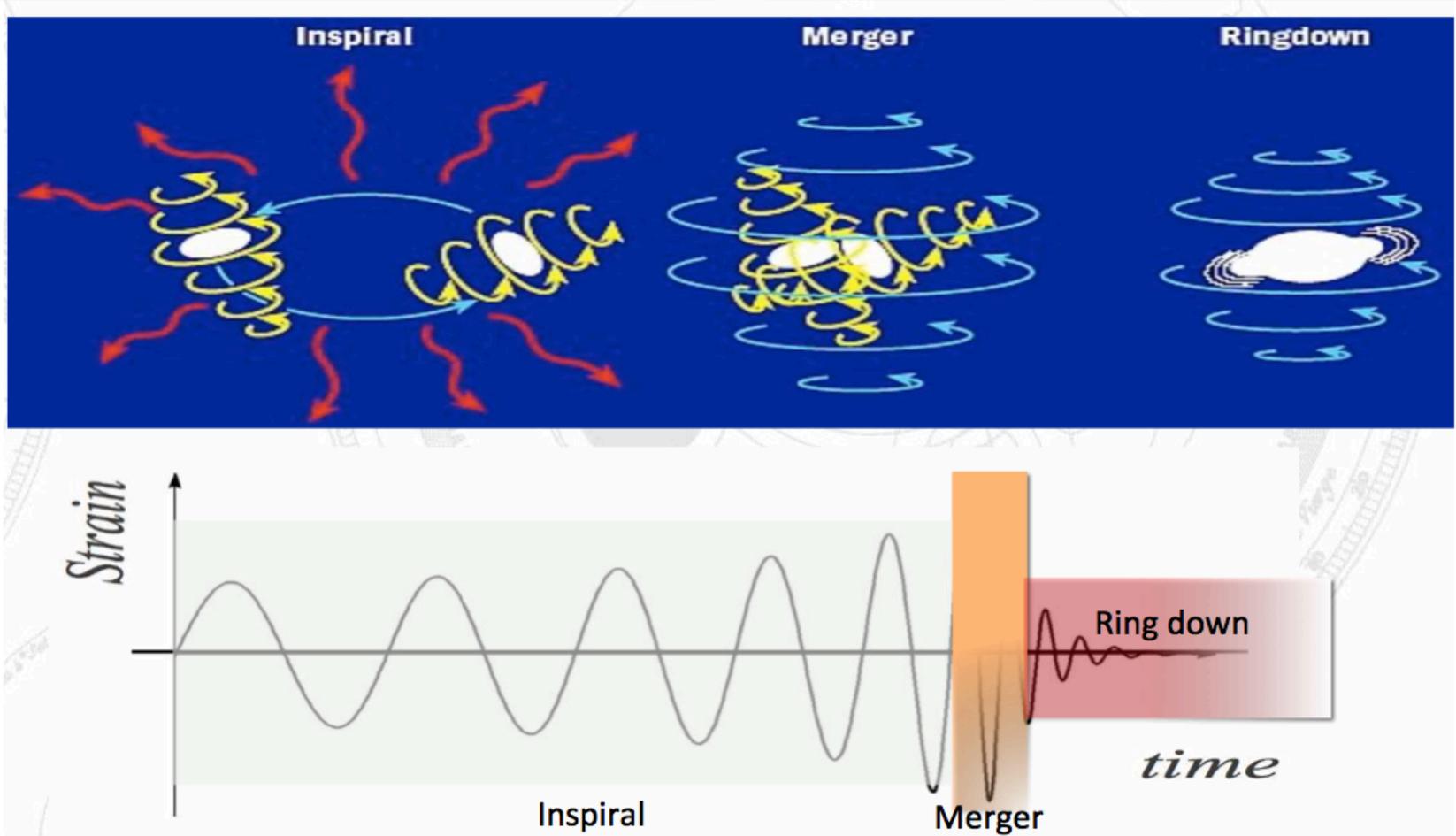
# 14 settembre 2015-L'evento



# Il segnale rivelato dagli osservatori LIGO



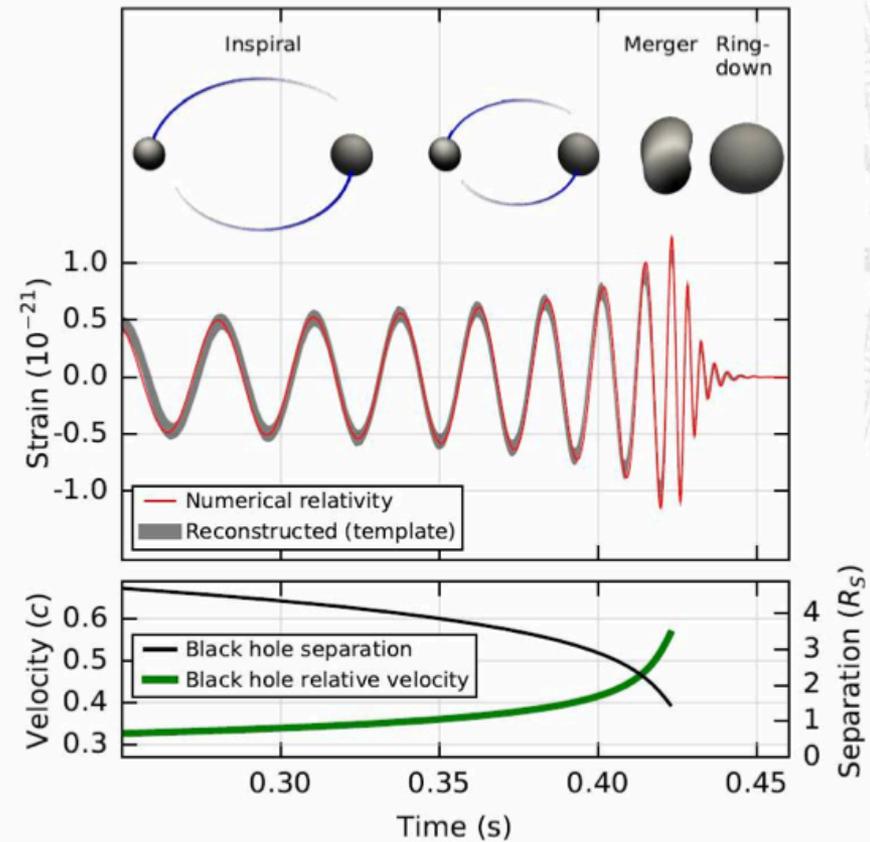
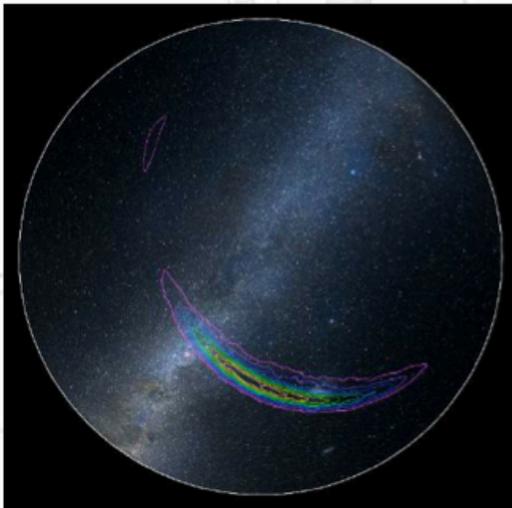
# Il segnale e la sorgente



# La sorgente

## Sistema binario di buchi neri

- $M_1 = 36 M_{\text{sol}}$
- $M_2 = 29 M_{\text{sol}}$
- Massa finale =  $62 M_{\text{sol}}$
- Distanza =  $410 \text{ MPc} \sim 1,3 \text{ Miliardi di anni-luce}$



# Il segnale delle onde gravitazionali.

